



PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO COM ALTERNÂNCIA DE CABOS PARA A INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

Elói Daniel de Araújo Neto

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: Breno Pinheiro Jacob
Bruno Martins Jacovazzo

Rio de Janeiro
Março de 2017

PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO COM ALTERNÂNCIA DE CABOS
PARA A INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

Elói Daniel de Araújo Neto

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

Examinada por:



Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.



Prof. Bruno Martins Jacovazzo, D.Sc.



Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.



Dr. Allan Carré de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Araújo Neto, Elói Daniel de

Proposta e avaliação de um método com alternância de cabos para a instalação de equipamentos submarinos / Elói Daniel de Araújo Neto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XXIII, 199 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Bruno Martins Jacovazzo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 159-162.

1. Equipamentos submarinos. 2. Instalação de sistemas submarinos. 3. Dinâmica de sistemas discretos. I. Jacob, Breno Pinheiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, com amor e gratidão

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Dina e Luís Gonzaga, e às minhas irmãs, Ana Célia e Rachel, pela confiança e pelo suporte incondicionais.

Às minhas queridas sobrinhas, Beatriz e Sara, pela alegria e pelo carinho.

Aos meus orientadores, Breno e Bruno, pela dedicação, pela paciência e pelos ensinamentos.

Aos meus caros amigos, pelo apoio emocional e pelas distâncias vencidas.

Aos companheiros de apartamento, pela construção de um lar em meio inexplorado.

Aos companheiros de laboratório, pelo espírito de equipe e pelo convívio diário.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, à Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao então Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, pela formação e pelo despertar da vida acadêmica.

A todos aqueles que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI pelo apoio financeiro.

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

PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO COM ALTERNÂNCIA DE CABOS
PARA A INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

Elói Daniel de Araújo Neto

Março/2017

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Bruno Martins Jacovazzo

Programa: Engenharia Civil

O desenvolvimento de sistemas submarinos para exploração e produção de petróleo em lâminas d'água ultraprofundas gera a necessidade de equipamentos submarinos complexos e pesados. Os métodos convencionais de instalação destes equipamentos encontram limitações devidas a efeitos de ressonância com os cabos comumente utilizados. Este trabalho propõe um novo procedimento operacional com alternância de cabos de aço e de poliéster de modo a mitigar estes efeitos. Simulações numéricas no *software* SITUA-Prosim foram realizadas para validar as premissas adotadas na proposta do novo método de instalação de equipamentos submarinos. Os resultados mostram que as premissas são atendidas e abrem espaço para novos estudos para desenvolvimento deste método e/ou de suas variações.

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

PROPOSAL AND EVALUATION OF A METHOD WITH ALTERNATING
CABLES FOR THE INSTALLATION OF SUBSEA EQUIPMENT

Elói Daniel de Araújo Neto

March/2017

Advisors: Breno Pinheiro Jacob
Bruno Martins Jacovazzo

Department: Civil Engineering

The development of oil and gas subsea exploration and production systems for ultra-deep-water requires heavy and complex subsea equipment. Usual installation methods for these structures are often limited by resonance effects for commonly used cables. A novel operational procedure based on the composition of steel wire and polyester ropes is proposed by this work in order to mitigate those effects. Numerical simulations were performed using SITUA-Prosim program to check adopted premises in the proposal of the novel subsea equipment installation method. Results show that the premises are met, which enables new studies to develop this method and/or its variations.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivo	2
1.4	Metodologia.....	3
1.5	Estruturação do texto	3
2	SISTEMAS DE PRODUÇÃO SUBMARINOS.....	4
2.1	Histórico	4
2.2	Configurações típicas de sistemas submarinos.....	5
2.3	Estruturas e equipamentos submarinos.....	9
2.3.1	<i>Poço submarino e árvore de natal molhada</i>	<i>9</i>
2.3.2	<i>Linhas de escoamento</i>	<i>10</i>
2.3.3	<i>Manifold submarino e template.....</i>	<i>11</i>
2.3.4	<i>Equipamentos de conexão.....</i>	<i>12</i>
2.3.5	<i>Sistemas submarinos de distribuição, controle e fornecimento de energia.</i>	<i>13</i>
2.3.6	<i>Veículos submarinos de operação remota</i>	<i>15</i>
2.4	Embarcações para operações de instalação	15
2.4.1	<i>Embarcações de transporte e rebocadores.....</i>	<i>16</i>
2.4.2	<i>Embarcações de perfuração.....</i>	<i>17</i>
2.4.3	<i>Embarcações de lançamento de dutos e de umbilicais.....</i>	<i>19</i>
2.4.4	<i>Embarcações de alta capacidade de carga, de apoio e outros elementos... ..</i>	<i>20</i>
3	CARREGAMENTOS AMBIENTAIS E DINÂMICA DE ESTRUTURAS	24
3.1	Introdução	24
3.2	Caracterização cinemática e dinâmica de onda	25
3.2.1	<i>Teoria linear de onda.....</i>	<i>25</i>
3.2.2	<i>Teoria de fluxo potencial.....</i>	<i>28</i>
3.3	Forças hidrodinâmicas induzidas por onda	31
3.3.1	<i>Fórmula de Morison.....</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>Teoria de Froude-Krylov</i>	<i>32</i>
3.3.3	<i>Teoria de difração-radiação</i>	<i>33</i>
3.4	Ondas irregulares e representação espectral.....	36
3.5	Efeitos dinâmicos sobre estruturas	40
3.5.1	<i>Sistemas não-amortecidos.....</i>	<i>41</i>
3.5.2	<i>Sistemas amortecidos</i>	<i>43</i>
4	INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS	46
4.1	Método vertical.....	46
4.1.1	<i>Via cabo.....</i>	<i>46</i>

4.1.2	<i>Com eslingas</i>	48
4.1.3	<i>Via riser de perfuração</i>	49
4.1.4	<i>Com compensadores de heave</i>	50
4.2	Método da roldana	53
4.3	Método pendular	54
4.4	Método Y	56
4.5	Método de alternância de cabos	57
4.5.1	<i>Estudo preliminar</i>	58
4.5.2	<i>Procedimento proposto e discussão técnica</i>	62
5	MODELOS ESTUDADOS	64
5.1	Diretrizes gerais	64
5.2	Características dos corpos e linhas modelados	65
5.2.1	<i>Embarcação de lançamento</i>	65
5.2.2	<i>Guindaste</i>	68
5.2.3	<i>Equipamentos submarinos</i>	68
5.2.4	<i>Cabos</i>	72
5.3	Cálculo de profundidades críticas	74
5.3.1	<i>Períodos naturais e mar regular</i>	74
5.3.2	<i>Períodos de maior energia de movimento</i>	77
5.4	Carregamentos ambientais	80
5.5	Sequência e critérios de análise	81
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
6.1	Considerações iniciais	85
6.2	Equipamento 1	85
6.2.1	<i>Envoltória de critérios normativos</i>	85
6.2.2	<i>Resultados de tração por estado de mar em cada profundidade</i>	87
6.2.3	<i>Resultados de tração por profundidade em cada estado de mar</i>	96
6.2.4	<i>Tração crítica em cada profundidade – cabo de aço</i>	106
6.2.5	<i>Tração crítica em cada profundidade – cabo de poliéster</i>	113
6.2.6	<i>Comparativo de trações críticas – cabo de aço vs. cabo de poliéster</i>	119
6.3	Equipamento 2	120
6.3.1	<i>Envoltória de critérios normativos</i>	120
6.3.2	<i>Resultados de tração por estado de mar em cada profundidade</i>	121
6.3.3	<i>Resultados de tração por profundidade em cada estado de mar</i>	130
6.3.4	<i>Tração crítica em cada profundidade – cabo de aço</i>	140
6.3.5	<i>Tração crítica em cada profundidade – cabo de poliéster</i>	147
6.3.6	<i>Comparativo de trações críticas – cabo de aço vs. cabo de poliéster</i>	153
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	155
7.1	Considerações finais	155
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159

APÊNDICE A	NÚMEROS DE KEULEGAN-CARPENTER DO ESTUDO DE CASO	163
APÊNDICE B	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS RESULTANTES.....	166
B.1	Equipamento 1A	166
B.2	Equipamento 1B	168
B.3	Equipamento 2A	171
B.4	Equipamento 2B	173
APÊNDICE C	PARCELA DINÂMICA DAS TRAÇÕES RESULTANTES.....	176
C.1	Equipamento 1	176
C.1.1	<i>Por estado de mar em cada profundidade</i>	<i>176</i>
C.1.2	<i>Por profundidade em cada estado de mar</i>	<i>179</i>
C.1.3	<i>Trações críticas para cabo de aço</i>	<i>182</i>
C.1.4	<i>Trações críticas para cabo de poliéster</i>	<i>185</i>
C.2	Equipamento 2	188
C.2.1	<i>Por estado de mar em cada profundidade</i>	<i>188</i>
C.2.2	<i>Por profundidade em cada estado de mar</i>	<i>191</i>
C.2.3	<i>Trações críticas para cabo de aço</i>	<i>194</i>
C.2.4	<i>Trações críticas para cabo de poliéster</i>	<i>197</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Configurações típicas de sistema submarinos (adaptado por ORTIZ, 2016, de HALLSET, 2009).....	5
Figura 2.2	Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a FPSO (BAI, BAI, 2010)	6
Figura 2.3	Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a TLP (BAI, BAI, 2010)	7
Figura 2.4	Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a instalação onshore (BAI, BAI, 2010)	7
Figura 2.5	Sistema de produção submarino tipo daisy chain (BAI, BAI, 2010).....	8
Figura 2.6	Cabeça de poço submarino (BAI, BAI, 2010)	9
Figura 2.7	Riser de perfuração submarino (BAI, BAI, 2010)	10
Figura 2.8	Cluster manifold com 10 slots (WANG et al, 2012)	11
Figura 2.9	Template manifold (HERDEIRO, 1997)	11
Figura 2.10	Manifold MSGL-RO-02 (RIBEIRO, 2008).....	12
Figura 2.11	PLET (BAI, BAI, 2010).....	12
Figura 2.12	Ilustração de içamento de um jumper (adaptado de BAI, BAI, 2010) ...	13
Figura 2.13	Sistema de controle submarino (BAI, BAI, 2010).....	14
Figura 2.14	Umbilicais (BAI, BAI, 2010).....	14
Figura 2.15	Veículo submarino de operação remota (BAI, BAI, 2010)	15
Figura 2.16	Barcaça de transporte (BAI, BAI, 2010)	16
Figura 2.17	Rebocador (BAI, BAI, 2010).....	17
Figura 2.18	Plataforma autoelevatória (BAI, BAI, 2010)	17
Figura 2.19	Plataforma semissubmersível (SILVEIRA, 2013).....	18
Figura 2.20	Navio-sonda (BAI, BAI, 2010).....	18
Figura 2.21	S-lay (BAI, BAI, 2010).....	19
Figura 2.22	J-lay (BAI, BAI, 2010)	19
Figura 2.23	Reel-lay (BAI, BAI, 2010).....	20
Figura 2.24	Carousel-lay (BAI, BAI, 2010).....	20
Figura 2.25	Balsa-guindaste (SILVEIRA, 2013)	21
Figura 2.26	Supridor, rebocador e manuseio de âncoras (SILVEIRA, 2013).....	21

Figura 2.27	Esquema de guinchos de um AHTS (SILVEIRA, 2013)	22
Figura 2.28	Esquema de um A-frame típico (ADAMIEC-WÓJCIK et al, 2009).....	22
Figura 2.29	OSCV com guincho sob seu deck (JAHANGIRY, 2015)	23
Figura 2.30	OSCV com guincho elevado (JAHANGIRY, 2015)	23
Figura 3.1	Parâmetros básicos de uma onda regular (RONCETTI, 2014).....	25
Figura 3.2	Simbologia para onda 2D sobre fundo plano (CHAKRABARTI, 2005)	26
Figura 3.3	Linhas de corrente e equipotenciais de um fluxo genérico.....	28
Figura 3.4	Movimentos de uma embarcação (RONCETTI, 2014)	34
Figura 3.5	Superposição de ondas regulares (JOURNÉE, MASSIE, 2001)	36
Figura 3.6	Representação de onda irregular no domínio do tempo e no domínio da frequência (DANTAS, 2004)	37
Figura 3.7	Exemplo de espectro de JONSWAP modificado para Bacia de Campos	40
Figura 3.8	Sistema massa-mola (CHAKRABARTI, 2005)	41
Figura 3.9	Amplificação dinâmica de um sistema não-amortecido (RAO, 2010)...	42
Figura 3.10	Sistema massa-mola-amortecedor (CHAKRABARTI, 2005).....	43
Figura 3.11	Amplificação dinâmica de um sistema amortecido (RAO, 2010)	45
Figura 4.1	Método de instalação vertical via cabo (BAI, BAI, 2010)	47
Figura 4.2	AHTS com A-frame (RIBEIRO, 2008).....	47
Figura 4.3	Balsa-guindaste BGL-1 (RIBEIRO, 2008)	48
Figura 4.4	Método de instalação vertical com eslingas e spreader bar (RIBEIRO, 2008)	48
Figura 4.5	Instalação de manifold com eslinga em Albacora (RIBEIRO, 2008).....	49
Figura 4.6	Método de instalação vertical via riser de perfuração (BAI, BAI, 2010)	49
Figura 4.7	Manifold conectado ao riser de perfuração de uma plataforma semissubmersível (RIBEIRO, 2008)	50
Figura 4.8	Método de instalação vertical com compensador de heave (OSHIRO, 2012)	51
Figura 4.9	Desenho esquemático de sistema passivo de compensação de heave (SOUZA, 2009).....	51
Figura 4.10	Compensador passivo de heave (SOUZA, 2009)	52

Figura 4.11	Desenho esquemático de sistema ativo de compensação de heave (SOUZA, 2009).....	52
Figura 4.12	Método de instalação da roldana (RIBEIRO, 2008).....	53
Figura 4.13	Método de instalação pendular (RIBEIRO, 2008).....	54
Figura 4.14	Método de instalação Y (MATTOS, 2009)	56
Figura 4.15	Método de instalação de alternância de cabos	57
Figura 4.16	Içamento aproximado por sistema massa-mola	58
Figura 4.17	Períodos naturais do sistema de içamento com cabo de aço.....	59
Figura 4.18	Períodos naturais do sistema de içamento com cabo de poliéster	60
Figura 5.1	Dimensões da embarcação - nomenclatura.....	65
Figura 5.2	Modelo no SITUA – eixos globais	66
Figura 5.3	Modelo no SITUA – eixos locais da unidade flutuante	66
Figura 5.4	RAO de movimento de roll, incidência de onda a 180°	67
Figura 5.5	RAO de movimento de heave, incidência de onda a 180°	67
Figura 5.6	RAO de movimento de pitch, incidência de onda a 180°	68
Figura 5.7	Efeito de variação do Cd com o KC para objetos prismáticos com relação largura/altura de 0,5 (VENUGOPAL et al, 2006).....	69
Figura 5.8	Modelo dos equipamentos 1 no SITUA.....	71
Figura 5.9	Modelo dos equipamentos 2 no SITUA.....	71
Figura 5.10	Períodos naturais do sistema de içamento, Equipamentos 1A e 1B	75
Figura 5.11	Períodos naturais do sistema de içamento, Equipamentos 2A e 2B	75
Figura 5.12	RAO de movimento vertical do ponto de conexão e da embarcação	77
Figura 5.13	Espectros de resposta de movimento vertical no ponto de conexão	78
Figura 5.14	Zonas de ressonância para os equipamentos 1A e 1B	82
Figura 5.15	Zonas de ressonância para os equipamentos 2A e 2B	82
Figura 6.1	Resultados, profundidade 230m, onda a 165°, Equipamento 1	87
Figura 6.2	Resultados, profundidade 230m, onda a 180°, Equipamento 1	88
Figura 6.3	Resultados, profundidade 230m, onda a 195°, Equipamento 1	88
Figura 6.4	Resultados, profundidade 650m, onda a 165°, Equipamento 1	89
Figura 6.5	Resultados, profundidade 650m, onda a 180°, Equipamento 1	89
Figura 6.6	Resultados, profundidade 650m, onda a 195°, Equipamento 1	89
Figura 6.7	Resultados, profundidade 1070m, onda a 165°, Equipamento 1	90
Figura 6.8	Resultados, profundidade 1070m, onda a 180°, Equipamento 1	90

Figura 6.9	Resultados, profundidade 1070m, onda a 195°, Equipamento 1	91
Figura 6.10	Resultados, profundidade 2180m, onda a 165°, Equipamento 1	91
Figura 6.11	Resultados, profundidade 2180m, onda a 180°, Equipamento 1	92
Figura 6.12	Resultados, profundidade 2180m, onda a 195°, Equipamento 1	92
Figura 6.13	Resultados, profundidade 2590m, onda a 165°, Equipamento 1	93
Figura 6.14	Resultados, profundidade 2590m, onda a 180°, Equipamento 1	93
Figura 6.15	Resultados, profundidade 2590m, onda a 195°, Equipamento 1	93
Figura 6.16	Resultados, profundidade 3000m, onda a 165°, Equipamento 1	94
Figura 6.17	Resultados, profundidade 3000m, onda a 180°, Equipamento 1	94
Figura 6.18	Resultados, profundidade 3000m, onda a 195°, Equipamento 1	95
Figura 6.19	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 165°, Equipamento 1	96
Figura 6.20	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 180°, Equipamento 1	97
Figura 6.21	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 195°, Equipamento 1	97
Figura 6.22	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 165°, Equipamento 1	98
Figura 6.23	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 180°, Equipamento 1	98
Figura 6.24	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 195°, Equipamento 1	99
Figura 6.25	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 165°, Equipamento 1	99
Figura 6.26	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 180°, Equipamento 1	100
Figura 6.27	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 195°, Equipamento 1	100
Figura 6.28	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 165°, Equipamento 1	101
Figura 6.29	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 180°, Equipamento 1	101

Figura 6.30	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 195°, Equipamento 1	102
Figura 6.31	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 165°, Equipamento 1	102
Figura 6.32	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 180°, Equipamento 1	103
Figura 6.33	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 195°, Equipamento 1	103
Figura 6.34	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 165°, Equipamento 1	104
Figura 6.35	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 180°, Equipamento 1	104
Figura 6.36	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 195°, Equipamento 1	105
Figura 6.37	Espectro de resposta do movimento vertical no ponto de conexão, onda com período de pico de 5s.....	105
Figura 6.38	Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1A	106
Figura 6.39	Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	107
Figura 6.40	Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1A	107
Figura 6.41	Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	108
Figura 6.42	Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1A	108
Figura 6.43	Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	109
Figura 6.44	Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1A	109
Figura 6.45	Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	110
Figura 6.46	Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1A	110
Figura 6.47	Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	111
Figura 6.48	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1A	111
Figura 6.49	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1B.....	112
Figura 6.50	Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 1	112
Figura 6.51	Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1A .	113
Figura 6.52	Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1B .	113
Figura 6.53	Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1A .	114
Figura 6.54	Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1B .	114

Figura 6.55	Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1A	115
Figura 6.56	Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1B	115
Figura 6.57	Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1A	116
Figura 6.58	Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1B	116
Figura 6.59	Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1A	117
Figura 6.60	Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1B	117
Figura 6.61	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1A	118
Figura 6.62	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1B	118
Figura 6.63	Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 1	119
Figura 6.64	Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 1 ..	120
Figura 6.65	Resultados, profundidade 40m, onda a 165°, Equipamento 2	122
Figura 6.66	Resultados, profundidade 40m, onda a 180°, Equipamento 2	122
Figura 6.67	Resultados, profundidade 40m, onda a 195°, Equipamento 2	123
Figura 6.68	Resultados, profundidade 150m, onda a 165°, Equipamento 2	123
Figura 6.69	Resultados, profundidade 150m, onda a 180°, Equipamento 2	124
Figura 6.70	Resultados, profundidade 150m, onda a 195°, Equipamento 2	124
Figura 6.71	Resultados, profundidade 260m, onda a 165°, Equipamento 2	125
Figura 6.72	Resultados, profundidade 260m, onda a 180°, Equipamento 2	125
Figura 6.73	Resultados, profundidade 260m, onda a 195°, Equipamento 2	125
Figura 6.74	Resultados, profundidade 1290m, onda a 165°, Equipamento 2	126
Figura 6.75	Resultados, profundidade 1290m, onda a 180°, Equipamento 2	126
Figura 6.76	Resultados, profundidade 1290m, onda a 195°, Equipamento 2	127
Figura 6.77	Resultados, profundidade 2150m, onda a 165°, Equipamento 2	127
Figura 6.78	Resultados, profundidade 2150m, onda a 180°, Equipamento 2	128
Figura 6.79	Resultados, profundidade 2150m, onda a 195°, Equipamento 2	128

Figura 6.80	Resultados, profundidade 3000m, onda a 165°, Equipamento 2	129
Figura 6.81	Resultados, profundidade 3000m, onda a 180°, Equipamento 2	129
Figura 6.82	Resultados, profundidade 3000m, onda a 195°, Equipamento 2	129
Figura 6.83	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 165°, Equipamento 2	131
Figura 6.84	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 180°, Equipamento 2	131
Figura 6.85	Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 195°, Equipamento 2	132
Figura 6.86	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 165°, Equipamento 2	132
Figura 6.87	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 180°, Equipamento 2	133
Figura 6.88	Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 195°, Equipamento 2	133
Figura 6.89	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 165°, Equipamento 2	134
Figura 6.90	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 180°, Equipamento 2	134
Figura 6.91	Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 195°, Equipamento 2	135
Figura 6.92	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 165°, Equipamento 2	135
Figura 6.93	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 180°, Equipamento 2	136
Figura 6.94	Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 195°, Equipamento 2	136
Figura 6.95	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 165°, Equipamento 2	137
Figura 6.96	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 180°, Equipamento 2	137
Figura 6.97	Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 195°, Equipamento 2	138

Figura 6.98	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 165°, Equipamento 2	138
Figura 6.99	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 180°, Equipamento 2	139
Figura 6.100	Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 195°, Equipamento 2	139
Figura 6.101	Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2A	140
Figura 6.102	Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	141
Figura 6.103	Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2A	141
Figura 6.104	Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	142
Figura 6.105	Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2A	142
Figura 6.106	Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	143
Figura 6.107	Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2A	143
Figura 6.108	Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	144
Figura 6.109	Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2A	144
Figura 6.110	Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	145
Figura 6.111	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2A	145
Figura 6.112	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2B.....	146
Figura 6.113	Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 2	146
Figura 6.114	Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2A ...	147
Figura 6.115	Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2B ...	147
Figura 6.116	Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2A .	148
Figura 6.117	Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2B .	148
Figura 6.118	Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2A .	149
Figura 6.119	Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2B .	149
Figura 6.120	Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2A	150
Figura 6.121	Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2B	150
Figura 6.122	Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2A	151
Figura 6.123	Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2B	151

Figura 6.124	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2A	152
Figura 6.125	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2B	152
Figura 6.126	Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 2.....	153
Figura 6.127	Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 2 ..	154

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Critério de água profunda e comprimento de onda (adaptado de CHAKRABARTI, 2005)	27
Tabela 3.2	Fórmulas para teoria linear de onda (adaptado de CHAKRABARTI, 2005)	27
Tabela 4.1	Propriedades dos cabos para estudo preliminar	59
Tabela 4.2	Comparação dos períodos naturais do sistema de içamento	61
Tabela 5.1	Características da unidade flutuante	65
Tabela 5.2	Coordenadas do ponto de conexão do guindaste	68
Tabela 5.3	Características dos equipamentos	70
Tabela 5.4	Coordenadas dos pontos de içamento dos equipamentos	72
Tabela 5.5	Propriedades físicas dos cabos de lançamento em aço	73
Tabela 5.6	Propriedades físicas dos cabos de lançamento em poliéster	73
Tabela 5.7	Propriedades físicas dos cabrestos	74
Tabela 5.8	Profundidades críticas para os equipamentos 1A e 1B, mar regular	76
Tabela 5.9	Profundidades críticas para os equipamentos 2A e 2B, mar regular	76
Tabela 5.10	Profundidades críticas para os equipamentos 1A e 1B, mar irregular	79
Tabela 5.11	Profundidades críticas para os equipamentos 2A e 2B, mar irregular	79
Tabela 5.12	Matriz de carregamentos ambientais	80
Tabela 5.13	Profundidades de análise	81
Tabela 5.14	Simulações realizadas	84
Tabela 6.1	Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de aço	86
Tabela 6.2	Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de poliéster	86
Tabela 6.3	Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 1	120
Tabela 6.4	Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de aço	121
Tabela 6.5	Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de poliéster	121
Tabela 6.6	Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 2	154
Tabela B.1	Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A	166
Tabela B.2	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 165°	167

Tabela B.3	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 180°	167
Tabela B.4	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 195°	168
Tabela B.5	Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B.....	169
Tabela B.6	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 165°	169
Tabela B.7	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 180°	170
Tabela B.8	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 195°	170
Tabela B.9	Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A.....	171
Tabela B.10	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 165°	172
Tabela B.11	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 180°	172
Tabela B.12	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 195°	173
Tabela B.13	Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B.....	174
Tabela B.14	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 165°	174
Tabela B.15	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 180°	175
Tabela B.16	Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 195°	175
Tabela C.1	Resultados, profundidade 230m, Equipamento 1	176
Tabela C.2	Resultados, profundidade 650m, Equipamento 1	176
Tabela C.3	Resultados, profundidade 1070m, Equipamento 1	177
Tabela C.4	Resultados, profundidade 2180m, Equipamento 1	177
Tabela C.5	Resultados, profundidade 2590m, Equipamento 1	178
Tabela C.6	Resultados, profundidade 3000m, Equipamento 1	178
Tabela C.7	Resultados, onda com período de pico de 5s, Equipamento 1.....	179
Tabela C.8	Resultados, onda com período de pico de 7s, Equipamento 1.....	179

Tabela C.9	Resultados, onda com período de pico de 9s, Equipamento 1.....	180
Tabela C.10	Resultados, onda com período de pico de 11s, Equipamento 1.....	180
Tabela C.11	Resultados, onda com período de pico de 13s, Equipamento 1.....	181
Tabela C.12	Resultados, onda com período de pico de 15s, Equipamento 1.....	181
Tabela C.13	Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1	182
Tabela C.14	Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1	182
Tabela C.15	Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1	183
Tabela C.16	Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1	183
Tabela C.17	Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1	183
Tabela C.18	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1	184
Tabela C.19	Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 1	184
Tabela C.20	Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1	185
Tabela C.21	Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1	185
Tabela C.22	Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1 ..	186
Tabela C.23	Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1 ..	186
Tabela C.24	Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1 ..	186
Tabela C.25	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1 ..	187
Tabela C.26	Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 1.....	187
Tabela C.27	Resultados, profundidade 40m, Equipamento 2	188
Tabela C.28	Resultados, profundidade 150m, Equipamento 2	188
Tabela C.29	Resultados, profundidade 260m, Equipamento 2	189
Tabela C.30	Resultados, profundidade 1290m, Equipamento 2	189
Tabela C.31	Resultados, profundidade 2150m, Equipamento 2	190
Tabela C.32	Resultados, profundidade 3000m, Equipamento 2	190
Tabela C.33	Resultados, onda com período de pico de 5s, Equipamento 2.....	191
Tabela C.34	Resultados, onda com período de pico de 7s, Equipamento 2.....	191
Tabela C.35	Resultados, onda com período de pico de 9s, Equipamento 2.....	192
Tabela C.36	Resultados, onda com período de pico de 11s, Equipamento 2.....	192
Tabela C.37	Resultados, onda com período de pico de 13s, Equipamento 2.....	193
Tabela C.38	Resultados, onda com período de pico de 15s, Equipamento 2.....	193
Tabela C.39	Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2	194
Tabela C.40	Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2	194
Tabela C.41	Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2	195

Tabela C.42	Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2	195
Tabela C.43	Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2	195
Tabela C.44	Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2	196
Tabela C.45	Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 2	196
Tabela C.46	Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2	197
Tabela C.47	Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2	197
Tabela C.48	Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2	198
Tabela C.49	Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2 ..	198
Tabela C.50	Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2 ..	198
Tabela C.51	Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2 ..	199
Tabela C.52	Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 2.....	199

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O movimento histórico de avanço das operações de exploração e produção para o ambiente marinho observado a partir de meados do século passado e seguindo para distâncias cada vez maiores em relação ao continente, em lâminas d'água cada vez mais profundas e com as recentes descobertas de reservas de petróleo da camada do Pré-Sal no Brasil, vem sempre acompanhado de novas demandas tecnológicas para sua viabilidade econômica.

Para instalação, operação e manutenção de sistemas de produção submarinos de petróleo, essas demandas apresentam particularidades que os diferenciam dos demais tipos de sistemas. É possível agrupá-las de acordo com três grandes causas para os desafios, são elas: (i) condições ambientais críticas em termos de clima, do ambiente marinho e das formações geológicas de seu subleito; (ii) grandes distâncias a serem percorridas entre a plataforma de operação e os poços explorados, ou entre a plataforma e o continente; (iii) invisibilidade das operações e dos equipamentos submarinos.

O desenvolvimento de veículos de operação remota trata da invisibilidade das operações e equipamentos. Já para mitigar as dificuldades relativas às grandes distâncias, faz-se necessário otimizar e racionalizar a quantidade de dutos de ligação poço-plataforma, interligando-os ainda no leito marinho e controlando os fluxos de fluidos associados através de equipamentos submarinos cada vez mais variados e complexos. Isto gera uma demanda pelo desenvolvimento deste tipo de equipamentos que, por sua vez, necessitam ser instalados neste ambiente.

Portanto, conforme a produção avança de águas rasas, para águas intermediárias, profundas e ultraprofundas, os aspectos particulares da operação submarina têm demandado análises de soluções cada vez mais específicas e multidisciplinares no contexto da engenharia – dentre as quais se insere este trabalho.

1.2 MOTIVAÇÃO

Com equipamentos submarinos mais robustos, complexos e, consequentemente, mais pesados e, em especial, para águas ultraprofundas, os métodos tradicionais para sua instalação enfrentam barreiras impostas pelas condições ambientais marinhas. Estas, associadas às características físicas dos sistemas de instalação, resultam em esforços amplificados dinamicamente sobre os cabos utilizados para a operação. A amplificação dinâmica de esforços é particularmente deletéria quando influenciada pelo fenômeno de ressonância, sendo crítica a partir de determinada profundidade a depender da rigidez e da massa do sistema.

O fenômeno de ressonância de um sistema de instalação ocorre quando seu período natural coincide com aqueles das ondas componentes dos estados de mar da região considerada – nas chamadas “zonas de ressonância”. A principal variável para a determinação deste período natural é a rigidez do material que compõe o cabo principal de içamento/instalação dos equipamentos submarinos, além da própria massa deste equipamento. Qualquer busca por procedimentos operacionais que, ao fim e ao cabo, viabilizam tecnicamente instalações de equipamentos pesados em águas ultraprofundas, pois, necessita acessar este fenômeno e as variáveis relacionadas.

1.3 OBJETIVO

Com base no descrito em 1.1 e 1.2, este trabalho tem por objetivos: (i) investigar o fenômeno de ressonância de sistemas de instalação de equipamentos submarinos em águas ultraprofundas; (ii) lançar diretrizes para a busca de alternativas viáveis de métodos de instalação de equipamentos submarinos em águas ultraprofundas, embasadas na caracterização físico-matemática do fenômeno e extrapolando o Estado da Arte deste tipo de operação.

É corrente o uso de cabos de aço e sintéticos em operações marítimas, cada qual com suas particularidades em termos de capacidade de carga, rigidez, peso próprio. Estes últimos configuram-se como objeto de estudo importante para pesquisas contemporâneas, enquanto os cabos de aço já são tradicionalmente utilizados desde os primeiros lançamentos de equipamentos submarinos realizados. Este trabalho explora as vantagens e desvantagens de ambos os materiais, no âmbito do objetivo (i), e oferece dados e

propostas de procedimentos operacionais de modo a servir-se de suas vantagens, ao mesmo tempo em que se mitiga suas desvantagens – isto no âmbito do objetivo (ii).

1.4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos em 1.3, propõe-se: (i) revisar a bibliografia disponível para sistemas submarinos de produção de petróleo, seus componentes e configurações; (ii) apresentar o Estado da Arte para as metodologias de instalação de equipamentos submarinos; (iii) conceitualizar o fenômeno de ressonância em sistemas dinâmicos sob o ponto de vista físico-matemático e no contexto hidrodinâmico; (iv) lançar a discussão a respeito de um método alternativo de instalação de equipamentos submarinos; (v) avaliar as premissas consideradas para esta discussão num estudo de caso baseado em simulações computacionais dos sistemas de içamento no *software* SITUA-Prosím e, através de inferências sobre os resultados obtidos, considerar alternativas operacionais e ponderar a própria metodologia adotada.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

Um breve histórico do desenvolvimento de sistemas de produção submarinos, bem como suas configurações típicas, estruturas e equipamentos componentes e tipos de embarcações utilizadas são apresentados no capítulo 2.

O capítulo 3 ocupa-se da conceituação físico-matemática de ondas, das forças hidrodinâmicas geradas por elas, ondas irregulares e sua representação espectral, bem como efeitos dinâmicos sobre sistemas discretos amortecidos e não-amortecidos.

O capítulo 4 descreve os métodos de instalação de equipamentos submarinos presentes na bibliografia disponível sobre o tema, bem como realiza um estudo preliminar e a proposta de um método alternativo de instalação de equipamentos.

Esta proposta tem suas premissas verificadas pelo estudo de caso deste trabalho. O capítulo 5 trata das características e sequência de modelagem e análise do estudo de caso, enquanto o capítulo 6 apresenta e discute seus resultados.

Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são feitas no capítulo 7, que é seguida pelas referências bibliográficas e apêndices.

2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO SUBMARINOS

2.1 HISTÓRICO

Desde as primeiras explorações comerciais de petróleo em terra, na metade do século XIX, até a entrada em operação dos primeiros poços em águas ultraprofundas, no final do século passado, a cadeia produtiva do petróleo sempre atuou como motor de desenvolvimento de novas tecnologias nas mais diversas áreas do conhecimento.

Conhecido desde a antiguidade através de seus afloramentos superficiais e com utilização para fins de lubrificação, de calefação e de medicação, o petróleo teve exploração e uso incipiente ao longo de séculos, até o advento da iluminação a querosene, por volta da década de 1850, bem como a necessidade de substituição de óleos de origem animal e as novas demandas de lubrificação de equipamentos da revolução industrial.

As décadas seguintes testemunharam o desenvolvimento de novas técnicas, equipamentos e áreas de estudo científico para a exploração do petróleo, assim como o surgimento de novos processos químicos, subprodutos e aplicações – contribuindo para o aumento da importância do insumo, à medida em que cresciam a sua demanda e oferta.

A título de exemplo deste desenvolvimento ainda no século XIX, podem ser destacados a invenção do motor a combustão interna, a descoberta do processo para diminuição da quantidade de enxofre do óleo – ambas na década de 1880 – e o uso da técnica de perfuração rotativa em poços de petróleo a partir da década de 1890.

Já o início do século XX é marcado pela busca por novas reservas baseada em mapeamentos geológicos, no surgimento da geofísica e da sísmica de reflexão, além do desenvolvimento do processo de craqueamento térmico do petróleo, que dobrou a quantidade de gasolina gerada por barril, e de equipamentos importantes, como a árvore de natal e o *blowout preventer*.

A exploração *offshore* como nova fronteira de produção de petróleo surge em 1947 na Louisiana, em águas do golfo do México, numa profundidade de aproximadamente 5m, embora haja registros de perfurações de poços em corpos d'água

ainda no final do século XIX, como na Califórnia, Oceano Pacífico, com uma estrutura de píer como acesso ao continente, bem como no Mar Cáspio, no Azerbaijão.

A partir deste novo paradigma em produção de petróleo, da necessidade de suprir demandas crescentes, de substituir reservas maduras em terra e do vulto das reservas descobertas em ambiente *offshore*, a exploração no mar torna-se cada vez mais atrativa para a indústria, que passa a enfrentar os novos desafios deste ambiente muitas vezes hostil.

Assim, é possível observar toda uma nova corrente de evolução tecnológica motivada pela exploração marinha e é na década de 1970 que surgem as primeiras ideias de disposição de equipamentos e componentes de produção no leito marinho – criando o conceito de sistemas de produção submarinos e marcando o nascimento da disciplina de engenharia submarina.

Como resultado disso, houve o desenvolvimento dos navios-sonda, dos sistemas de posicionamento dinâmico para embarcações, de equipamentos submarinos como árvores de natal molhadas e separadores de fluxo petróleo-gás-água, uso de novos materiais flexíveis para confecção dos *risers*, avanços tecnológicos na área da geofísica, entre outros aprimoramentos objetivando reduzir os custos operacionais potencialmente impeditivos da exploração comercial de reservas.

2.2 CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DE SISTEMAS SUBMARINOS

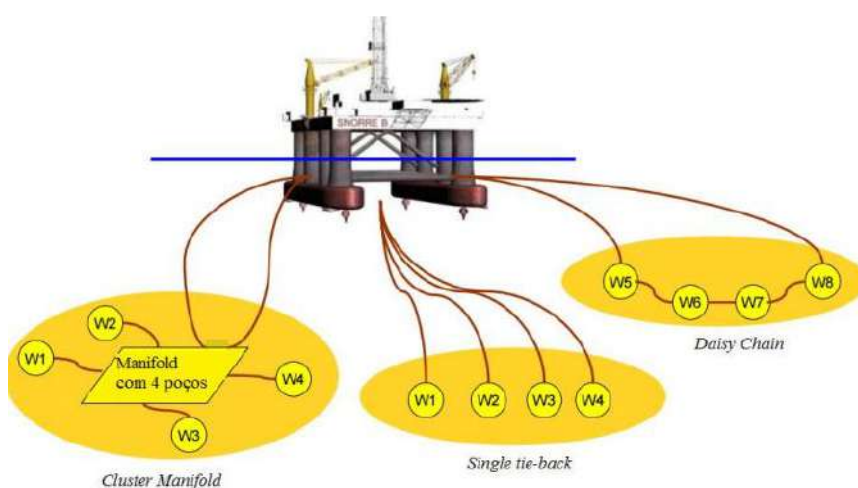


Figura 2.1 Configurações típicas de sistema submarinos (adaptado por ORTIZ, 2016, de HALLSET, 2009)

Sistemas submarinos de produção de petróleo e gás consistem em poços e equipamentos associados sob a superfície da água, bem como soluções tecnológicas necessárias para as etapas de perfuração, desenvolvimento e operação do campo. Isso inclui poços completados, cabeças de poço submarinas, árvores de natal molhadas, sistemas de escoamentos com *flowlines*, *risers* e *pipelines*, instalações de controle para operação, além dos sistemas de perfuração e instalação submarinas (BAI, BAI, 2010).



*Figura 2.2 Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a FPSO
(BAI, BAI, 2010)*

O objetivo do desenvolvimento de um campo de produção submarino é maximizar os ganhos econômicos da operação através das soluções mais confiáveis, seguras e efetivas disponíveis. Para atender esse objetivo, devem ser consideradas as características específicas do campo, em especial: a profundidade da lâmina d'água, o tipo de árvore de natal, dos métodos de elevação, o processamento submarino e as unidades químicas e hidráulicas a serem operadas, o tipo de configuração adotado (*tie-back*, *daisy chain*, *template* ou *cluster manifold*, como esquematizado na Figura 2.1) e, conseqüentemente, as instalações requeridas (BAI, BAI, 2010; ORTIZ, 2016).

Segundo BAI, BAI, 2010, *tie-backs* são soluções interessantes para pequenos reservatórios marginais que possam ser ligados à infraestrutura existente. Assim, é possível categorizar *tie-backs* como: (i) ligados a unidades de produção flutuantes, Figura 2.2; (ii) ligados a plataformas fixas, Figura 2.3; (iii) ligados a instalações *onshore*, Figura 2.4. O principal aspecto de projeto para *tie-backs* é, portanto, garantir o fluxo nas *flowlines* que os conectam.

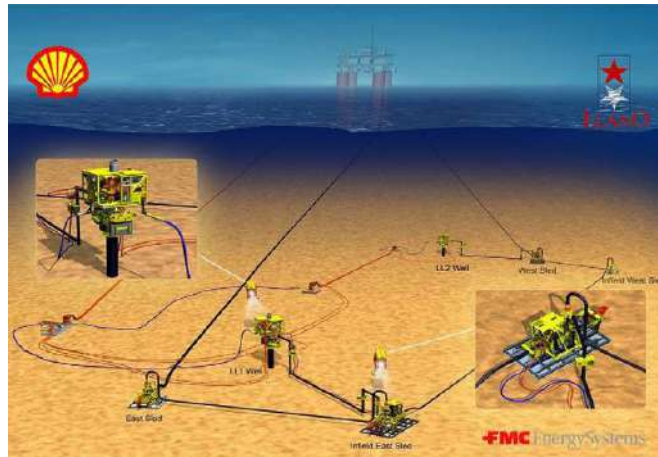


Figura 2.3 Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a TLP
(BAI, BAI, 2010)

A configuração em *daisy chain* é caracterizada por uma *flowline* comum ligando (em série) todos os poços e a instalação de produção. À medida em que cresce o número de poços a serem explorados, configurações com *manifolds* tornam-se mais atrativas, de acordo com BAI, BAI, 2010. A Figura 2.5 ilustra uma configuração deste tipo.

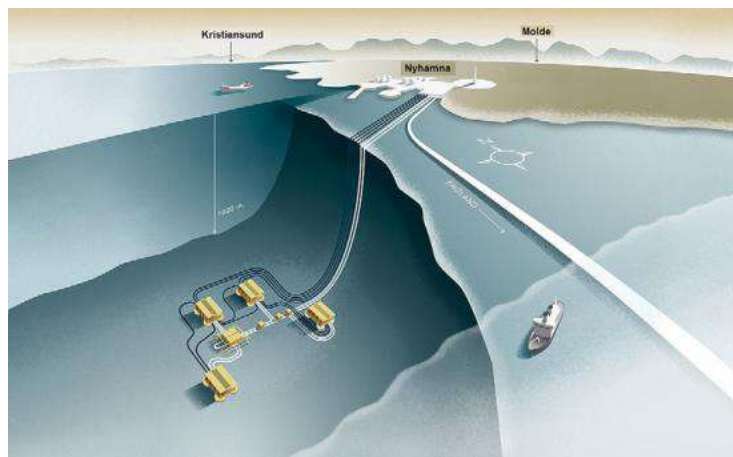


Figura 2.4 Sistema de produção submarino tipo tie-back conectado a instalação
onshore (BAI, BAI, 2010)

A produção em *template* ou *cluster manifold* parte do princípio de agrupar múltiplos poços vizinhos num único equipamento, a partir do qual se estabelece a ligação com a unidade de produção. Com isso, economiza-se em *flowlines* e umbilicais. Um *template* é utilizado para agrupar poços uniformemente espaçados, e pode ser instalado ainda quando da perfuração do poço. Entretanto, a configuração uniforme dos poços torna o sistema pouco flexível a eventuais mudanças na configuração do campo.

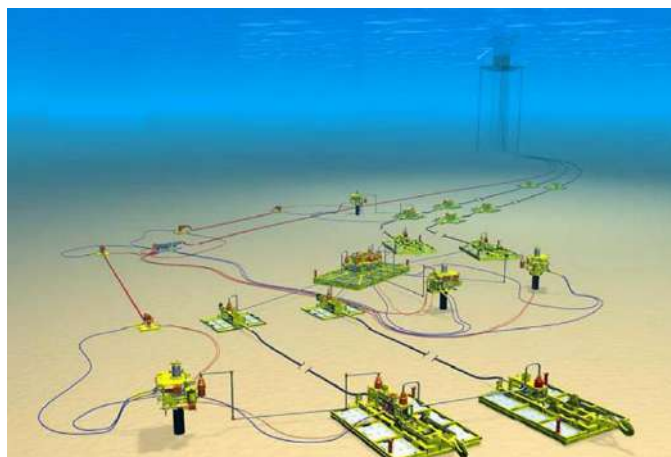


Figura 2.5 Sistema de produção submarino tipo daisy chain (BAI, BAI, 2010)

Já o uso de *cluster manifold* serve a agrupar poços satélites numa localização ótima intermediária, a do equipamento, de modo que seja garantido o fluxo nas *flowlines* entre as cabeças dos poços e o *manifold*, e que a ligação com a unidade de produção seja feita a partir deste ponto único. Esta configuração pode ser projetada para aceitar futuras expansões ou eventuais mudanças de configuração no campo, garantindo certa flexibilidade ao sistema. O posicionamento de *manifolds* para otimizar o agrupamento dos poços é um problema corrente de engenharia.

É claro, portanto, que quanto mais complexas as configurações e arranjos dos sistemas de produção submarinos, maior a quantidade e mais diversa a variedade de equipamentos submarinos projetados. Nesse sentido, as operações de instalação destes equipamentos assumem um papel importante em análises de viabilidade técnica e econômica para a exploração, desenvolvimento e operação de campos de petróleo.

Ademais, BAI, BAI, 2010 divide as operações de instalação submarina em dois grupos: (i) instalação de *pipelines* e *risers* submarinos; (i) instalação de equipamentos submarinos. O primeiro caracteriza-se pela necessidade de embarcações especializadas para o método projetado de instalação da linha, quais sejam *S-lay*, *J-lay* ou *reel lay*. Já o segundo, objeto deste trabalho, trata de equipamentos como árvores de natal, *manifolds* e outros que são instalados comumente por embarcações com capacidade de içamento através de métodos como descritos no capítulo 4. De uma forma geral, os equipamentos submarinos podem ser categorizados a partir de seu peso, forma (linear ou de volume), dimensões e profundidade de instalação (águas rasas ou profundas).

2.3 ESTRUTURAS E EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

2.3.1 POÇO SUBMARINO E ÁRVORE DE NATAL MOLHADA

O procedimento de preparação de um poço submarino para produção de petróleo passa por diversas etapas, destacando-se inicialmente a de perfuração – através das sondas de perfuração, que podem ser plataformas fixas, autoelevatórias ou flutuantes. Este processo é realizado através de mecanismo rotativo interno à coluna de perfuração – elemento estrutural tipicamente tubular que, além de dar passagem à broca de perfuração, permite o retorno do fluido de perfuração no espaço entre sua parede interna e a parede externa do *riser* de perfuração. *Riser* de perfuração é o duto que leva o fluido de perfuração até o poço e apoia o mecanismo de perfuração. A circulação deste fluido, por sua vez, é o que garante a evacuação dos resíduos gerados durante a operação.

É essencial garantir a estanqueidade e estabilidade do poço durante toda a execução e, para isto, utiliza-se revestimento tipicamente em aço para as paredes do poço e posterior cimentação da região revestida. Esta técnica de perfuração-revestimento-cimentação é repetida quantas vezes forem necessárias, até que se atinja a profundidade projetada para o reservatório (ORTIZ, 2016).

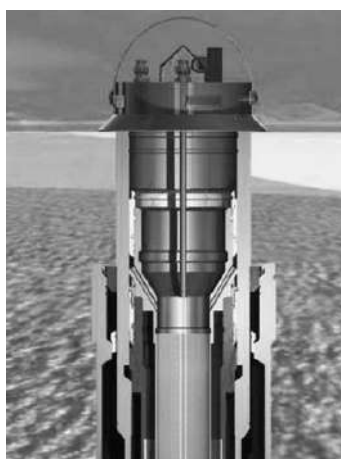


Figura 2.6 Cabeça de poço submarino (BAI, BAI, 2010)

A superfície de interface entre reservatório e unidade produtora, chamada cabeça do poço, deve ser equipada de forma a conter a pressão e manter a conexão segura durante toda a vida útil prevista, conforme ilustrado pela Figura 2.6 (BAI, BAI, 2010). Os procedimentos realizados entre a perfuração e o início da operação do poço, visando

segurança e economicidade da produção, podem ser agrupadas na etapa de completação – que consiste na instalação dos equipamentos de segurança, substituição do fluido de perfuração, instalação da coluna de produção, da árvore de natal molhada e realização dos testes de produção.

A árvore de natal molhada (ANM) é um equipamento que comporta um conjunto de válvulas, tubos, acessórios, conexões e é posicionado na cabeça do poço para controle dos fluxos. Estas válvulas podem ser operadas por sinais hidráulicos, elétricos, ou manualmente por mergulhadores ou veículos submarinos operados remotamente (ROV – *remotely operated underwater vehicle*, na sigla em inglês).

2.3.2 LINHAS DE ESCOAMENTO



Figura 2.7 Riser de perfuração submarino (BAI, BAI, 2010)

Para sistemas de produção submarinos, as linhas de escoamento podem ser categorizadas em *flowlines* e *risers*. Conforme BAI, BAI, 2010, *flowlines* consistem em dutos submarinos que conectam a cabeça de poço com um *manifold*. Transportam fluidos petroquímicos, gás para *gas lift*, água para injeção ou produtos químicos. Podem ser constituídos de tubos rígidos ou flexíveis e podem, ou não, ser agrupados num duto de suporte. Mesmo não agrupadas, as *flowlines* estão sujeitas à necessidade de isolamento térmico, para evitar perda de calor que possa afetar o escoamento do fluido transportado.

Já um *riser* é o segmento de duto que liga os equipamentos submarinos à unidade de produção na superfície – e, portanto, verticais ou aproximadamente verticais. São dutos que podem ser constituídos de material rígido ou flexível. Um exemplo deste tipo de duto é o *riser* de perfuração, já citado no item 2.3.1, que transporta fluido de perfuração da sonda ao leito marinho, ilustrado na Figura 2.7.

2.3.3 *MANIFOLD SUBMARINO E TEMPLATE*



Figura 2.8 Cluster manifold com 10 slots (WANG et al, 2012)

Manifolds consistem em um conjunto de válvulas e dutos projetados de forma a centralizar e redistribuir de forma simplificada os fluxos advindos de sistemas submarinos de produção. Esses equipamentos combinam, distribuem, controlam e podem monitorar os fluxos de fluidos. BAI, BAI, 2010, descreve variadas configurações de *manifolds* para variados fins. Os mais simples, como os PLEMs (*pipeline end manifold*, na sigla em inglês) e PLETs (*pipeline end termination*, na sigla em inglês) serão tratados no item 2.3.4. Aqueles de maior porte são do tipo *cluster manifold*, como o da Figura 2.8, ou *template manifolds*, como o da Figura 2.9.

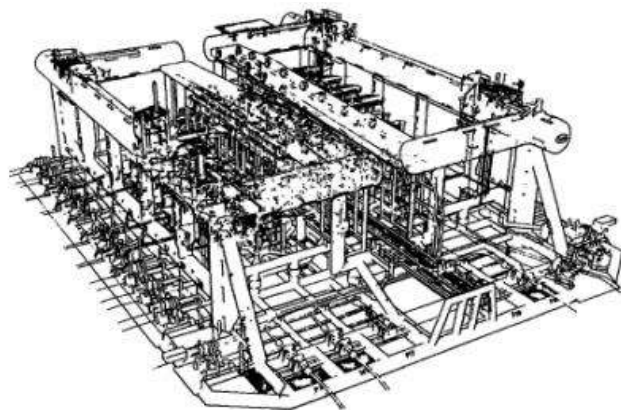


Figura 2.9 Template manifold (HERDEIRO, 1997)

Ambos são instalados no leito marinho, sendo que os *templates* são instalados precocemente, visto que dão suporte a todas as etapas de desenvolvimento dos poços que agrupa. Os poços são perfurados a distâncias uniformes exatamente sob o equipamento, o que torna a configuração do campo explorado pouco flexível, mas vantajosa para casos

de poços muito próximos entre si, haja vista que as operações de perfuração e produção podem ocorrer simultaneamente onde este equipamento é utilizado.

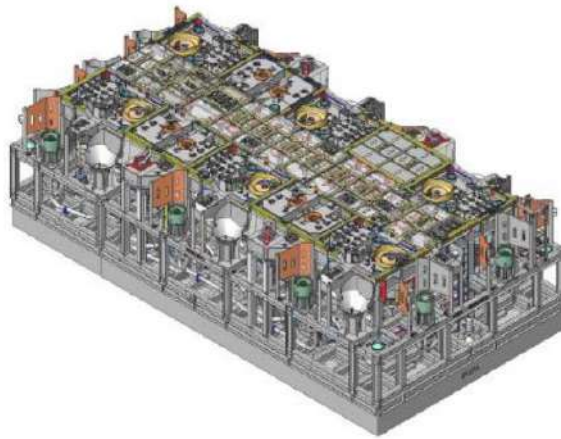


Figura 2.10 Manifold MSGL-RO-02 (RIBEIRO, 2008)

Já os *cluster manifolds*, ou simplesmente *manifolds*, permitem uma flexibilização maior do campo explorado, pois a ligação entre os poços e este equipamento é feito através de *flowlines* e é comum que haja reserva de *slots* para posterior expansão do campo em operação de *tie-back*, como citado no item 2.2. São equipamentos mais simples que os *templates* e, portanto, mais baratos. A Figura 2.10 apresenta o esquema de um *cluster manifold* utilizado no campo de Roncador pela Petrobras (RIBEIRO, 2008).

2.3.4 EQUIPAMENTOS DE CONEXÃO



Figura 2.11 PLET (BAI, BAI, 2010)

Conforme BAI, BAI, 2010, as conexões entre os dutos submarinos e demais elementos do sistema são feitas por meio de equipamentos auxiliares de conexão, dentre eles os PLEMs, PLETs e *jumpers*. Os *pipeline end manifolds* (PLEMs) são estruturas

submarinas incorporadas ao fim de um duto submarino. Tem por objetivo conectar um duto rígido com outras estruturas, como *manifolds* e árvores de natal molhadas, através de um *jumper*. As *pipeline end termination* (PLETs), ilustradas em Figura 2.11, são também conectadas ao fim de um duto, mas servindo a uma válvula de *pipeline* e um conector vertical, como o de um *riser*.

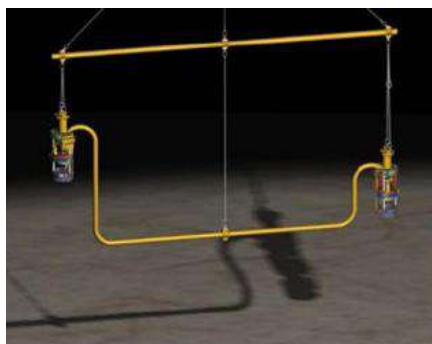


Figura 2.12 Ilustração de içamento de um jumper (adaptado de BAI, BAI, 2010)

Já um *jumper* consiste num pequeno trecho de duto que transporta fluido de produção entre dois componentes submarinos, por exemplo: entre uma árvore de natal molhada e um *manifold*, entre dois *manifolds*, entre um PLET e a base de um *riser*. Podem ser constituídos de material rígido ou flexível. Também podem ser utilizados para injeção de água em poços. A Figura 2.12 ilustra um *jumper*.

2.3.5 SISTEMAS SUBMARINOS DE DISTRIBUIÇÃO, CONTROLE E FORNECIMENTO DE ENERGIA

Para garantir que a produção de um sistema submarino seja possível e controlada, se faz necessário um conjunto de sistemas que forneçam energia, garantam a comunicação e façam o controle dos equipamentos envolvidos.

Assim, BAI, BAI, 2010, classifica como sistema de distribuição o conjunto de componentes que fornecem a comunicação entre os controles submarinos de produção com aqueles de superfície para todos os equipamentos através do sistema de umbilicais. Esse sistema é composto, além de umbilicais, por módulos de distribuição hidráulica, elétrica, conectores, equipamentos de lógica, entre outros.

Já o sistema de controle de produção é aquele, segundo BAI, BAI, 2010, que engloba os sistemas de controle de operações de válvulas e componentes de árvores de

natal, *manifolds*, *templates* e dutos. Esses controles podem ser hidráulicos, eletrohidráulicos ou somente elétricos. Além disso, recebe e transmite dados de monitoramento de produção, como temperaturas, pressões, presença de areia, entre outros. A Figura 2.13 dá uma visão geral de um sistema de controle submarino.

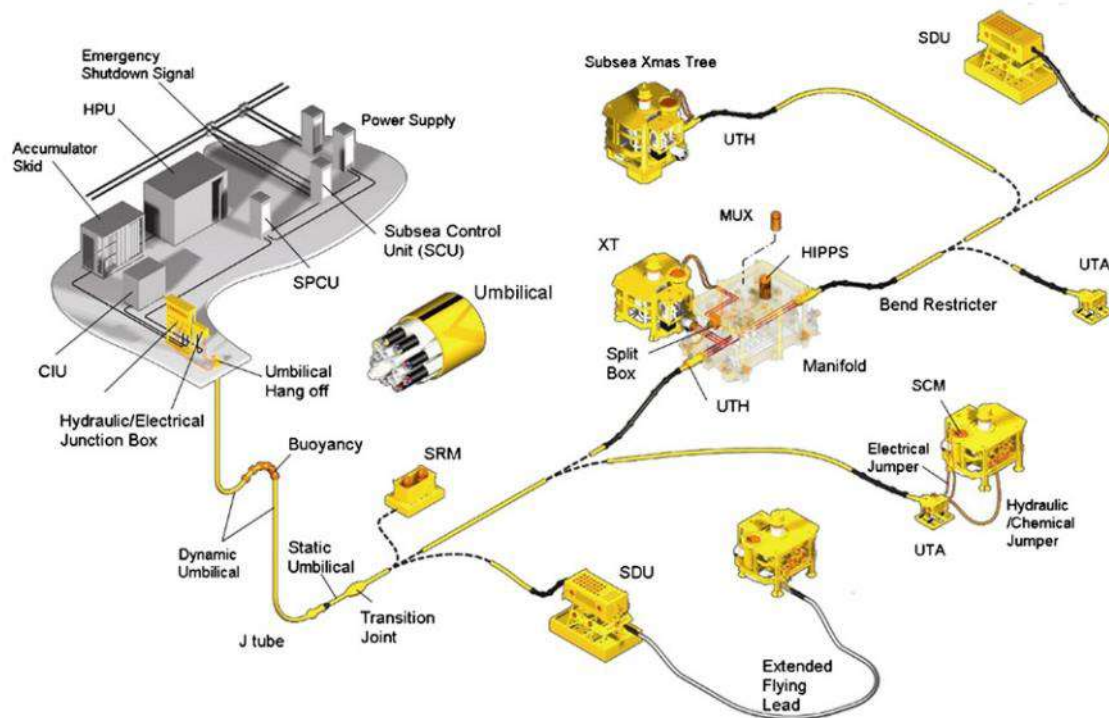


Figura 2.13 Sistema de controle submarino (BAI, BAI, 2010)

As unidades de energia elétrica, hidráulica e fontes de alimentação ininterruptas são classificadas como parte do sistema submarino de alimentação. A energia fornecida por esse sistema pode ser gerada por uma planta *onshore* ou por meio de geradores nas próprias plataformas, conforme BAI, BAI, 2010 e é, claramente, imprescindível para a não-interrupção dos sistemas que necessitam de energia na produção.



Figura 2.14 Umbilicais (BAI, BAI, 2010)

Um tipo de componente comum nesses sistemas são os cabos umbilicais, como o ilustrado pela Figura 2.14. Os umbilicais são um tubo oco que reúne os dutos de transmissão de fluidos de controle ou corrente elétrica necessários para os sistemas descritos.

2.3.6 VEÍCULOS SUBMARINOS DE OPERAÇÃO REMOTA

À medida em que os sistemas de produção submarinos se desenvolvem em águas cada vez mais profundas, a intervenção humana através de mergulhadores em equipamentos e operações diversas torna-se inviável. Para isto, foram desenvolvidos os veículos de operação remota (ROVs).



Figura 2.15 Veículo submarino de operação remota (BAI, BAI, 2010)

Entre as intervenções realizadas por este tipo de equipamento, destacam-se: sondagens *in situ*, assistência em operação de perfuração, instalação ou produção, inspeções em geral, manutenção e reparos. A Figura 2.15 mostra um ROV utilizado para mapeamento submarino.

2.4 EMBARCAÇÕES PARA OPERAÇÕES DE INSTALAÇÃO

As embarcações utilizadas para instalações de sistemas submarinos de produção são comumente do tipo: (i) balsas de transporte e rebocadores; (ii) embarcações para perfuração, como navios-sonda, plataformas autoelevatórias e semissubmersíveis; (iii) navios de lançamento de dutos e umbilicais; (iv) embarcações com alta capacidade de carga; (v) embarcações de apoio, como as para ROV, para mergulhadores, entre outros (BAI, BAI, 2010)

Conforme BAI, BAI, 2010, a escolha do tipo de embarcação a ser utilizado no desenvolvimento dos sistemas submarinos deve ser feita considerando-se os seguintes critérios: (i) necessidades da instalação; (ii) condições ambientais; (iii) características e capacidade da embarcação; (iv) custos.

No que tange às características da embarcação, consideram-se critérios básicos e funcionais. Os critérios básicos, dizem respeito à performance e segurança da embarcação, como sua fluabilidade, estabilidade, manobrabilidade, velocidade, potência e resistência do motor, entre outros.

Com relação aos critérios funcionais, deve-se levar em conta as atividades a serem desenvolvidas por aquela embarcação. Para instalação de equipamentos submarinos, por exemplo, avalia-se o espaço disponível e a capacidade de carga do *deck* e do sistema de içamento, os movimentos da embarcação, a janela de operação de acordo com as condições meteoceanográficas, entre outros.

Os itens a seguir, portanto, apresentarão sucintamente os diferentes tipos de embarcações e suas características principais. O item 2.4.1 tratará de balsas e rebocadores, o 2.4.2, de sondas de perfuração, o 2.4.3, de embarcações para lançamento de dutos e umbilicais, o 2.4.4, de embarcações de alta capacidade de carga, de apoio e demais elementos auxiliares ligados às embarcações de instalação.

2.4.1 EMBARCAÇÕES DE TRANSPORTE E REBOCADORES



Figura 2.16 Barcaça de transporte (BAI, BAI, 2010)

O transporte de equipamentos submarinos de ambiente *onshore* ao campo *offshore* onde serão instalados se dá por meio de embarcações de transporte: tipicamente barcaças

sem propulsão própria, como a da Figura 2.16, e rebocadores, como o da Figura 2.17. O equipamento é, então, transferido para uma embarcação adequada e equipada para a operação de instalação.

Os critérios de escolha do tipo de embarcação a ser utilizada para o transporte dependem, segundo BAI, BAI, 2010, de: dimensões, peso e centro de gravidade da estrutura a ser transportada, distância e rota de transporte, limitações de cronograma, custo e condições ambientais.



Figura 2.17 Rebocador (BAI, BAI, 2010)

2.4.2 EMBARCAÇÕES DE PERFURAÇÃO



Figura 2.18 Plataforma autoelevatória (BAI, BAI, 2010)

Embora tenham como principal finalidade a perfuração de poços de petróleo, as sondas de perfuração também são utilizadas em métodos de instalação de equipamentos submarinos. Isto se dá devido à sua capacidade de içamento, posicionamento e atuação em diversas profundidades (BAI, BAI, 2010).

Um exemplo de sondas de perfuração são as plataformas autoelevatórias, como a da Figura 2.18. Este tipo de plataforma tornou-se popular para perfurações em águas com profundidades até aproximadamente 100 m devido à facilidade de transporte e estabilidade de escavação conferida por sua estrutura de torres móveis por macacos hidráulicos e cremalheiras para autoelevação (BAI, BAI, 2010; SILVEIRA, 2013).



Figura 2.19 Plataforma semissubmersível (SILVEIRA, 2013)

Para operações em águas com profundidades típicas entre 120 m e 1200 m, e/ou com necessidade de realização partir de uma estrutura flutuante, é comum a utilização de plataformas semissubmersível, como a da Figura 2.19. Essas plataformas, quando em transporte, flutuam como um navio. Chegando à locação de perfuração ou instalação, elas contam com um sistema de inundação de seus cascos, de modo que sua estrutura é parcialmente submersa – o que atenua os efeitos das ondulações da superfície marinha nos movimentos da plataforma.



Figura 2.20 Navio-sonda (BAI, BAI, 2010)

Por fim, conforme SILVEIRA, 2013, navios-sonda, como o da Figura 2.20, são empregados em perfurações em águas profundas, por possuírem sistema de

posicionamento dinâmico, e em demais serviços de curta duração, por terem facilidade de deslocamento entre locações. Segundo BAI, BAI, 2010, embora tenham maior capacidade de carga que plataformas semissubmersíveis, costumam apresentar também maiores amplitudes de movimentos – o que é um dificultador para a operação.

2.4.3 EMBARCAÇÕES DE LANÇAMENTO DE DUTOS E DE UMBILICAIS

Para a instalação de *pipelines* submarinos, há uma variedade específica de embarcações, cada qual adaptado para um determinado método de lançamento, quais sejam: *S-lay* como o da Figura 2.21, *J-lay* como o da Figura 2.22, *Reel-lay* como o da Figura 2.23 e *Carousel-lay* como o da Figura 2.24.



Figura 2.21 *S-lay* (BAI, BAI, 2010)

Embarcações preparadas para *S-lay* contam com uma estrutura dita *stinger*, que controla a deformação e configura a forma em S (que dá nome ao método) do duto em lançamento. Já embarcações de *J-lay* contam com uma torre, ou rampa, para que o duto seja lançado com inclinação inicial muito próxima da vertical, configurando o formato em J (que dá nome ao método) do duto lançado (BAI, BAI, 2010).



Figura 2.22 *J-lay* (BAI, BAI, 2010)

Embarcações para *Reel-lay*, utilizadas tanto para lançamento de *pipelines*, quanto para umbilicais, contam com uma estrutura de carretel na vertical onde o duto se mantém em formato de bobina. Este tipo de configuração plastifica o duto, fenômeno que deve ser levado em consideração na análise de instalação. Durante o procedimento, o duto plastificado deve passar por uma estação de retificação antes de ser lançado (BAI, BAI, 2010).



Figura 2.23 Reel-lay (BAI, BAI, 2010)

Embarcações de *Carousel-lay*, comumente utilizadas para lançamento de umbilicais, contam também com uma estrutura tipo carretel, onde o umbilical é transportado. Permite lançamento de umbilicais mais longos, mas normalmente a embarcação deve ser dedicada exclusivamente a esse fim (BAI, BAI, 2010).



Figura 2.24 Carousel-lay (BAI, BAI, 2010)

2.4.4 EMBARCAÇÕES DE ALTA CAPACIDADE DE CARGA, DE APOIO E OUTROS ELEMENTOS

Estruturas e equipamentos mais pesados requerem embarcações especiais para instalação. Para este fim, há balsas-guindaste de carga pesada (HLV – *heavy lift vessel*,

na sigla em inglês) como a da Figura 2.25. Enquanto guindastes comuns têm capacidade de carga por volta de 250 ton, HLVs contam com guindastes com capacidades entre 500 ton e 1000 ton (BAI, BAI, 2010).



Figura 2.25 Balsa-guindaste (SILVEIRA, 2013)

Para além das já descritas, há também um conjunto de outras embarcações ditas de apoio a operações *offshore*. Como exemplo desta categoria, tem-se embarcações de apoio a ROV (RSV), embarcações de apoio a mergulho (DSV), navios de estimulação de poços de petróleo (WSV), navios de pesquisa sísmica (RV), supridores (OSV), supridores de plataforma (PSV), embarcações de manuseio de espas (LH), entre outros.



Figura 2.26 Supridor, rebocador e manuseio de âncoras (SILVEIRA, 2013)

Um representante de embarcação de apoio é o supridor, rebocador e de manuseio de âncoras (AHTS – *anchor handling tug supply*, na sigla em inglês), ilustrado pela Figura 2.26. De acordo com SILVEIRA, 2013, AHTSs são construídos com o objetivo principal de realizar operações de reboque e ancoragem de plataformas. Para tanto, têm um complexo arranjo de equipamentos em seu convés e mecanismos de guinchos, como é possível observar na Figura 2.27.

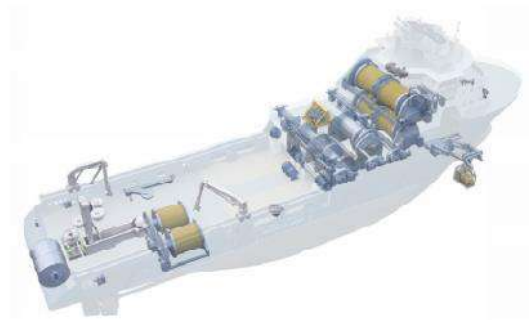


Figura 2.27 Esquema de guinchos de um AHTS (SILVEIRA, 2013)

Para operação de reboque, um cabo para este fim deve ser conectado à engrenagem do reboque e esta, à cabresteira da unidade rebocada. Já as operações de manuseio de âncoras, mais complexas, podem ter por objetivo o seu posicionamento no fundo do mar, a sua recuperação para inspeção, o seu reposicionamento ou a sua retirada definitiva. É uma operação mais complexa e deve considerar o solo e eventuais limitações pela presença de interferências submarinas (SILVEIRA, 2013).

Um elemento extra para içamento de estruturas possível numa embarcação de apoio como um AHTS é o *A-frame*. Conforme ADAMIEC-WÓJCIK *et al*, 2009, *A-frames* consistem em um guindaste em formato de pórtico, conforme esquema da Figura 2.28. São componentes importantes para a instalação de equipamentos em ambiente *offshore*, em que estabilização e posicionamento da carga içada são fundamentais para o sucesso da operação.

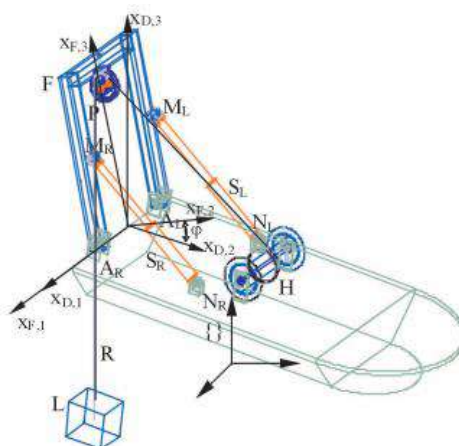


Figura 2.28 Esquema de um A-frame típico (ADAMIEC-WÓJCIK *et al*, 2009)

Outra embarcação de particular interesse para este trabalho é a de construção submarina *offshore* (OSCV – *offshore subsea construction vessel*, na sigla em inglês).

Conforme JAHANGIRY, 2015, este tipo de navio é projetado para realizar operações de inspeção, manutenção, reparo, içamento e instalação de sistemas submarinos.



Figura 2.29 OSCV com guincho sob seu deck (JAHANGIRY, 2015)

Os OSCVs contam com uma área de *deck* utilizada para o transporte de módulos a serem instalados, normalmente com sistema de posicionamento dinâmico (DP) e um sistema de içamento com guindaste e guincho que pode ser posicionado sob o *deck* ou elevado, como ilustrado na Figura 2.29 e na Figura 2.30, respectivamente. A capacidade de içamento e a área do *deck* são utilizados como critérios de categorização para OSCVs.



Figura 2.30 OSCV com guincho elevado (JAHANGIRY, 2015)

Segundo JAHANGIRY, a maior parte dos OSCVs recentes têm capacidade de operar ROVs, o que garante o acompanhamento mais seguro das operações designadas. Além disso, este tipo de embarcação é comumente equipado com sistemas ativos de compensação de movimento de *heave* – sistemas estes descritos em maiores detalhes na seção 4.1.4 deste trabalho.

3 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS E DINÂMICA DE ESTRUTURAS

3.1 INTRODUÇÃO

De cunho ambiental, as ações às quais estruturas *offshore* estão submetidas durante sua vida produtiva estão ligadas às condições meteoceanográficas do ambiente marinho em que estão inseridas, como: vento local; ondas locais geradas pelo vento; ondas de longo período geradas à distância (marulho ou *swell*); corrente superficial local; correntes profundas de baixa frequência; correntes locais específicas, como a Corrente de *Loop* do Golfo do México (CHAKRABARTI, 2005; RONCETTI, 2014).

Para mensurar os efeitos sobre a estrutura a partir destas condições, faz-se uso de modelos teóricos para onda, corrente e/ou vento. Ações excepcionais, como as advindas de terremotos e tsunamis, também devem ser levadas em conta em determinadas localizações geográficas. Da mesma forma, o tipo de estrutura ou sistema a ser projetado apresenta respostas características face aos carregamentos, quais sejam considerados estáticos ou dinâmicos.

Para análises de instalação de equipamentos submarinos como as deste trabalho, destacam-se os efeitos de onda sobre o sistema, a serem tratados neste capítulo. O item 3.2 apresenta os modelos teóricos para caracterização do movimento das partículas de fluido, em particular a Teoria Linear de Onda, ou Teoria de Airy, e elementos da Teoria de Fluxo Potencial.

A partir dos resultados de 3.2, o item 3.3 apresenta algumas formulações disponíveis para cálculo do efeito de forças induzidas por onda num corpo submerso, quais sejam a Formulação de Morison, a de Froude-Krylov e a Teoria de Difração-Radiação. No item 3.4, o conceito de mar irregular e sua representação espectral é apresentado. Por fim, o item 3.5 tratará da resposta estrutural a carregamentos cíclicos por parte de corpos submersos.

Conforme MELLO, 2004, o movimento horizontal do equipamento em instalação é comumente negligenciado em operações práticas, de forma que efeitos de corrente e consequentes vibrações induzidas por vórtice sobre o sistema podem ser desconsideradas e, portanto, não serão abordadas neste trabalho.

3.2 CARACTERIZAÇÃO CINEMÁTICA E DINÂMICA DE ONDA

3.2.1 TEORIA LINEAR DE ONDA

Qualquer estrutura em ambiente *offshore* sofre os efeitos, de maior ou menor monta, das ondulações do fluido oceânico. Para descrição deste movimento periódico utilizam-se os parâmetros básicos de: período T (em s) ou frequência de onda ω (em rad/s); altura de onda H (em m); profundidade de lâmina d'água d (em m) representados na Figura 3.1.

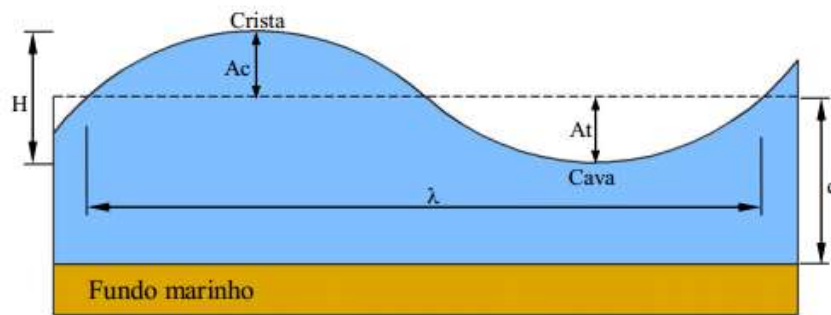


Figura 3.1 Parâmetros básicos de uma onda regular (RONCETTI, 2014)

A partir destes, podem ser calculados: comprimento de onda λ ou L (em m); velocidade de onda ou velocidade de fase c (em m/s); elevação ou perfil de onda η (em m); número de onda k (em rad/m).

Caso haja interesse na cinemática das partículas do fluido, também é possível calcular: velocidades horizontal u (em m/s) e vertical da partícula de fluido v (em m/s); acelerações horizontal $\dot{u}$ (em m/s^2) e vertical da partícula de fluido $\dot{v}$ (em m/s^2). Em termos de efeito dinâmico, determina-se a pressão p (em Pa).

A Teoria Linear de Onda, ou Teoria de Airy, descreve a elevação da superfície de movimento livre da onda em relação ao nível médio da água como uma função harmônica

(senoidal ou cossenoidal, conforme queira) que varia no tempo t (em s) e no espaço x (em m) (no caso de propagação unidimensional) conforme (3.1), em que o número de onda k é definido em (3.2), a frequência de onda ω se relaciona com o período T de acordo com (3.3) e a amplitude de onda A (em m) pode ser calculada nos termos de (3.4), onde A_c (em m) é a distância da posição de equilíbrio à crista da onda e A_t (em m) é a distância da posição de equilíbrio à cava da onda (CHAKRABARTI, 2005; RONCETTI, 2014).

$$\eta = A \sin(kx - \omega t) \quad (3.1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.3)$$

$$A = A_c = A_t = \frac{H}{2} \quad (3.4)$$

Outrossim, sabendo que a velocidade de onda c é calculada conforme (3.5) e reescrevendo (3.1) em cosseno, é possível estabelecer as relações descritas na Tabela 3.2, seguindo os critérios de profundidade da água da Tabela 3.1 e a simbologia ilustrada na Figura 3.2. As formulações apresentadas na Tabela 3.2 para águas profundas advém de simplificações das funções hiperbólicas apresentadas para o caso de profundidades finitas (rasas e intermediárias).

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} \quad (3.5)$$

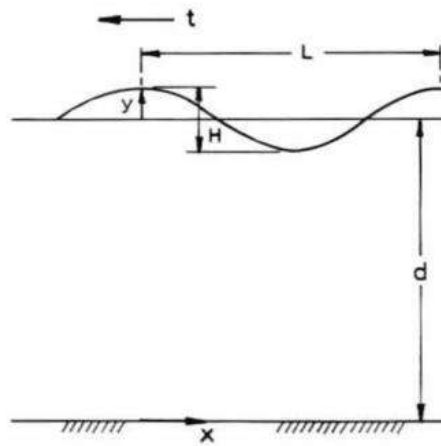


Figura 3.2 Simbologia para onda 2D sobre fundo plano (CHAKRABARTI, 2005)

Tabela 3.1 Critério de água profunda e comprimento de onda (adaptado de CHAKRABARTI, 2005)

Profundidade da água	Critério	Comprimento de onda
Águas profundas	$\frac{d}{L} \geq \frac{1}{2}$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$
Águas rasas	$\frac{d}{L} \leq \frac{1}{20}$	$L = T\sqrt{gd}$
Águas intermediárias	$\frac{1}{20} < \frac{d}{L} \leq \frac{1}{2}$	$L = L_0 \sqrt{\tanh \frac{2\pi d}{L_0}}$

Tabela 3.2 Fórmulas para teoria linear de onda (adaptado de CHAKRABARTI, 2005)

Profundidade finita	Águas profundas
$\eta = \frac{H}{2} \cos[k(x - ct)]$	$\eta = \frac{H}{2} \cos[k(x - ct)]$
$u = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh[k(y + d)]}{\cosh(kd)} \cos[k(x - ct)]$	$u = \frac{gkH}{2\omega} e^{ky} \cos[k(x - ct)]$
$v = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh[k(y + d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x - ct)]$	$v = \frac{gkH}{2\omega} e^{ky} \cos[k(x - ct)]$
$\dot{u} = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh[k(y + d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x - ct)]$	$\dot{u} = \frac{gkH}{2} e^{ky} \cos[k(x - ct)]$
$\dot{v} = -\frac{gkH}{2} \frac{\sinh[k(y + d)]}{\cosh(kd)} \cos[k(x - ct)]$	$\dot{v} = \frac{gkH}{2} e^{ky} \cos[k(x - ct)]$
$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(y + d)]}{\cosh(kd)} \cos[k(x - ct)]$	$p = \rho g \frac{H}{2} e^{ky} \cos[k(x - ct)]$

É possível perceber que as amplitudes das grandezas cinemáticas e dinâmicas apresentadas pela Teoria de Airy são funções lineares da altura de onda H . A partir delas, é possível calcular amplitudes de respostas estruturais. Caso estas também sejam descritas por relações lineares em termos de altura de onda, é possível normaliza-las para H , de modo que variem apenas em função do período de onda T .

Funções de amplitude de resposta em termos de período de onda e normalizadas em relação à altura de onda são definidas como Funções de Transferência ou RAO (do inglês *Response Amplitude Operator*) e têm larga aplicação na análise de estruturas

offshore. Estas respostas podem ser de esforços, deslocamentos ou quaisquer outras grandezas que se relacionem linearmente com a altura de onda à qual o sistema estrutural está submetido.

3.2.2 TEORIA DE FLUXO POTENCIAL

Para abordagem matemática de forma generalizada da caracterização cinemática e dinâmica do fluxo de um fluido considerado ideal, lança-se mão dos conceitos de função corrente Ψ e de função potencial Φ .

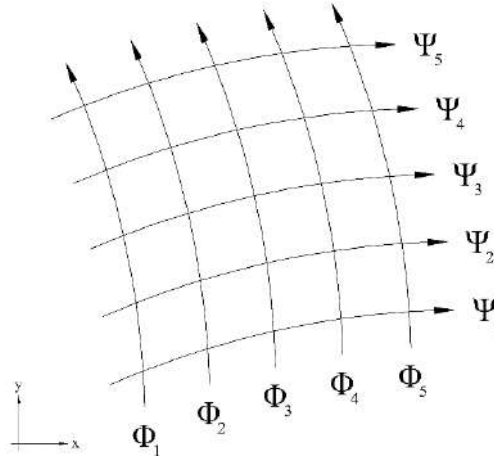


Figura 3.3 Linhas de corrente e equipotenciais de um fluxo genérico

Sendo um fluxo genérico representado pelas suas linhas de corrente Ψ_i e pelas suas linhas equipotenciais Φ_i conforme Figura 3.3, e sendo u e v as componentes x e y , respectivamente, da velocidade da partícula do fluido, a função corrente e a função potencial são tais que (3.6) e (3.7) são satisfeitas (CHAKRABARTI, 1987; JOURNÉE, MASSIE, 2001).

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (3.6)$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (3.7)$$

A função potencial é, portanto, a representação de um campo escalar. Logo, considerando $\mathbf{V}$ o vetor velocidade da partícula de fluido, percebe-se ele é o vetor gradiente de Φ , conforme (3.8).

$$\mathbf{V} = \nabla\Phi \quad (3.8)$$

A partir desta definição, parte-se para duas condições necessárias para o desenvolvimento da teoria potencial. A primeira delas é que o fluxo é irrotacional. Esta condição é satisfeita se o rotacional da velocidade do fluido é nulo (3.9).

$$\nabla \times \mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

Considerando, agora, a velocidade na forma geral com componentes nas três dimensões x , y e z , substituindo (3.8) do lado esquerdo de (3.9), obtém-se (3.10).

$$\nabla \times \mathbf{V} = \nabla \times \nabla\Phi = \nabla \times \begin{bmatrix} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \\ \frac{\partial\Phi}{\partial y} \\ \frac{\partial\Phi}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Atenta-se, aqui, para o fato de que a origem do sistema de eixos tridimensional encontra-se no nível de águas tranquilas (ou no nível médio da água), o eixo horizontal x usualmente segue a propagação da onda, o eixo vertical y aponta para cima e o eixo horizontal z segue o produto vetorial $\hat{i} \times \hat{j}$.

Desenvolvendo (3.10), tem-se (3.11) e a primeira condição é, portanto, atendida.

$$\nabla \times \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2\Phi}{\partial y\partial z} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial z\partial y} \\ \frac{\partial^2\Phi}{\partial z\partial x} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial z} \\ \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial y\partial x} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

A segunda condição dita que o fluxo é incompressível. Isto ocorre caso o divergente do vetor velocidade do fluido seja nulo (3.12).

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.12)$$

Substituindo (3.8) em (3.12), obtém-se (3.13).

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot \nabla\Phi = \nabla^2\Phi \quad (3.13)$$

Percebe-se, portanto, que a definição da função potencial de velocidade de um fluxo Φ é regida pela equação de Laplace (3.14).

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.14)$$

Esta é a equação de continuidade que deve ser obedecida por um fluxo potencial e, para encontrar soluções para a função potencial $\Phi(x, y, z, t)$, temos um Problema de Valor de Contorno. Sabe-se da equação de Laplace que suas soluções, chamadas de harmônicos, obedecem o princípio da superposição e podem, portanto, ser obtidas em termos de somatórios de harmônicos e/ou séries numéricas.

Fluxos potenciais livres (sem a presença de corpos submersos) de ondas em ambiente marinho com profundidade finita d são regidos usualmente por três condições de contorno: (i) condição do fundo do mar; (ii) condição cinemática da superfície livre da água; (iii) condição dinâmica da superfície livre da água (CHAKRABARTI, 1987).

A primeira condição considera que o fundo do oceano é plano e que a componente vertical de velocidade para todas as partículas de fluido em contato com o fundo é nula (3.14).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0; \quad y = -d \quad (3.15)$$

Já a condição de contorno cinemática para a superfície livre da água afirma que uma partícula fluída da superfície livre $y = \eta(x, z, t)$ se mantém na superfície livre para qualquer instante de tempo, e isto é expresso matematicamente por (3.16), onde u é a componente horizontal em x de velocidade da partícula de fluido e v , a horizontal em z .

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial z}; \quad y = \eta \quad (3.16)$$

Por fim, a condição de contorno dinâmica para a superfície livre da água se baseia na equação de Bernoulli e diz que a pressão atmosférica é constante em todos os pontos do espaço, como expresso em (3.17), onde ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade e $f(t)$ é uma função genérica da pressão em relação ao tempo.

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g \eta = f(t); \quad y = \eta \quad (3.17)$$

A solução deste PVC truncado na primeira ordem e com demais hipóteses simplificadoras é a própria Teoria linear de onda de Airy, mas a formulação geral do problema dá margem a considerações mais complexas, inclusive análises do comportamento do fluxo na presença de corpos de dimensões não negligenciáveis, conforme será visto nas seções seguintes.

3.3 FORÇAS HIDRODINÂMICAS INDUZIDAS POR ONDA

A caracterização cinemática e dinâmica do movimento de fluido marinho induzido por ondulações em sua superfície através da Teoria Linear de Onda apresentada no item 3.2.1 (ou quaisquer outras teorias consideradas adequadas para a situação de análise) não considera o efeito de um eventual corpo imerso neste fluido (GIRÓN, 2009).

Não obstante a complexidade da interação corpo-fluido em movimento ondulatório, há teorias disponíveis na literatura, baseadas em estudos analíticos, experimentos laboratoriais e em campo, que permitem o cálculo de forças induzidas por onda. Dentre elas, destacam-se formulações como a de Morison, a de Froude-Krylov e de Difração, sendo sua aplicabilidade dependente da forma e tamanho dos corpos imersos e o quanto isto perturba o movimento das partículas de fluido (CHAKRABARTI, 1987; GIRÓN, 2013).

3.3.1 FÓRMULA DE MORISON

Deduzida para corpos cilíndricos, a formulação de Morison para cálculo de forças hidrodinâmicas induzidas por ondas é recomendada para corpos com dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda λ . A expressão propõe duas componentes de força que são somadas linearmente, quais sejam: parcela inercial e parcela de arrasto (CHAKRABARTI, 1987).

Sendo D (em m) uma dimensão transversal característica para o corpo imerso, o item 2.4.1.1 da DNV-RP-H103 indica a condição expressa em (3.18) para considerar a aplicabilidade da formulação de Morison, expressa em (3.19).

$$D < \frac{\lambda}{5} \quad (3.18)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\dot{u} - \dot{x}| (\dot{u} - \dot{x}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_m \ddot{u} - \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_a \ddot{x} \quad (3.19)$$

Em (3.19), ρ_w é a massa específica do fluido (em m/s^3), a parcela de força referente ao arrasto é aquela contendo o coeficiente adimensional de arrasto C_d e proporcional ao quadrado da velocidade relativa fluido-estrutura, calculada pela diferença entre a velocidade da partícula de fluido $\dot{u}$ e a da estrutura $\dot{x}$ (ambos em m/s).

As parcelas inerciais da equação de Morison são proporcionais às acelerações da partícula de fluido $\ddot{u}$ e da estrutura $\ddot{x}$ (ambos em m/s^2). A primeira se relaciona com o coeficiente adimensional de massa (ou de inércia) C_m , enquanto a segunda, com o coeficiente adimensional de massa adicionada C_a , tomado comumente como (3.20).

$$C_a = C_m - 1 \quad (3.20)$$

Pelo caráter semiempírico da expressão de Morison, os coeficientes adimensionais de arrasto, de inércia e de massa adicionada são calibrados experimentalmente. Normas e recomendações técnicas como a DNV-RP-H103, todavia, apresentam tabelas para determinação destes coeficientes a partir de informações geométricas da estrutura e de direção do movimento.

3.3.2 TEORIA DE FROUDE-KRYLOV

Segundo CHAKRABARTI, 1987, a teoria de Froude-Krylov é aplicável para corpos relativamente pequenos em que as forças inerciais são mais importantes que as de arrasto. Seu cálculo é baseado no campo de pressões calculado por teoria de onda, considerando-a agindo em direção normal à superfície do corpo em cada ponto (GIRÓN, 2013).

As expressões (3.21) e (3.22), portanto, são utilizadas para calcular as componentes horizontal e vertical da força induzida por onda sobre o corpo, respectivamente. Trata-se da integração na superfície submersa S do campo de pressões dinâmicas de onda p da teoria de onda, em que n_x e n_y são as componentes horizontal e vertical, respectivamente, do vetor normal a cada porção infinitesimal de superfície dS .

$$F_X = C_H \iint_S p n_X dS \quad (3.21)$$

$$F_Y = C_V \iint_S p n_Y dS \quad (3.22)$$

Os coeficientes de força horizontal C_H e vertical C_V são determinados empiricamente, mas não são os mesmos de Morison. Existem formulações desenvolvidas a partir de (3.21) e (3.22) para superfícies de sólidos comuns disponíveis na literatura, como, por exemplo, em CHAKRABARTI, 1987, que apresenta deduções para cilindros, semicilindros, esferas, semiesferas, paralelepípedos e placa circular.

3.3.3 TEORIA DE DIFRAÇÃO-RADIAÇÃO

Para estruturas de grande porte em relação ao comprimento de onda, os efeitos de difração devem ser levados em conta quando do cálculo das forças sobre o corpo, o que não acontece para as formulações apresentadas anteriormente. Para isto, remonta-se à Teoria do Potencial, e as condições de contorno para o fundo do mar, cinemática e dinâmica para a superfície livre da água assumem as formas de (3.23), (3.24) e (3.25), respectivamente (CHAKRABARTI, 1987).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0; \quad y = -d \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial z} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0; \quad y = \eta \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = g\eta + \frac{1}{2}\rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0; \quad y = \eta \quad (3.25)$$

Para além destas, são acrescentadas as condições de contorno: (i) para as partículas de fluido na superfície do corpo, sendo (3.26) para a consideração do corpo em repouso e (3.27) para o corpo em movimento com velocidade V_n ; (ii) condição de radiação de Sommerfeld (3.28).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0; \quad -d \leq y \leq \eta \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n; \quad -d \leq y \leq \eta \quad (3.27)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial}{\partial R} \pm i\lambda \right) \Phi_s = 0 \quad (3.28)$$

As condições (3.26) e (3.27) indicam que a componente de velocidade da partícula de fluido na direção normal à superfície submersa do corpo n deve ser igual à do próprio corpo, quer esteja em repouso ou em movimento, respectivamente. Já (3.28) indica que, para uma distância radial R suficientemente grande do centro do corpo, os efeitos de difração, representados pelo potencial Φ_s , desaparecem. Nesta expressão, $i = \sqrt{-1}$ e λ são autovalores.



Figura 3.4 Movimentos de uma embarcação (RONCETTI, 2014)

O potencial de velocidade Φ , conforme a propriedade de superposição de efeitos discutida no item 3.2.2, pode ser expresso por (3.29), em parcelas de potencial de velocidade devido às ondas incidentes Φ_0 , devido às ondas difratadas Φ_s e devido às ondas irradiadas pelo movimentos do corpo submerso Φ_{rj} , onde $j = 1, 2, \dots, 6$ refere-se aos graus de liberdade de corpo, sendo as translações (*surge*, *sway* e *heave*) e as rotações (*roll*, *pitch* e *yaw*) para uma embarcação ilustrados na Figura 3.4 (JACOB, 2006).

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_s + \sum_{j=1}^6 \Phi_{rj} \quad (3.29)$$

As soluções para efeito de onda incidente Φ_0 podem ser obtidas através das teorias de onda baseadas na condição de não perturbação do fluxo por parte de um eventual corpo submerso, como a de Airy, apresentada no item 3.2.1.

Considerando apenas o efeito de difração Φ_s e a condição de contorno homogênea para a superfície do corpo, a expressão (3.26) é reescrita como (3.30) e soluções podem ser encontradas para a parcela de ondas incidentes do potencial de velocidades.

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_s}{\partial n}; \quad -d \leq y \leq \eta \quad (3.30)$$

Já para o potencial irradiado Φ_{rj} devido ao movimento do corpo em cada direção j , considera-se que o fluido está em repouso e utiliza-se da condição de contorno (3.27), que assume formas compatíveis para cada grau de liberdade. Neste caso, é importante destacar que as expressões devem ser proporcionais não só à velocidade, mas também a acelerações do corpo – considerando, respectivamente, efeitos de amortecimento e de inércia (inclusive de massa adicionada) neste movimento (JACOB, 2006).

Devido à complexidade do PVC, as soluções de potencial de velocidade são altamente não-lineares e, portanto, normalmente apresentadas em formas de séries como (3.31), onde ε é o parâmetro de perturbação definido por (3.32).

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (3.31)$$

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad (3.32)$$

Expandindo com série de Taylor até a segunda ordem e utilizando-se da equação de Bernoulli para cálculo da pressão dinâmica do fluido, chega-se às expressões (3.33) e (3.34) para as respectivas ordens.

$$p_1 = \rho \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \quad (3.33)$$

$$p_2 = \rho \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi_1)^2 \quad (3.34)$$

De posse destes resultados, o cálculo da força na superfície submersa do corpo a partir da Teoria de Difração é efetuado pela integração da expressão (3.35), em que F_{nj} é a força de n -ésima ordem na j -ésima direção, n_j é a normal na j -ésima direção e S é a superfície submersa de interesse (CHAKRABARTI, 1987).

$$F_{nj} = \varepsilon^n \iint_S p_n n_j dS \quad (3.35)$$

Há *softwares* disponíveis no mercado que obtém resultados para modelos numéricos baseados na Teoria da Difração, dentre os quais o WAMIT, utilizado comumente para obter RAOs dos movimentos de uma unidade flutuante na frequência da onda incidente de amplitude unitária (GIRÓN, 2013).

3.4 ONDAS IRREGULARES E REPRESENTAÇÃO ESPECTRAL

As teorias apresentadas nos itens anteriores partem da premissa de que o movimento ondulatório do fluido marinho pode ser descrito por um harmônico simples. De fato, há metodologias de projetos de estruturas *offshore* que adotam uma onda regular para fins de dimensionamento, usualmente caracterizada através de uma análise de extremos estatísticos em termos de altura de onda (CHAKRABARTI, 2005).

Porém, devido à natureza aleatória dos fenômenos naturais envolvidos, a consideração de um único harmônico é uma simplificação pouco realista para as ondas irregulares observadas em ambiente marinho. Para efeitos matemáticos, entretanto, uma onda irregular pode ser expressa como o somatório de uma infinidade de ondas regulares de diferentes períodos, amplitudes e com fases aleatórias entre elas, conforme ilustrado na Figura 3.5 (BATALHA, 2009).

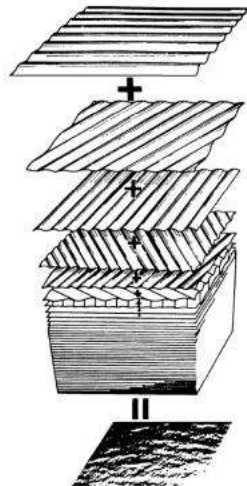


Figura 3.5 Superposição de ondas regulares (JOURNÉE, MASSIE, 2001)

Ademais, para caracterização das ondas oceânicas irregulares, se faz necessário definir o conceito de Estado de Mar, que consiste num período de curta duração, em geral 3h, durante o qual se assume que os processos aleatórios que o caracterizam (como elevações da superfície marinha, direção e velocidade de vento, por exemplo) são estacionários. Dessa forma, é possível afirmar que os parâmetros estatísticos obtidos de medições de campo realizadas para um determinado estado de mar são de um evento ambiental de curto prazo, o que simplifica sua caracterização (BATALHA, 2009).

Os parâmetros utilizados para representar um estado de mar são a altura significativa de onda H_s (em m) e o período de pico T_p ou período de cruzamento zero T_z (em s), considerando as hipóteses simplificadoras da própria definição de estado de mar. Ambos determinados a partir de análises sobre as medições realizadas *in loco*.

Se um estado de mar descreve uma onda irregular e esta onda irregular pode ser representada por suas componentes harmônicas de diferentes amplitudes para cada período (ou frequência) no domínio do tempo, então também é possível representar este mesmo estado de mar através de um espectro de densidade de energia para as frequências de onda que o compõem e assim fornecer mais informações a respeito do comportamento da superfície marinha durante o estado de mar correspondente, conforme ilustrado na Figura 3.6.

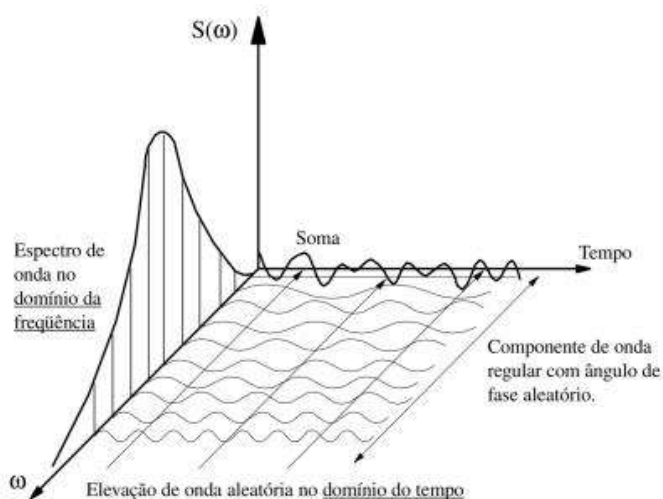


Figura 3.6 Representação de onda irregular no domínio do tempo e no domínio da frequência (DANTAS, 2004)

De acordo com JOURNÉE, MASSIE, 2001, o estudo em termos de frequência da superposição da série de ondas harmônicas que compõem uma determinada onda irregular é baseado em análise de série de Fourier, no teor da equação (3.36) – onde a elevação da onda irregular $\eta(t)$ (em m) depende da amplitude de cada componente de onda η_{a_n} (em m) e de sua respectiva frequência angular ω_n (em rad/s), número de onda k_n (em rad/m) e ângulo de fase aleatório ϕ_n (em rad).

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \eta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \phi_n) \quad (3.36)$$

Dado um espectro de onda $S_\eta(\omega)$, portanto, a expressão (3.37) relaciona a área do gráfico para uma faixa de frequência $\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n$ com a amplitude η_{a_n} da respectiva componente de onda na frequência ω da série de Fourier. Da mesma forma, dadas as amplitudes $\eta_{a_n}(\omega)$ e definindo as faixas de frequência, é possível construir o espectro de energia de onda. Se $\Delta\omega \rightarrow 0$, a definição de espectro de energia de onda torna-se (3.38) (JOURNÉE, MASSIE, 2001).

$$S_\eta(\omega_n)\Delta\omega = \sum_{\omega_n}^{\omega_n+\Delta\omega} \frac{1}{2} \eta_{a_n}^2(\omega) \quad (3.37)$$

$$S_\eta(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2} \eta_{a_n}^2 \quad (3.38)$$

A partir das propriedades observadas das ondas oceânicas e, portanto, de natureza empírica, a comunidade científica vem desenvolvendo formulações matemáticas padronizadas para representação dos espectros de energia de onda, de modo que seja possível obter a forma do espectro com base em poucas variáveis medidas em campo, em especial a altura significativa de onda H_s e período de pico T_p (ou de cruzamento zero T_z) já citados (JOURNÉE, MASSIE, 2001; CHAKRABARTI, 2005).

No escopo deste trabalho, destaca-se o espectro JONSWAP (da sigla em inglês *Joint North Sea Wave Project*), resultado do programa de medições no Mar do Norte realizado entre os anos de 1968 e 1969 e apresentado nos termos de (3.39), em que g é a aceleração da gravidade (em m/s²), a frequência angular de pico ω_p (em rad/s) é dada

por (3.40), o parâmetro de pico γ é dado por (3.41), a constante modificada de Phillips $\bar{\alpha}$ é dada por (3.42) e o fator de forma σ é dado por (3.43) (CHAKRABARTI, 2005).

$$S_{\eta}(\omega) = \bar{\alpha} g^2 \omega^{-5} e^{-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \gamma e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right)} \quad (3.39)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (3.40)$$

$$\gamma = \begin{cases} 5, & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \\ e^{5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}}, & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \end{cases} \quad (3.41)$$

$$\bar{\alpha} = 5,058 \left(\frac{H_s}{T_p^2} \right)^2 (1 - 0,287 \ln \gamma) \quad (3.42)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07, & \omega \leq \omega_p \\ 0,09, & \omega > \omega_p \end{cases} \quad (3.43)$$

Para representação de mar irregular para a Bacia de Campos, a Petrobras adota o espectro de JONSWAP modificado conforme apresentado em (3.44) em função da frequência f (em Hz), sendo a frequência de pico f_p (em Hz) definida em (3.45), o parâmetro de pico γ calculado por (3.46) e o fator de forma σ como (3.47) (RONCETTI, 2014).

$$S_{\eta}(f) = \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left(\frac{f_p}{f} \right)^5 (1 - 0,287 \ln \gamma) e^{-1,25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4}} \gamma e^{-\left(\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right)} \quad (3.44)$$

$$f_p = \frac{1}{T_p} \quad (3.45)$$

$$\gamma = 6,4 T_p^{-0,491} \quad (3.46)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07, & f \leq f_p \\ 0,09, & f > f_p \end{cases} \quad (3.47)$$

A relação entre o período médio de cruzamento zero T_z e o período de pico T_p pode ser dado por (3.48) (BATALHA, 2009). A Figura 3.7 apresenta um exemplo de espectro modificado de JONSWAP para o estado de mar com $H_s = 1,5\text{m}$ e $T_p = 5\text{s}$.

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10,89 + \gamma}} \quad (3.48)$$

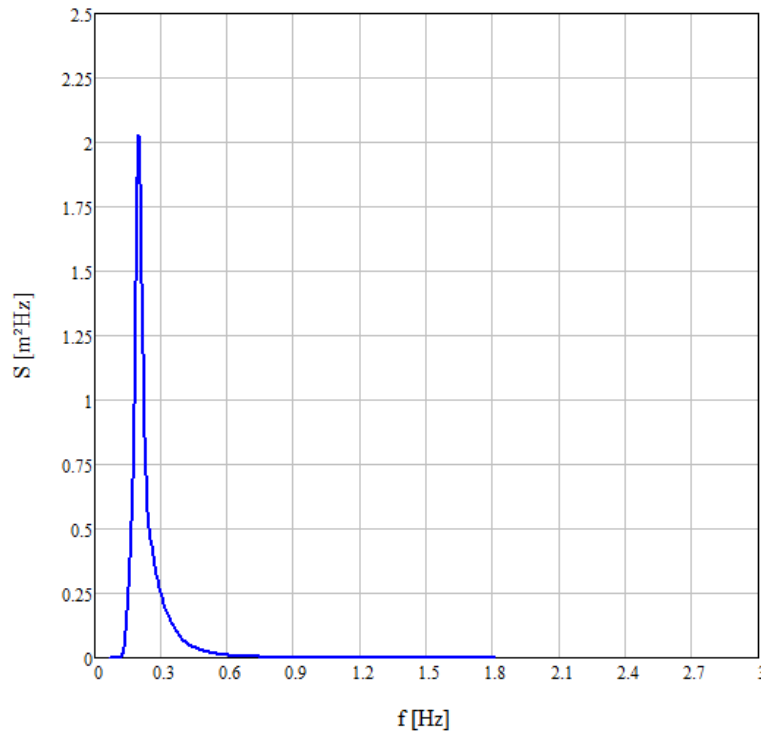


Figura 3.7 Exemplo de espectro de JONSWAP modificado para Bacia de Campos

3.5 EFEITOS DINÂMICOS SOBRE ESTRUTURAS

Esforços induzidos por onda, como visto, são modelados matematicamente por séries harmônicas e, portanto, estão associados a efeitos cíclicos nos corpos em que atuam. Para estudar movimentos e esforços de caráter repetitivo num intervalo de tempo – ditos vibratórios ou oscilatórios, a teoria da vibração se apresenta como arcabouço teórico adequado (RAO, 2010).

A depender da direção (ou direções) de movimento de interesse para cada caso real, podem ser adotados modelos físicos mais ou menos complexos para análise de vibrações, mas todos eles se baseiam no caso com um grau de liberdade a ser tratado nesta seção (CHAKRABARTI, 2005).

Segundo RAO, 2010, um sistema vibratório em geral é composto por um meio de armazenamento de energia potencial (mola/elasticidade), um meio de armazenamento de

energia cinética (massa/inércia) e um meio de dissipação de energia (amortecedor). A vibração envolve sucessivas transformações de energia potencial para cinética e vice-versa. Se o sistema for amortecido, cada ciclo de transformação também conta com certa dissipação de energia.

3.5.1 SISTEMAS NÃO-AMORTECIDOS

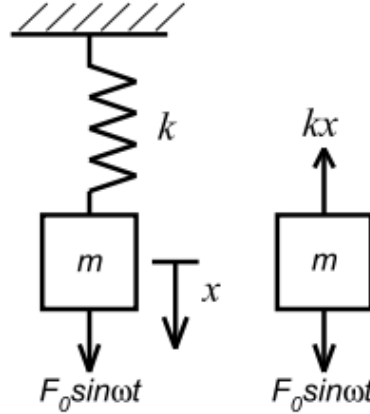


Figura 3.8 Sistema massa-mola (CHAKRABARTI, 2005)

A Figura 3.8 apresenta um sistema discreto de vibração forçada, linear, não-amortecida, com um grau de liberdade (translação na direção x): o sistema massa-mola, em que m é a massa do corpo em movimento, k é a constante de mola e a força atuante é definida por uma função harmônica de amplitude F_0 e frequência ω (de forma equivalente àquela obtida pela teoria linear de onda). Neste caso, a equação de movimento desse sistema pode ser escrita como (3.49) (CHAKRABARTI, 2005; RAO, 2010).

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (3.49)$$

A solução geral dessa equação é dada em (3.50), onde x_0 e $\dot{x}_0$ são as condições iniciais de posição e a velocidade, respectivamente (RAO, 2010).

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega_n t + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \right) \sin \omega_n t + \left(\frac{F_0}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega t \quad (3.50)$$

Um conceito importante que surge desta análise é o de frequência natural ω_n do sistema. Conforme RAO, 2010, esta é a frequência em que um sistema vibra por si só

após uma perturbação inicial. Para o sistema apresentado, a frequência natural é dada por (3.51). Além disso, vale ressaltar que, para um elemento de barra de comprimento L , área de seção transversal A e módulo de Young E , a rigidez k de mola equivalente é dada por (3.52). Este resultado é importante para as análises realizadas neste trabalho.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.51)$$

$$k = \frac{EA}{L} \quad (3.52)$$

Ademais, define-se a deflexão estática δ_{st} por (3.53). A partir dela é possível calcular o fator de amplificação dinâmica X/δ_{st} por (3.54).

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k} \quad (3.53)$$

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (3.54)$$

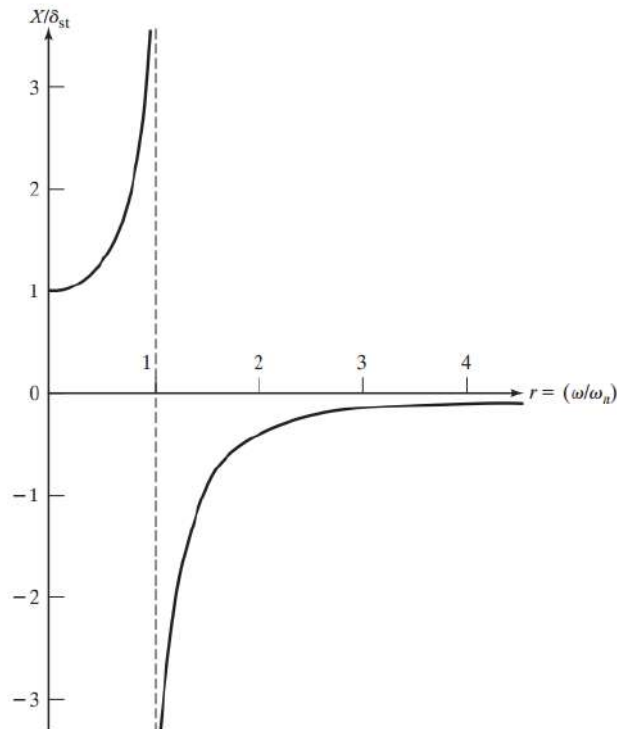


Figura 3.9 Amplificação dinâmica de um sistema não-amortecido (RAO, 2010)

O gráfico da Figura 3.9 apresenta, portanto, o comportamento do fator de amplificação dinâmica X/δ_{st} em função da relação ω/ω_n entre a frequência de excitação e a natural do sistema. É possível perceber que, à medida que a frequência de excitação se aproxima da natural, a amplitude de movimento tende a infinito – esse fenômeno é chamado de ressonância e tem consequências muito danosas para sistemas pouco amortecidos.

3.5.2 SISTEMAS AMORTECIDOS

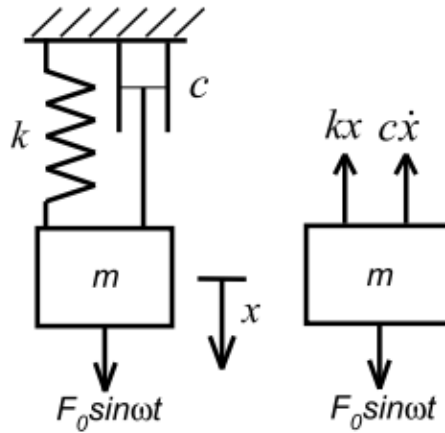


Figura 3.10 Sistema massa-mola-amortecedor (CHAKRABARTI, 2005)

A Figura 3.10 apresenta um sistema discreto de vibração forçada, linear, amortecida, com um grau de liberdade (translação na direção x): o sistema massa-mola-amortecedor. Existem vários modelos para representar a dissipação de energia através de amortecimento, sendo o mais simples deles o modelo de amortecimento viscoso, em que vale a relação linear (3.55) entre a força de amortecimento F_d e a velocidade $\dot{x}$ através do coeficiente de amortecimento c (CHAKRABARTI, 2005).

$$F_d = c\dot{x} \quad (3.55)$$

Com base nisso, a equação de movimento deste sistema pode ser escrita como (3.56). A solução particular esperada para ela assume, portanto, a forma (3.57), em que (3.58) indica a amplitude X e (3.59), o ângulo de fase Φ de resposta (RAO, 2010).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (3.56)$$

$$x_p(t) = X \cos(\omega t - \Phi) \quad (3.57)$$

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \quad (3.58)$$

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right) \quad (3.59)$$

Da solução homogênea de (3.56) surge a definição de constante de amortecimento crítico c_c (3.60) e de taxa de amortecimento ζ (3.61). A forma desta solução é (3.62), em que as constantes C_1 e C_2 dependem das condições iniciais e se o sistema é subamortecido ($\zeta < 1$), criticamente amortecido ($\zeta = 1$) ou superamortecido ($\zeta > 1$).

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (3.60)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (3.61)$$

$$x_h(t) = C_1 e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + C_2 e^{(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \quad (3.62)$$

Usando os conceitos apresentados, a taxa de frequência r , calculada por (3.63), pode ser usada para expressar a taxa de amplitude M como (3.64) e o ângulo de fase como (3.65).

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3.63)$$

$$M = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3.64)$$

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1 - r^2}\right) \quad (3.65)$$

O gráfico da Figura 3.11 indica, portanto, os diversos comportamentos que a amplitude de resposta de movimento do sistema assume em função da frequência de excitação e do tipo de amortecimento a que está submetido. É possível observar que o pico da taxa de amplitude para sistemas subamortecidos ocorre para esforços com frequência menor que a natural do sistema, atenuando-se em termos de magnitude à medida que o sistema é mais amortecido.

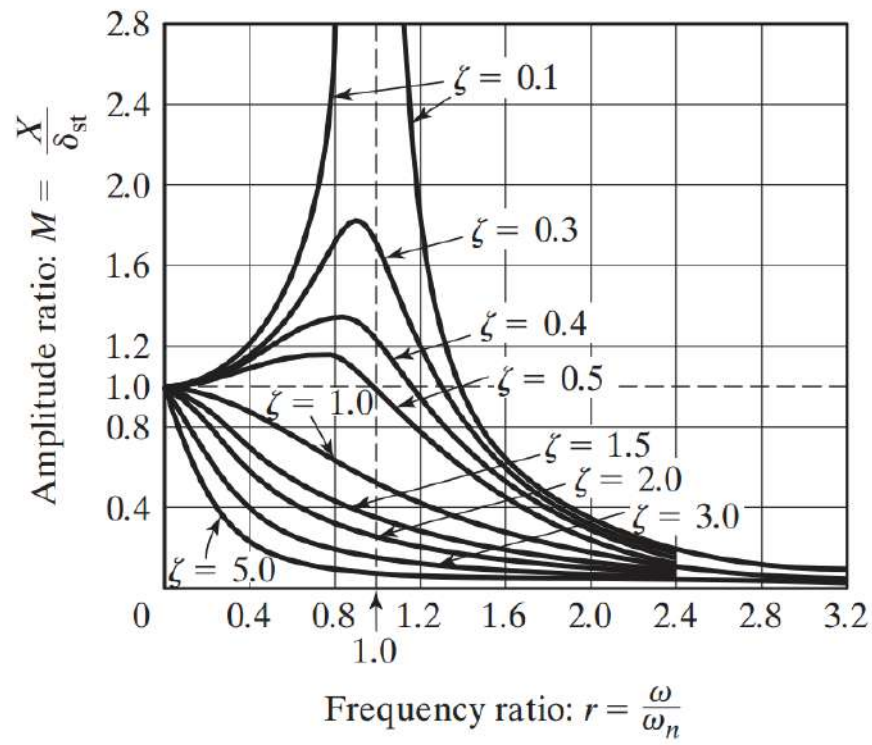


Figura 3.11 Amplificação dinâmica de um sistema amortecido (RAO, 2010)

4 INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

À medida em que se exploram águas cada vez mais profundas para produção de petróleo, a instalação dos equipamentos e das estruturas submarinos para a composição deste sistema enfrenta novos desafios.

Portanto, a execução dessa etapa demanda projeto, planejamento e coordenação cuidadosos, tendo em vista atender às restrições técnicas vinculadas principalmente aos seguintes aspectos destacados por BAI, BAI, 2010 e OSHIRO, 2012:

- (i) Tecnologia de instalação – embarcações, guinchos, guindastes e/ou outros elementos do sistema de içamento, sua capacidade de carga considerando efeitos de amplificação dinâmica;
- (ii) Controle de carregamento e posição – compensadores de movimentos, aproamento, localização, comunicação;
- (iii) Efeitos do oceano e requisitos de janela operacional – condições ambientais, seus efeitos na tecnologia utilizada e consequente velocidade requerida para execução das tarefas e cumprimento da janela operacional.

Assim, ao longo da breve história da engenharia submarina, diversos são os métodos de instalação utilizados, estudados, desenvolvidos e patenteados. As seções seguintes descrevem os registros encontrados na bibliografia consultada.

4.1 MÉTODO VERTICAL

4.1.1 VIA CABO

Método convencional utilizado desde a primeira geração de equipamentos submarinos de exploração *offshore* – quais sejam os de pequeno porte e em águas pouco profundas. É caracterizado pela movimentação lenta do equipamento desde o convés da

embarcação até as coordenadas e aproamento de instalação em solo marinho por meio de guindaste ou guincho com cabo tipicamente de aço, como ilustrado na Figura 4.1.

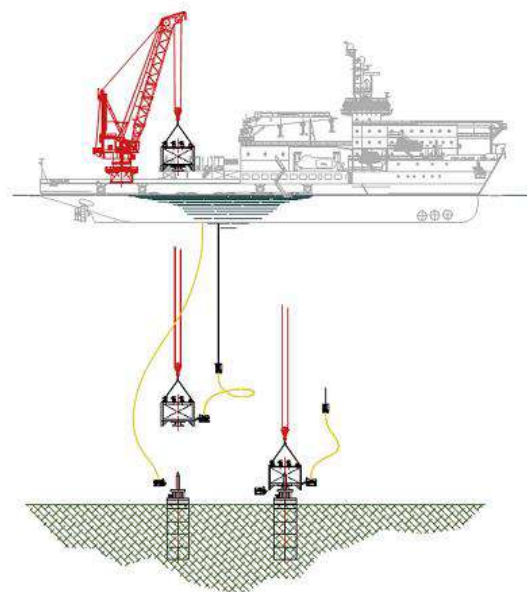


Figura 4.1 Método de instalação vertical via cabo (BAI, BAI, 2010)

As embarcações comumente utilizadas para este fim são: ou (i) rebocadores AHTS com *A-frame*, como o da Figura 4.2; ou (ii) balsas-guindaste, como a BGL-1 ilustrada na Figura 4.3.



Figura 4.2 AHTS com A-frame (RIBEIRO, 2008)

Em águas profundas e ultraprofundas, as limitações mais relevantes para este método referem-se ao comprometimento da capacidade de carga do sistema de içamento devido a: (i) peso-próprio elevado do cabo de aço; (ii) efeitos de amplificação dinâmica devido à ressonância axial do sistema cabo-equipamento com o movimento vertical da

embarcação causado pelo efeito de ondas na superfície marinha, conforme abordado no capítulo 5 deste trabalho.



Figura 4.3 Balsa-guindaste BGL-1 (RIBEIRO, 2008)

4.1.2 COM ESLINGAS



Figura 4.4 Método de instalação vertical com eslingas e spreader bar (RIBEIRO, 2008)

No intuito de minimizar efeitos de ressonância observados no método de instalação vertical convencional via cabo, a conexão do sistema de içamento com o equipamento a ser instalado é feita através de eslingas e *spreader bar*, conforme Figura 4.4.

A unidade flutuante usada para suporte deste tipo de operação é balsa-guindaste. Esta precisa ser equipada com cabideiro – estrutura fixa de apoio para içamento. O equipamento, içado por uma placa de conexão e *spreader bar*, é apoiado no cabideiro para a instalação dos tramos de eslinga (RIBEIRO, 2008).

O exemplo de aplicação deste método vem da instalação de um *manifold* pesando 420 toneladas, numa profundidade de 620 metros no campo de Albacora (Bacia de

Campos) em 1995 pela Petrobras, ilustrado na Figura 4.5. A operação mostrou-se lenta e complexa, o que tornou o método pouco utilizado (RIBEIRO, 2008).



Figura 4.5 Instalação de manifold com eslinga em Albacora (RIBEIRO, 2008)

4.1.3 VIA RISER DE PERFURAÇÃO

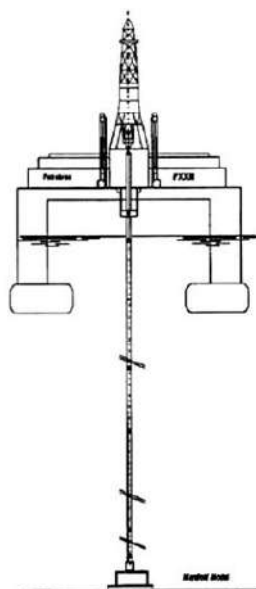


Figura 4.6 Método de instalação vertical via riser de perfuração (BAI, BAI, 2010)

O equipamento é conectado à coluna do *riser* de perfuração da embarcação, tipicamente uma plataforma-sonda semissubmersível, e descido ao leito marinho nas coordenadas e azimutes de projeto, conforme esquematizado na Figura 4.6. Este método foi utilizado na instalação de um *manifold* pesando 240 toneladas, numa profundidade de 940 metros no campo de Marlim em 2001 (RIBEIRO, 2008).

Previamente, uma balsa de serviço é utilizada para transportar o equipamento de modo que este fique sob o alinhamento da abertura no casco da plataforma para acesso ao mar (*moon-pool*), por onde a coluna do *riser* atravessa para que seja feita a conexão com o equipamento, que deve ser dotado de um ponto (*hub*) central para tanto, observado na Figura 4.7.



Figura 4.7 Manifold conectado ao riser de perfuração de uma plataforma semissubmersível (RIBEIRO, 2008)

É uma modalidade de instalação de equipamentos que enfrenta as seguintes limitações: (i) capacidade e profundidade da coluna do *riser* de perfuração da embarcação; (ii) pouca disponibilidade de plataformas de perfuração para realização de atividades não-fim; (iii) custo mais elevado da diária de trabalho de uma plataforma de perfuração relativamente a embarcações do tipo AHTS e balsa-guindaste.

4.1.4 COM COMPENSADORES DE *HEAVE*

De acordo com BAI, BAI, 2010, o uso de compensadores de movimento em instalações de equipamentos submarinos, em especial compensadores de movimento vertical (*heave*), é uma opção técnica que visa: (i) minimizar os efeitos de amplificação dinâmica durante a descida do equipamento; (ii) evitar danos e situações instáveis na aproximação do equipamento ao leito marinho; (iii) auxiliar as operações assistidas por ROV. Este método está esquematizado na Figura 4.8.

Os compensadores são instalados junto ao sistema de içamento de rebocadores ou balsas-guindaste e podem ser categorizados em: sistemas passivos e sistemas ativos. Desenhos esquemáticos de sistemas passivos e ativos estão ilustrados na Figura 4.9 e na Figura 4.11, respectivamente.

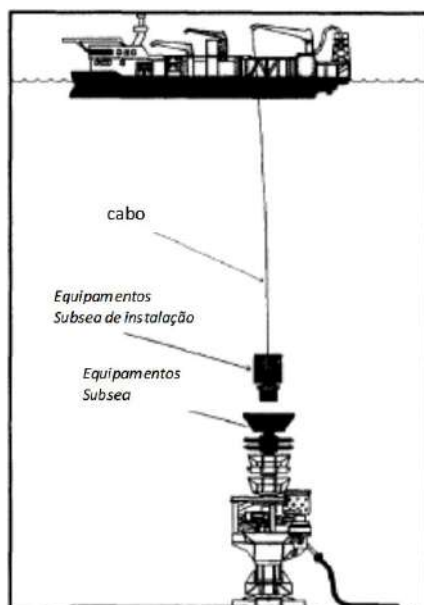


Figura 4.8 Método de instalação vertical com compensador de heave (OSHIRO, 2012)

Compensadores passivos de *heave* são compostos por uma mola pneumática, que responde ao movimento de um pistão, e por um reservatório hidropneumático (acumulador) e estão representadas na Figura 4.10.

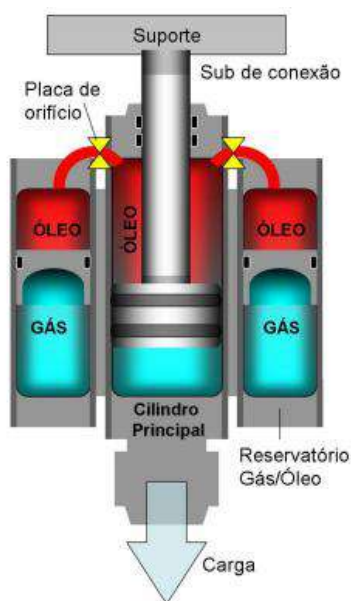


Figura 4.9 Desenho esquemático de sistema passivo de compensação de heave (SOUZA, 2009)

Seu funcionamento baseia-se na variação da força exercida sobre si: a resistência do gás à compressão e à expansão exercidas pelo pistão conferindo rigidez ao sistema, enquanto o escoamento do fluido proveniente do acumulador o amortece viscosamente.

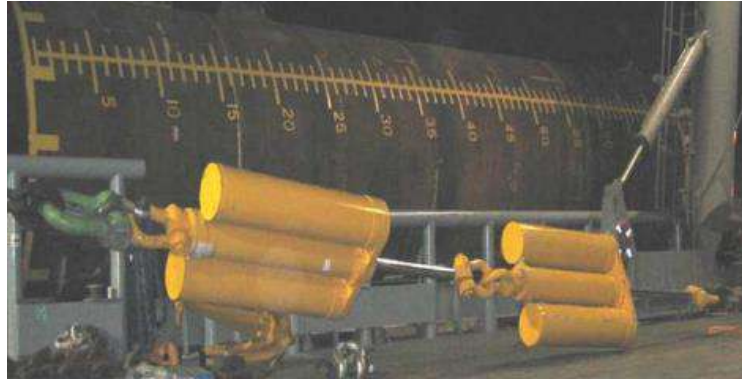


Figura 4.10 Compensador passivo de heave (SOUZA, 2009)

Compensadores ativos de *heave* são equipamentos sofisticados que atuam fornecendo ou recolhendo cabo do sistema de içamento, de acordo com o processamento computacional de informações advindas de sensores de movimento da embarcação.

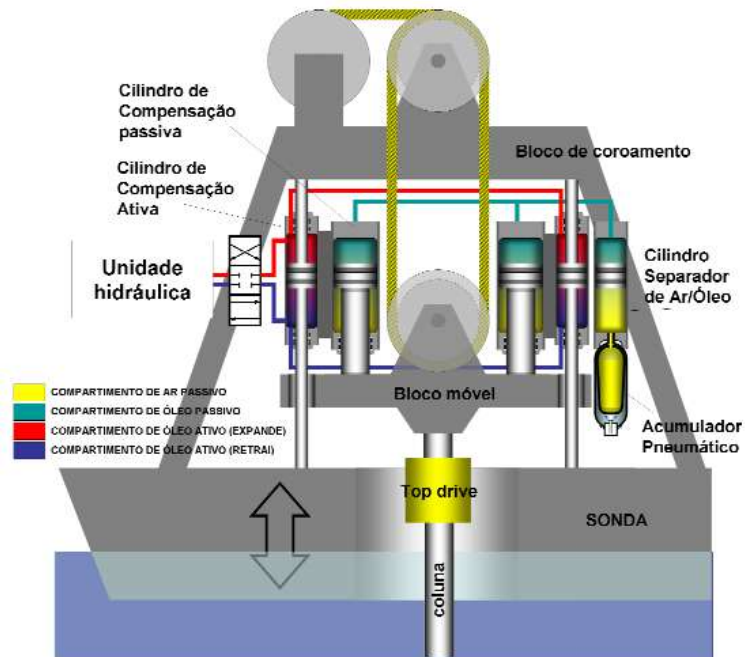


Figura 4.11 Desenho esquemático de sistema ativo de compensação de heave (SOUZA, 2009)

Conforme MELLO, 2004, sistemas ativos de compensação de *heave* são normalmente são ligados em paralelo a sistemas passivos para contingência em caso de falha e minimização da energia requerida para ação do sistema ativo. O dado de entrada principal destes sistemas é a variação da posição da embarcação – e não a variação de força sobre o sistema, conforme ocorre nos passivos.

Numa aplicação prática deste método, MELLO, 2004, cita o caso do navio de instalação *Normand Progress*, em que foi instalado um sistema ativo e passivo integrados que, por sua vez, havia modelado e simulado numericamente. Os resultados previstos nos estudos foram verificados nas operações após a instalação do sistema.

As limitações para uso de sistemas compensadores de *heave* em instalações de equipamentos submarinos são referentes a: (i) disponibilidade de embarcações equipadas com o sistema; (ii) custo de instalação e manutenção; (iii) capacidade de carga, probabilidade de falha e demais complicadores operacionais da adição de um equipamento intermediário entre o sistema de içamento e o equipamento submarino principal a ser instalado.

4.2 MÉTODO DA ROLDANA

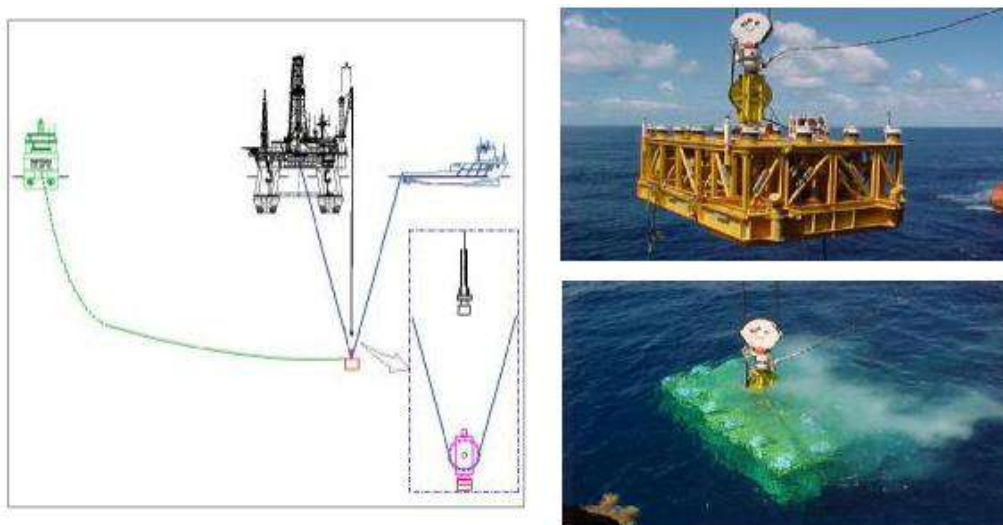


Figura 4.12 Método de instalação da roldana (RIBEIRO, 2008)

Neste método, uma plataforma semissubmersível e duas embarcações do tipo AHTS operam de maneira conjunta na descida do equipamento ao leito marinho com a ajuda de uma ferramenta de instalação – a roldana, observável na Figura 4.12.

Primeiramente, o equipamento é içado do convés da semissubmersível por meio de seu guindaste e descido até uma certa profundidade, onde a carga é transferida para a roldana presa a um cabo de aço ligado à semissubmersível e ao guincho de popa do primeiro AHTS.

Com a suportaçoão da carga feita pelo cabo de aço ligado à semissubmersível e ao AHTS (assumindo um formato em V), o equipamento é descido até o leito marinho, contando também com a ligação lateral de um cabo de aço controlado pelo segundo AHTS, com a finalidade de evitar rotações excessivas do sistema e garantir sua correta orientação e aproamento (NEVES, 2005).

O método da roldana foi utilizado para o primeiro *manifold* do campo de Roncador, que pesava 175 toneladas, instalado a uma profundidade de 1885 metros no ano de 2002 (RIBEIRO, 2008).

Devido à quantidade e tipo das embarcações utilizadas por esse método, bem como os cabos, equipamentos e procedimentos empregados, as seguintes limitações podem ser destacadas: (i) custo e disponibilidade de plataformas semissubmersíveis, de forma semelhante ao método vertical por *riser* de perfuração; (ii) embora atenuado, ainda há efeitos de ressonância importantes a serem considerados em determinada profundidade; (iii) capacidade de carga do sistema de içamento empregado.

4.3 MÉTODO PENDULAR

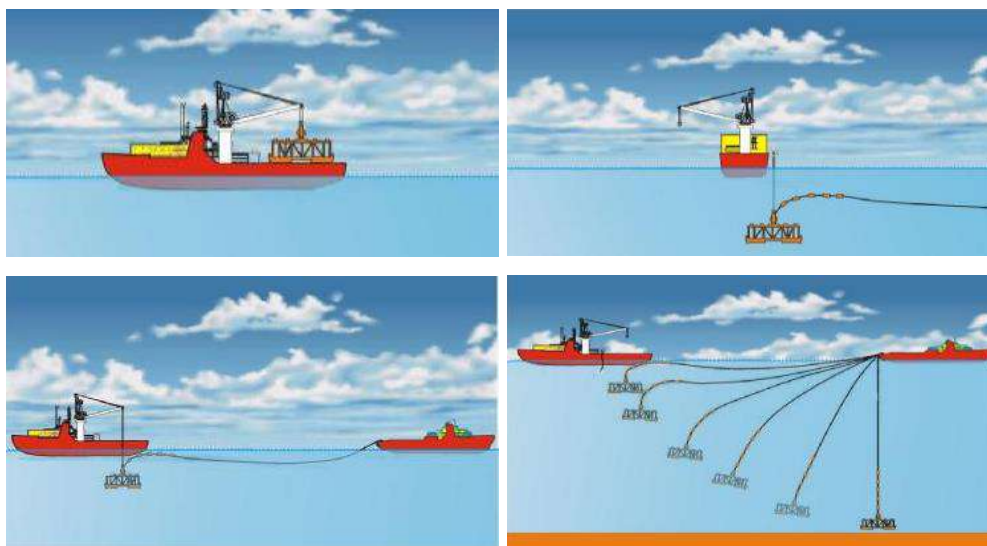


Figura 4.13 Método de instalação pendular (RIBEIRO, 2008)

O método pendular de instalação de equipamentos foi desenvolvido com o objetivo de contornar algumas das limitações recorrentes em outros métodos de instalação ao serem adotados em águas profundas e ultraprofundas, quais sejam: (i) peso-próprio do

cabo de aço; (ii) ressonância axial do sistema cabo-equipamento; (iii) custo e disponibilidade de embarcações ou equipamentos especiais (RIBEIRO, 2008).

Este é um método patenteado no Brasil, de titularidade da PETROBRAS (MACHADO, 2005), e foi desenvolvido diante da necessidade de instalação do segundo e do terceiro *manifold* do campo de Roncador, numa profundidade de 1900 metros.

O método requer, a princípio, o uso de duas embarcações, ditas de transporte e de instalação (RIBEIRO, 2008). A primeira deve contar com espaço em convés e guindaste com capacidade de içamento compatível com o equipamento a ser instalado. Da segunda, necessita-se que seja dotada de guincho/rolo de popa também com capacidade compatível com o equipamento.

O procedimento inicia com o transporte do equipamento até a locação de instalação, onde então um cabo de poliéster é conectado a uma placa triangular por uma extremidade e, pela outra, ao guincho da embarcação de instalação. A placa triangular permite a ligação simultânea do equipamento ao cabo de poliéster e ao sistema de içamento da embarcação de transporte.

Assim, o equipamento é içado pelo guindaste da embarcação de transporte e descido a uma profundidade determinada e segura, onde é mantido em posição para lançamento, com a embarcação de instalação distanciada em cerca de 95% do comprimento do cabo sintético que a liga à placa triangular sobre o equipamento.

Nestas condições, é efetuada a operação de desconexão entre a placa triangular sobre o equipamento e o sistema de içamento da embarcação de transporte, de modo que o equipamento passa a descrever um movimento que, apesar do nome do método, não é pendular devido ao amortecimento hidrodinâmico ao qual o sistema é sujeito durante a descida (NEVES, 2005).

O equipamento, portanto, estabiliza-se próximo ao leito marinho, e a última parcela de profundidade é vencida pelo sistema de içamento da embarcação de instalação com uso de um trecho de amarras, para que não haja risco de abrasão entre o cabo de poliéster e o rolo de popa (RIBEIRO, 2008).

Para o método pendular, as limitações a considerar estão ligadas aos seguintes aspectos: (i) capacidade de carga dos sistemas de içamento das embarcações, mesmo que

os efeitos de amplificação dinâmica sejam mínimos; (ii) falta de controle dos operadores sobre o movimento de descida do equipamento, o que pode levar a situações instáveis, principalmente no que se refere às rotações do equipamento (OSHIRO, 2012).

4.4 MÉTODO Y

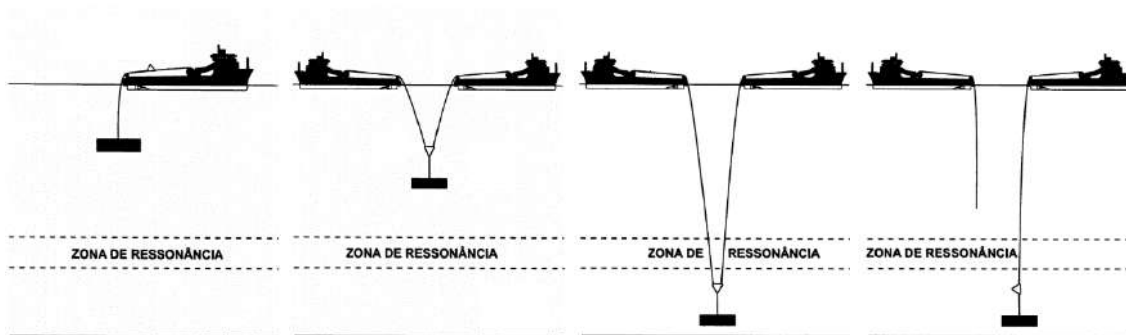


Figura 4.14 Método de instalação Y (MATTOS, 2009)

Com patentes brasileira (MATTOS, 2009) e americana (MATTOS, 2011) de titularidade das empresas Inspectronics Engenharia e Consultoria, Subsea Integrity Engenharia e Projetos, e Zytech Pesquisa, Desenvolvimento e Tecnologia Industrial, este procedimento é realizado por meio de dois rebocadores convencionais operando de forma integrada com a liberação de cabos ligados ao equipamento e o afastamento entre si até que este atinja o leito marinho (OSHIRO, 2012).

Para tal, o equipamento é conectado a uma peça auxiliar (placa triangular ou anel) através de uma lingada. A peça auxiliar é ligada aos dois rebocadores por meio de dois cabos independentes. Dessa forma, o sistema rebocadores-equipamento assume a configuração em Y que dá nome ao método.

A ligação rotulada dos cabos com a peça auxiliar e a angulação assumida por eles são tais que o método minimiza a influência do movimento vertical oscilatório advindo do efeito das ondas nos rebocadores durante a instalação do equipamento e permite sua passagem pela zona de ressonância com controle de posição e movimento.

Este método toma partido da geometria do sistema para atenuar os efeitos de ressonância e há uma série de estudos sendo realizados nos últimos anos que contribuem para desenvolvimento tecnológico e sua viabilização como alternativa para instalação de

equipamentos submarinos de grandes dimensões e massa, conforme citados por OSHIRO, 2012.

4.5 MÉTODO DE ALTERNÂNCIA DE CABOS

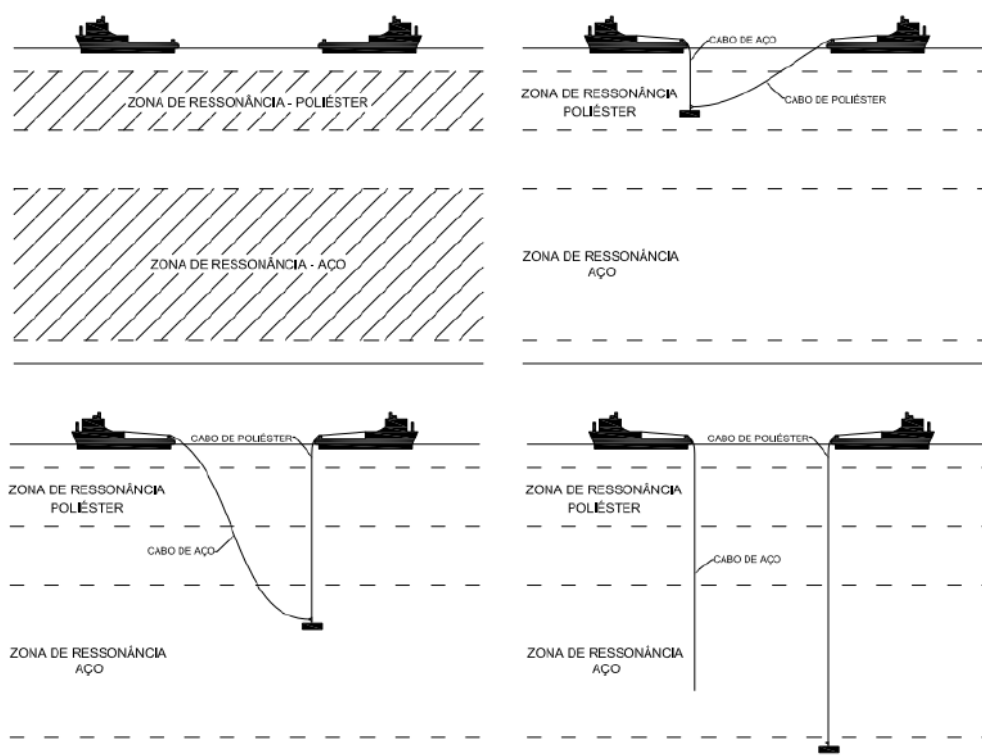


Figura 4.15 Método de instalação de alternância de cabos

Face às dificuldades enfrentadas pelos métodos de instalação de equipamentos submarinos descritos nas seções anteriores, este trabalho introduz o método de alternância de rigidez/cabos.

Numa operação de instalação de equipamentos submarinos, especialmente para águas profundas e ultraprofundas, um dos efeitos críticos a ser considerado nos esforços a que o sistema de içamento está submetido decorre do fenômeno de ressonância, que causa efeitos de amplificação dinâmica.

Este fenômeno é verificado com maior intensidade nas chamadas zonas de ressonância, que consiste num conjunto de profundidades, ditas críticas, em que o período natural do sistema de içamento se sobrepõe aos das ondulações que excitam a embarcação.

Para uma instalação de equipamento submarino, o cálculo do período natural e, conseqüentemente, das profundidades críticas para a operação dependem da rigidez e da configuração geométrica do sistema de içamento, da massa do equipamento a ser instalado e dos períodos de onda aos quais o sistema está submetido.

O método de alternância de cabos toma partido, portanto, da rigidez dos materiais constitutivos dos cabos utilizados alternadamente ao longo do içamento visando evitar ou minimizar os efeitos de ressonância que porventura ocorram quando da passagem do equipamento pelas profundidades críticas das zonas de ressonância.

A seção 4.5.1 apresenta as análises preliminares realizadas para dar suporte teórico ao desenvolvimento do método, enquanto a seção 4.5.2 propõe o procedimento de instalação e estabelece uma discussão introdutória de ordem tecnológica.

4.5.1 ESTUDO PRELIMINAR

Tomando por base uma instalação de equipamento pelo método vertical, é possível identificar as profundidades críticas (zonas de ressonância) de forma simplificada da aproximação do sistema cabo-equipamento por um sistema massa-mola, conforme Figura 4.16.

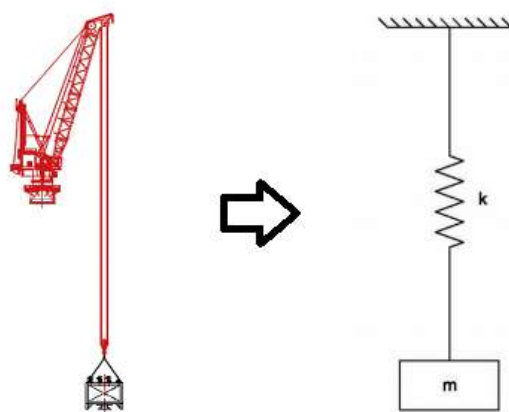


Figura 4.16 Içamento aproximado por sistema massa-mola

Partindo das equações (3.51) e (3.52) e apresentado o resultado em termos de período, tem-se a expressão (4.1) de período natural do sistema de içamento, onde m refere-se à massa total do equipamento, L ao comprimento do cabo, E ao módulo de

Young do material do cabo e A à área da seção transversal do cabo; estes últimos comumente apresentados como o produto EA rigidez axial.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mL}{EA}} \quad (4.1)$$

Considerando, portanto, um cabo de aço e um cabo de poliéster com carga mínima de ruptura (MBL – *minimum breaking load*, da sigla em inglês) de mesma ordem, conforme características descritas na Tabela 4.1, é possível obter os gráficos da Figura 4.17 e da Figura 4.18 de período natural do sistema de içamento para o respectivo material constitutivo do cabo e abrangendo uma certa faixa de valores para massa do equipamento.

Tabela 4.1 Propriedades dos cabos para estudo preliminar

Propriedade	Cabo de aço	Cabo de poliéster
Diâmetro	87 mm	142 mm
MBL	5180 kN	5494 kN
Rigidez axial	237,7 MN	27,56 MN

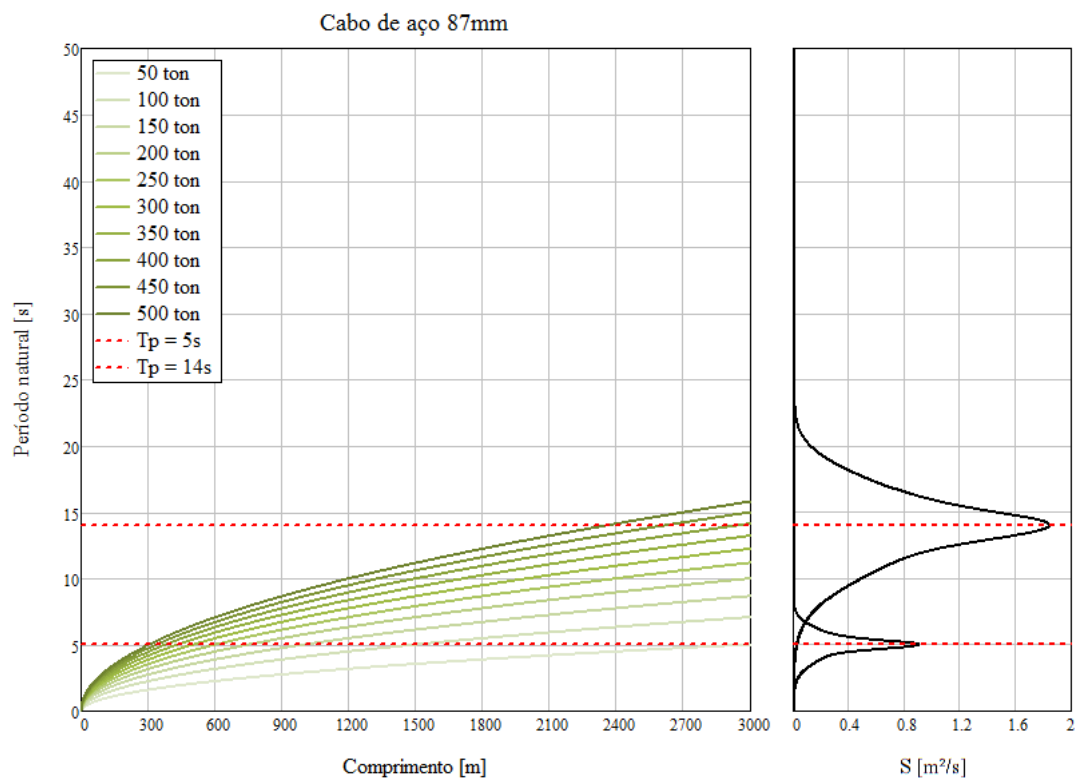


Figura 4.17 Períodos naturais do sistema de içamento com cabo de aço

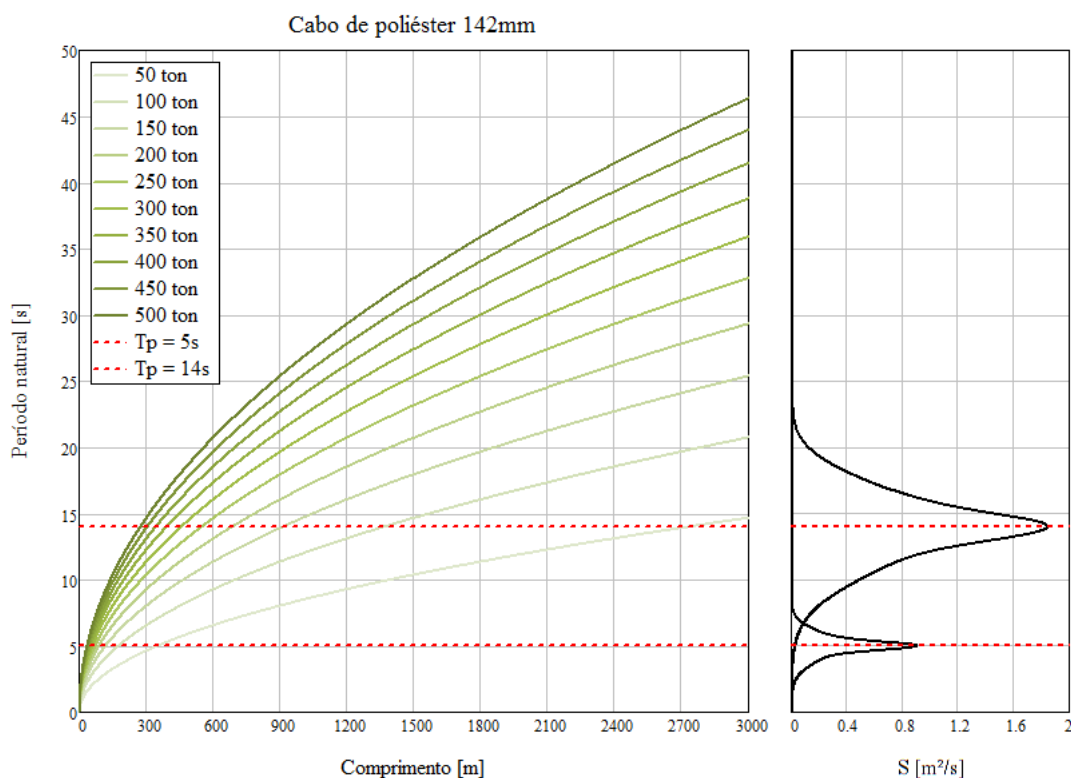


Figura 4.18 Períodos naturais do sistema de içamento com cabo de poliéster

Os gráficos da Figura 4.17 e da Figura 4.18 apresentam-se associados aos espectros de onda para Bacia de Campos com período de pico variando entre 5s e 14s, considerados valores usuais para o local. Para além das simplificações já apresentadas, é importante destacar que a não consideração destes espectros para definição das profundidades críticas de ressonância incorre em erros por negligenciar o efeito de uma larga faixa de períodos de onda que incidem, na prática, sobre um sistema *offshore*.

A partir das mesmas informações, é possível montar a Tabela 4.2 de períodos naturais do sistema, com valores de comprimento do cabo variando de 100 em 100m, para algumas massas de equipamento seleccionadas e com destaque para aqueles valores de período natural que se encontram entre os períodos de pico usuais para ondas da região. É possível, assim, estimar as profundidades das zonas de ressonância distintas para cada material em cada uma das situações.

Nota-se que, para equipamentos mais leves (50 ton), o período natural do sistema com cabo de aço não sofreria grandes efeitos de ressonância na instalação pelo método tradicional até profundidades de 3000 m, enquanto o cabo de poliéster não se mostra

adequado para uma extensa faixa de profundidades. Entretanto, à medida em que a massa do equipamento aumenta, percebe-se que a zona de ressonância do poliéster se apresenta em profundidades mais rasas que as esperadas para o aço e é baseado nessa observação que o método de alternância de cabos é proposto.

Tabela 4.2 Comparação dos períodos naturais do sistema de içamento

Período natural analítico do sistema simplificado massa-mola [s]												
L [m]	50 ton		100 ton		150 ton		200 ton		350 ton		500 ton	
	Aço	Pol.	Aço	Pol.	Aço	Pol.	Aço	Pol.	Aço	Pol.	Aço	Pol.
100	0.91	2.68	1.29	3.79	1.58	4.64	1.82	5.35	2.41	7.08	2.88	8.46
200	1.29	3.79	1.82	5.35	2.23	6.56	2.58	7.57	3.41	10.01	4.08	11.97
300	1.58	4.64	2.23	6.56	2.73	8.03	3.16	9.27	4.18	12.27	4.99	14.66
400	1.82	5.35	2.58	7.57	3.16	9.27	3.65	10.71	4.82	14.16	5.76	16.93
500	2.04	5.99	2.88	8.46	3.53	10.37	4.08	11.97	5.39	15.83	6.44	18.93
600	2.23	6.56	3.16	9.27	3.87	11.36	4.46	13.11	5.91	17.35	7.06	20.73
700	2.41	7.08	3.41	10.01	4.18	12.27	4.82	14.16	6.38	18.74	7.62	22.39
800	2.58	7.57	3.65	10.71	4.46	13.11	5.16	15.14	6.82	20.03	8.15	23.94
900	2.73	8.03	3.87	11.36	4.74	13.91	5.47	16.06	7.23	21.24	8.65	25.39
1000	2.88	8.46	4.08	11.97	4.99	14.66	5.76	16.93	7.62	22.39	9.11	26.76
1100	3.02	8.88	4.27	12.55	5.24	15.38	6.04	17.75	8.00	23.49	9.56	28.07
1200	3.16	9.27	4.46	13.11	5.47	16.06	6.31	18.54	8.35	24.53	9.98	29.32
1300	3.29	9.65	4.65	13.65	5.69	16.71	6.57	19.30	8.69	25.53	10.39	30.52
1400	3.41	10.01	4.82	14.16	5.91	17.35	6.82	20.03	9.02	26.50	10.78	31.67
1500	3.53	10.37	4.99	14.66	6.11	17.95	7.06	20.73	9.34	27.43	11.16	32.78
1600	3.65	10.71	5.16	15.14	6.31	18.54	7.29	21.41	9.64	28.33	11.53	33.86
1700	3.76	11.04	5.31	15.61	6.51	19.11	7.51	22.07	9.94	29.20	11.88	34.90
1800	3.87	11.36	5.47	16.06	6.70	19.67	7.73	22.71	10.23	30.04	12.23	35.91
1900	3.97	11.67	5.62	16.50	6.88	20.21	7.94	23.33	10.51	30.87	12.56	36.89
2000	4.08	11.97	5.76	16.93	7.06	20.73	8.15	23.94	10.78	31.67	12.89	37.85
2100	4.18	12.27	5.91	17.35	7.23	21.24	8.35	24.53	11.05	32.45	13.21	38.79
2200	4.27	12.55	6.04	17.75	7.40	21.74	8.55	25.11	11.31	33.21	13.52	39.70
2300	4.37	12.84	6.18	18.15	7.57	22.23	8.74	25.67	11.56	33.96	13.82	40.59
2400	4.46	13.11	6.31	18.54	7.73	22.71	8.93	26.22	11.81	34.69	14.12	41.46
2500	4.56	13.38	6.44	18.93	7.89	23.18	9.11	26.76	12.05	35.41	14.41	42.32
2600	4.65	13.65	6.57	19.30	8.05	23.64	9.29	27.29	12.29	36.11	14.69	43.16
2700	4.74	13.91	6.70	19.67	8.20	24.09	9.47	27.81	12.53	36.80	14.97	43.98
2800	4.82	14.16	6.82	20.03	8.35	24.53	9.64	28.33	12.76	37.47	15.25	44.79
2900	4.91	14.41	6.94	20.38	8.50	24.96	9.81	28.83	12.98	38.13	15.52	45.58
3000	4.99	14.66	7.06	20.73	8.65	25.39	9.98	29.32	13.21	38.79	15.78	46.36

4.5.2 PROCEDIMENTO PROPOSTO E DISCUSSÃO TÉCNICA

Diante dos resultados de períodos naturais obtidos no estudo preliminar, concebe-se o método de alternância de cabos para instalação de equipamentos submarinos com o objetivo de mitigar as limitações devidas a: (i) efeitos de ressonância do sistema de içamento; (ii) custo e disponibilidade de embarcações e equipamentos especiais para a operação.

São necessárias, fundamentalmente, duas embarcações para pôr o método em prática. Ambas devem contar com sistema de içamento de capacidade suficiente para o procedimento sendo que uma delas deve ter também espaço disponível para o transporte do equipamento a ser instalado.

O primeiro passo consiste no transporte do equipamento à locação de içamento. A embarcação usada para o transporte deve contar com o sistema de içamento com cabo de aço. Este é conectado, através de uma placa em sua extremidade, ao equipamento a ser instalado e eventuais componentes auxiliares para içamento. A placa deve ser ligada, também, à extremidade do cabo de içamento de poliéster da segunda embarcação.

A embarcação de transporte inicia o içamento do equipamento até uma profundidade segura (fora da zona de ressonância do cabo de aço), enquanto o cabo de poliéster se mantém relaxado. A profundidade segura para o cabo de aço deve estar de acordo com a ondulação da superfície marinha no momento da instalação e projeto previamente estabelecido.

A partir de então, transfere-se a carga do equipamento do cabo de aço (que passa a ficar relaxado) para o cabo de poliéster da embarcação auxiliar, que finaliza, portanto, o içamento de forma vertical até o leito marinho sem passar pela zona de ressonância do cabo de aço ou do cabo de poliéster. Naturalmente um ROV deve acompanhar o procedimento e realizar eventuais operações de desconexão dos cabos do sistema.

Esta metodologia tornaria possível o acompanhamento de movimentação do equipamento durante toda a descida. Além disso, seria conveniente o acompanhamento das movimentações da embarcação e altura de onda – para melhor controle tecnológico, tomada de decisão e para permitir flexibilidade na definição da profundidade segura para

transferência de carga com base em critérios mais objetivos e no planejamento preliminar da instalação.

Ponderando eventuais dificuldades deste método proposto, cita-se: (i) efeitos de dissipação de energia no cabo sintético quando da instalação (abrasão e aquecimento por atrito, por exemplo); (ii) passagem do cabo sintético pelo equipamento de içamento da embarcação; (iii) eventual necessidade de uso de vários tramos de cabo sintético a depender da profundidade de instalação – as conexões entre tramos utilizadas atualmente são especialmente complicadas de lidar se há necessidade de passa-las através do rolo do guindaste.

Dentre as dificuldades inerentes a propostas de inovação tecnológica, este trabalho tem a intenção, portanto, de avaliar as premissas ora descritas e eventualmente somar-se a avaliações futuras de cunho teórico, experimental e/ou operacional para a viabilização, ou não, desta alternativa para instalação de equipamentos.

5 MODELOS ESTUDADOS

5.1 DIRETRIZES GERAIS

Com o objetivo de validar as premissas para o desenvolvimento do método de alternância de cabos em comparação com o método vertical tradicional, estabeleceu-se o estudo de caso a ser apresentado nas seções subsequentes. Consiste na realização de simulações numéricas por meio da ferramenta computacional SITUA-Prosim, desenvolvida pelo Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore* da COPPE/UFRJ.

Conforme JACOB, 2006, o programa Prosim incorpora um modelo hidrodinâmico de casco de unidade flutuante e um modelo de elementos finitos de linhas de ancoragem, *risers*, entre outras. O código é estruturado de forma a realizar um processo de integração no tempo considerando a interação não-linear do comportamento hidrodinâmico do casco e o estrutural e hidrodinâmico das linhas.

Já o SITUA configura-se como a interface gráfica de pré e pós-processamento dos modelos utilizados para análise pelo Prosim. Os dados a respeito das estruturas e sistemas a serem calculados são inseridos através desta interface, que conta com visualização 3D e animação dos resultados. Durante a elaboração deste trabalho foi utilizado o SITUA2, em versão beta recém-lançada, mas que utiliza como código de cálculo um Prosim compatível com a última versão disponível do SITUA original.

O estudo de caso será realizado através das etapas: (i) definição das características da unidade flutuante, do sistema de içamento e dos equipamentos, conforme seção 5.2 e seus subitens; (ii) cálculo analítico de profundidades críticas para o cabo de aço e para o cabo de poliéster – embasando a seleção das profundidades de análise para os modelos, conforme descrito na seção 5.3; (iii) varredura da matriz de carregamentos ambientais nos modelos simulados, apresentada na seção 5.4; (iv) comparação das variáveis de saída com critérios normativos para a operação de instalação de equipamentos, conforme descritos na seção 5.5; (v) apresentação e análise crítica dos resultados, abordadas no capítulo 6.

Importante destacar que os modelos abordados neste trabalho tratarão do comportamento estrutural e hidrodinâmico do sistema considerando o equipamento estacionado nas profundidades críticas, com o efeito das ondulações da superfície marinha sobre a unidade flutuante – análise dita em *snapshot*. Outras abordagens são possíveis, inclusive considerando a descida contínua do equipamento e a análise na chamada *splash-zone* (quando o equipamento rompe a superfície marinha), mas estas realizações não foram consideradas no escopo deste trabalho.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS E LINHAS MODELADOS

5.2.1 EMBARCAÇÃO DE LANÇAMENTO

A unidade flutuante adotada para análise é um OSCV sem compensadores de *heave*, com suas dimensões principais e coordenadas do centro de movimento apresentados pela Tabela 5.1. A nomenclatura das dimensões da embarcação é apresentada na Figura 5.1.

Tabela 5.1 Características da unidade flutuante

Característica	Valor
Comprimento	156,9 m
Boca	27 m
Pontal	12 m
Calado	6,664 m
Coordenada X do Centro de Movimento	−3,15 m
Coordenada Y do Centro de Movimento	0 m
Coordenada Z do Centro de Movimento	6,664 m

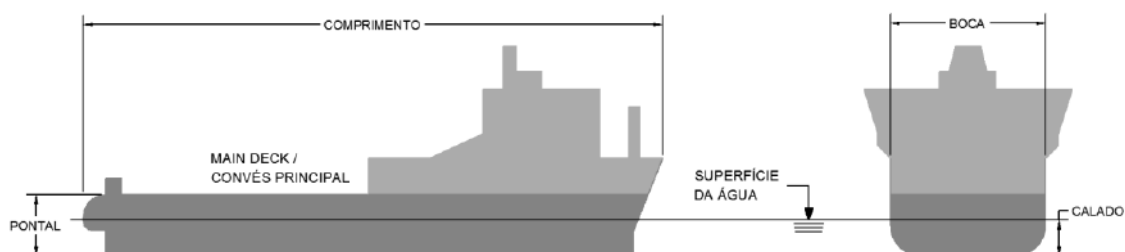


Figura 5.1 Dimensões da embarcação - nomenclatura

A Figura 5.2 mostra a representação desta embarcação no modelo do SITUA com a indicação dos eixos globais e da direção Norte do programa, sendo X o eixo horizontal paralelo à embarcação, Y o horizontal transversal e Z o vertical, com origem na superfície da água. O Norte é indicado por uma linha fina e tem direção paralela ao eixo Y global.

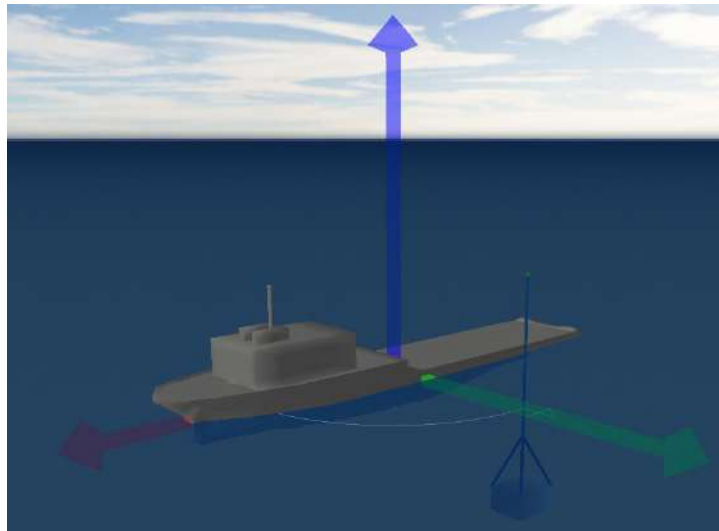


Figura 5.2 Modelo no SITUA – eixos globais

A Figura 5.3 apresenta os eixos locais da embarcação por dois ângulos. Esse sistema de eixos é utilizado como referência para locação do centro de movimento da embarcação. Sua origem encontra-se na quilha à meia nau do OSCV, com coordenadas globais $(0, 0, -6,664)$. O eixo X local é horizontal, com sentido positivo para a proa; o eixo Y local é horizontal, com sentido positivo para bombordo; o eixo Z local é vertical, com sentido positivo para cima.

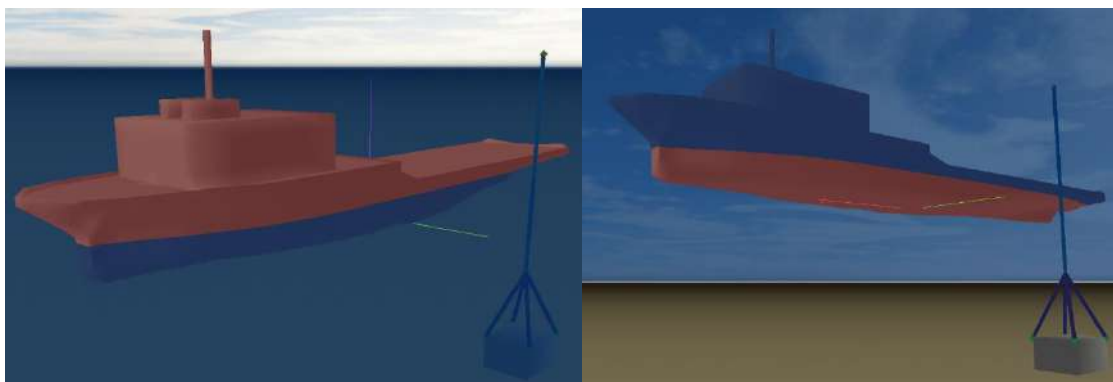


Figura 5.3 Modelo no SITUA – eixos locais da unidade flutuante

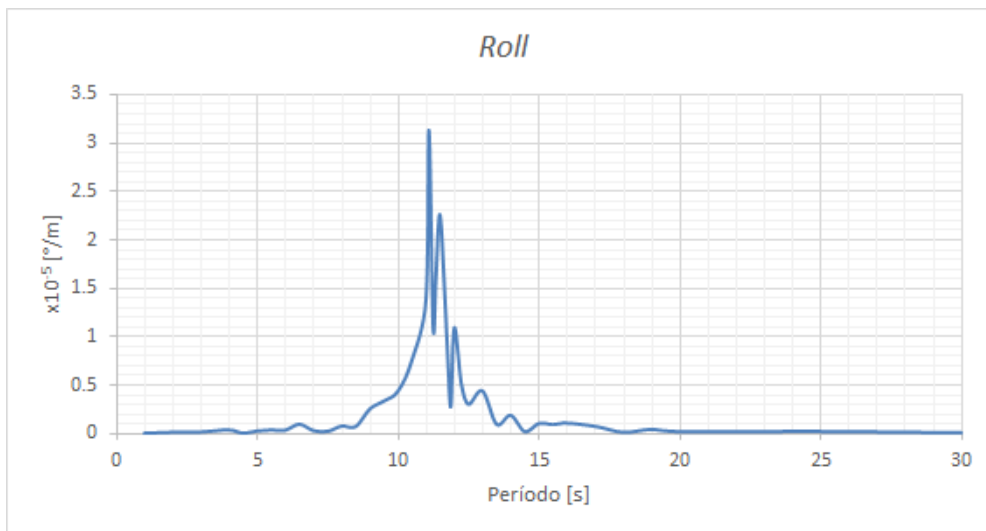


Figura 5.4 RAO de movimento de roll, incidência de onda a 180°

O comportamento hidrodinâmico da embarcação diante dos estados de mar de análise será modelado através de um RAO de movimentos calibrado, naturalmente, para o centro de movimento apresentado. A Figura 5.4 apresenta o RAO para o movimento de *roll*, a Figura 5.5, para *heave* e a Figura 5.6, para *pitch*.

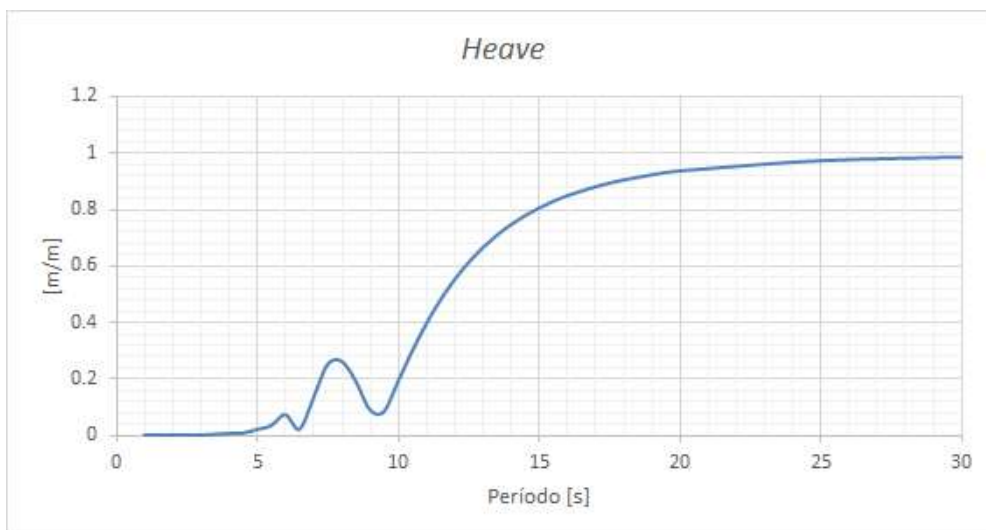


Figura 5.5 RAO de movimento de heave, incidência de onda a 180°

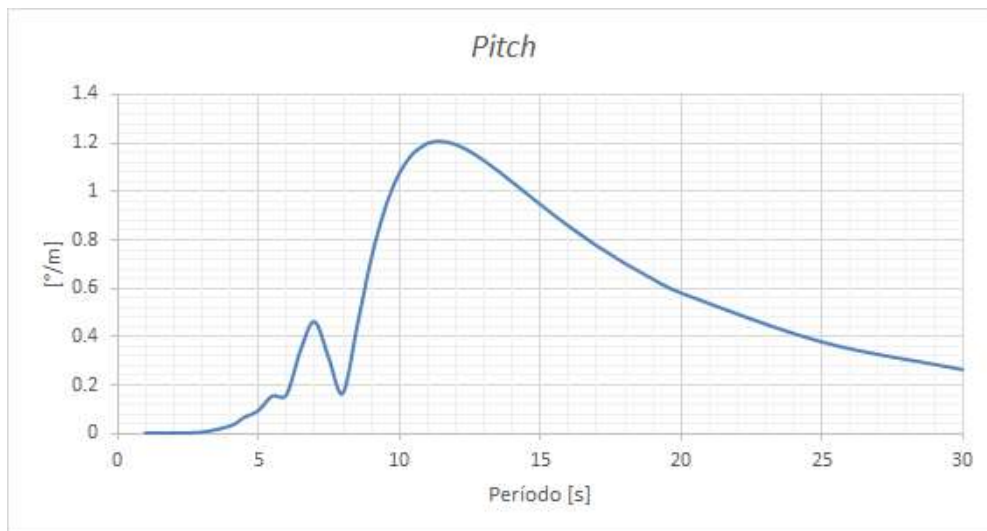


Figura 5.6 RAO de movimento de pitch, incidência de onda a 180°

5.2.2 GUINDASTE

Do guindaste da embarcação, interessa neste estudo apenas a posição do seu ponto de conexão ao cabo de içamento. Devido ao caráter acadêmico do trabalho, negligencia-se sua capacidade de carga e abertura/angulação da lança do guindaste – o que não é possível num projeto prático de engenharia para instalação de equipamentos.

A Figura 5.2 ilustra o ponto de conexão de interesse através da figura sólida flutuante associado à embarcação, onde se conecta a extremidade superior do cabo de içamento. A Tabela 5.2 apresenta suas coordenadas em relação ao sistema local de eixos da unidade flutuante, conforme descrito no item 5.2.1.

Tabela 5.2 Coordenadas do ponto de conexão do guindaste

Característica	Valor
Coordenada X do Ponto de Conexão	−34,75 m
Coordenada Y do Ponto de Conexão	22,30 m
Coordenada Z do Ponto de Conexão	35,00 m

5.2.3 EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

Serão considerados para análise dois pares de equipamento com distintos valores de massa, geometria e coeficientes hidrodinâmicos. Cada par de equipamentos conta com

o mesmo conjunto de dados de massa e geometria, variando-se apenas o coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_d .

Nota-se, aqui, os trabalhos de KEULEGAN, CARPENTER, 1958, e de VENUGOPAL *et al*, 2006, que abordam o comportamento dos coeficientes hidrodinâmicos de corpos submersos com a variação de determinados parâmetros. Em especial, é demonstrado que à medida em que o número de Keulegan-Carpenter aproxima-se de zero, o coeficiente C_d tende a crescer em objetos prismáticos de seção retangular, como serão aproximados os equipamentos para análise, de forma semelhante à ilustrada pelo gráfico da Figura 5.7.

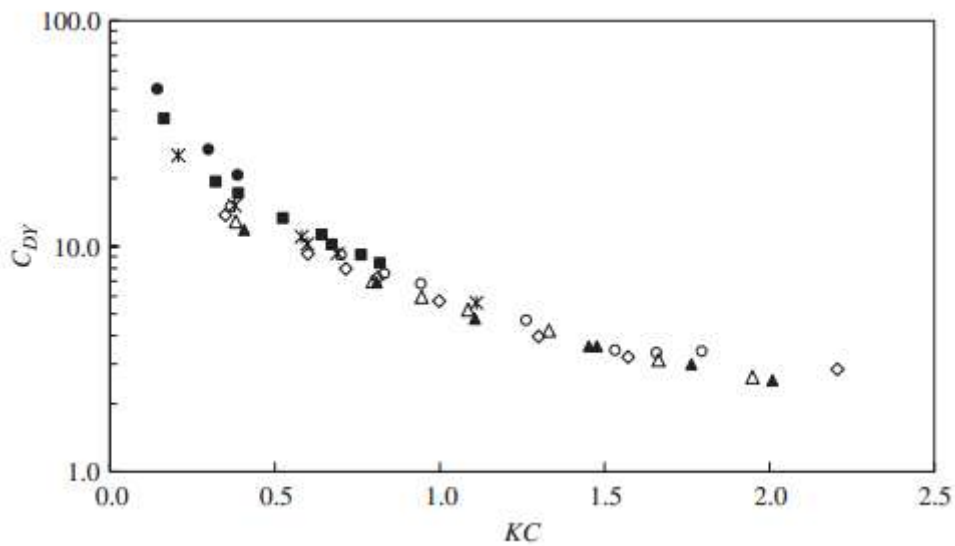


Figura 5.7 Efeito de variação do C_d com o KC para objetos prismáticos com relação largura/altura de 0,5 (VENUGOPAL *et al*, 2006)

A equação (5.1) apresenta o número de Keulegan-Carpenter, também chamado de número de período, onde u_0 é a amplitude da velocidade da partícula de fluido em movimento oscilatório, T é o período de onda e D é a dimensão representativa do corpo submerso.

$$KC = u_0 \frac{T}{D} \quad (5.1)$$

Dessa forma, tomando por base as equações que descrevem o comportamento cinemático das partículas de onda apresentadas no item 3.2 e valores típicos de período e altura de onda para a bacia de Campos, é demonstrável que o número de Keulegan-

Carpenter assumirá valores tendendo a zero para toda a extensão de matriz de carregamentos ambientais e profundidades a serem analisadas (ver Apêndice A). Por conseguinte, são estimados os dois valores de coeficiente de arrasto na direção vertical para cada equipamento, um considerado típico (equipamentos A) e o outro levando em consideração este efeito (equipamentos B), conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Características dos equipamentos

Característica	Equipamento			
	1A	1B	2A	2B
Coeficiente de arrasto vertical	1,5	7,0	1,5	7,0
Massa estrutural	100 ton		200 ton	
Peso submerso	87 ton		174 ton	
Comprimento	6,0 m		15,0 m	
Largura	4,0 m		12,0 m	
Altura	5,0 m		8,0 m	
Posição longitudinal do Centro de Gravidade e de Empuxo	3,0 m		7,5 m	
Posição transversal do Centro de Gravidade e de Empuxo	2,0 m		6,0 m	
Posição vertical do Centro de Gravidade e de Empuxo	2,5 m		4,0 m	
Raio de giração XX	1,848 m		4,163 m	
Raio de giração YY	2,255 m		4,907 m	
Raio de giração ZZ	2,082 m		5,545 m	
Coeficiente de arrasto lateral	1,2		1,2	
Coeficiente de massa adicionada lateral	1,5		1,5	
Massa adicionada vertical	53,33 ton		1116 ton	

As características dos equipamentos foram estimadas a partir de massa e dimensões usuais de compressores (equipamentos 1) e *manifolds* (equipamentos 2). O centro de gravidade e o de empuxo foram considerados congruentes ao centro geométrico – à meia altura, meia largura e meio comprimento em ambos os casos. Os raios de giração foram calculados considerando expressões para paralelepípedo fechado com as dimensões dos equipamentos.

Para a massa adicionada considerando o movimento relativo entre fluido e estrutura na direção vertical, o cálculo levou em consideração uma placa plana com

expansão tridimensional, tomando a largura e o comprimento dos equipamentos e tabelas da DNV-RP-H103. Para os coeficientes hidrodinâmicos restantes, foram tomados os valores usuais. O peso submerso dos equipamentos foi tomado como 87% do valor em superfície.

Os pontos de içamento dos equipamentos, por sua vez, foram definidos de forma simétrica considerando o alinhamento entre o centro de gravidade destes com o ponto de encontro dos cabrestos com o cabo de lançamento. Assim, estão locados nos vértices da superfície superior dos paralelepípedos fechados que representam o equipamento, conforme ilustrado pela Figura 5.8 e pela Figura 5.9 para os equipamentos 1 e 2, respectivamente. As coordenadas locais para os pontos de içamento são apresentadas na Tabela 5.4.

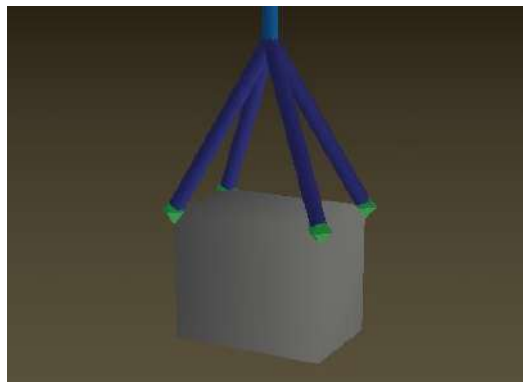


Figura 5.8 Modelo dos equipamentos 1 no SITUA

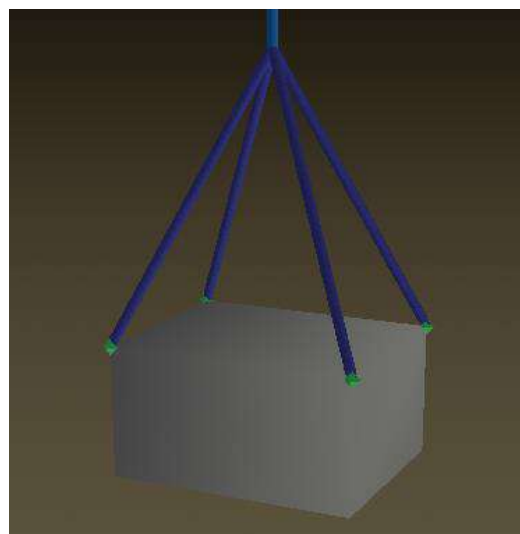


Figura 5.9 Modelo dos equipamentos 2 no SITUA

Tabela 5.4 Coordenadas dos pontos de içamento dos equipamentos

Característica		Equipamento			
		1A	1B	2A	2B
Centro de Gravidade e de Empuxo	Coordenada X local	0 m		0 m	
	Coordenada Y local	0 m		0 m	
	Coordenada Z local	2,5 m		4,0 m	
Ponto de Içamento 1	Coordenada X local	−3,0 m		−7,5 m	
	Coordenada Y local	−2,0 m		−6,0 m	
	Coordenada Z local	5,0 m		8,0 m	
Ponto de Içamento 2	Coordenada X local	−3,0 m		−7,5 m	
	Coordenada Y local	2,0 m		6,0 m	
	Coordenada Z local	5,0 m		8,0 m	
Ponto de Içamento 3	Coordenada X local	3,0 m		7,5 m	
	Coordenada Y local	2,0 m		6,0 m	
	Coordenada Z local	5,0 m		8,0 m	
Ponto de Içamento 4	Coordenada X local	3,0 m		7,5 m	
	Coordenada Y local	−2,0 m		−6,0 m	
	Coordenada Z local	5,0 m		8,0 m	

5.2.4 CABOS

Os cabos de lançamento e os cabrestos adotados para as análises foram selecionados utilizando-se como parâmetro seus MBLs (*minimum breaking load*, na sigla em inglês). Para isto, segue-se recomendações da DNV-OS-H205, em que a máxima carga no cabo F_{sling} deve atender à expressão (5.2).

$$F_{sling} < SWL \quad (5.2)$$

O SWL (*safe working load*, na sigla em inglês) é calculado pela expressão (5.3), sendo γ_{sf} o fator de segurança nominal. Neste trabalho, adotar-se-á o valor estimado $\gamma_{sf} = 3,5$ para todos os cabos. A carga F_{sling} , por sua vez, é tomada como a força total F_{total} descrita na DNV-OS-H206 e calculada pela equação (5.4) abaixo, onde $F_{static,max}$ é a força estática máxima devida ao peso do objeto e F_{hyd} é sua parcela dinâmica, que

deve atender a (5.5). Os critérios expressos por (5.2) e (5.5) são abordados com mais detalhes na seção 5.5 deste trabalho.

$$SWL = \frac{MBL}{\gamma_{sf}} \quad (5.3)$$

$$F_{total} = F_{static,max} + F_{hyd} \quad (5.4)$$

$$F_{hyd} \leq 0,9 F_{static,min} \quad (5.5)$$

Os cabos de lançamento serão de aço e de poliéster, conforme previsto pelo método de instalação a ser estudado. Serão utilizados valores usuais para suas características físicas, a partir dos MBLs requeridos pelas expressões apresentadas. A rigidez axial dos cabos de poliéster será a de recém-fabricados. A Tabela 5.5 e a Tabela 5.6 apresentam as propriedades dos cabos de aço e de poliéster, respectivamente.

Tabela 5.5 Propriedades físicas dos cabos de lançamento em aço

Característica	Equipamento			
	1A	1B	2A	2B
Diâmetro nominal	103 mm		133 mm	
Peso no ar	431,6 N/m		920,2 N/m	
Peso submerso	358,3 N/m		739,5 N/m	
Rigidez axial (EA)	333,2 MN		1542 MN	
MBL (<i>Minimum breaking load</i>)	6520 kN		14275 kN	

Tabela 5.6 Propriedades físicas dos cabos de lançamento em poliéster

Característica	Equipamento			
	1A	1B	2A	2B
Diâmetro nominal	157 mm		229 mm	
Peso no ar	161,9 N/m		337,5 N/m	
Peso submerso	42,6 N/m		88,7 kN/m	
Rigidez axial (EA)	34,51 MN		75,82 MN	
MBL (<i>Minimum breaking load</i>)	6867 kN		14715 kN	

O conjunto de cabrestos foi arranjado de modo que as linhas formem um ângulo de 60° com a face superior do equipamento. Com isso, foi possível determinar o comprimento de cada um deles. Suas propriedades físicas mais importantes estão expostas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Propriedades físicas dos cabrestos

Característica	Equipamento			
	1A	1B	2A	2B
Diâmetro nominal	52 mm		71 mm	
Comprimento	7,211 m		19,21 m	
Peso no ar	107,9 N/m		204,0 N/m	
Peso submerso	89,6 N/m		169,4 N/m	
Rigidez axial (EA)	101,9 MN		158,3 MN	
MBL (<i>Minimum breaking load</i>)	1760 kN		3270 kN	

5.3 CÁLCULO DE PROFUNDIDADES CRÍTICAS

O cálculo das profundidades críticas de ressonância será apresentado por meio de dois procedimentos distintos: (i) cálculo analítico do período natural do sistema de içamento considerando um modelo simplificado massa-mola e mar regular; (ii) obtenção e identificação dos picos do espectro de resposta do movimento vertical da ponta da lança do guindaste, obtido pelo cruzamento do RAO da embarcação com os espectros de onda. Estes procedimentos são apresentados nas seções 5.3.1 e 5.3.2, respectivamente.

A seleção das profundidades de fato a serem modeladas e analisadas por meio de simulações numéricas no *software* SITUA-Prosim para fins do estudo de caso deste trabalho é descrita em maiores detalhes na seção 5.5. Por ora, destaca-se que o cálculo apresentado em 5.3.1 incorre em erros inerentes à consideração de mar regular, que negligencia a composição de múltiplos períodos de onda num mesmo estado de mar.

5.3.1 PERÍODOS NATURAIS E MAR REGULAR

Baseando-se no modelo massa-mola apresentado na seção 3.5.1 deste trabalho, é possível obter gráficos de período natural do sistema de içamento (cabos e equipamentos)

em função do comprimento do cabo de lançamento. Para isto, são consideradas as hipóteses: (i) o comprimento do cabo de lançamento é considerado do ponto de conexão ao guindaste até a face superior do equipamento, desconsiderando os cabrestos para cálculo da rigidez; (ii) a massa do equipamento é considerada concentrada na extremidade inferior do cabo de lançamento; (iii) seguindo a recomendação do item 5.3.5.3 da DNV-RP-H103, a massa concentrada do equipamento tem o acréscimo de $\frac{1}{3}$ da massa do cabo içado, além da massa adicionada vertical da Tabela 5.3.

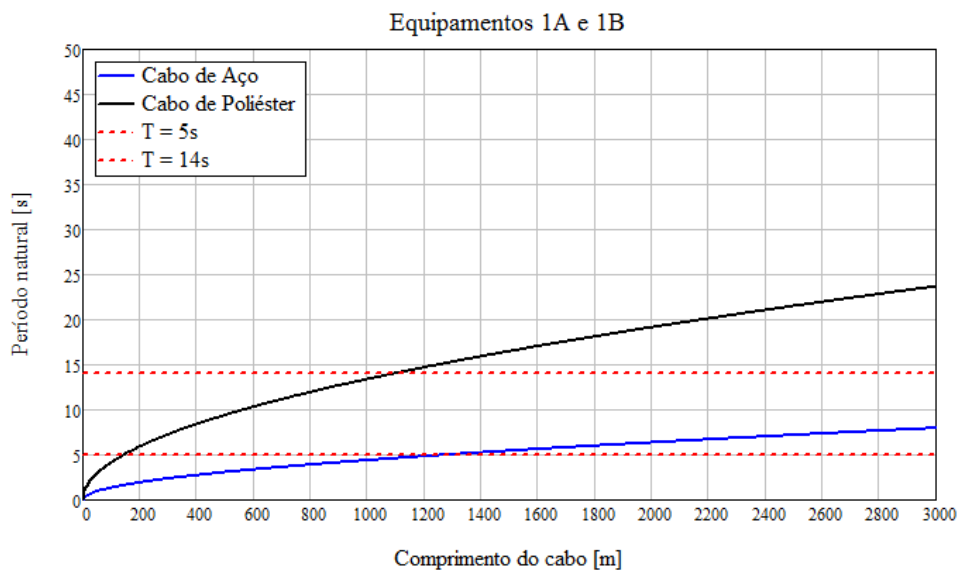


Figura 5.10 Períodos naturais do sistema de içamento, Equipamentos 1A e 1B

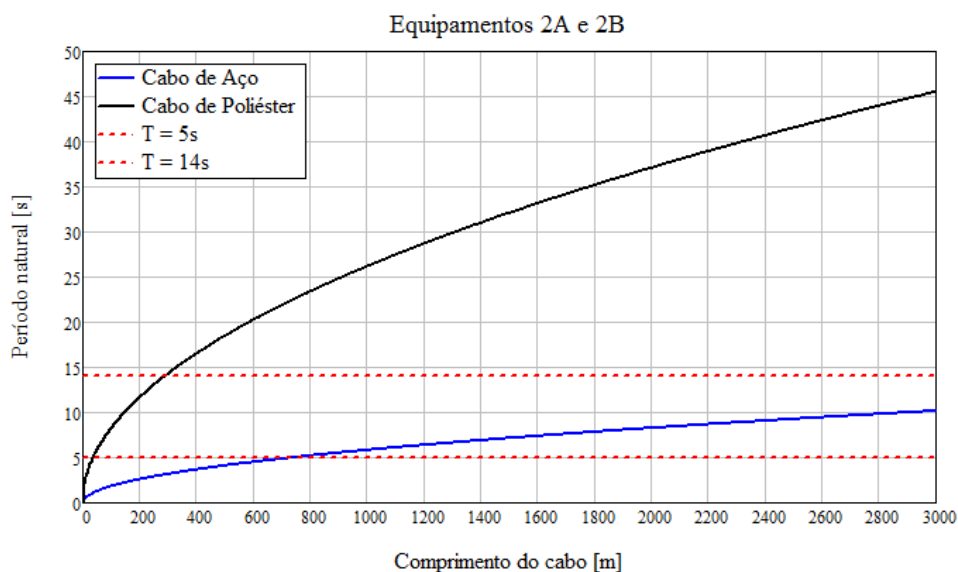


Figura 5.11 Períodos naturais do sistema de içamento, Equipamentos 2A e 2B

Tabela 5.8 Profundidades críticas para os equipamentos 1A e 1B, mar regular

Período de onda [s]	Profundidade crítica [m]	
	Aço	Poliéster
5	1261	116
6	1780	178
7	2364	252
8	3004	336
9	3691	431
10	4418	537
11	5179	654
12	5970	781
13	6785	918
14	7621	1065

Tabela 5.9 Profundidades críticas para os equipamentos 2A e 2B, mar regular

Período de onda [s]	Profundidade crítica [m]	
	Aço	Poliéster
5	712	11
6	1034	27
7	1413	46
8	1848	68
9	2337	92
10	2880	120
11	3475	151
12	4122	184
13	4818	221
14	5562	260

Assim, a Figura 5.10 apresenta o gráfico resultante para os equipamentos 1A e 1B considerando o cabo de aço e o de poliéster; a Figura 5.11 apresenta o gráfico equivalente para os equipamentos 2A e 2B; a Tabela 5.8 resume as profundidades críticas para o posicionamento dos equipamentos 1A e 1B (descontando o comprimento emerso dos

cabos e acrescentando a distância do centro de gravidade dos equipamentos à extremidade inferior dos cabos); e a Tabela 5.9, as mesmas para os equipamentos 2A e 2B. Os períodos naturais listados nesta tabela são coincidentes aos de pico das ondas consideradas em 4.5.1. Nesta situação são esperados os efeitos de ressonância, segundo o modelo simplificado ora adotado.

5.3.2 PERÍODOS DE MAIOR ENERGIA DE MOVIMENTO

Supondo que se disponha de um número de espectros de resposta de movimento vertical no topo do cabo de lançamento, sendo cada espectro referente à incidência de uma onda de período diferente, é possível identificar um período de pico em cada um deles, donde se infere ser o período de maior energia de movimento – fortuitamente diferente do período da onda considerada para o cálculo do espectro.

Neste período de maior energia de movimento, portanto, espera-se que os efeitos de ressonância sejam mais importantes para o sistema cabo-equipamento com período natural correspondente. Assim, observando o modelo massa-mola simplificado como descrito em 5.3.1, é possível encontrar a profundidade crítica para cada período de máxima energia e referenciá-la ao período da onda usada para a construção do espectro.

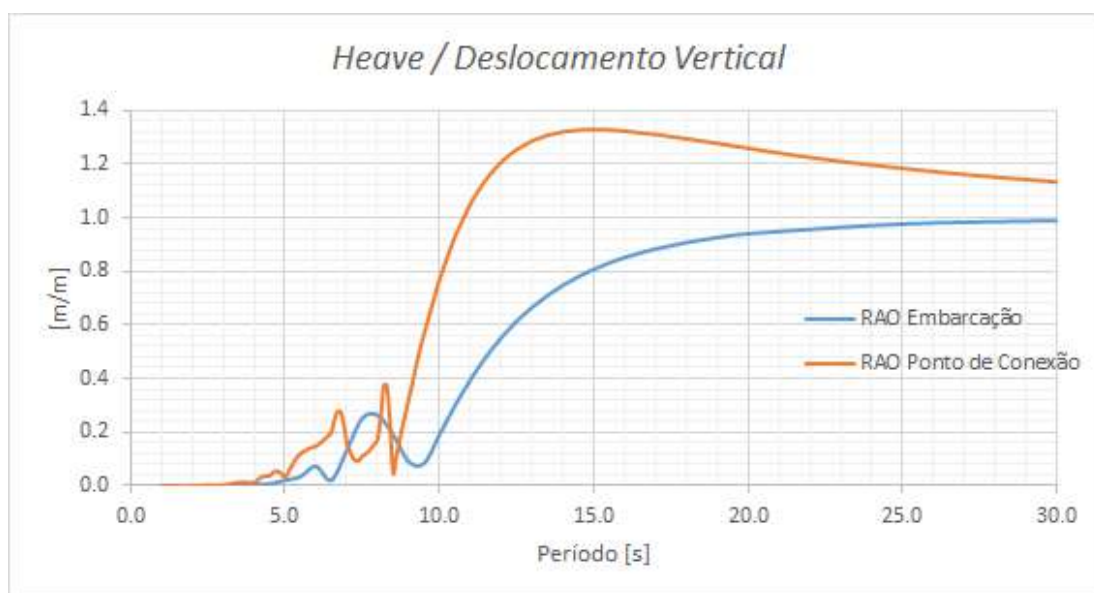


Figura 5.12 RAO de movimento vertical do ponto de conexão e da embarcação

Dessa forma, o primeiro passo deste procedimento consiste na obtenção de um RAO de movimento vertical para o ponto de conexão entre o cabo de lançamento e a

ponta da lança do guindaste da embarcação. Isto foi feito com a realização de simulações dinâmicas com a incidência de ondas regulares, de amplitude unitária, com direção de ataque de proa à popa e períodos variando conforme o RAO original da embarcação de estudo. Tomando apenas o movimento vertical do ponto de interesse e o de *heave* da embarcação para comparação, tem-se a Figura 5.12.

Na sequência, considerou-se os espectros de onda $S_w(\omega)$ de JONSWAP para ondas com altura $H_s = 2,0\text{m}$ e período de pico T_p variando de 5s a 14s, semelhantemente ao item 5.3.1. Efetuou-se o cruzamento do RAO, $RAO_z(\omega)$, de deslocamento vertical do ponto de conexão com cada espectro de onda, conforme expressão (5.6). Os espectros resultantes, $S_z(\omega)$, de movimento vertical são apresentados graficamente na Figura 5.13 em sua forma análoga em termos de período.

$$S_z(\omega) = [RAO_z(\omega)]^2 S_w(\omega) \quad (5.6)$$

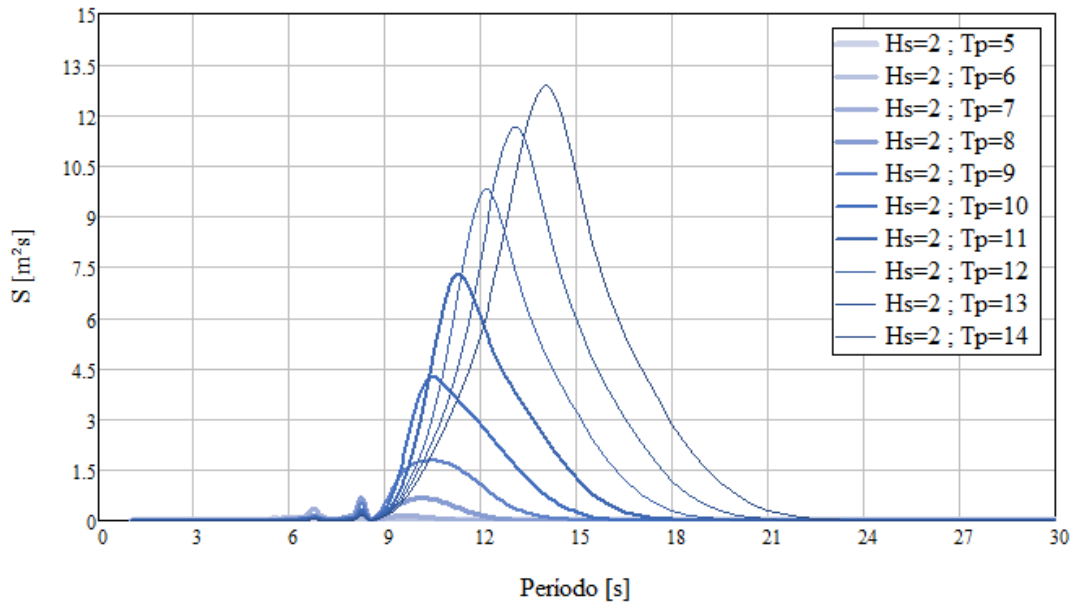


Figura 5.13 Espectros de resposta de movimento vertical no ponto de conexão

Com os períodos de pico de energia identificados, passa-se à definição do comprimento de cabo e, conseqüentemente, das profundidades críticas do sistema cabo-equipamento de forma semelhante ao cálculo já apresentado neste trabalho no item 5.3.1. Por fim, a Tabela 5.10 e a Tabela 5.11 apresentam estas profundidades em relação aos

períodos de onda considerados para os equipamentos 1A e 1B, e para os equipamentos 2A e 2B, respectivamente.

Tabela 5.10 Profundidades críticas para os equipamentos 1A e 1B, mar irregular

Período de pico [s]		Profundidade crítica [m]	
Onda irregular	Energia de movimento	Aço	Poliéster
5	6,7	2183	229
6	6,7	2183	229
7	6,8	2243	236
8	8,2	3138	354
9	10,5	4794	594
10	10,5	4794	594
11	11,3	5413	691
12	12,2	6131	808
13	13,1	6868	933
14	14,0	7621	1065

Tabela 5.11 Profundidades críticas para os equipamentos 2A e 2B, mar irregular

Período de pico [s]		Profundidade crítica [m]	
Onda irregular	Energia de movimento	Aço	Poliéster
5	6,7	1294	40
6	6,7	1294	40
7	6,8	1333	42
8	8,2	1941	72
9	10,5	3171	135
10	10,5	3171	135
11	11,3	3664	160
12	12,2	4257	191
13	13,1	4890	224
14	14,0	5562	260

5.4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

As simulações realizadas no âmbito deste trabalho levarão em conta apenas incidência de ondas irregulares sobre a embarcação. As ondas terão como modelo de espectro o de JONSWAP e com período de pico (coluna T_p) variando conforme a Tabela 5.12, que também apresenta a altura das ondas (coluna H_s), a numeração do carregamento no modelo (coluna Onda), as incidências considerando variação de $\pm 15^\circ$ em relação à incidência de proa à popa da embarcação (coluna Incidência).

Tabela 5.12 Matriz de carregamentos ambientais

T_p [s]	H_s [m]	Onda	Incidência	Onda	Incidência	Onda	Incidência
5	2,0	1	165°	7	180°	13	195°
7	2,0	2	165°	8	180°	14	195°
9	2,0	3	165°	9	180°	15	195°
11	2,0	4	165°	10	180°	16	195°
13	2,0	5	165°	11	180°	17	195°
15	2,0	6	165°	12	180°	18	195°

A seleção destes períodos de pico de onda leva em consideração as recomendações dos itens 3.4.2.22 e 3.4.2.23 da DNV-RP-H103. O primeiro sugere que as análises devem cobrir a faixa de períodos de cruzamento zero T_z conforme (5.7). Tomando a altura de onda para análise como $H_s = 2,0\text{m}$, essa expressão torna-se (5.8). Utilizando a relação entre T_z e T_p descrita no item 3.4, bem como a expressão (3.46), é possível encontrar os T_p que satisfazem a relação (3.48) para os valores de (5.8). Tem-se assim definida a faixa de períodos de pico da (5.9) para valores truncados em inteiros.

$$8,9 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T_z \leq 13 \text{ s} \quad (5.7)$$

$$4,02 \text{ s} \leq T_z \leq 13 \text{ s} \quad (5.8)$$

$$5 \text{ s} \leq T_p \leq 17 \text{ s} \quad (5.9)$$

Já o item 3.4.2.23 da DNV-RP-H103 abre a possibilidade de análises para faixas mais estreitas de variação do período de onda, desde que isso seja refletido nos critérios

para a operação. Levando em conta que os procedimentos de que tratam este trabalho estão tomando por referência ondas da Bacia de Campos, restringe-se os períodos selecionados para valores entre 5s e 15s, com variação de 2s entre os casos ambientais.

5.5 SEQUÊNCIA E CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Diante dos dados apresentados, os modelos a serem montados e simulados no *software* SITUA-Prosím contarão com a embarcação de lançamento descrita no item 5.2.1, com ponto de conexão do cabo de lançamento ao guindaste conforme item 5.2.2, os 2 pares de equipamentos apresentados no item 5.2.3, cada par será analisado com os 2 cabos de lançamento do item 5.2.4 em 6 profundidades consideradas críticas, baseadas nos valores encontrados no item 5.3 e com os estados de mar previstos no item 5.4.

Em relação às profundidades críticas selecionadas para cada equipamento, serão 3 referentes ao cabo de aço e 3 ao de poliéster, correspondentes à profundidade inicial, uma profundidade intermediária e à final das respectivas zonas de ressonância, limitadas à profundidade total de 3000 m e arredondadas para valores múltiplos de 10 m. Foi adotada como profundidade inicial da zona de ressonância aquela obtida pelo método descrito no item 5.3.2, apresentado aqui como Método 2.

Tabela 5.13 Profundidades de análise

Equipamento			
1A	1B	2A	2B
230 m		40 m	
650 m		150 m	
1070 m		260 m	
2180 m		1290 m	
2590 m		2150 m	
3000 m		3000 m	

A Figura 5.14 e a Figura 5.15 apresentam em escala as zonas de ressonância obtidas para os equipamentos 1 e 2, respectivamente. O Método 1 citado nas figuras é aquele apresentado no item 5.3.1, com a consideração de mar regular, exposta apenas para efeito de comparação com o Método 2 adotado. Em cada profundidade selecionada,

serão realizadas simulações com ambos os tipos de cabo. A Tabela 5.13 resume, portanto, as profundidades que serão avaliadas para cada um dos equipamentos.

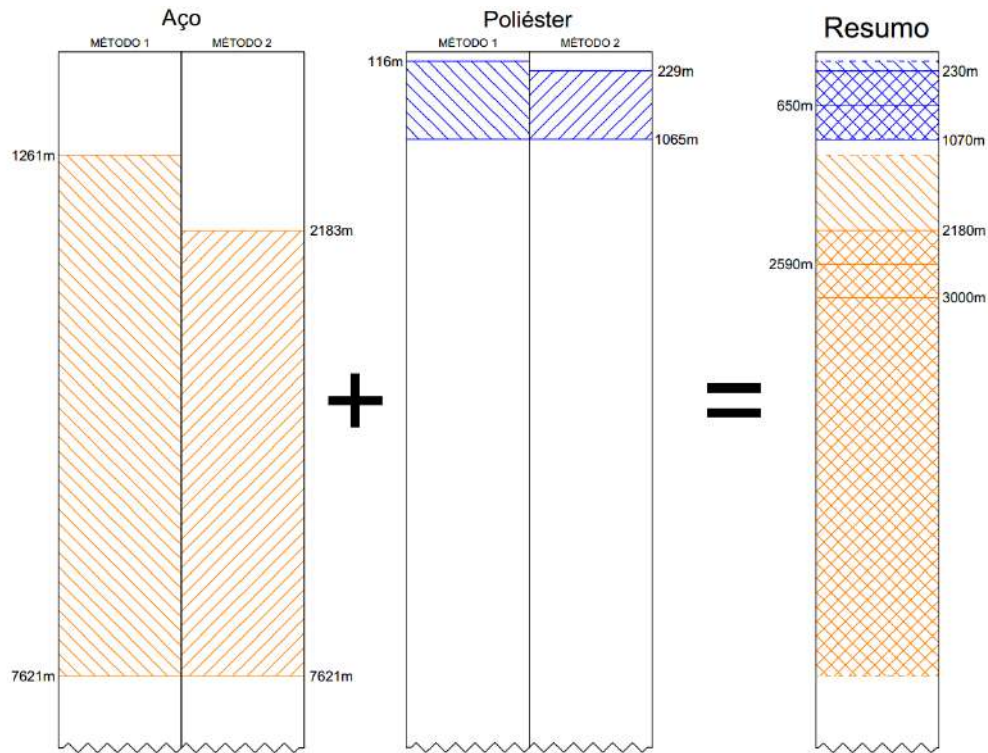


Figura 5.14 Zonas de ressonância para os equipamentos 1A e 1B

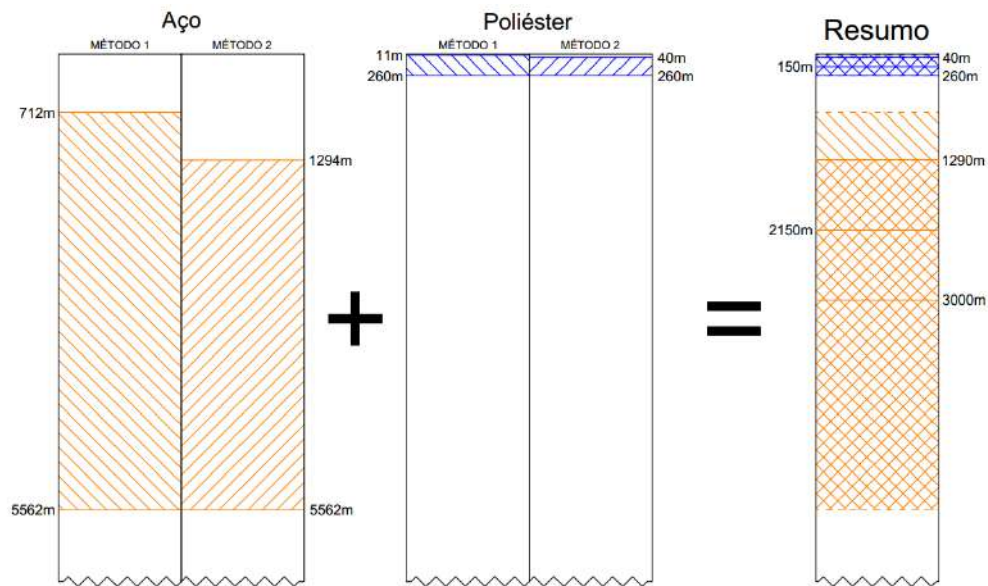


Figura 5.15 Zonas de ressonância para os equipamentos 2A e 2B

O resultado das simulações numéricas a ser adotado como variável de análise neste trabalho será o esforço axial no topo do cabo principal de lançamento do

equipamento. Como critérios de referência para sua avaliação, serão utilizadas as recomendações da DNV-RP-H103, da DNV-OS-H205 e da DNV-OS-H206 para situações de instalação de equipamentos. Em particular, os critérios: (i) de capacidade de carga, dito Critério 1; (ii) de afrouxamento (*slack sling*), dito Critério 2.

O Critério 1, citado nos itens 4.4.4 da DNV-RP-H103, 4.1.5 da DNV-OS-H205 e 5.3 da DNV-OS-H206, é apresentado neste trabalho pela expressão (5.2). Considerando a expressão (5.4), temos a força total no cabo composta por duas parcelas: uma estática F_{static} e uma dinâmica F_{hyd} . Logo, é possível apresentar o Critério 1 por (5.10), onde a parcela estática $F_{static,max}$ representa não só o peso submerso do equipamento (que é considerado o mesmo estando ele vazio ou cheio), como também o peso total dos cabos do sistema.

$$F_{hyd} \leq SWL - F_{static,max} \quad (5.10)$$

O Critério 2, citado nos itens 4.4.3 da DNV-RP-H103 e 5.3 da DNV-OS-H206, é apresentado neste trabalho pela expressão (5.5). Este critério deve ser atendido para garantir que, ao curso da operação, serão evitados os efeitos adversos das *snap loads*. Diferentemente do Critério 1, a parcela estática a ser considerada neste critério é a mínima $F_{static,min}$, que corresponde ao peso submerso do equipamento, somente. Por fim, a equação (5.11) agrupa ambos os critérios numa envoltória para a parcela dinâmica da força no cabo. A seção 6.1 deste trabalho descreve a obtenção destes parâmetros a partir das saídas do *software* SITUA-Prosism utilizado.

$$F_{hyd} \leq \begin{cases} SWL - F_{static,max}, & \text{Critério 1} \\ 0,9 F_{static,min}, & \text{Critério 2} \end{cases} \quad (5.11)$$

Assim, o estudo de caso deste trabalho fará as simulações sintetizadas na Tabela 5.14. Para cada uma das doze profundidades selecionadas são montados quatro modelos, sendo dois para os equipamentos com $C_d = 1,5$ e outros dois para os com $C_d = 7,0$ – variando o material do cabo de lançamento. Todos os 48 modelos contam com os mesmos dezoito casos de carregamento (6 períodos de onda em 3 ângulos de incidência diferentes). Serão realizadas, pois, 864 simulações numéricas do comportamento hidrodinâmico desses sistemas, cada uma delas tendo como resposta de análise a série

temporal de força total no topo do cabo principal de lançamento, donde se basearão todas as análises e conclusões apresentadas nas seções subsequentes.

Tabela 5.14 Simulações realizadas

Prof.	Cabo	Eqpto.	Comb.	Prof.	Cabo	Eqpto.	Comb.
230	Aço	1A	C1-C18	40	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
650	Aço	1A	C1-C18	150	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
1070	Aço	1A	C1-C18	260	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
2180	Aço	1A	C1-C18	1290	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
2590	Aço	1A	C1-C18	2150	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
3000	Aço	1A	C1-C18	3000	Aço	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
	Poliéster	1A	C1-C18		Poliéster	2A	C1-C18
		1B	C1-C18			2B	C1-C18
Total de simulações							864

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A variável de análise para as simulações numéricas realizadas nos termos descritos no capítulo 5 é a tração no topo do cabo de lançamento do equipamento. O *software* SITUA-Prosim fornece como saída a série temporal desta variável em cada caso de carregamento no tempo de simulação adotado – tipicamente para este trabalho 3600s.

Sobre cada saída temporal é realizada uma análise estatística, de modo que são obtidos os valores médios na série temporal e extremos máximos, considerando uma distribuição de Weibull. Estes resultados estatísticos estão registrados em maiores detalhes no Apêndice B.

$$F_{static,max} = \bar{F} \quad (6.1)$$

$$F_{static,min} = \bar{F} - [(P_{lin,ar}L_{ar}) + (P_{lin,sub}L_{sub})] \quad (6.2)$$

$$F_{hyd} = F_{max,Weibull} - F_{static,max} \quad (6.3)$$

Desta análise estatística, tem-se a média da série temporal $\bar{F}$, que equivale à parcela estática máxima $F_{static,max}$ da envoltória (5.11) – relação expressa por (6.1). Já a parcela estática mínima $F_{static,min}$ é calculada subtraindo da média, o peso próprio do cabo de lançamento, conforme (6.2), onde $P_{lin,ar}$ é o peso próprio linear no ar do cabo de lançamento, $P_{lin,sub}$ é o submerso, L_{ar} e L_{sub} são os comprimentos correlatos. Ademais, é possível calcular a parcela dinâmica F_{hyd} através da expressão (6.3). Estes valores são utilizados nas seções subsequentes para cálculo da envoltória dos critérios normativos e apresentação dos resultados.

6.2 EQUIPAMENTO 1

6.2.1 ENVOLTÓRIA DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam os valores limites para a parcela dinâmica do esforço axial de tração no cabo de lançamento de aço e de poliéster, respectivamente.

Os Critério 1 e 2 são os mesmos descritos no item 5.5, e a coluna Envoltória relata o menor valor entre eles, conforme (5.11), limitado a 0.

Tabela 6.1 Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de aço

Prof. [m]	SWL [kN]	Peso- próprio do cabo [kN]	$F_{static,max}$ [kN]	$F_{static,min}$ [kN]	Critério 1 [kN]	Critério 2 [kN]	Envoltória [kN]
230	1863	92	948	856	915	770	770
650	1863	243	1099	856	764	770	764
1070	1863	393	1249	856	614	770	614
2180	1863	791	1646	855	217	770	217
2590	1863	938	1793	855	70	770	70
3000	1863	1085	1940	855	-77	769	0

Para o cabo de aço escolhido e o coeficiente de segurança adotado, percebe-se que o cabo não apresentaria sequer capacidade de carga para suportar seu peso-próprio para comprimentos por volta dos 3000m, embora para a profundidade inicial analisada, 230m, a restrição do critério de *slack sling* seja mais importante.

Já com relação ao cabo de poliéster, percebe-se que seu peso próprio é tão baixo que torna-se irrelevante frente ao critério de *slack sling*, que é o crítico para todas as profundidades de análise do equipamento 1.

Tabela 6.2 Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de poliéster

Prof. [m]	SWL [kN]	Peso- próprio do cabo [kN]	$F_{static,max}$ [kN]	$F_{static,min}$ [kN]	Critério 1 [kN]	Critério 2 [kN]	Envoltória [kN]
230	1962	14	869	855	1093	770	770
650	1962	32	886	854	1076	768	768
1070	1962	50	902	852	1060	767	767
2180	1962	97	946	849	1016	764	764
2590	1962	115	962	848	1000	763	763
3000	1962	132	979	846	983	762	762

6.2.2 RESULTADOS DE TRAÇÃO POR ESTADO DE MAR EM CADA PROFUNDIDADE

Com base nos resultados estatísticos, é calculada a parcela dinâmica da tração no topo do cabo do guindaste e agrupada nesta seção por profundidade e incidência de onda. Desta forma, é possível observar a variação de tração com o período da onda, verificar ocorrência de efeito de ressonância para período de onda específico em cada profundidade, bem como identificar eventuais relações de comportamento com os dois valores de coeficientes de arrasto adotados para o equipamento.

A Tabela C.1 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 230m. A Figura 6.1, a Figura 6.2 e a Figura 6.3 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

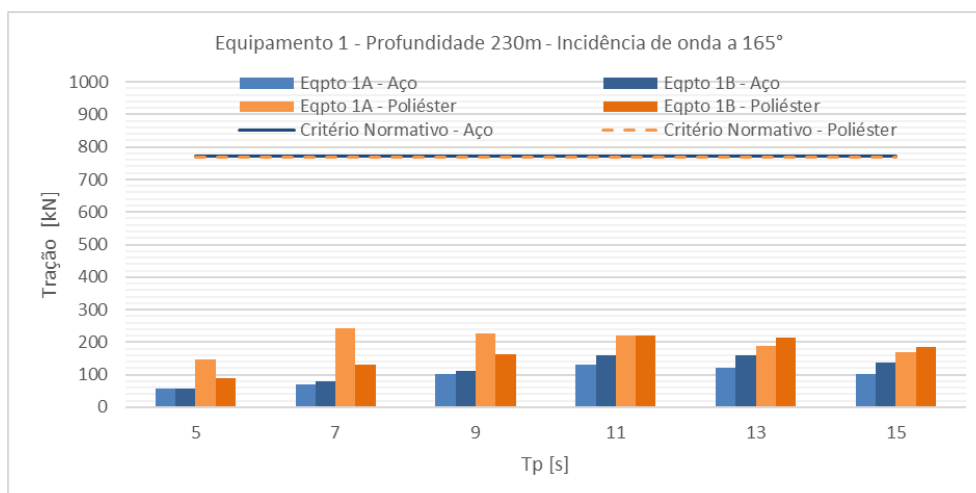


Figura 6.1 Resultados, profundidade 230m, onda a 165°, Equipamento 1

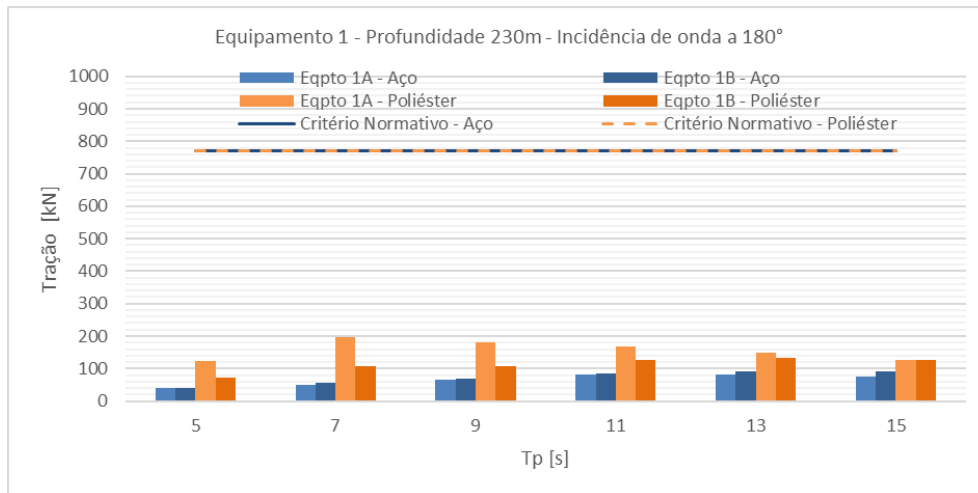


Figura 6.2 Resultados, profundidade 230m, onda a 180°, Equipamento 1

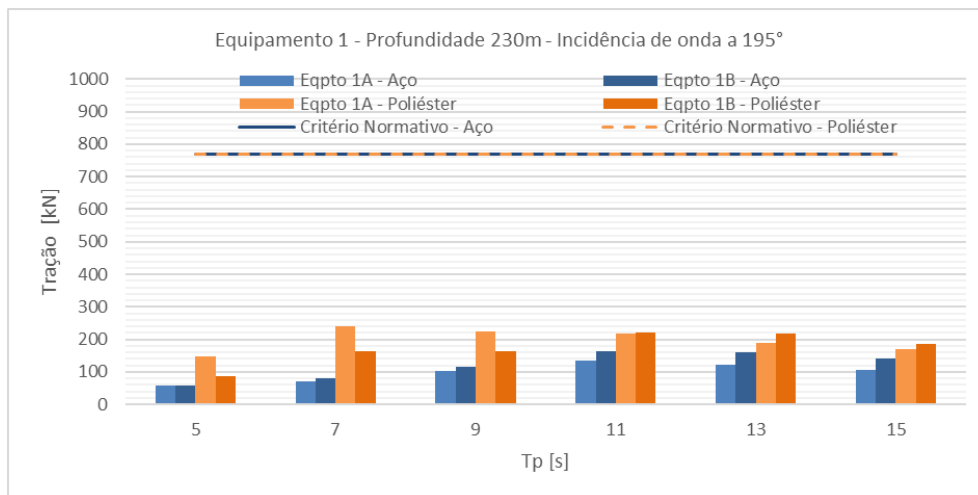


Figura 6.3 Resultados, profundidade 230m, onda a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.2 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 650m. A Figura 6.4, a Figura 6.5 e a Figura 6.6 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

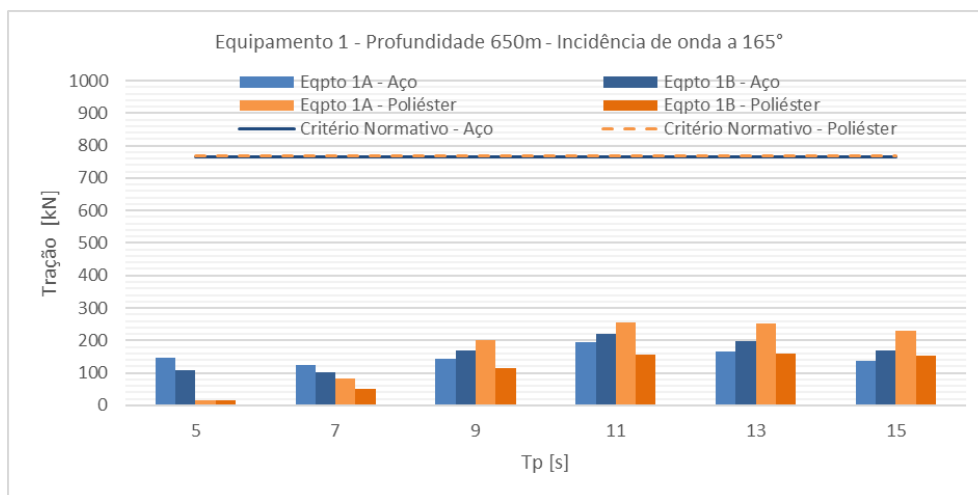


Figura 6.4 Resultados, profundidade 650m, onda a 165°, Equipamento 1

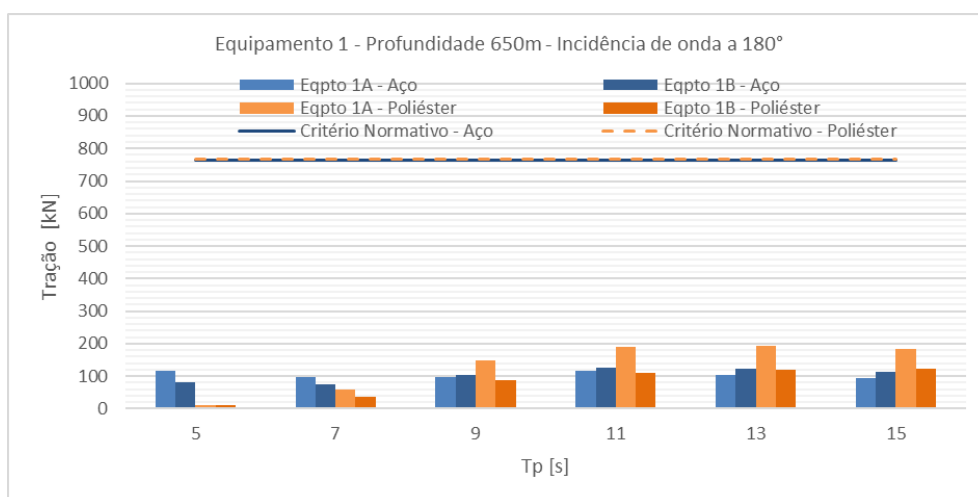


Figura 6.5 Resultados, profundidade 650m, onda a 180°, Equipamento 1

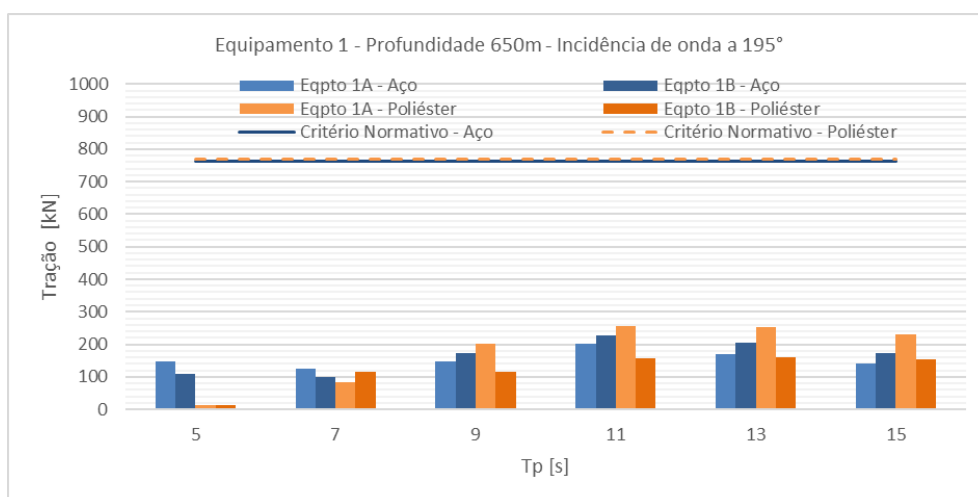


Figura 6.6 Resultados, profundidade 650m, onda a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.3 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 1070m. A Figura 6.7, a Figura 6.8 e a Figura 6.9 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

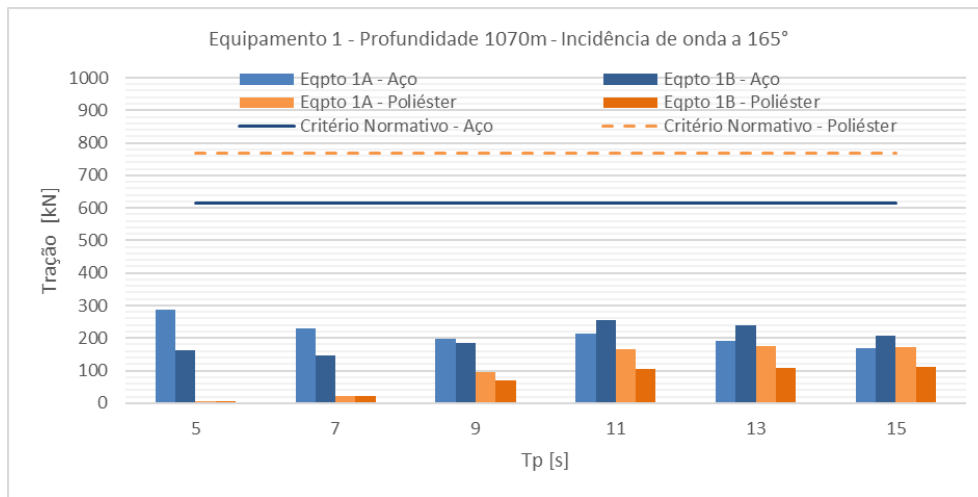


Figura 6.7 Resultados, profundidade 1070m, onda a 165°, Equipamento 1

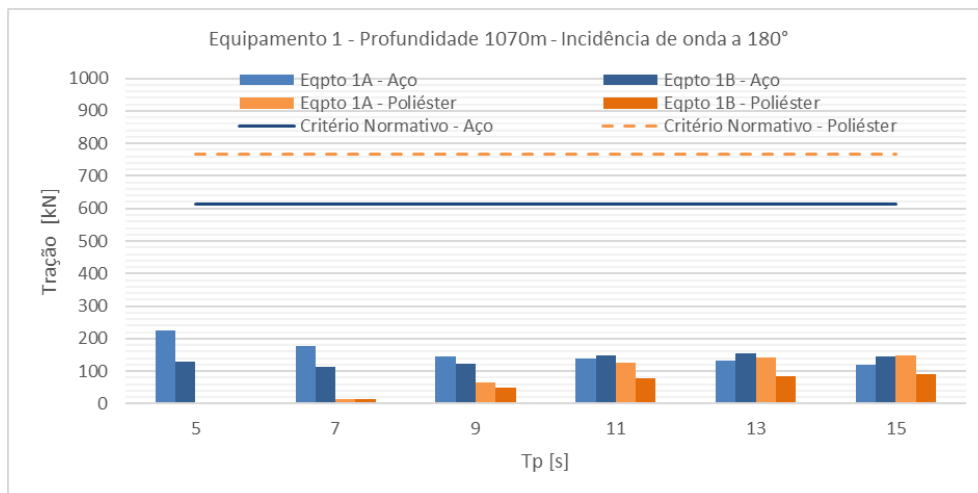


Figura 6.8 Resultados, profundidade 1070m, onda a 180°, Equipamento 1

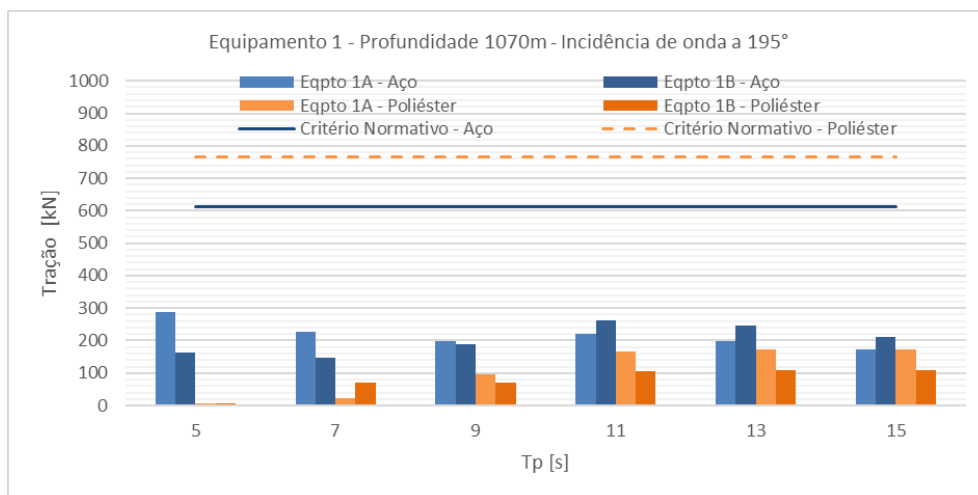


Figura 6.9 Resultados, profundidade 1070m, onda a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.4 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 2180m. A Figura 6.10, a Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

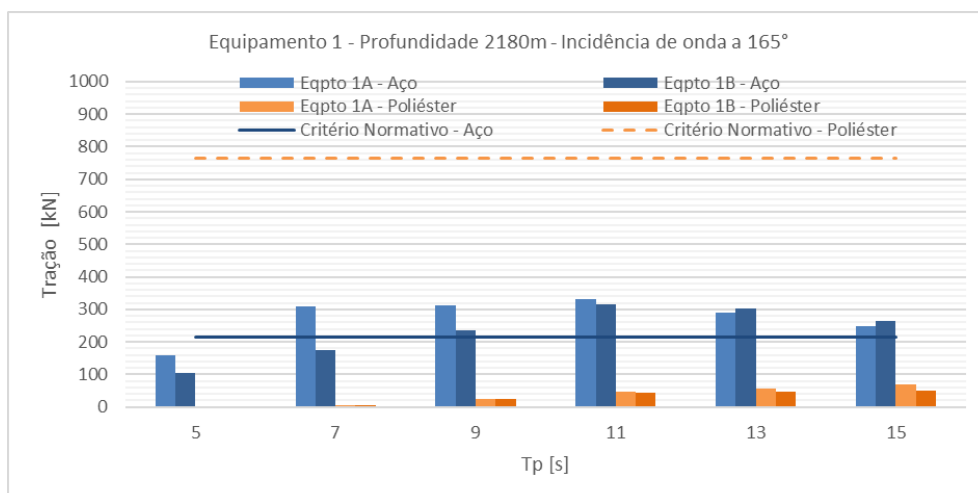


Figura 6.10 Resultados, profundidade 2180m, onda a 165°, Equipamento 1

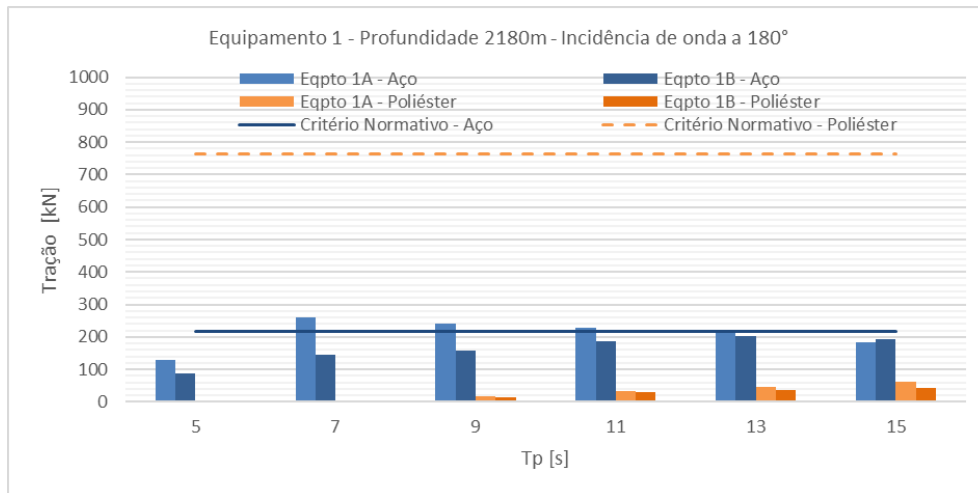


Figura 6.11 Resultados, profundidade 2180m, onda a 180°, Equipamento 1

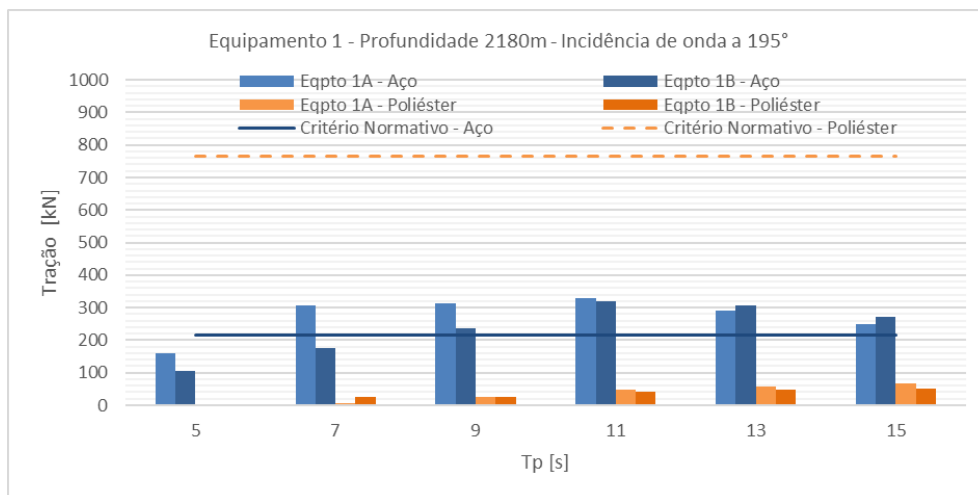


Figura 6.12 Resultados, profundidade 2180m, onda a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.5 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 2590m. A Figura 6.13, a Figura 6.14 e a Figura 6.15 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

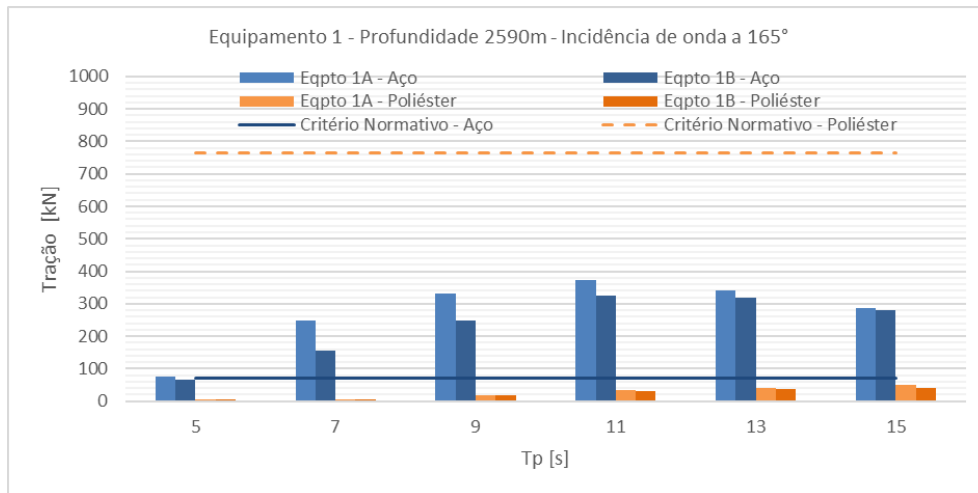


Figura 6.13 Resultados, profundidade 2590m, onda a 165°, Equipamento 1

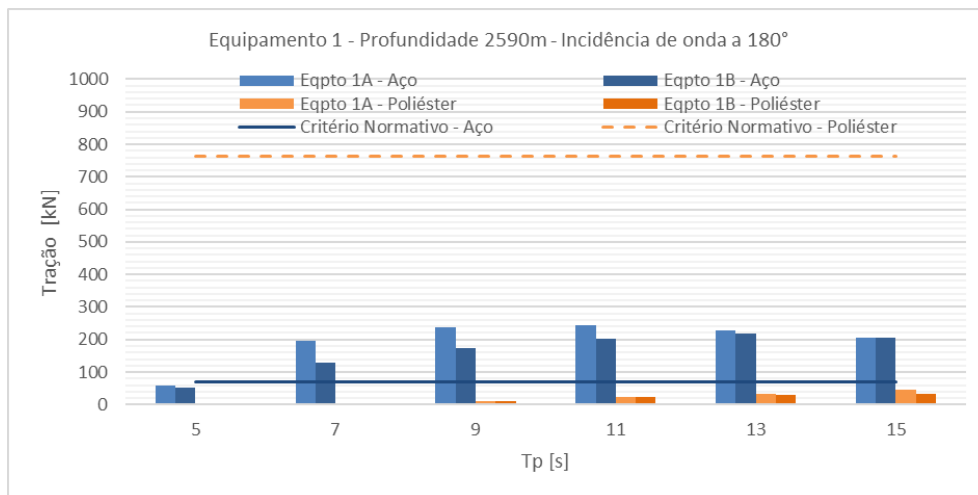


Figura 6.14 Resultados, profundidade 2590m, onda a 180°, Equipamento 1

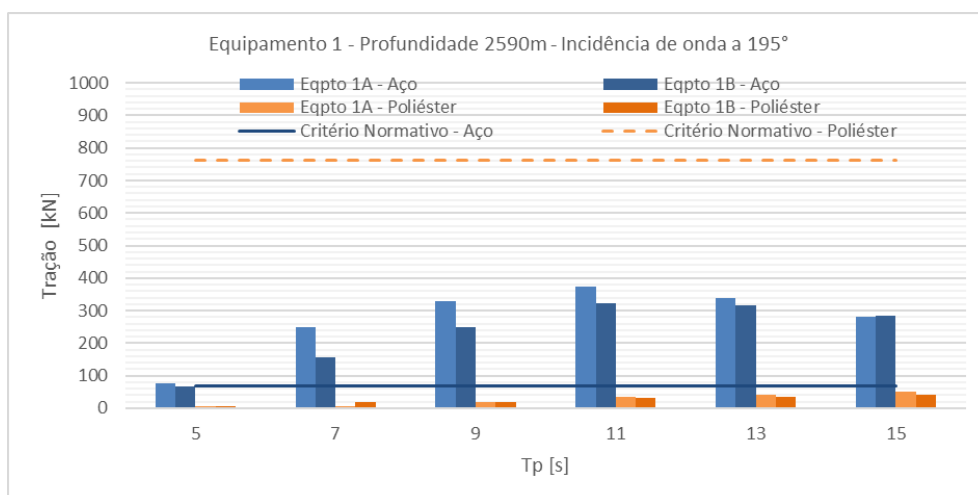


Figura 6.15 Resultados, profundidade 2590m, onda a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.6 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 3000m. A Figura 6.16, a Figura 6.17 e a Figura 6.18 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

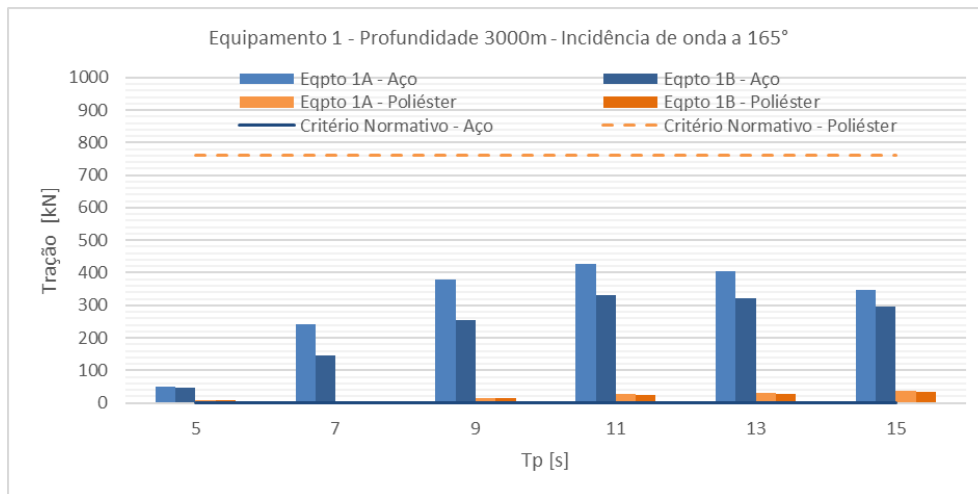


Figura 6.16 Resultados, profundidade 3000m, onda a 165°, Equipamento 1

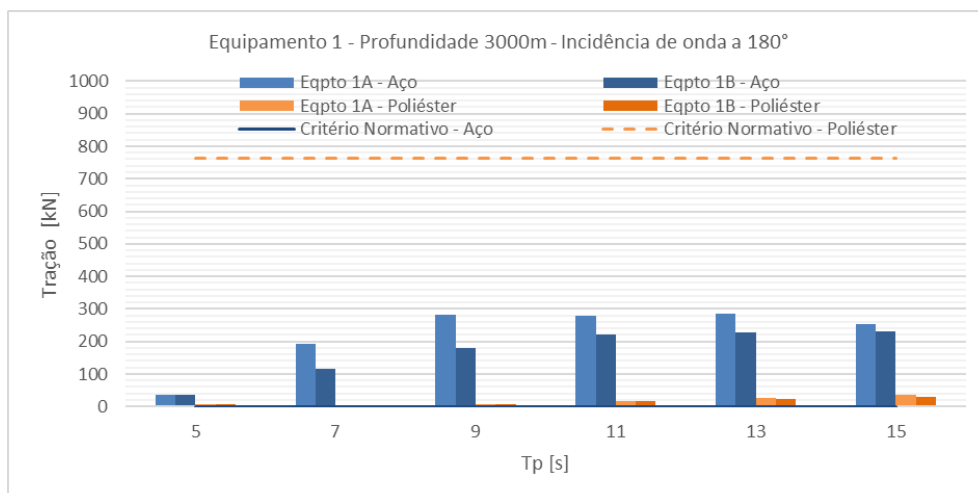


Figura 6.17 Resultados, profundidade 3000m, onda a 180°, Equipamento 1

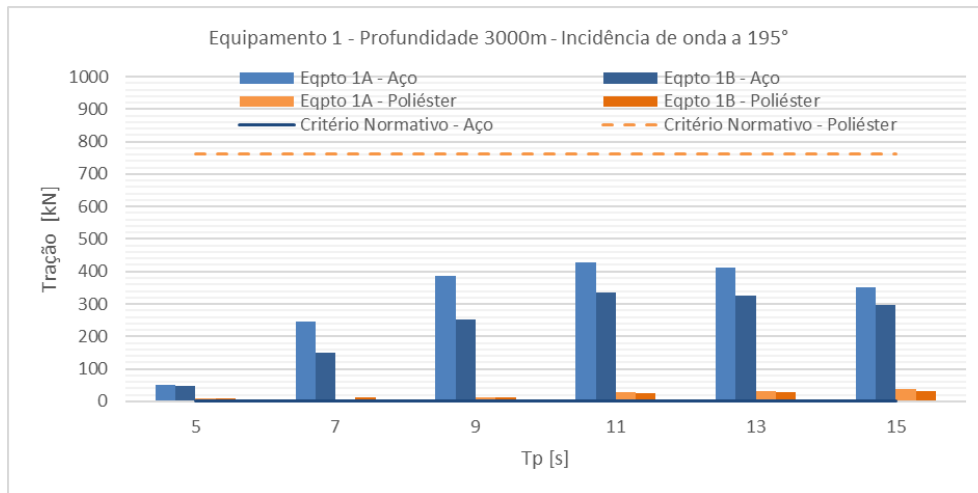


Figura 6.18 Resultados, profundidade 3000m, onda a 195°, Equipamento 1

As profundidades iniciais 230m, 650m e 1070m referem-se à zona de ressonância do poliéster. Com efeito, é possível observar valores de parcela dinâmica de tração mais importantes para os modelos de equipamento com cabo de poliéster, para ambos os valores considerados para coeficiente de arrasto – sem, no entanto, ultrapassar a envoltória dos critérios normativos.

De forma semelhante, as profundidades 2180m, 2590m e 3000m referem-se à zona de ressonância do aço, tendo valores de parcela dinâmica de tração para os modelos com este material ultrapassando o critério normativo de capacidade de carga já nos modelos a 2180m entre os períodos de pico de onda de 7s a 15s.

A parcela de arrasto mostra ter mais influência para períodos de onda maiores e profundidades menores, de modo que os modelos de cabo de aço com $C_d = 7,0$ apresentam valores de tração maiores que os modelos com $C_d = 1,5$ para a profundidade de 230m – e isso ocorre para parte dos períodos de onda do cabo de poliéster também. No outro extremo, a 3000m, as trações mais importantes para o cabo de aço ocorrem com o equipamento com $C_d = 1,5$. Para o cabo de poliéster, as parcelas dinâmicas em profundidades maiores já são de magnitude muito baixa, portanto esta análise é irrelevante.

6.2.3 RESULTADOS DE TRAÇÃO POR PROFUNDIDADE EM CADA ESTADO DE MAR

De forma semelhante à seção 6.2.2, a parcela dinâmica da tração no topo do cabo do guindaste é agrupada, desta vez, por período e incidência de onda. Desta forma, é possível observar a variação de tração com a profundidade em cada estado de mar, verificar profundidades de ocorrência de picos de tração para cada período de onda, assim como identificar eventuais relações de comportamento com os dois valores de coeficientes de arrasto adotados para o equipamento.

Ademais, esta disposição de resultados permite acompanhar a mudança de valor da envoltória de critérios normativos. Sabendo que o Critério 2 – *slack sling* não varia com a profundidade, qualquer variação observada nesta envoltória está relacionada ao Critério 1 – capacidade de carga do sistema.

A Tabela C.7 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 5\text{s}$. A Figura 6.19, a Figura 6.20 e a Figura 6.21 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165° , 180° e 195° , respectivamente.

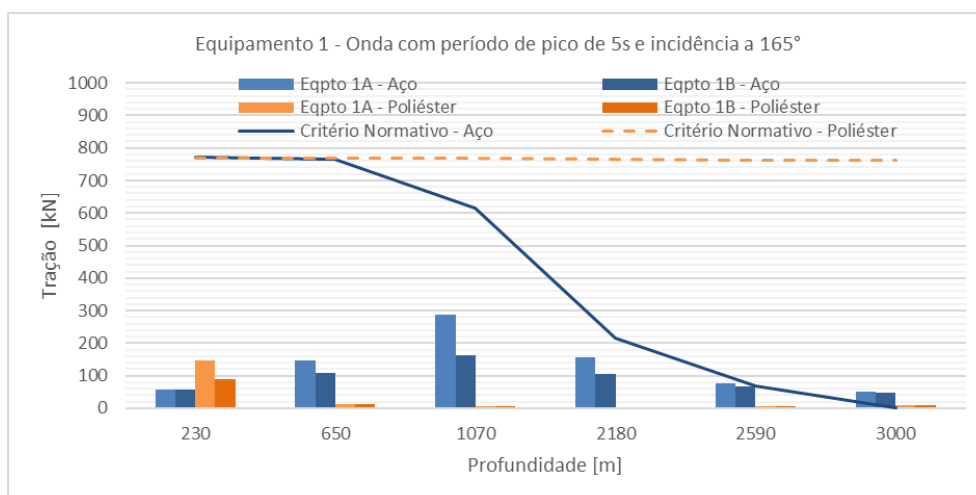


Figura 6.19 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 165° , Equipamento 1

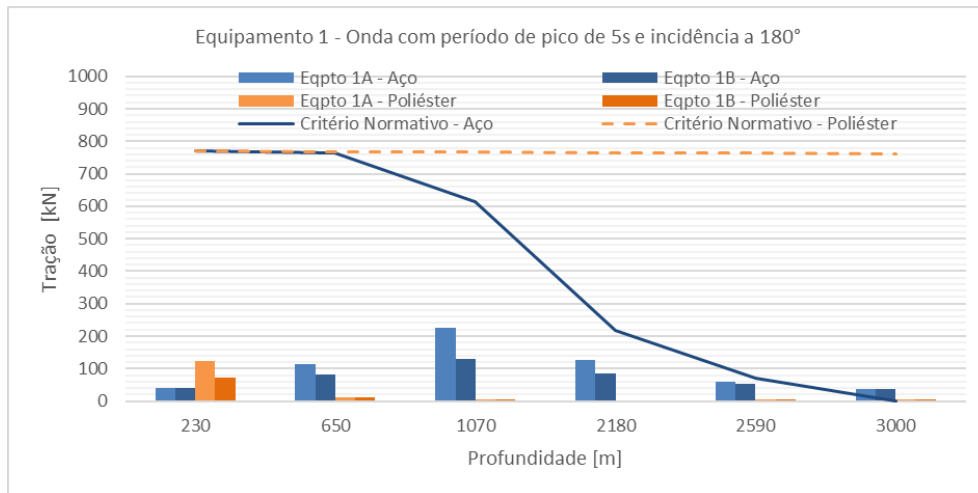


Figura 6.20 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 180°, Equipamento 1

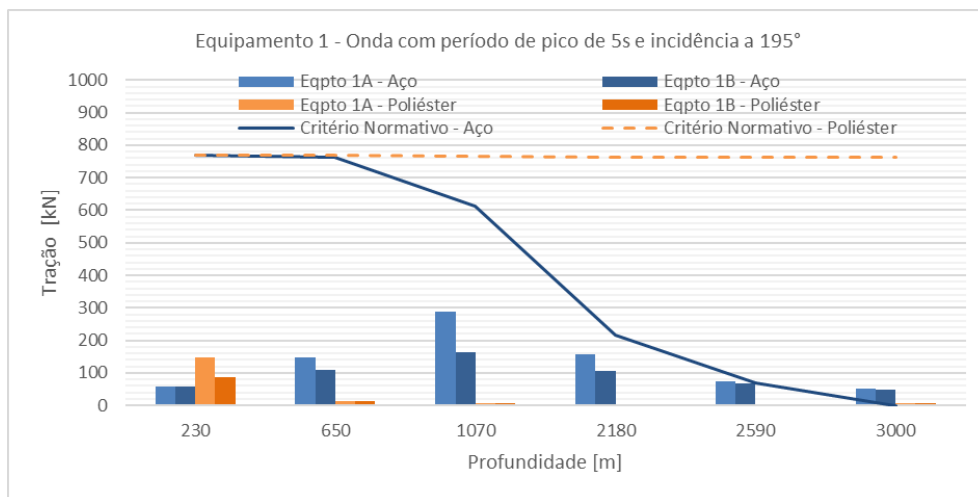


Figura 6.21 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.8 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 7\text{s}$. A Figura 6.22, a Figura 6.23 e a Figura 6.24 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

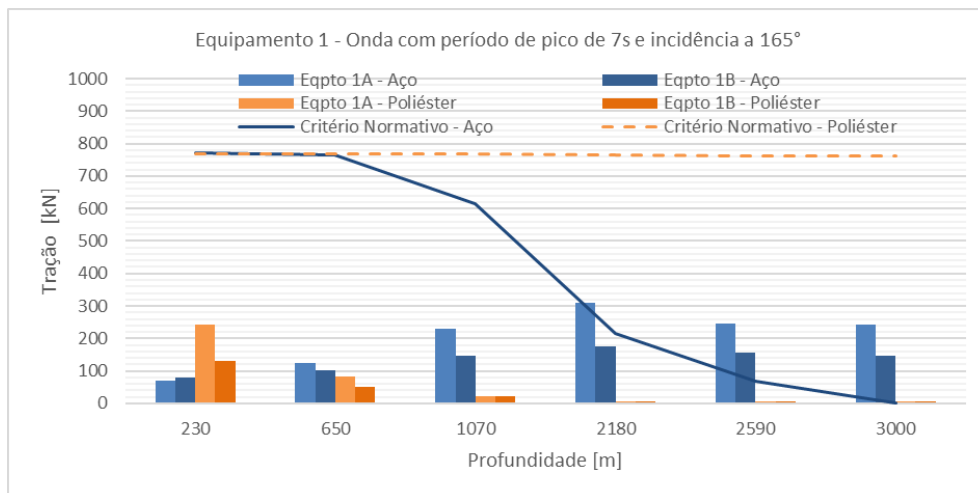


Figura 6.22 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 165°, Equipamento 1

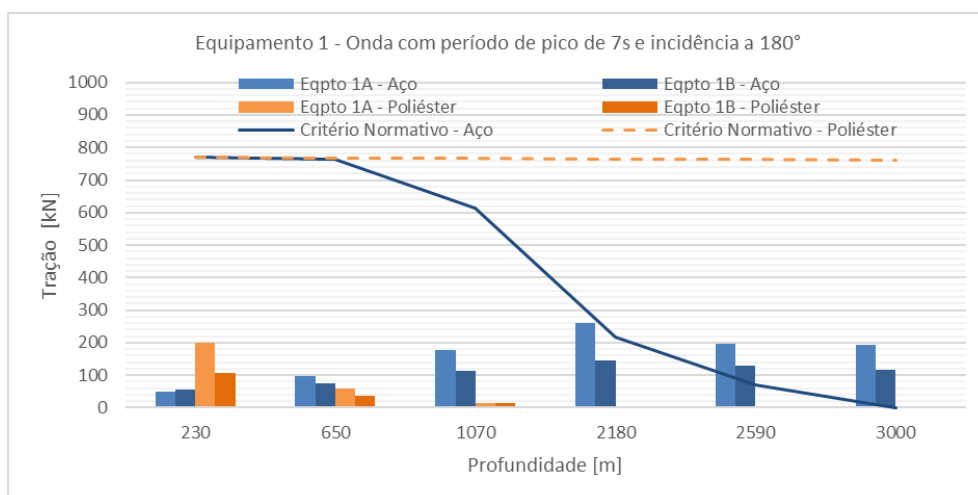


Figura 6.23 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 180°, Equipamento 1

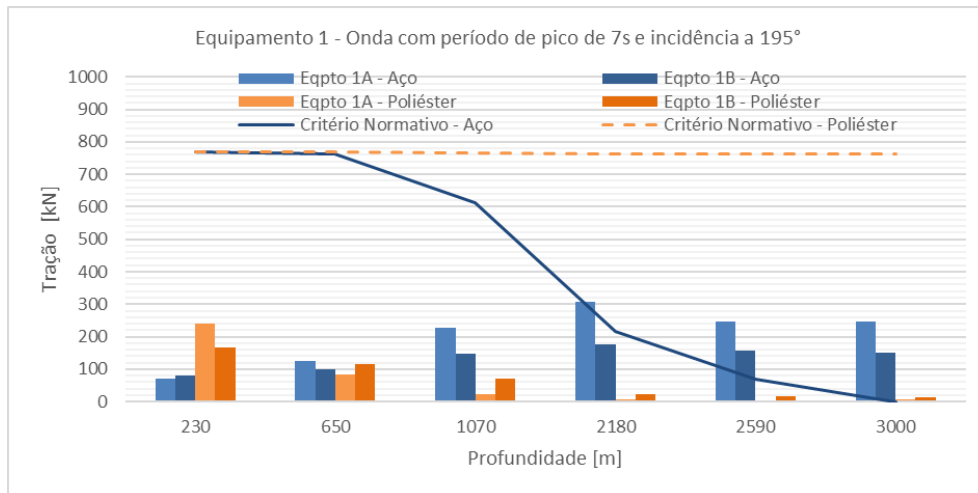


Figura 6.24 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.9 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 9\text{s}$. A Figura 6.25, a Figura 6.26 e a Figura 6.27 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

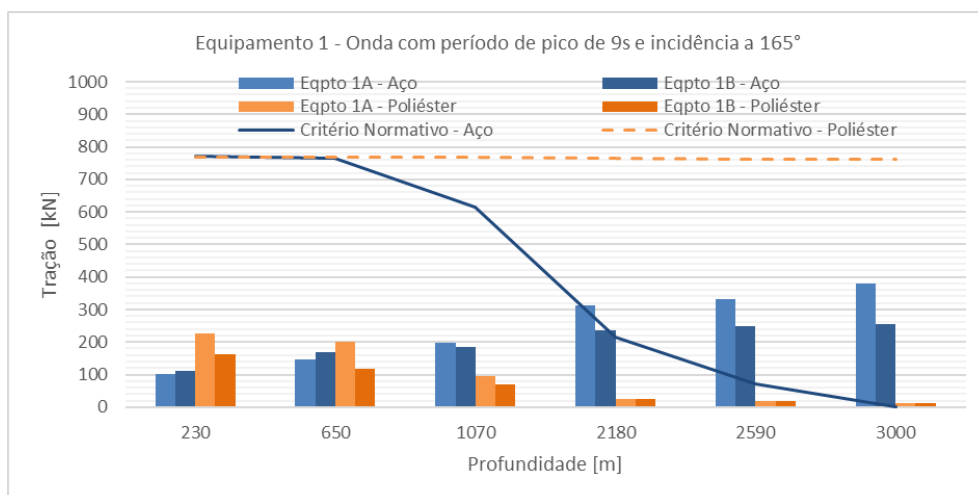


Figura 6.25 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 165°, Equipamento 1

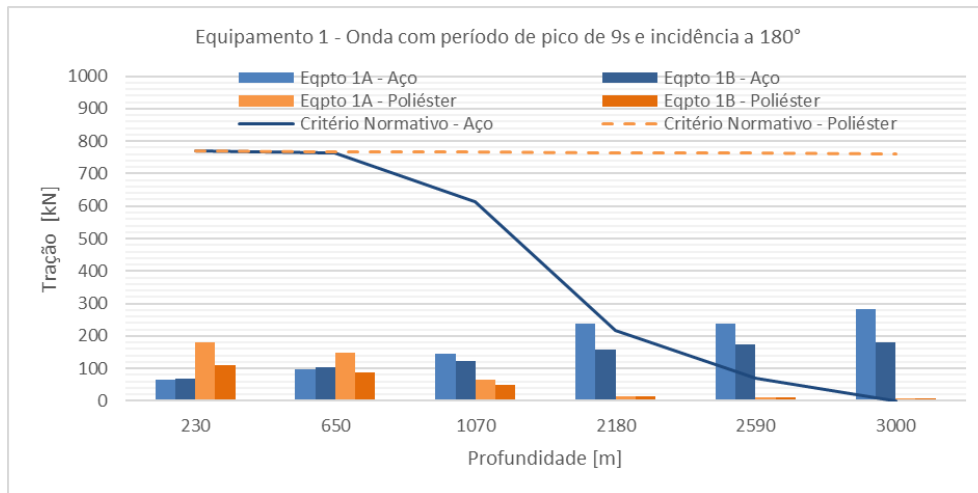


Figura 6.26 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 180°, Equipamento 1

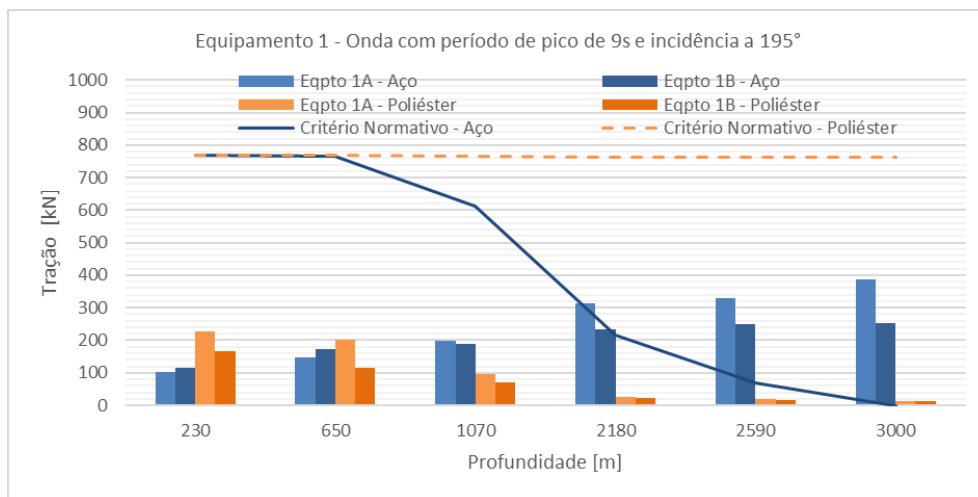


Figura 6.27 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.10 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 11\text{s}$. A Figura 6.28, a Figura 6.29 e a Figura 6.30 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

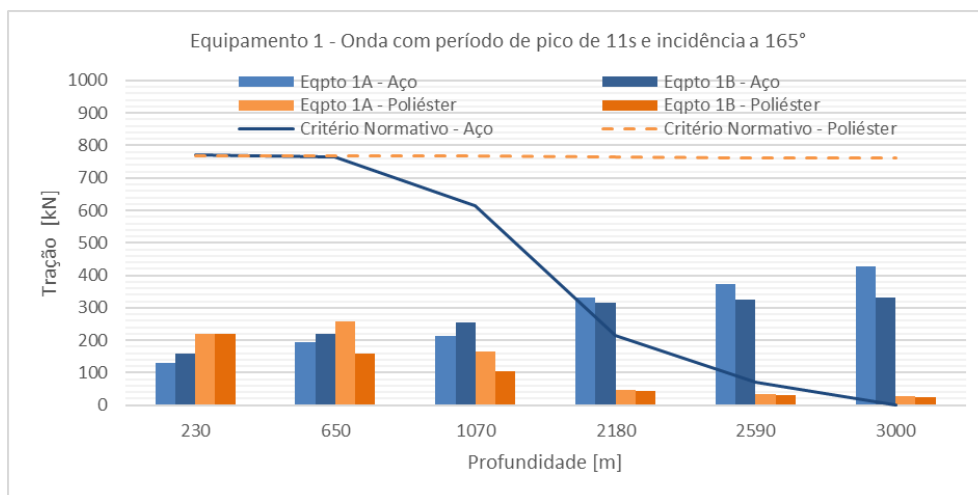


Figura 6.28 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 165°, Equipamento 1

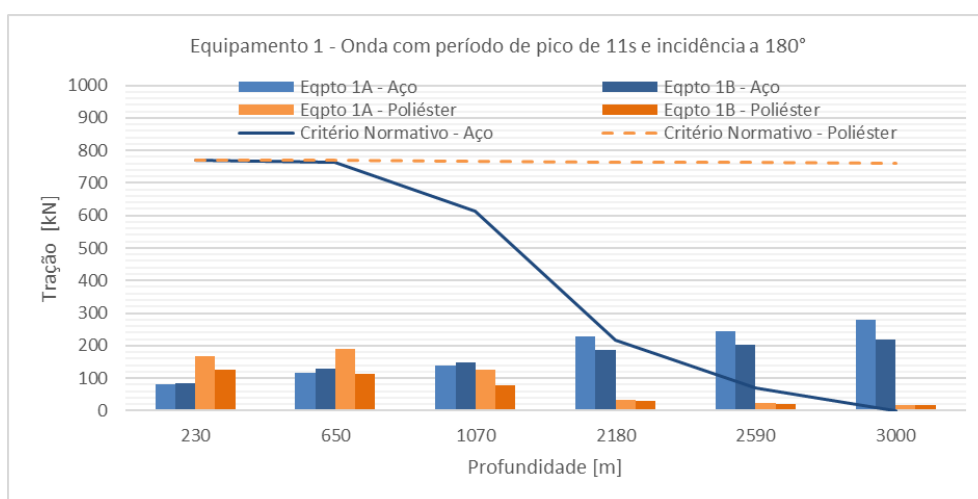


Figura 6.29 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 180°, Equipamento 1

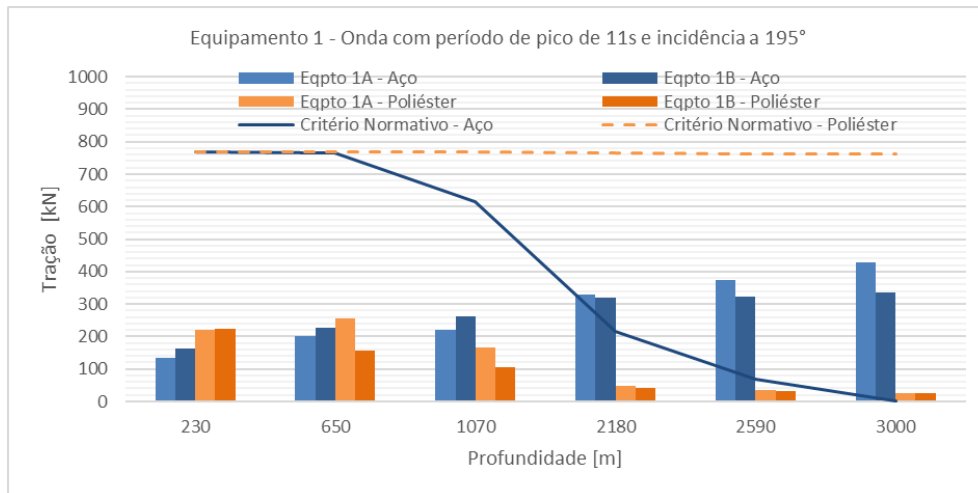


Figura 6.30 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.11 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 13\text{s}$. A Figura 6.31, a Figura 6.32 e a Figura 6.33 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

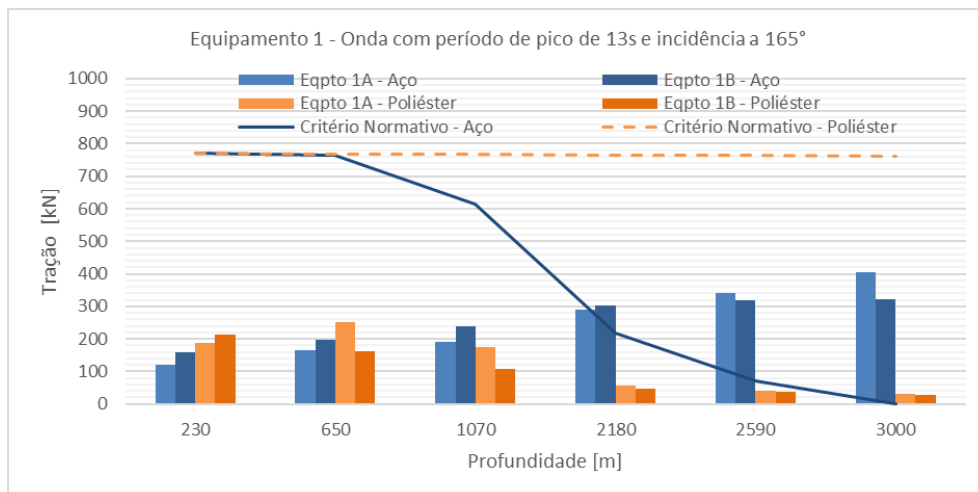


Figura 6.31 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 165°, Equipamento 1

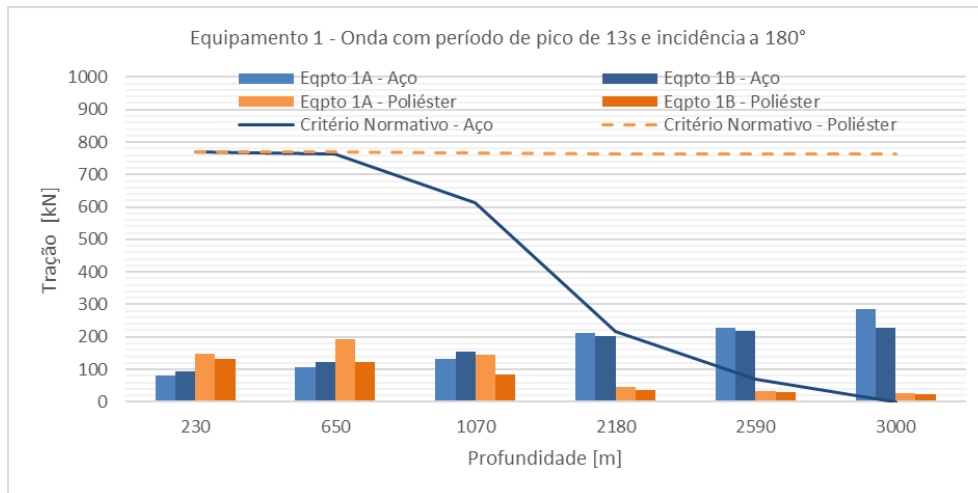


Figura 6.32 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 180°, Equipamento 1

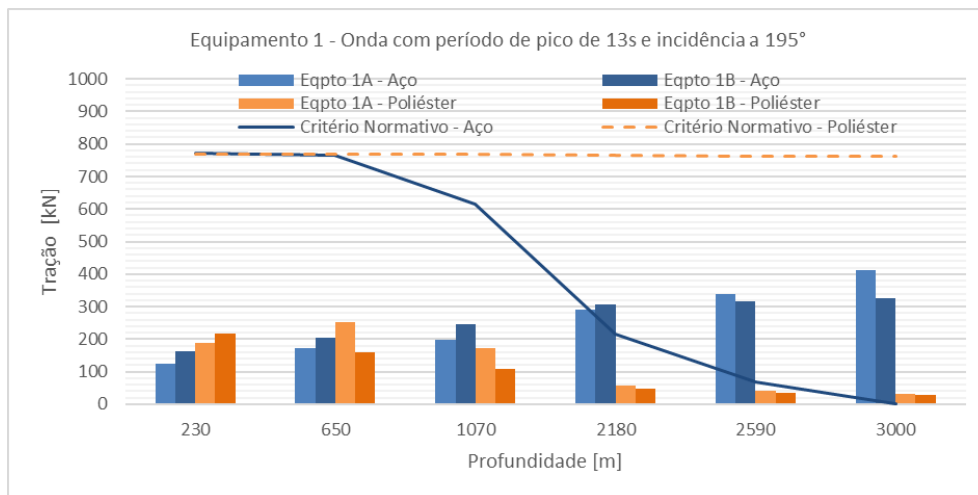


Figura 6.33 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 195°, Equipamento 1

A Tabela C.12 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 15\text{s}$. A Figura 6.34, a Figura 6.35 e a Figura 6.36 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

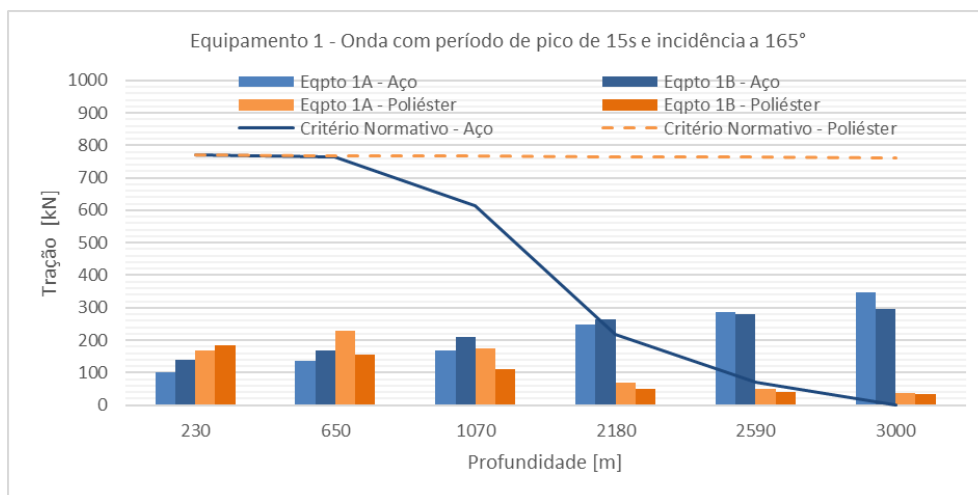


Figura 6.34 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 165°, Equipamento 1

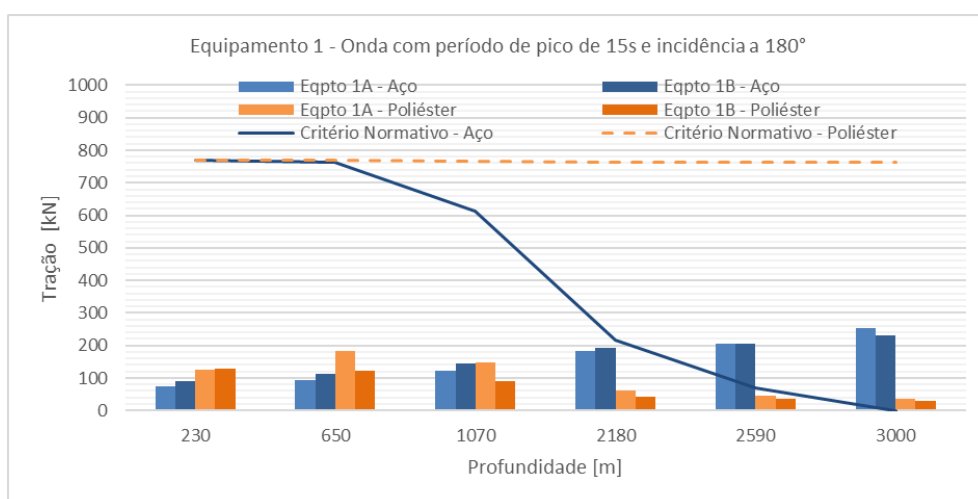


Figura 6.35 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 180°, Equipamento 1

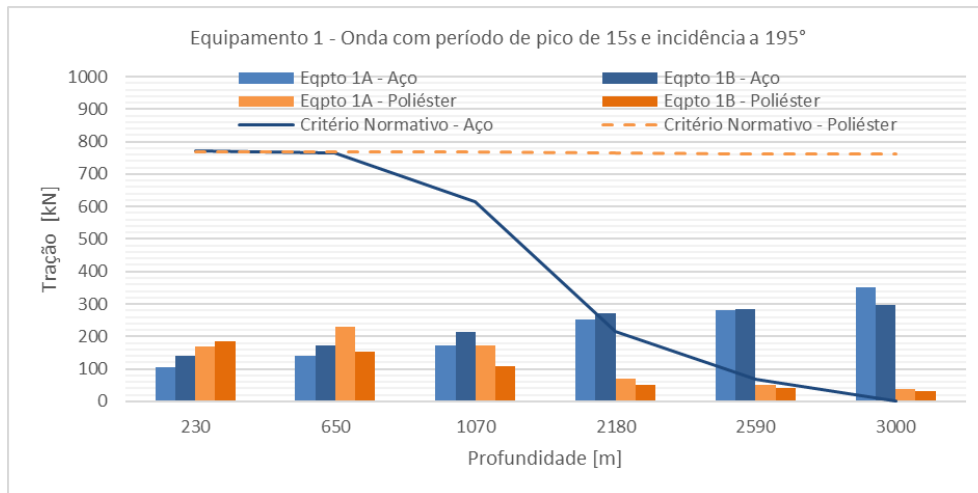


Figura 6.36 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 195°, Equipamento 1

Para as ondas com $T_p = 5s$, observa-se um pico da parcela dinâmica de tração para o cabo de aço na profundidade de 1070m, o que parece ser um resultado discrepante com a zona de ressonância estimada conforme processo descrito na seção 5.3.2. Entretanto, se analisarmos com atenção o espectro de resposta para o período em questão, reproduzido na Figura 6.37, é possível identificar seu caráter multimodal, fato que é negligenciado pelo procedimento de cálculo de períodos naturais, que considera apenas o maior dos picos de energia do espectro de resposta.

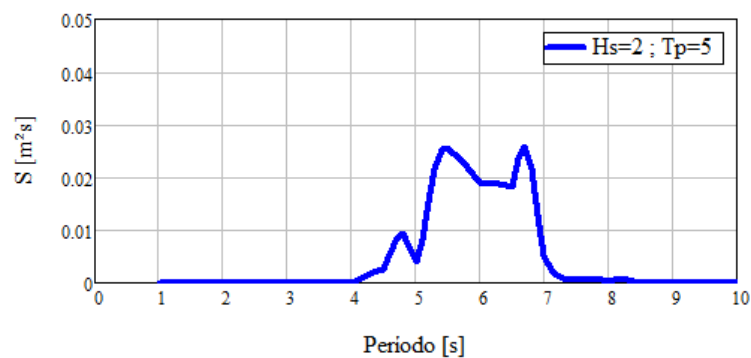


Figura 6.37 Espectro de resposta do movimento vertical no ponto de conexão, onda com período de pico de 5s

A despeito disto, a tração no cabo de aço nestas condições ainda atende ao critério de segurança de norma, já que, embora seja um espectro multimodal, sua energia é muito

baixa relativamente aos outros períodos de onda – refletindo-se em magnitudes mais baixas de tração.

Para além deste efeito, é possível observar que, de uma forma geral, os resultados de tração para o poliéster de fato são mais importantes nas profundidades iniciais, que correspondem à sua zona de ressonância, para todos os períodos de onda considerados. Embora o critério de norma seja atendido para todos eles.

Para o aço, é possível observar que já há violação do critério normativo a partir do período de onda de 7s particularmente para o equipamento com coeficiente de arrasto $C_d = 1,5$; e a partir do período de onda de 9s, considerando $C_d = 7,0$.

6.2.4 TRAÇÃO CRÍTICA EM CADA PROFUNDIDADE – CABO DE AÇO

Com o objetivo de identificar valores máximos de parcela dinâmica de tração no topo do cabo de aço em cada profundidade, independentemente do período ou incidência de onda, os resultados são agrupados, nesta seção, por profundidade e coeficiente de arrasto adotado para o equipamento.

A Tabela C.13 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 230m. A Figura 6.38 e a Figura 6.39 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

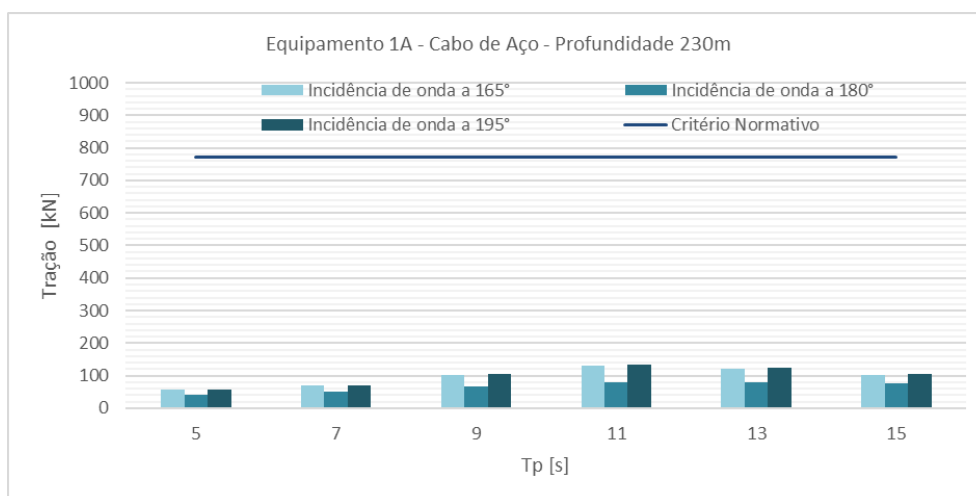


Figura 6.38 Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1A

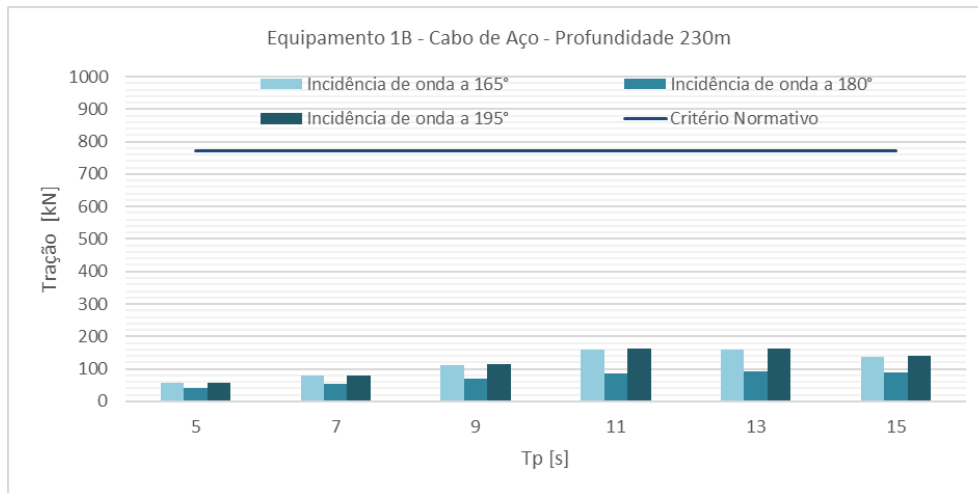


Figura 6.39 Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1B

A Tabela C.14 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 650m. A Figura 6.40 e a Figura 6.41 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

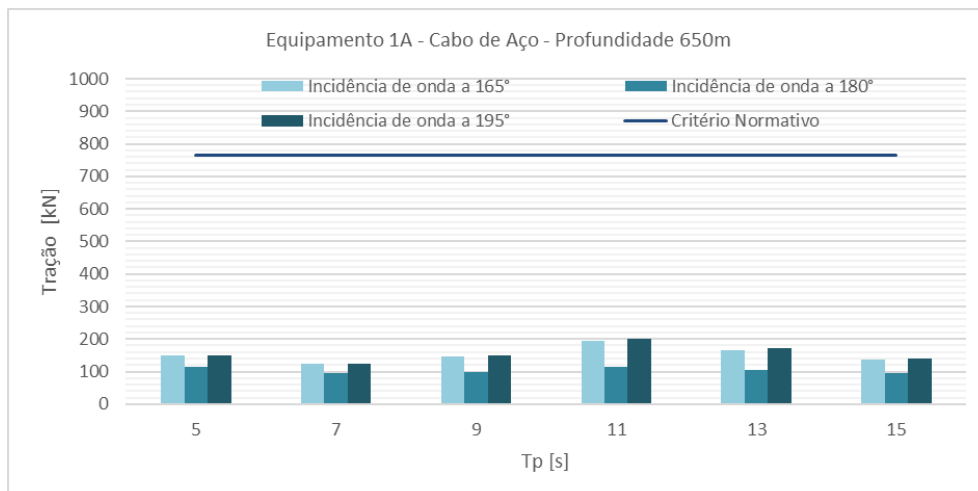


Figura 6.40 Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1A

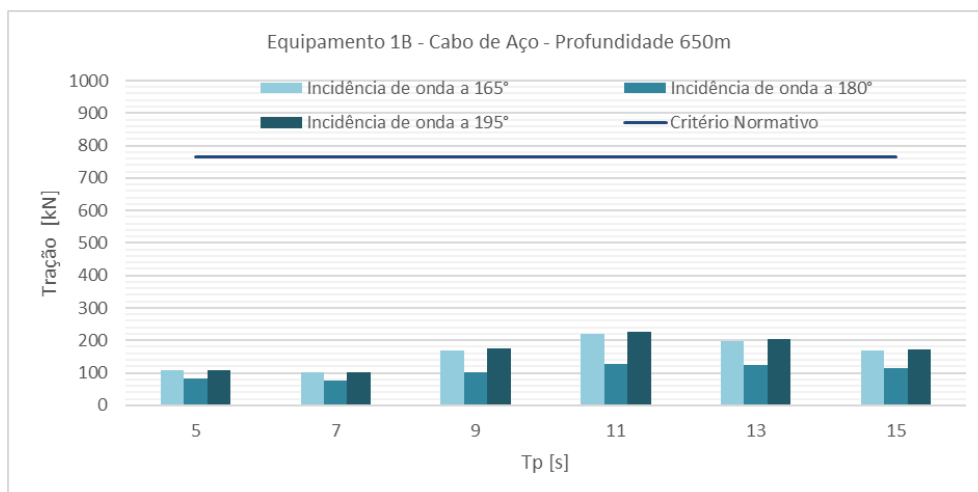


Figura 6.41 Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1B

A Tabela C.15 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 1070m. A Figura 6.42 e a Figura 6.43 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

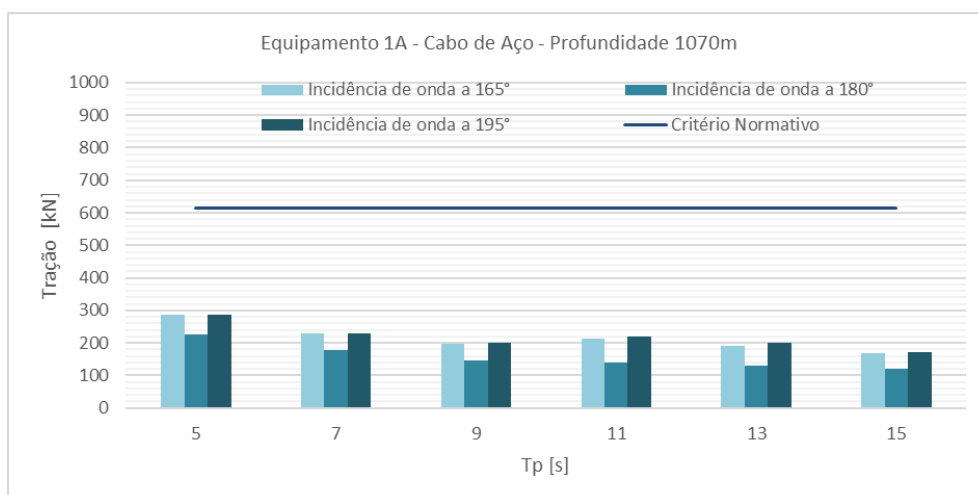


Figura 6.42 Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1A

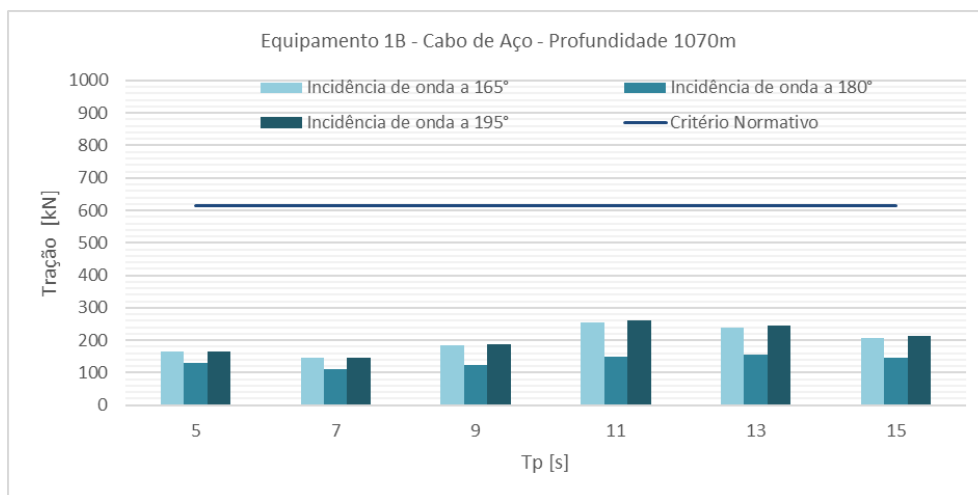


Figura 6.43 Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1B

A Tabela C.16 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 2180m. A Figura 6.44 e a Figura 6.45 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

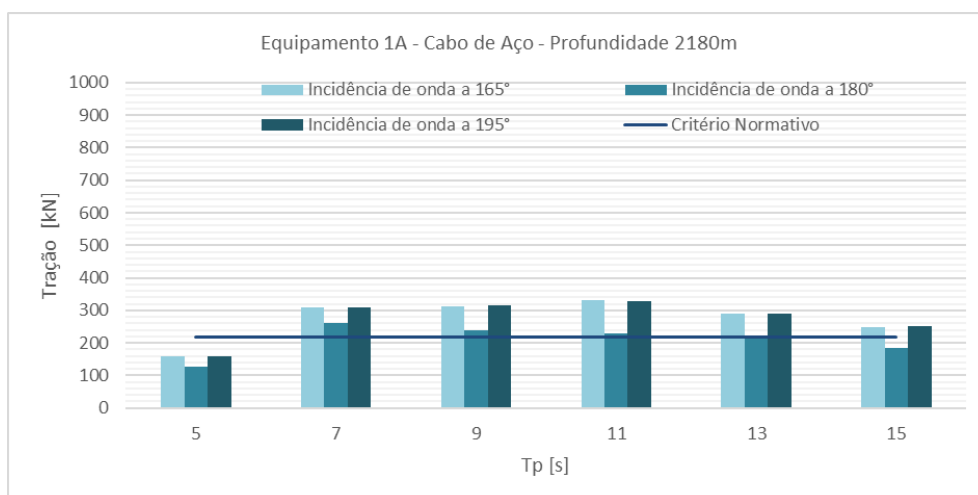


Figura 6.44 Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1A

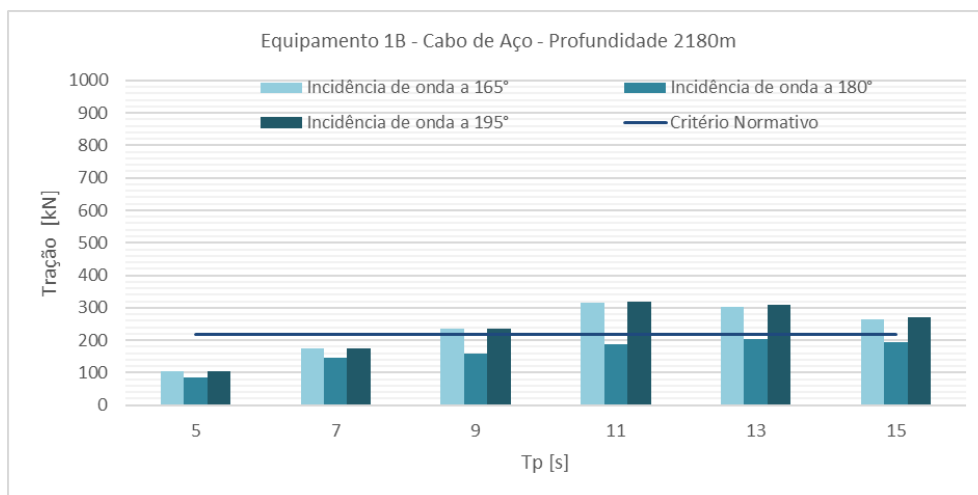


Figura 6.45 Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1B

A Tabela C.17 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 2590m. A Figura 6.46 e a Figura 6.47 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

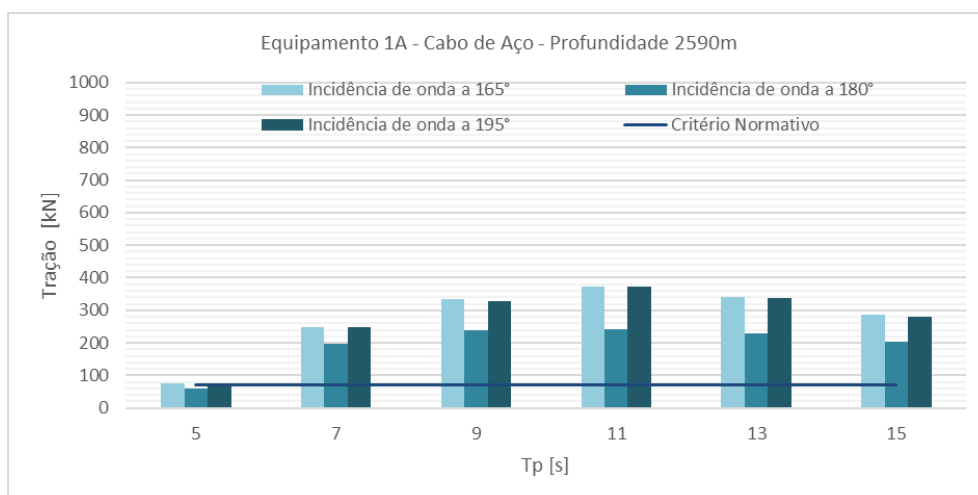


Figura 6.46 Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1A

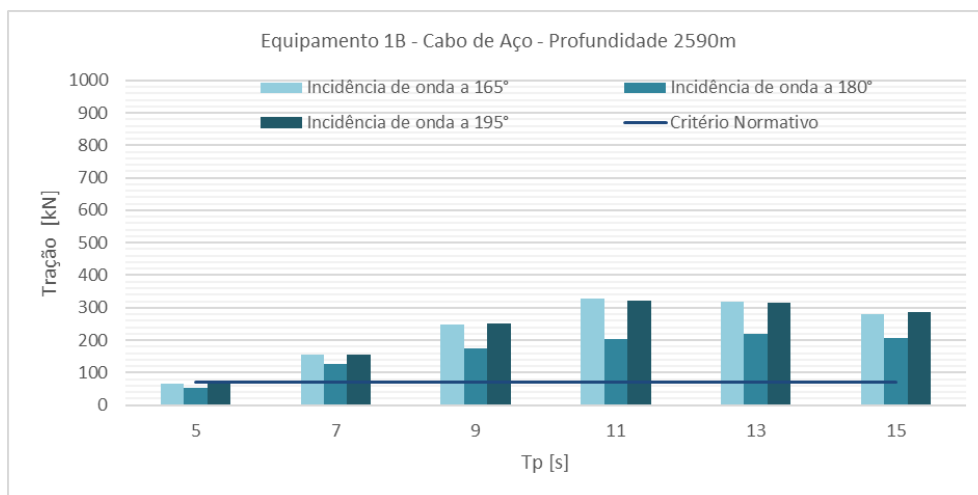


Figura 6.47 Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1B

A Tabela C.18 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 3000m. A Figura 6.48 e a Figura 6.49 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

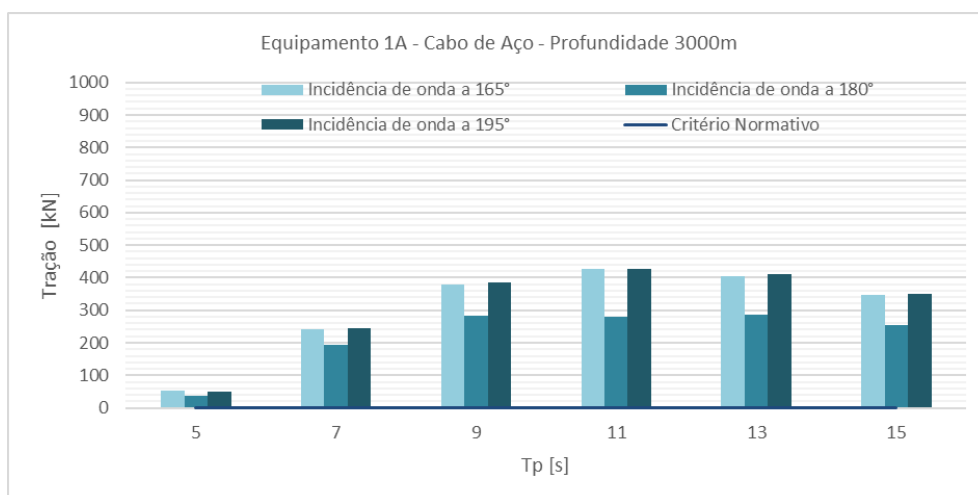


Figura 6.48 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1A

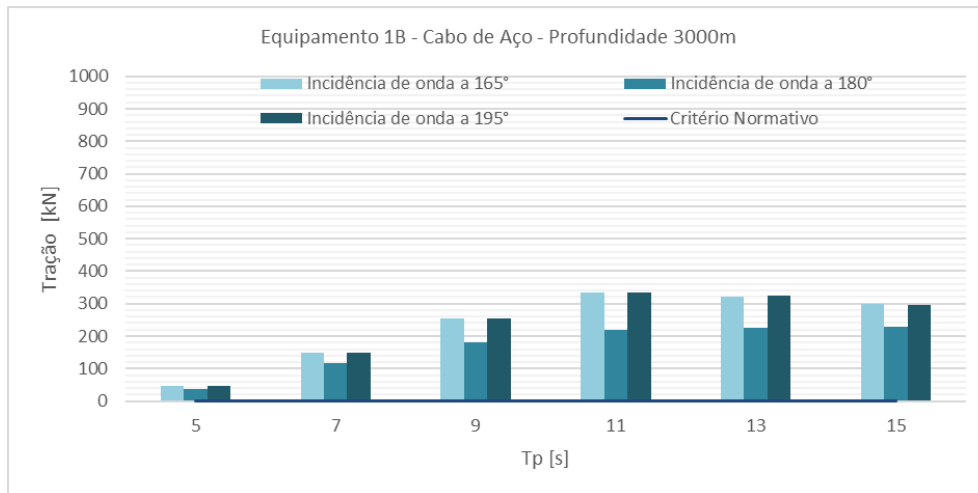


Figura 6.49 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1B

Dos valores de tração agrupados acima, é possível identificar os máximos para cada profundidade e equipamento, resultando na Tabela C.19 de valores críticos e o gráfico correlato da Figura 6.50. Dessa forma, observa-se que os valores críticos de tração para o Equipamento 1 ocorrem para a consideração de $C_d = 7,0$ nas profundidades iniciais de 230m e 650m. Para as demais, os esforços obtidos com o coeficiente de arrasto considerado $C_d = 1,5$ são os críticos. Isto sugere que a parcela de arrasto da formulação de Morison tem um efeito amortecedor mais importante para o sistema em profundidades maiores, ou seja, na zona de ressonância para o sistema de instalação com cabo de aço.

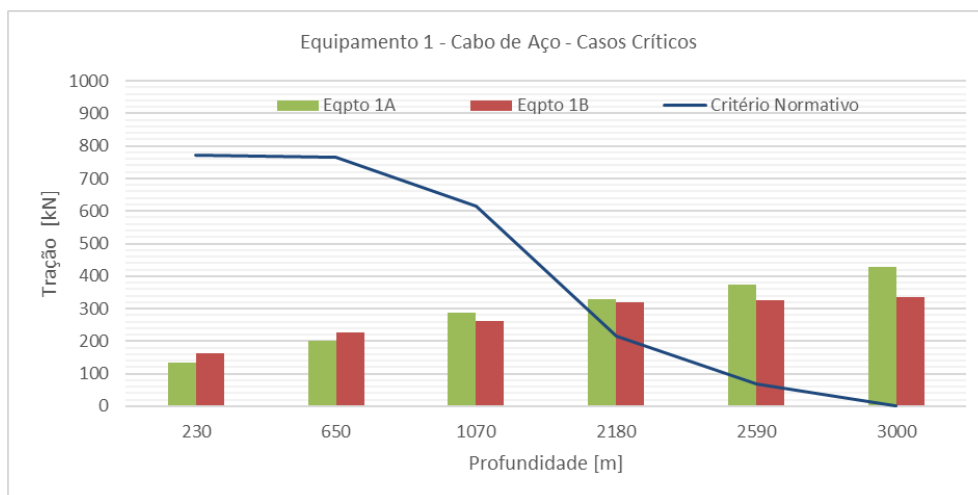


Figura 6.50 Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 1

6.2.5 TRAÇÃO CRÍTICA EM CADA PROFUNDIDADE – CABO DE POLIÉSTER

Para identificar valores máximos de parcela dinâmica de tração no topo do cabo de poliéster, tal qual realizado para o cabo de aço na seção 6.2.4, os resultados são ora agrupados por profundidade e coeficiente de arrasto adotado para o equipamento.

A Tabela C.20 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 230m. A Figura 6.51 e a Figura 6.52 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

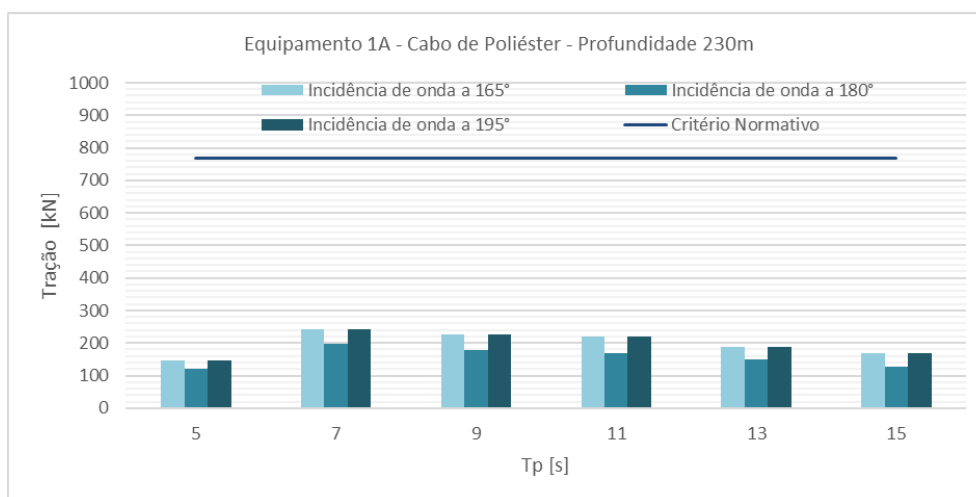


Figura 6.51 Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

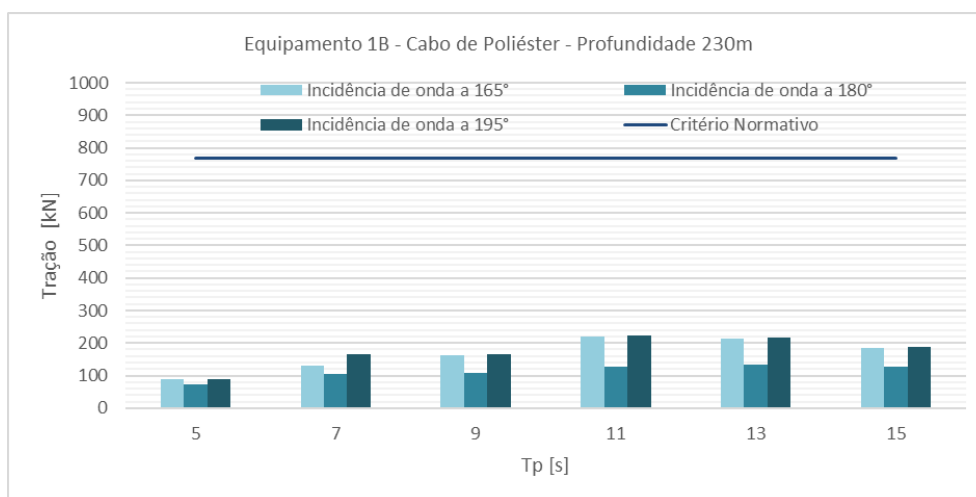


Figura 6.52 Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

A Tabela C.21 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 650m. A Figura 6.53 e a Figura 6.54 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

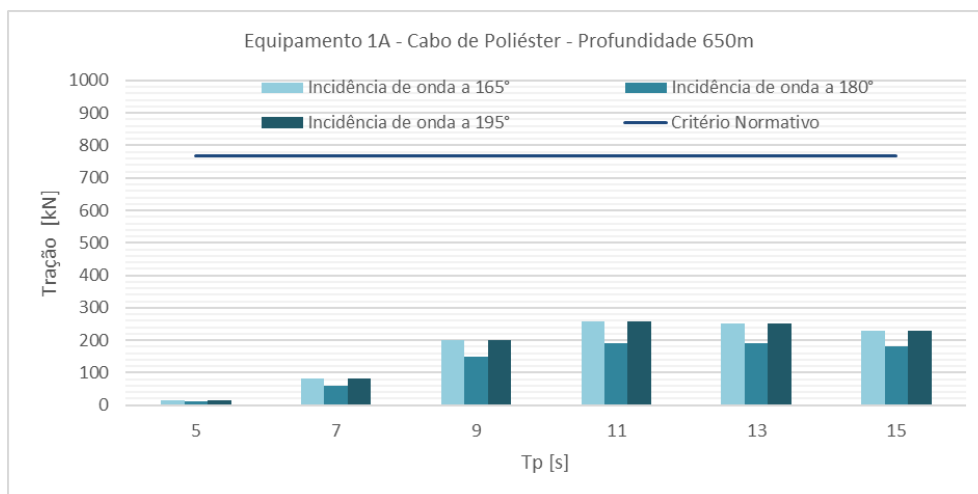


Figura 6.53 Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

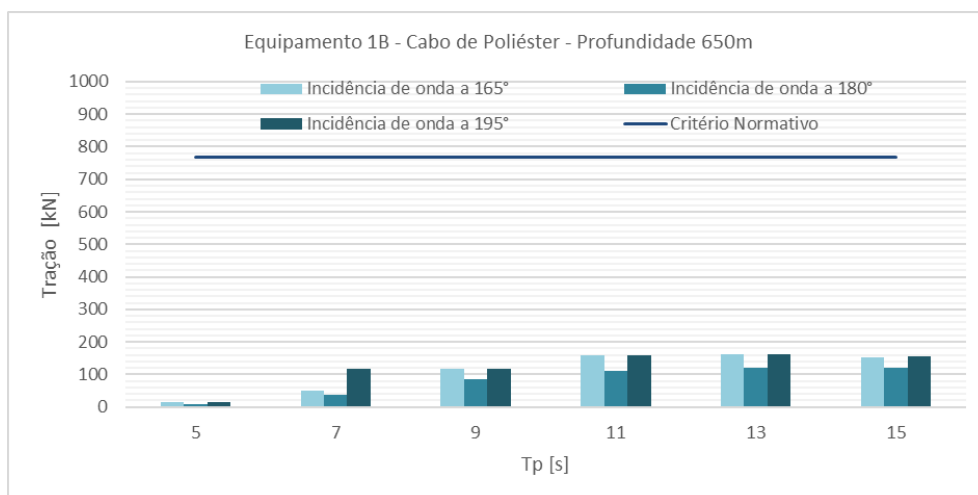


Figura 6.54 Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

A Tabela C.22 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 1070m. A Figura 6.55 e a Figura 6.56 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

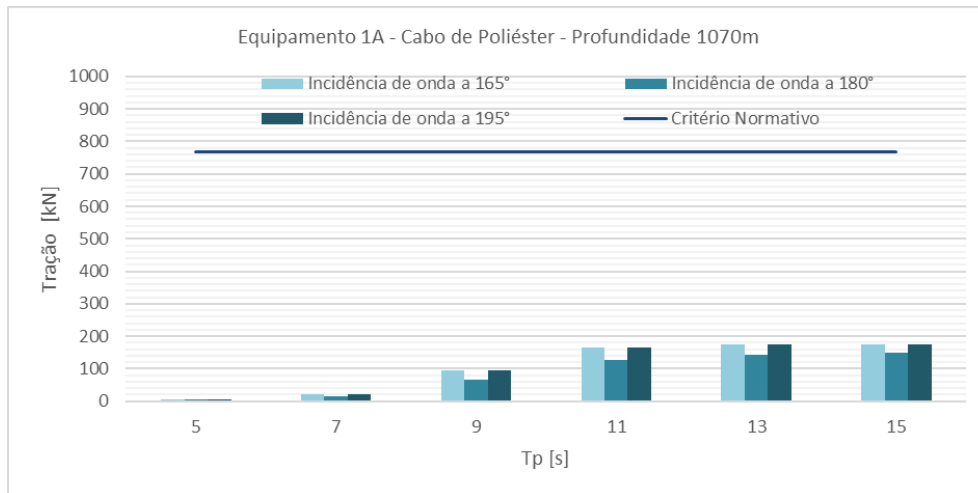


Figura 6.55 Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

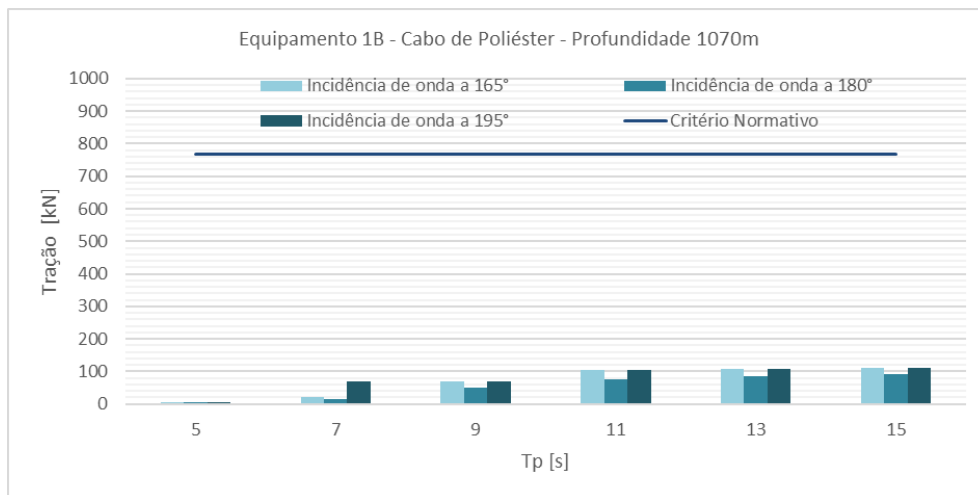


Figura 6.56 Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

A Tabela C.23 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 2180m. A Figura 6.57 e a Figura 6.58 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

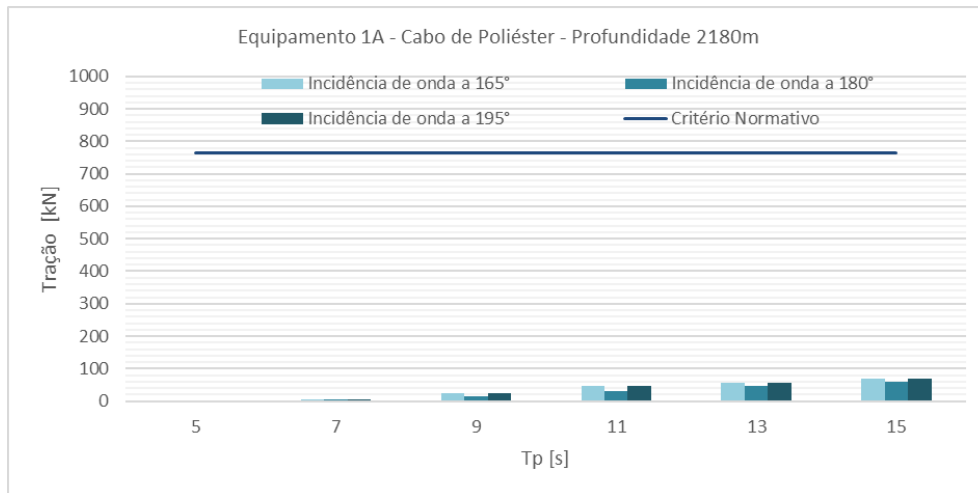


Figura 6.57 Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

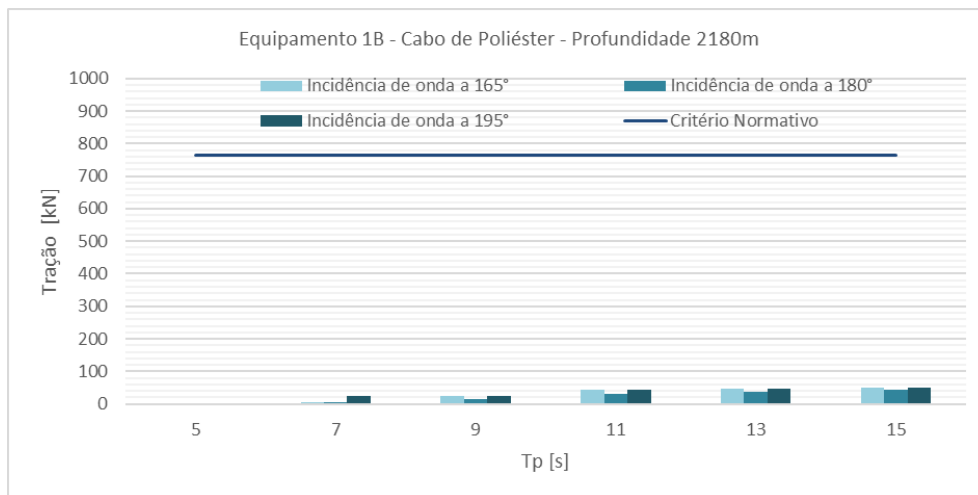


Figura 6.58 Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

A Tabela C.24 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 2590m. A Figura 6.59 e a Figura 6.60 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

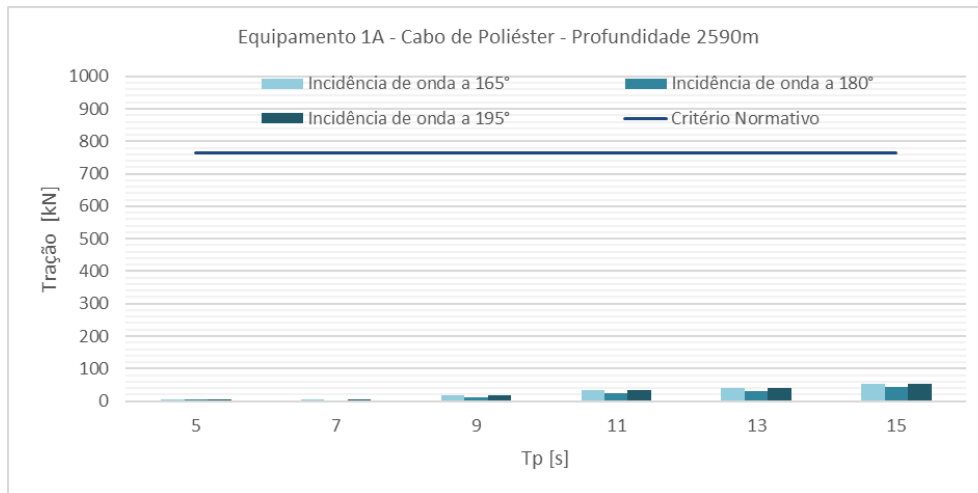


Figura 6.59 Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

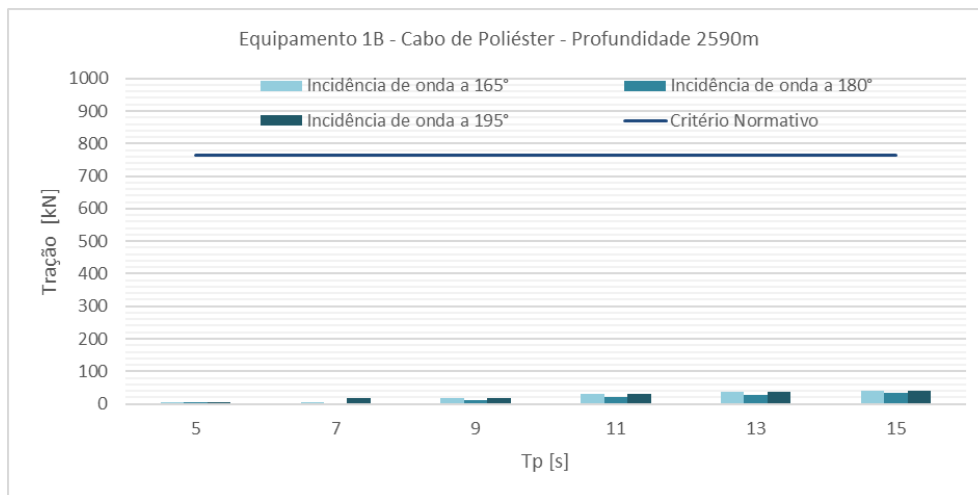


Figura 6.60 Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

A Tabela C.25 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 3000m. A Figura 6.61 e a Figura 6.62 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 1A ($C_d = 1,5$) e 1B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

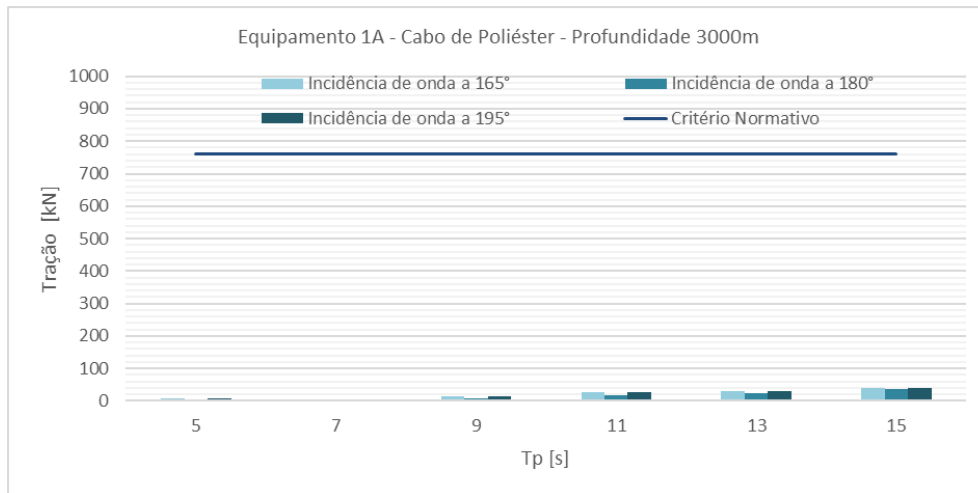


Figura 6.61 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1A

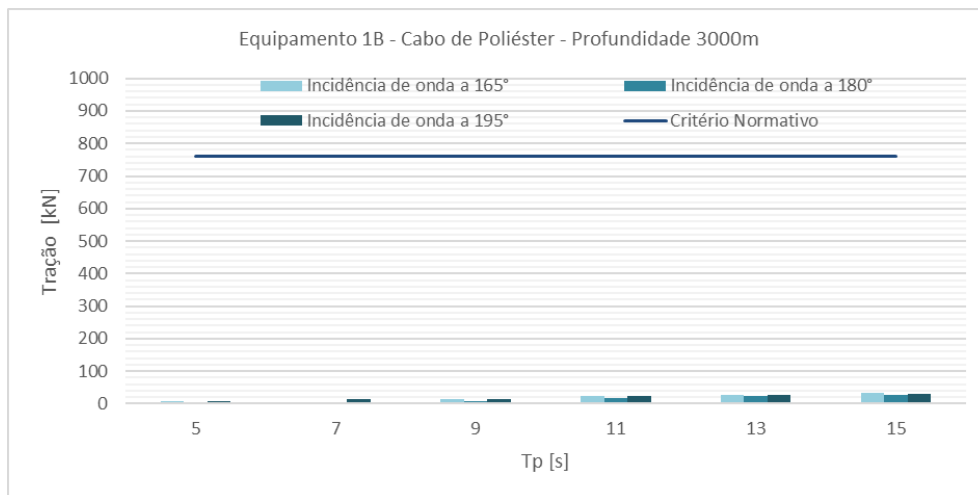


Figura 6.62 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1B

Dos valores de tração agrupados acima, é possível identificar os máximos para cada profundidade e equipamento, resultando na Tabela C.26 de valores críticos e o gráfico correlato da Figura 6.63. Para o cabo de poliéster, todos os casos críticos foram obtidos para o modelo do equipamento 1 com coeficiente de arrasto $C_d = 1,5$. As magnitudes mais importantes estão de fato na zona de ressonância esperada para o sistema de içamento com cabo de poliéster.

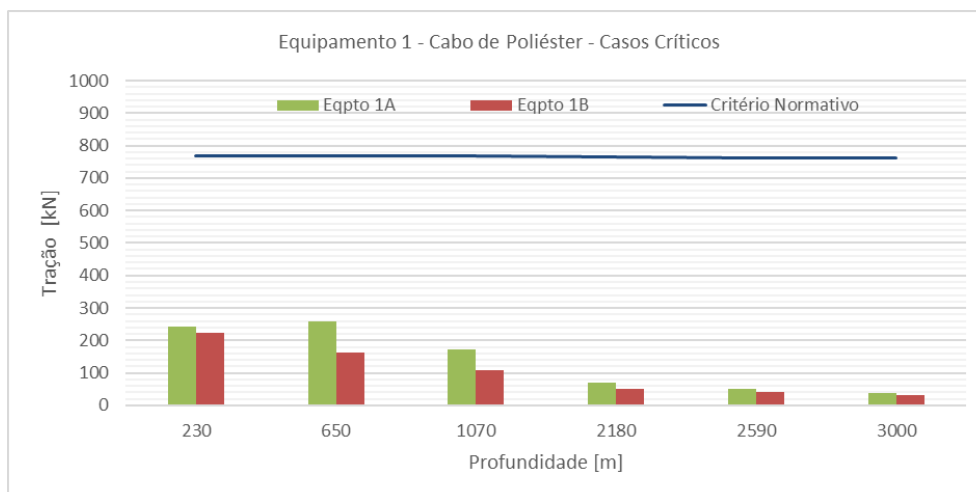


Figura 6.63 Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 1

6.2.6 COMPARATIVO DE TRAÇÕES CRÍTICAS – CABO DE AÇO VS. CABO DE POLIÉSTER

Das seções 6.2.4 e 6.2.5, extraem-se as trações críticas por profundidade, independentemente do coeficiente de arrasto adotado para o modelo do equipamento, e constrói-se a Tabela 6.3 e o gráfico da Figura 6.64 dos valores críticos de tração para ambos os materiais modelados para o cabo de içamento do equipamento, em comparação com seus respectivos critérios normativos.

Para o Equipamento 1, é possível perceber que a sua instalação com cabo de aço a partir da profundidade 2180m é inviabilizada pelo critério de capacidade de carga do material. O cabo de poliéster, no entanto, permanece com uma margem de segurança para todas as profundidades modeladas. Outrossim, o comportamento dos dois materiais em suas respectivas zonas de ressonância resulta em esforços axiais comparativamente maiores em relação às profundidades fora destas zonas.

Tabela 6.3 Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 1

Prof. [m]	Cabo de aço		Cabo de poliéster	
	Tração [kN]	Critério Normativo [kN]	Tração [kN]	Critério Normativo [kN]
230	163	770	241	770
650	227	764	257	768
1070	288	614	174	767
2180	330	217	68	764
2590	373	70	51	763
3000	427	0	39	762

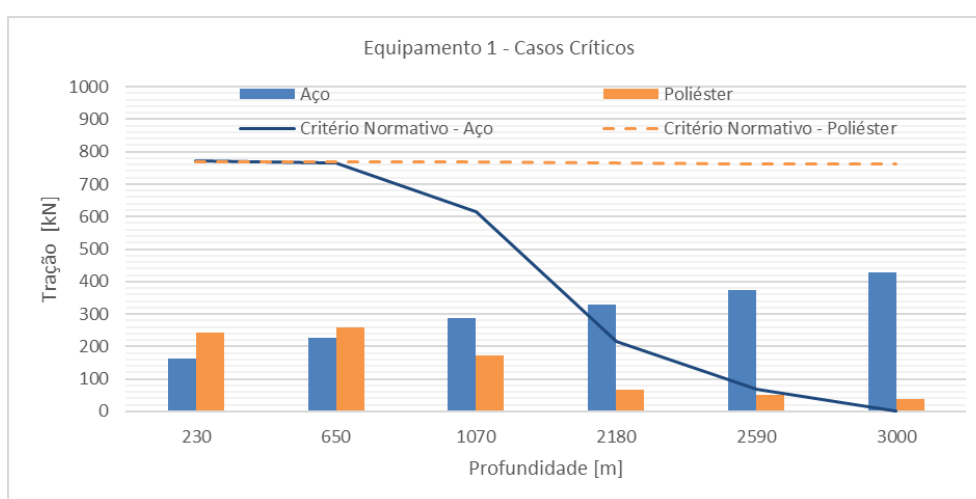


Figura 6.64 Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 1

6.3 EQUIPAMENTO 2

6.3.1 ENVOLTÓRIA DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

A Tabela 6.4 e a Tabela 6.5 apresentam os valores limites para a parcela dinâmica do esforço axial de tração no cabo de lançamento de aço e de poliéster, respectivamente. Os Critério 1 e 2 são os mesmos descritos no item 5.5, e a coluna Envoltória relata o menor valor entre eles, conforme (5.11), limitado a 0.

Tabela 6.4 Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de aço

Prof. [m]	SWL [kN]	Peso- próprio do cabo [kN]	$F_{static,max}$ [kN]	$F_{static,min}$ [kN]	Critério 1 [kN]	Critério 2 [kN]	Envoltória [kN]
40	4079	51	1763	1712	2316	1540	1540
150	4079	132	1844	1712	2234	1541	1541
260	4079	214	1925	1712	2153	1541	1541
1290	4079	975	2687	1711	1392	1540	1392
2150	4079	1611	3323	1711	756	1540	756
3000	4079	2240	3951	1711	127	1540	127

Tabela 6.5 Parcelas estáticas e critérios normativos – cabo de poliéster

Prof. [m]	SWL [kN]	Peso- próprio do cabo [kN]	$F_{static,max}$ [kN]	$F_{static,min}$ [kN]	Critério 1 [kN]	Critério 2 [kN]	Envoltória [kN]
40	4204	13	1731	1718	2474	1546	1546
150	4204	22	1740	1718	2464	1546	1546
260	4204	32	1749	1717	2455	1545	1545
1290	4204	123	1834	1711	2370	1540	1540
2150	4204	200	1905	1706	2299	1535	1535
3000	4204	275	1976	1701	2228	1531	1531

Para os cabos de aço selecionados para o içamento do equipamento 2, verifica-se que o Critério 2, de afrouxamento do cabo, é o crítico para ambos os materiais, exceto para o aço nas profundidades finais de análise, quais sejam 1290m, 2150m e 3000m, em que seu peso próprio passa a limitar sua própria capacidade de carga, fazendo do Critério 1 o pior nestes casos.

6.3.2 RESULTADOS DE TRAÇÃO POR ESTADO DE MAR EM CADA PROFUNDIDADE

Com base nos resultados estatísticos, é calculada a parcela dinâmica da tração no topo do cabo do guindaste e agrupada nesta seção por profundidade e incidência de onda.

Desta forma, é possível observar a variação de tração com o período da onda, verificar ocorrência de efeito de ressonância para período de onda específico em cada profundidade, bem como identificar eventuais relações de comportamento com os dois valores de coeficientes de arrasto adotados para o equipamento.

A Tabela C.27 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 40m. A Figura 6.65, a Figura 6.66 e a Figura 6.67 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

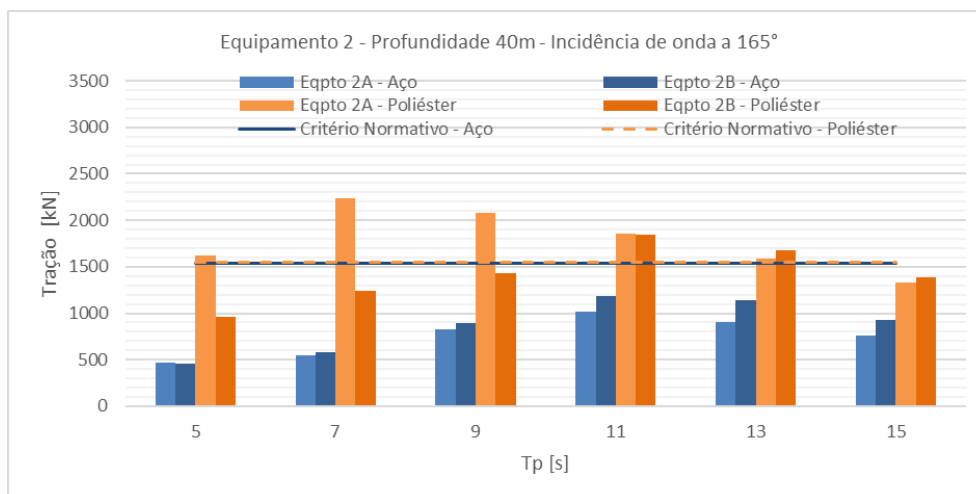


Figura 6.65 Resultados, profundidade 40m, onda a 165°, Equipamento 2

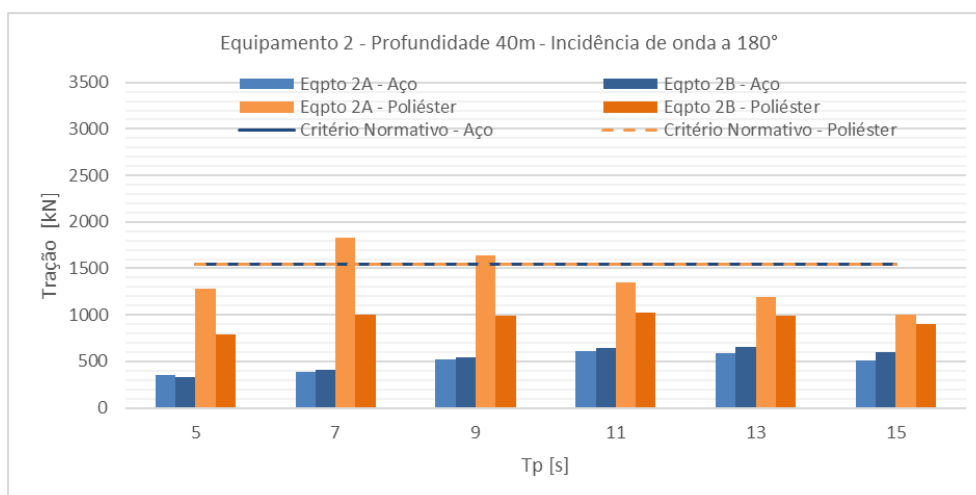


Figura 6.66 Resultados, profundidade 40m, onda a 180°, Equipamento 2

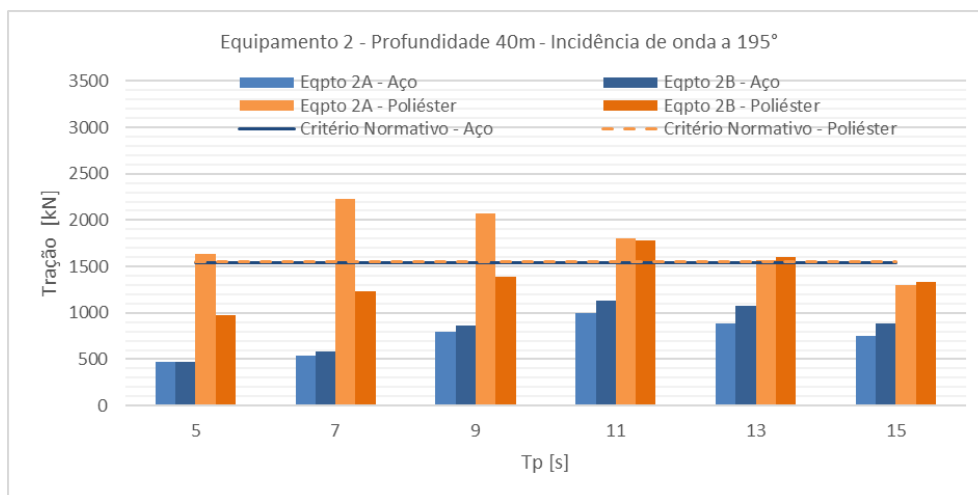


Figura 6.67 Resultados, profundidade 40m, onda a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.28 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 150m. A Figura 6.68, a Figura 6.69 e a Figura 6.70 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

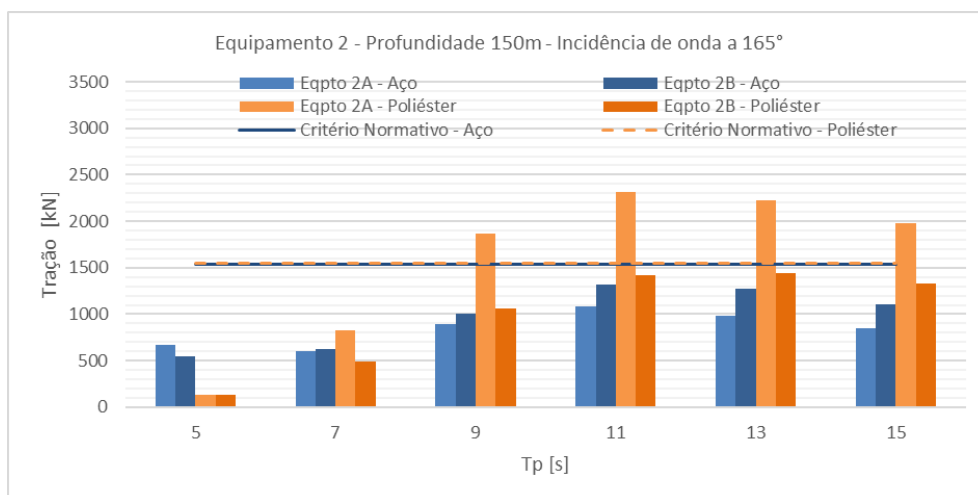


Figura 6.68 Resultados, profundidade 150m, onda a 165°, Equipamento 2

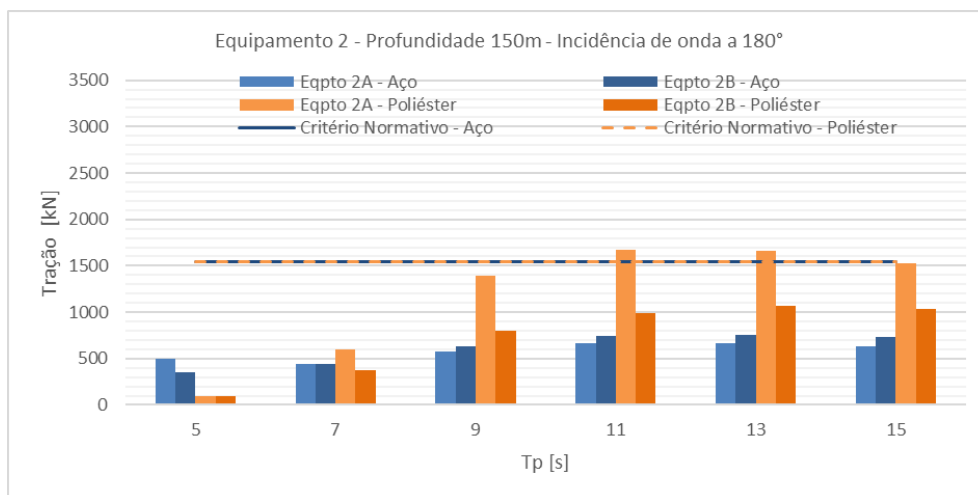


Figura 6.69 Resultados, profundidade 150m, onda a 180°, Equipamento 2

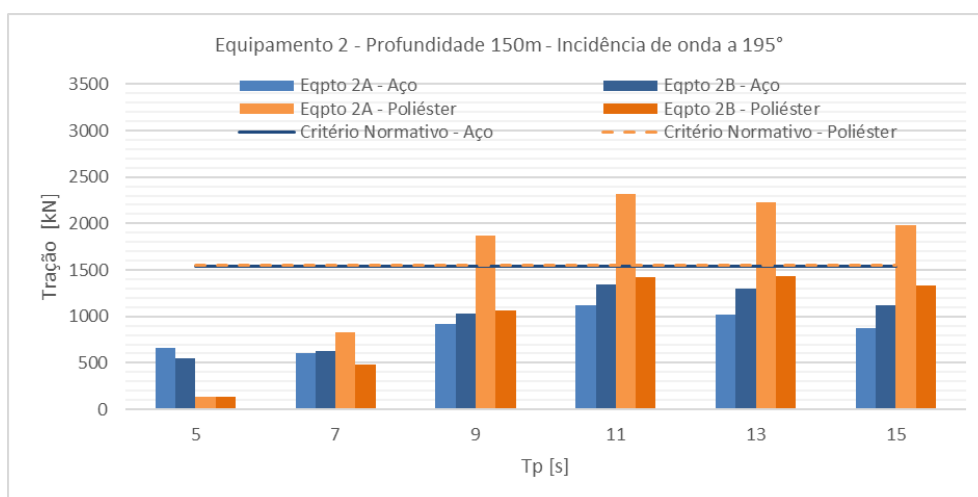


Figura 6.70 Resultados, profundidade 150m, onda a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.29 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 260m. A Figura 6.71, a Figura 6.72 e a Figura 6.73 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

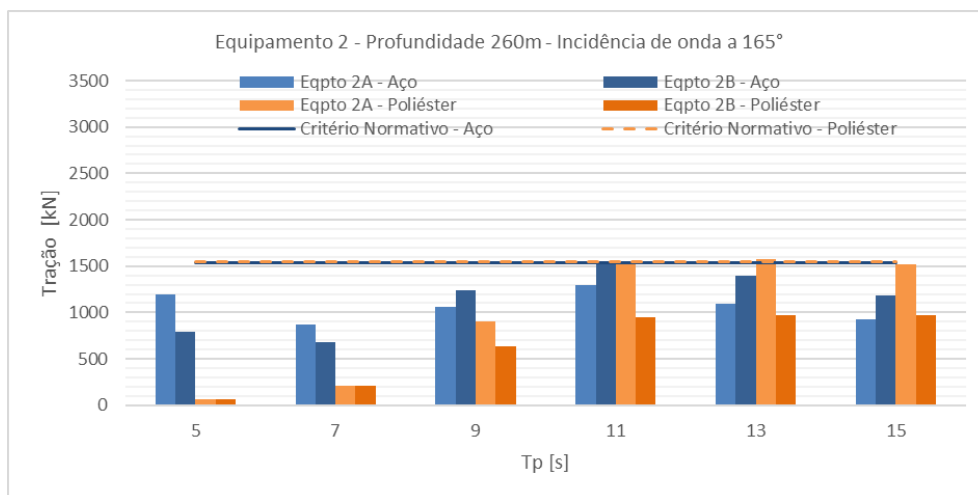


Figura 6.71 Resultados, profundidade 260m, onda a 165°, Equipamento 2

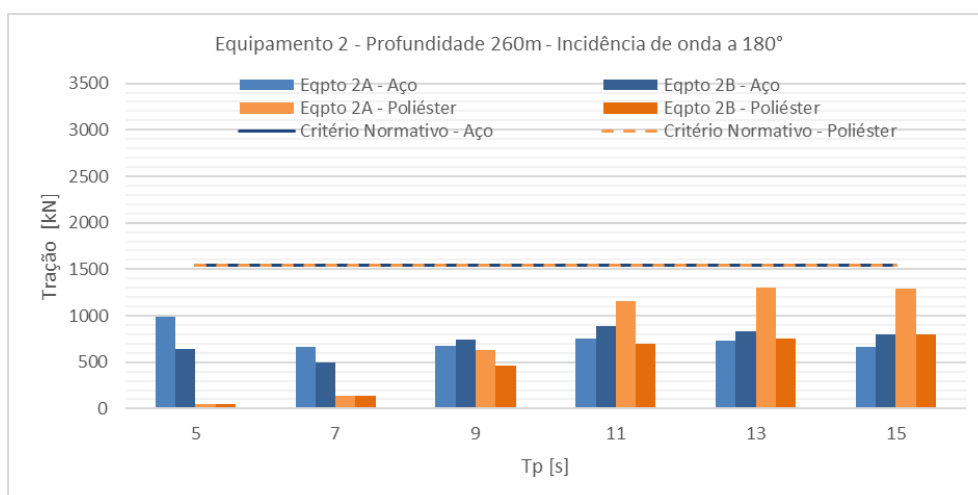


Figura 6.72 Resultados, profundidade 260m, onda a 180°, Equipamento 2

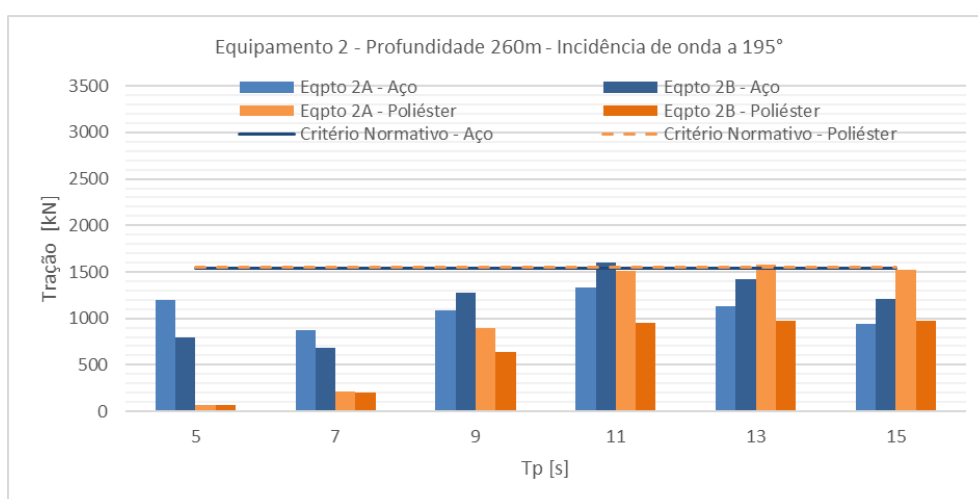


Figura 6.73 Resultados, profundidade 260m, onda a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.30 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 1290m. A Figura 6.74, a Figura 6.75 e a Figura 6.76 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

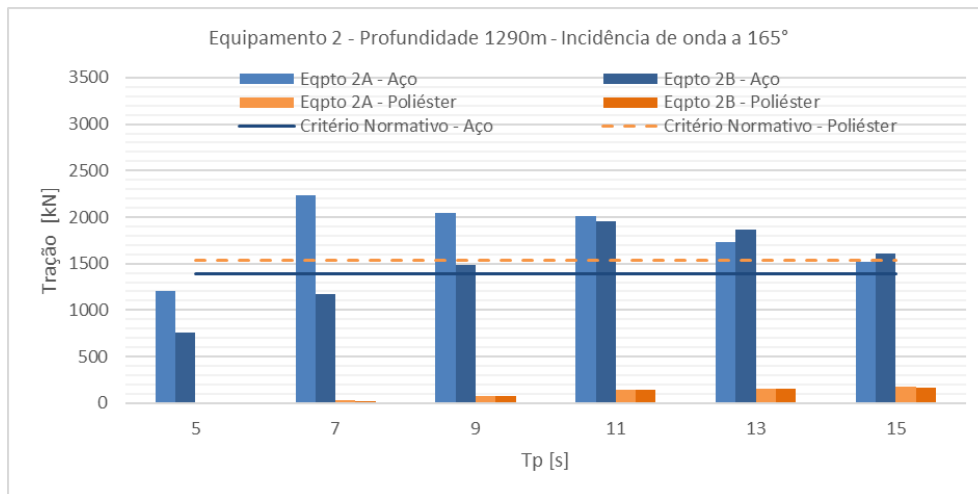


Figura 6.74 Resultados, profundidade 1290m, onda a 165°, Equipamento 2

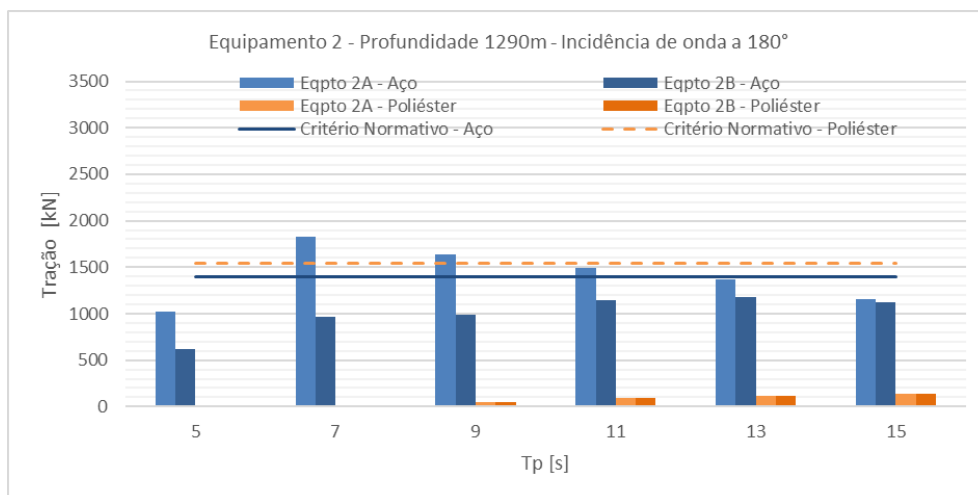


Figura 6.75 Resultados, profundidade 1290m, onda a 180°, Equipamento 2

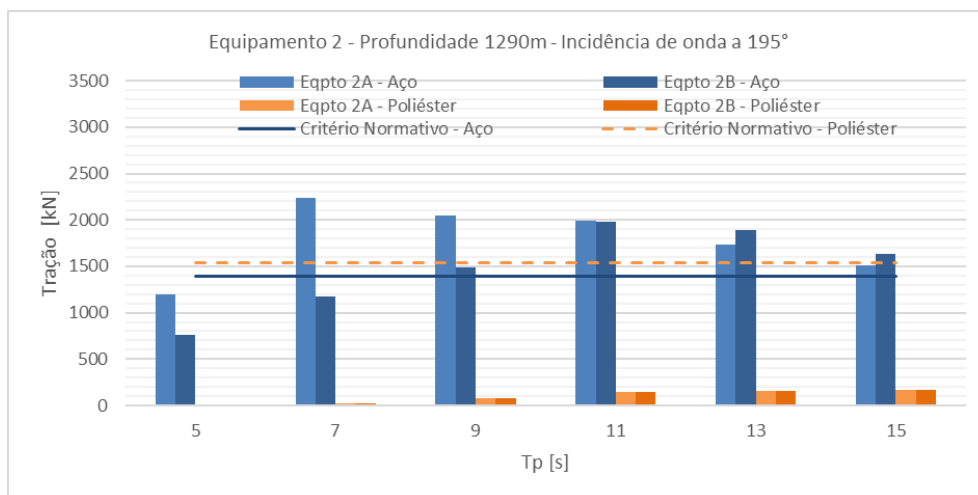


Figura 6.76 Resultados, profundidade 1290m, onda a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.31 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 2150m. A Figura 6.77, a Figura 6.78 e a Figura 6.79 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

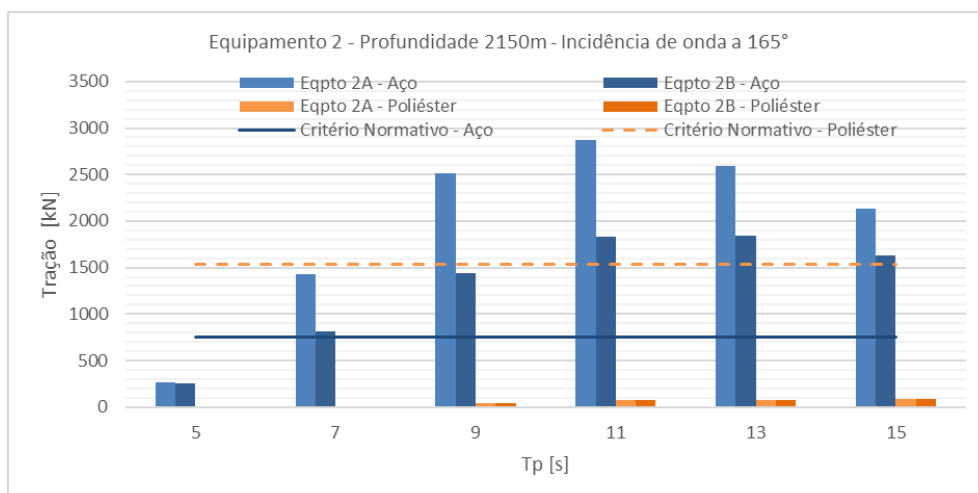


Figura 6.77 Resultados, profundidade 2150m, onda a 165°, Equipamento 2

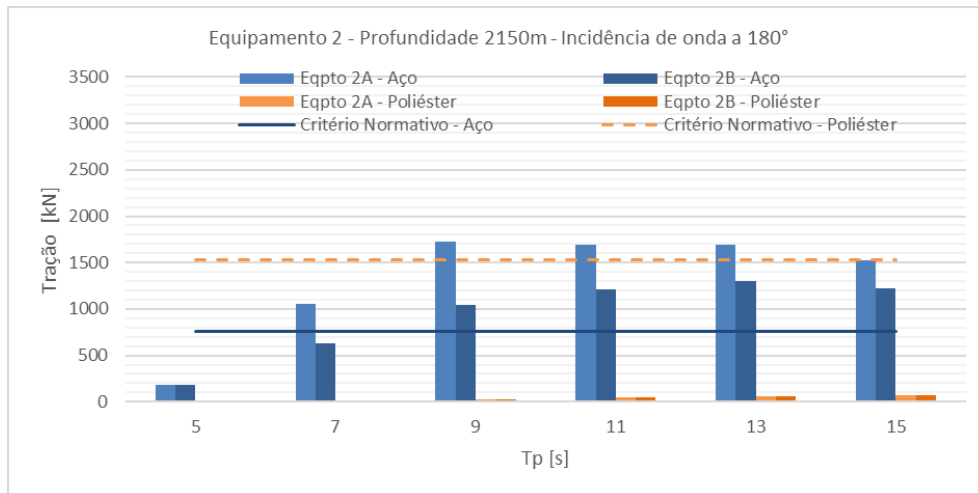


Figura 6.78 Resultados, profundidade 2150m, onda a 180°, Equipamento 2

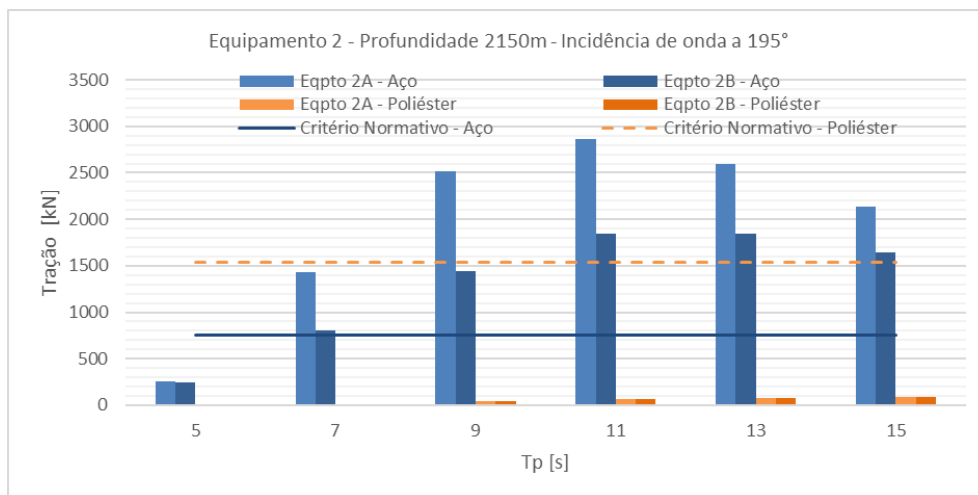


Figura 6.79 Resultados, profundidade 2150m, onda a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.32 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para a profundidade 3000m. A Figura 6.80, a Figura 6.81 e a Figura 6.82 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

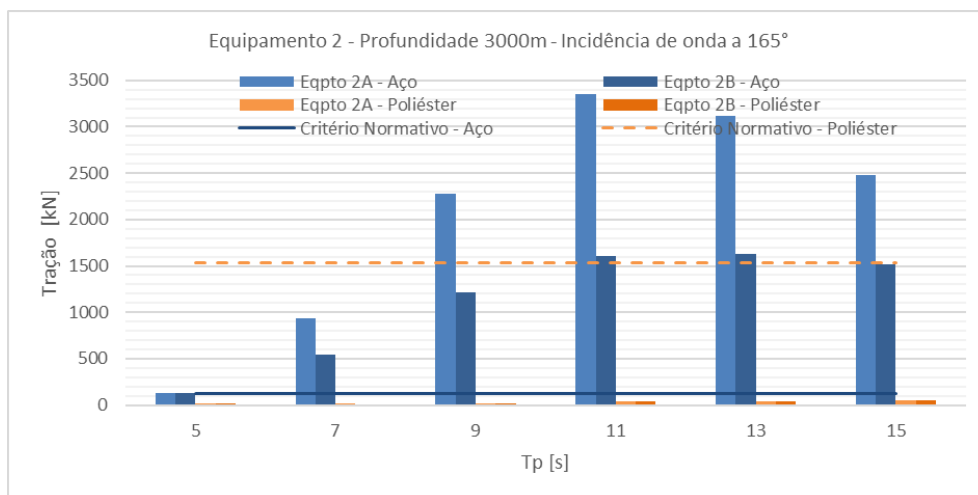


Figura 6.80 Resultados, profundidade 3000m, onda a 165°, Equipamento 2

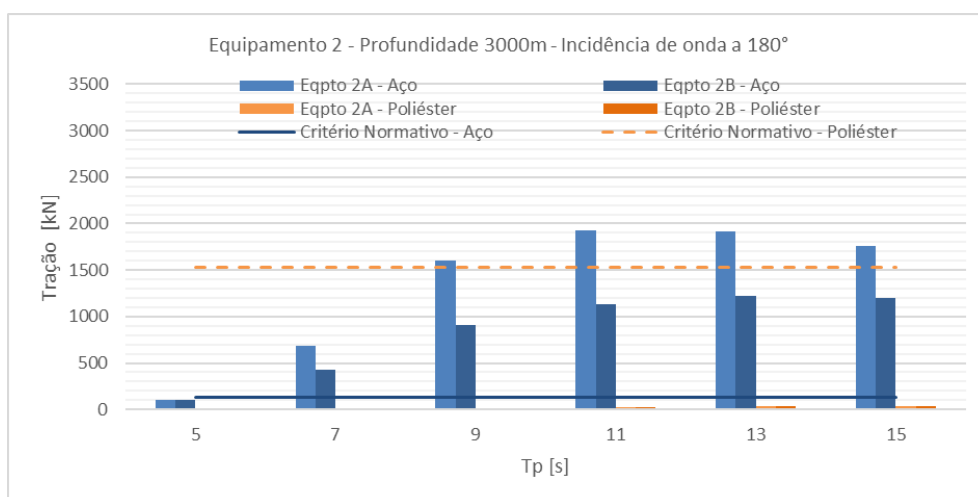


Figura 6.81 Resultados, profundidade 3000m, onda a 180°, Equipamento 2

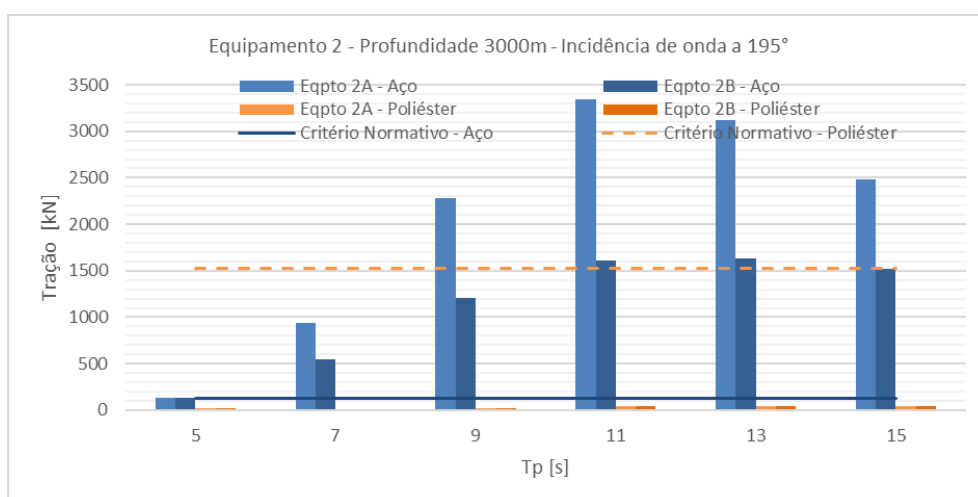


Figura 6.82 Resultados, profundidade 3000m, onda a 195°, Equipamento 2

Nas profundidades iniciais 40m, 150m e 260m, que se referem à zona de ressonância do poliéster, os resultados de tração obtidos para este material não atendem ao critério normativo, particularmente para a condição de *slack sling*. Para o equipamento com coeficiente de arrasto menor, é possível observar um pico de esforços para os períodos de pico de onda entre 5s e 9s para 40m, mudando para os períodos entre 11s e 15s para 260m.

Já nas profundidades 1290m, 2150m e 3000m, referentes à zona de ressonância do aço, nota-se que as parcelas dinâmicas da tração no cabo de poliéster assumem valores pouco relevantes frente aos critérios normativos para este material. Já para o cabo de aço, as trações excedem o critério, sendo, na profundidade inicial desta zona, obtidos picos de tração em períodos de onda orbitando os 7s para o equipamento 2A, e 11s para o 2B. À medida em que se avança aos 3000m, o período de onda de 11s se consolida como crítico para ambos os modelos adotados.

6.3.3 RESULTADOS DE TRAÇÃO POR PROFUNDIDADE EM CADA ESTADO DE MAR

De forma semelhante à seção 6.3.2, a parcela dinâmica da tração no topo do cabo do guindaste é agrupada, desta vez, por período e incidência de onda. Desta forma, é possível observar a variação de tração com a profundidade em cada estado de mar, verificar profundidades de ocorrência de picos de tração para cada período de onda, assim como identificar eventuais relações de comportamento com os dois valores de coeficientes de arrasto adotados para o equipamento.

Ademais, esta disposição de resultados permite acompanhar a mudança de valor da envoltória de critérios normativos. Sabendo que o Critério 2 – *slack sling* não varia com a profundidade, qualquer variação observada nesta envoltória está relacionada ao Critério 1 – capacidade de carga do sistema.

A Tabela C.33 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 5\text{s}$. A Figura 6.83, a Figura 6.84 e a Figura 6.85 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165° , 180° e 195° , respectivamente.

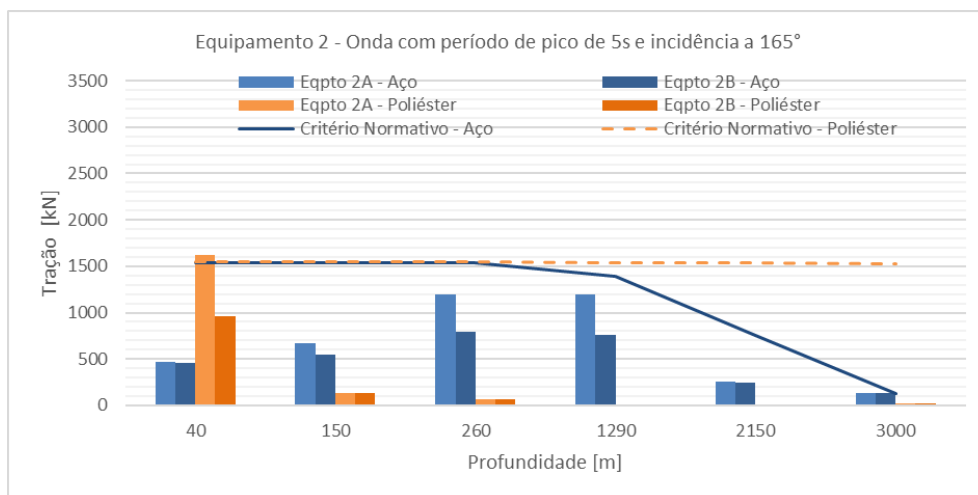


Figura 6.83 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 165°, Equipamento 2

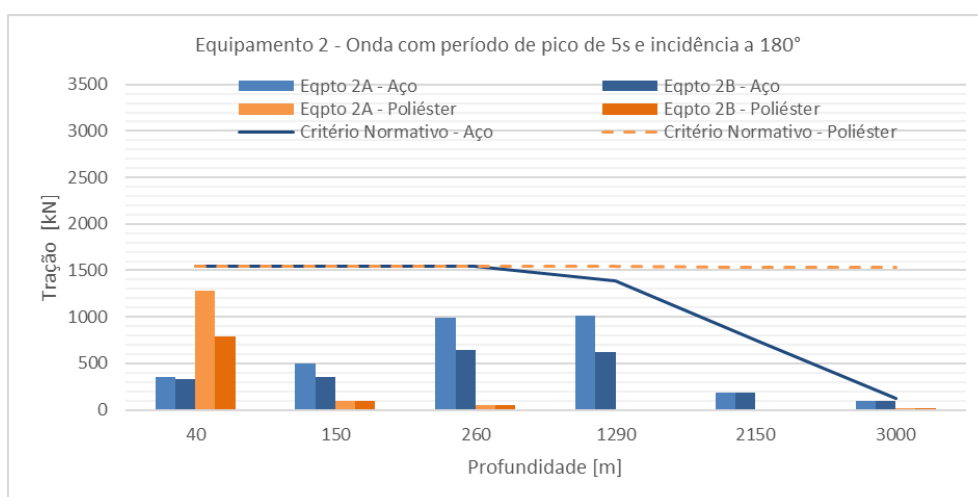


Figura 6.84 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 180°, Equipamento 2

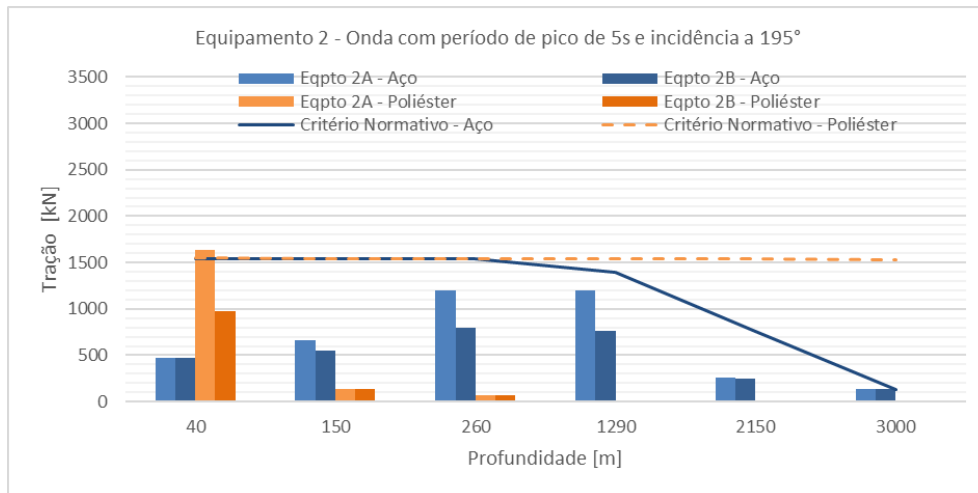


Figura 6.85 Resultados, onda com período de pico de 5s e incidência a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.34 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 7\text{s}$. A Figura 6.86, a Figura 6.87 e a Figura 6.88 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

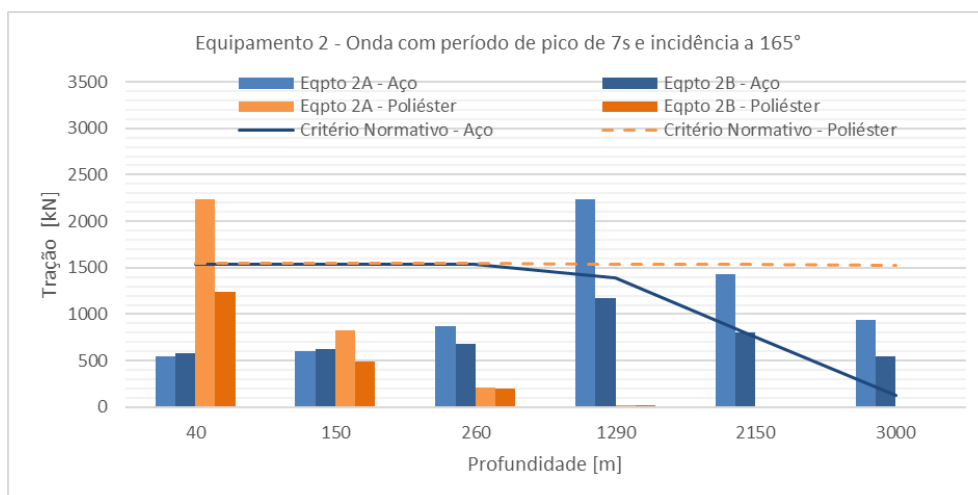


Figura 6.86 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 165°, Equipamento 2

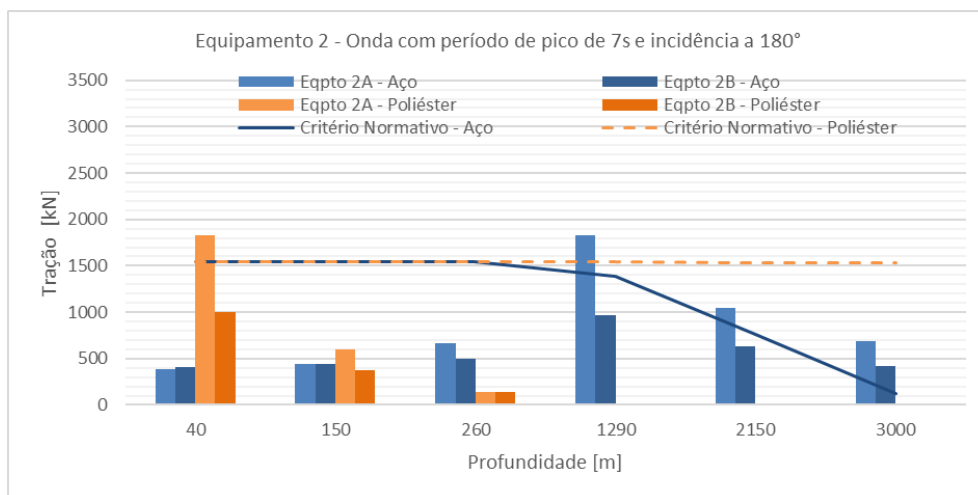


Figura 6.87 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 180°, Equipamento 2

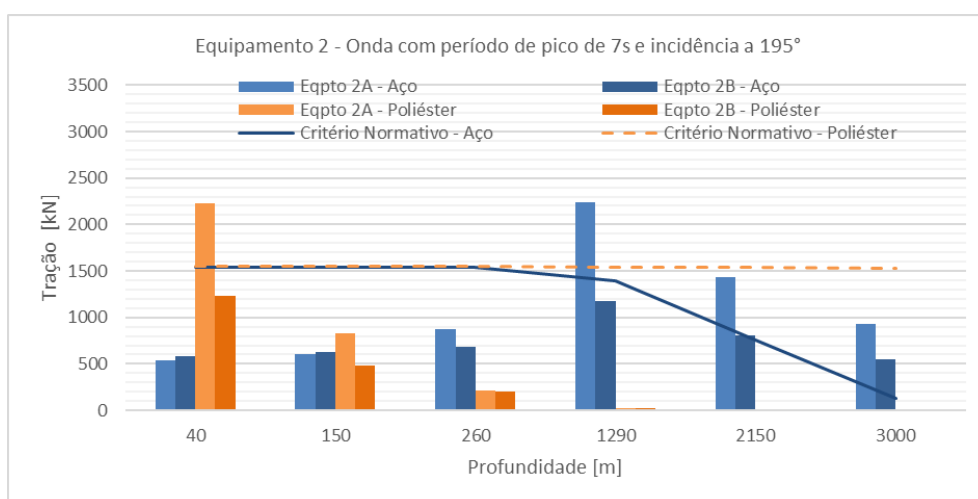


Figura 6.88 Resultados, onda com período de pico de 7s e incidência a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.35 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 9\text{s}$. A Figura 6.89, a Figura 6.90 e a Figura 6.91 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

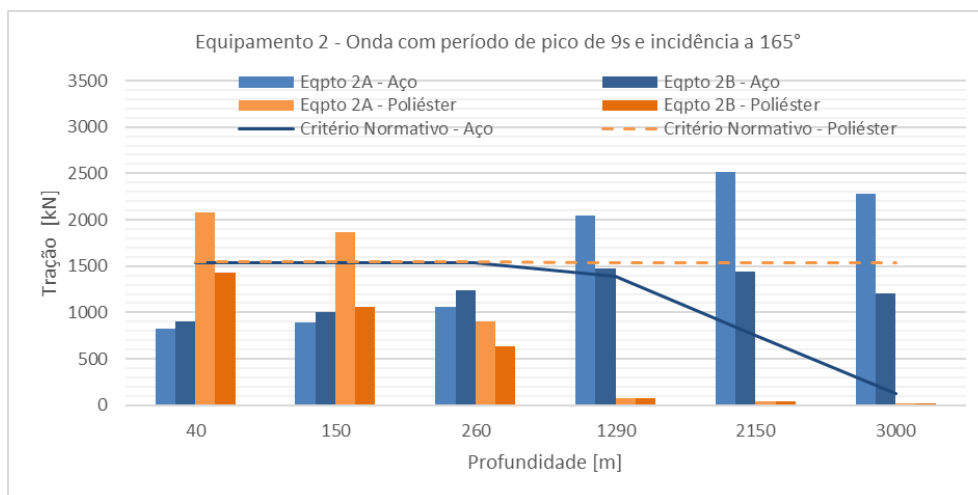


Figura 6.89 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 165°, Equipamento 2

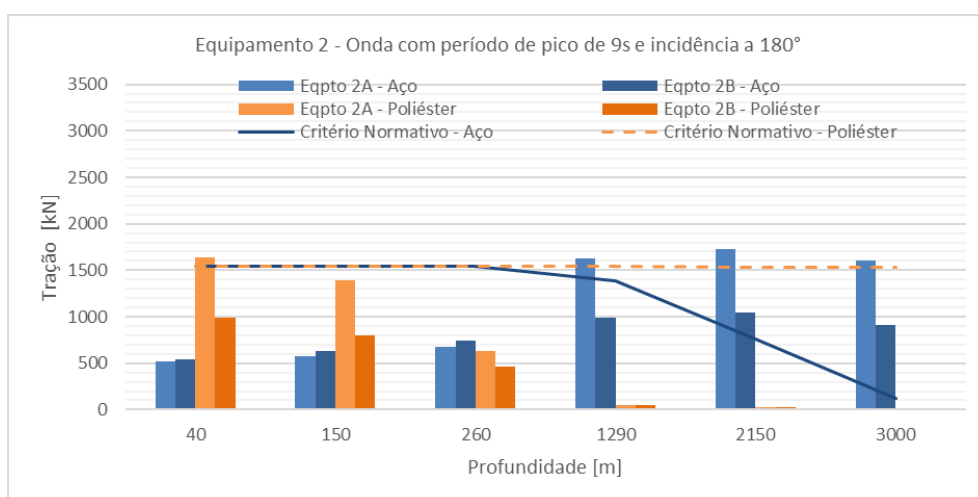


Figura 6.90 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 180°, Equipamento 2

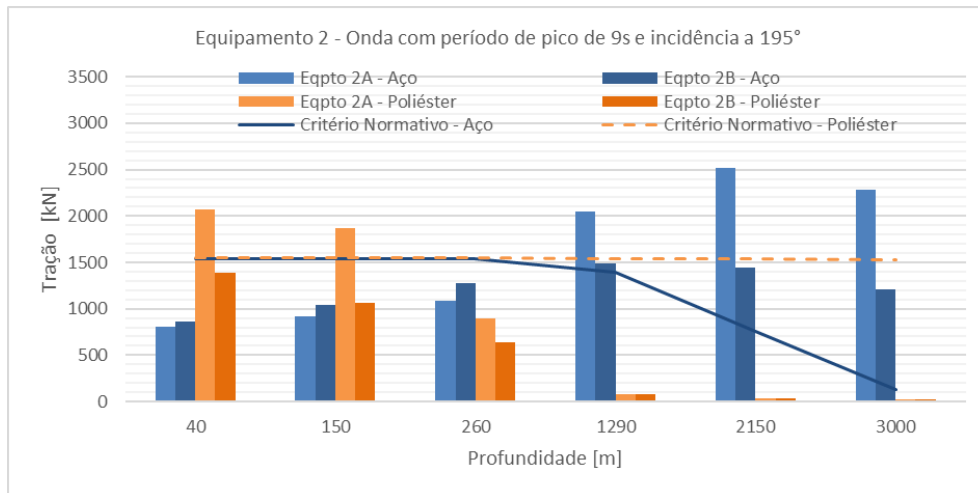


Figura 6.91 Resultados, onda com período de pico de 9s e incidência a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.36 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 11\text{s}$. A Figura 6.92, a Figura 6.93 e a Figura 6.94 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

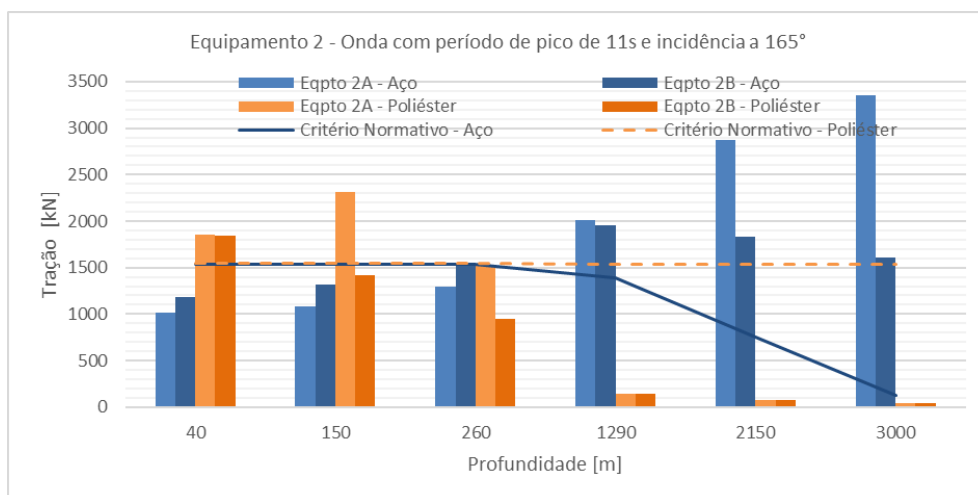


Figura 6.92 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 165°, Equipamento 2

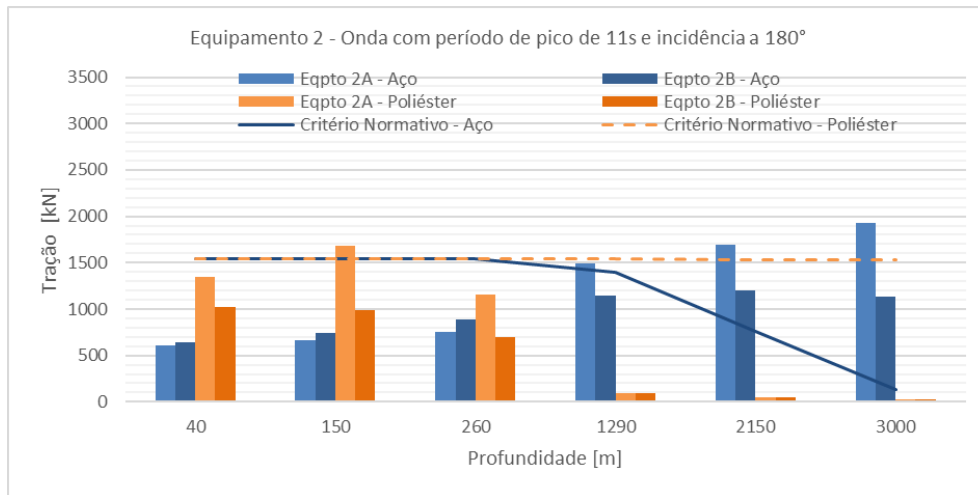


Figura 6.93 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 180°, Equipamento 2

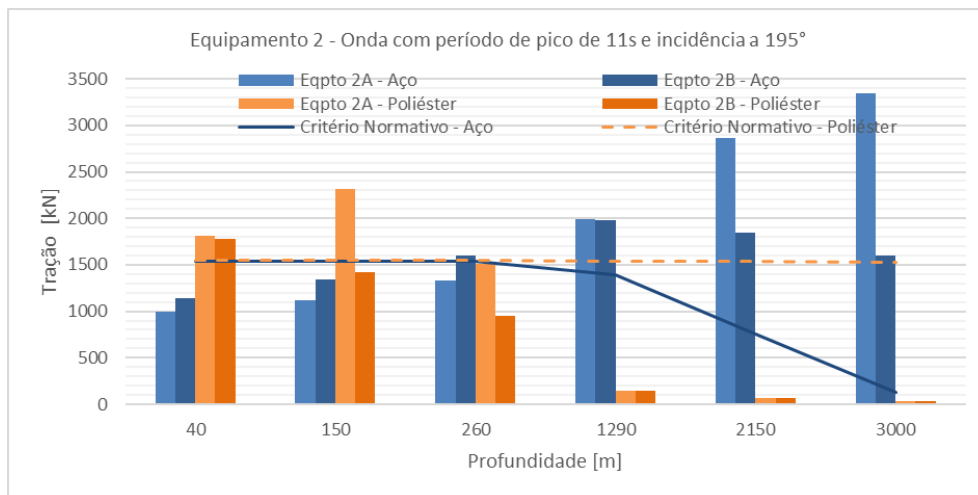


Figura 6.94 Resultados, onda com período de pico de 11s e incidência a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.37 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 13\text{s}$. A Figura 6.95, a Figura 6.96 e a Figura 6.97 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

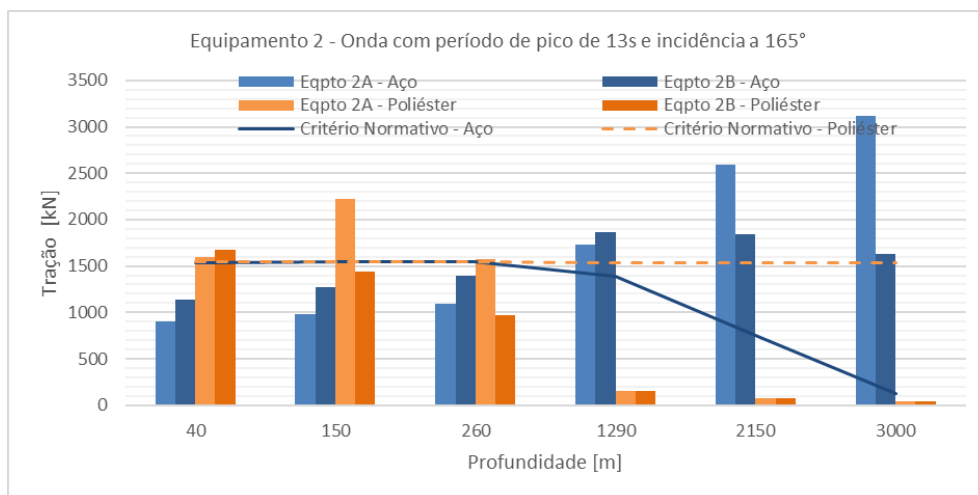


Figura 6.95 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 165°, Equipamento 2

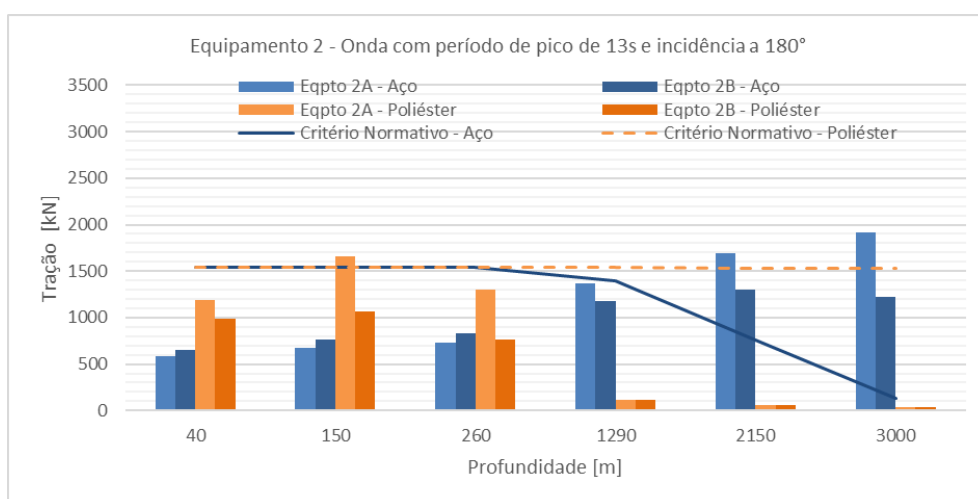


Figura 6.96 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 180°, Equipamento 2

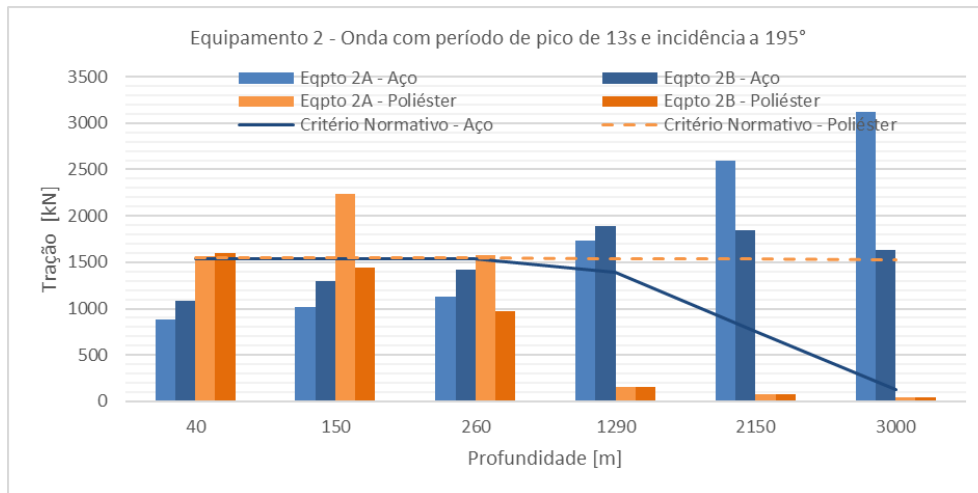


Figura 6.97 Resultados, onda com período de pico de 13s e incidência a 195°, Equipamento 2

A Tabela C.38 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração para o estado de mar com onda de $H_s = 2,0\text{m}$ e $T_p = 15\text{s}$. A Figura 6.98, a Figura 6.99 e a Figura 6.100 mostram graficamente estes resultados para incidências de onda a 165°, 180° e 195°, respectivamente.

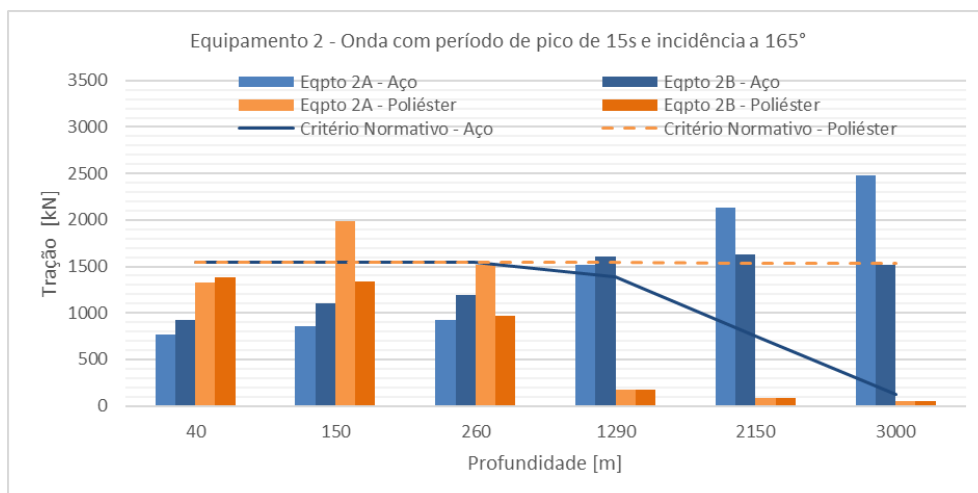


Figura 6.98 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 165°, Equipamento 2

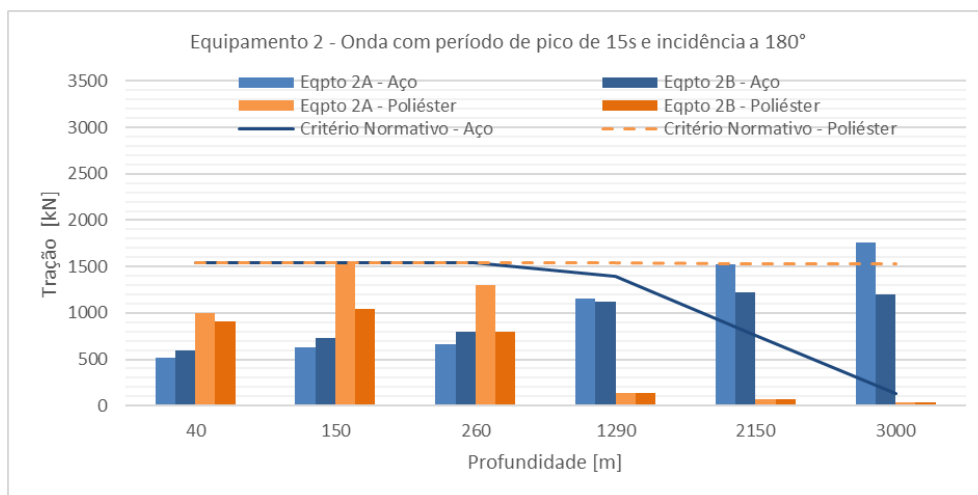


Figura 6.99 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 180°, Equipamento 2

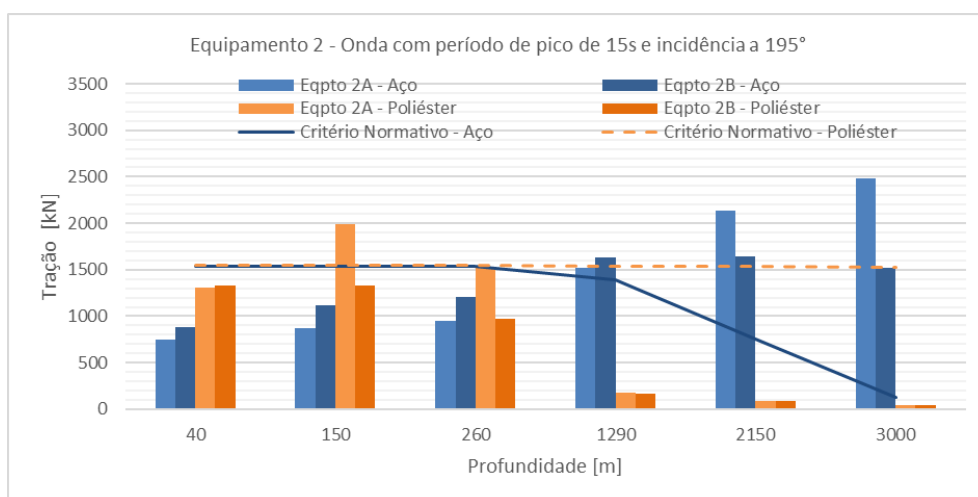


Figura 6.100 Resultados, onda com período de pico de 15s e incidência a 195°, Equipamento 2

Para as ondas com $T_p = 5s$, observa-se um pico da parcela dinâmica de tração para o cabo de aço entre as profundidades de 260m e 1290m, enquanto o cabo de poliéster sofre efeitos de ressonância, particularmente no modelo com menor coeficiente de arrasto – que ultrapassa a barreira do seu critério normativo.

O período de pico de 7s excita o sistema com cabo de poliéster também na profundidade inicial, enquanto para o cabo de aço a profundidade mais crítica para esse período é a de 1290m.

Com o aumento do período de pico de onda e, conseqüentemente, de energia associada, percebe-se a resposta de tração nos cabos crescendo, o que é esperado, sendo um comportamento padrão o fato de que as maiores trações de cada material ocorrem em suas respectivas zonas de ressonância. Outrossim, para este equipamento, tanto o poliéster não atende os critérios normativos nas profundidades iniciais, quanto o aço não o faz para as profundidades finais.

6.3.4 TRAÇÃO CRÍTICA EM CADA PROFUNDIDADE – CABO DE AÇO

Com o objetivo de identificar valores máximos de parcela dinâmica de tração no topo do cabo de aço em cada profundidade, independentemente do período ou incidência de onda, os resultados são agrupados, nesta seção, por profundidade e coeficiente de arrasto adotado para o equipamento.

A Tabela C.39 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 40m. A Figura 6.101 e a Figura 6.102 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

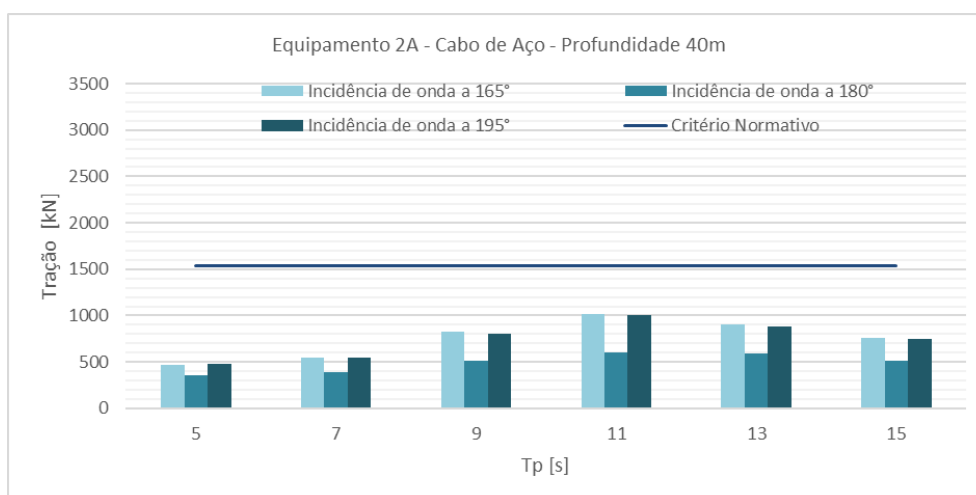


Figura 6.101 Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2A

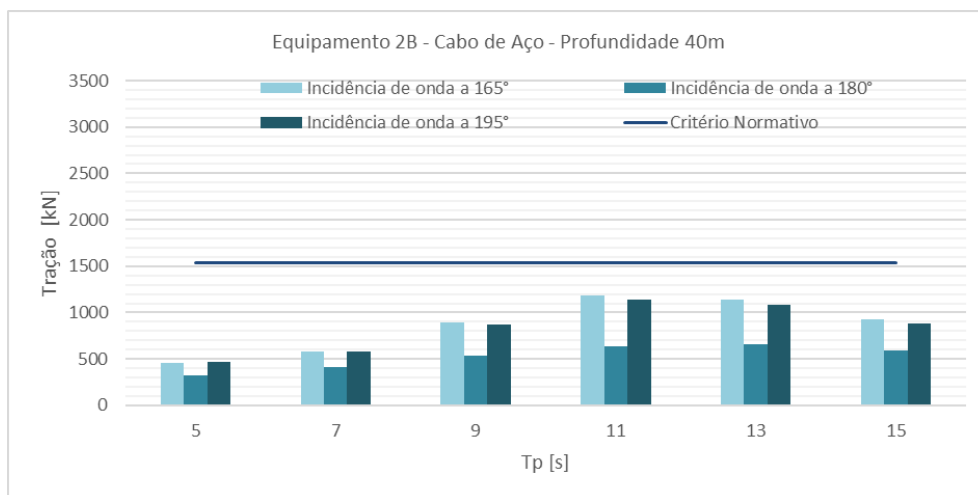


Figura 6.102 Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2B

A Tabela C.40 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 150m. A Figura 6.103 e a Figura 6.104 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

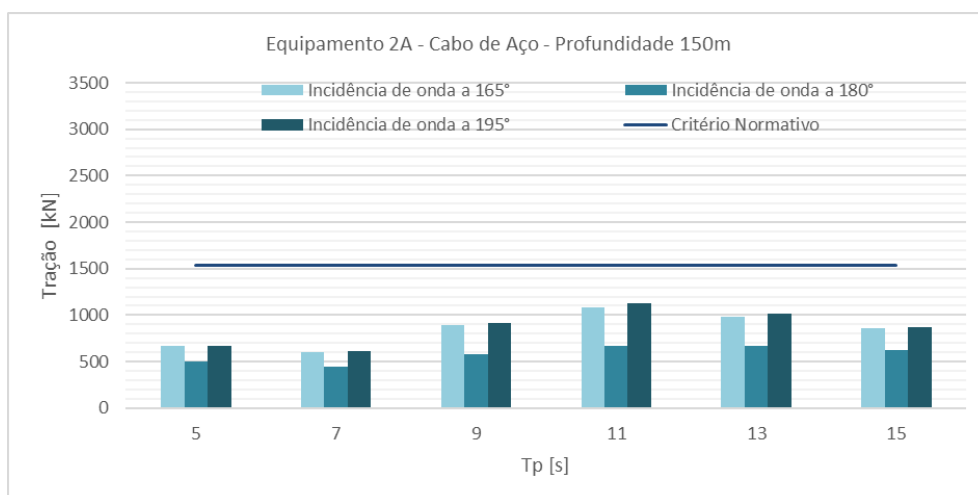


Figura 6.103 Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2A

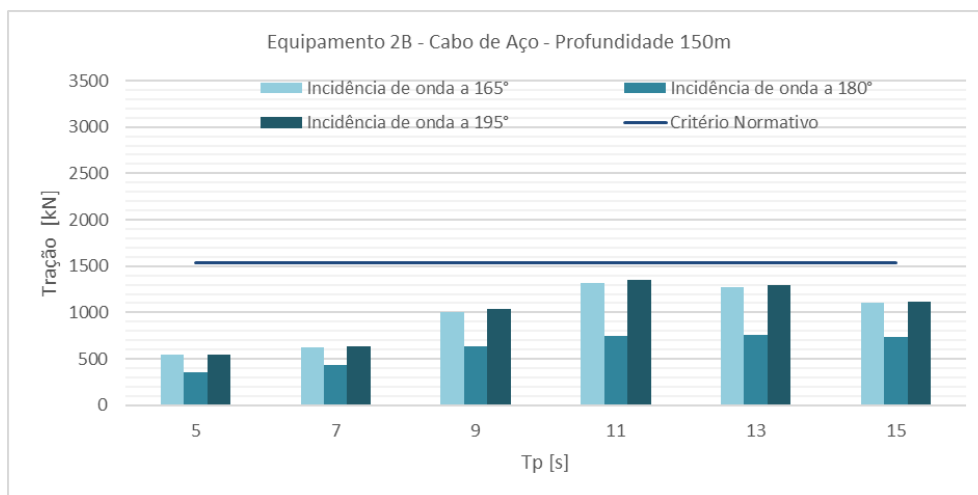


Figura 6.104 Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2B

A Tabela C.41 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 260m. A Figura 6.105 e a Figura 6.106 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

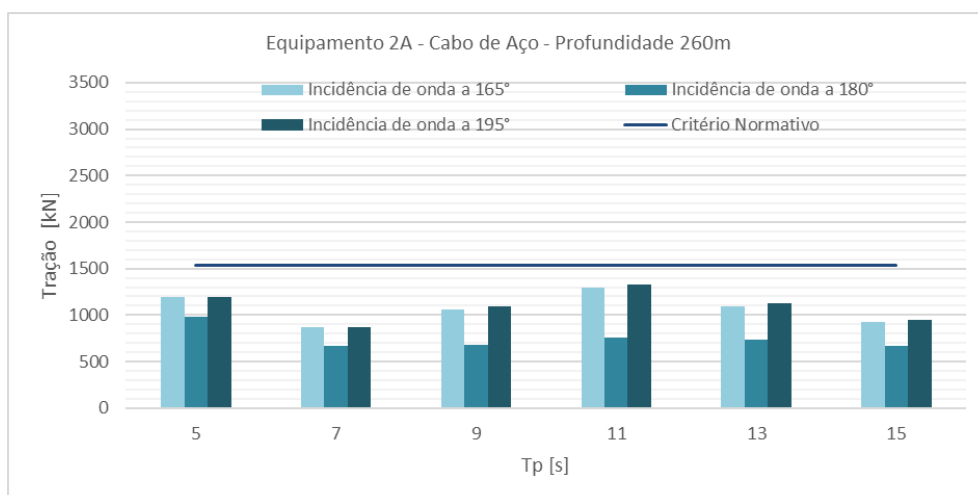


Figura 6.105 Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2A

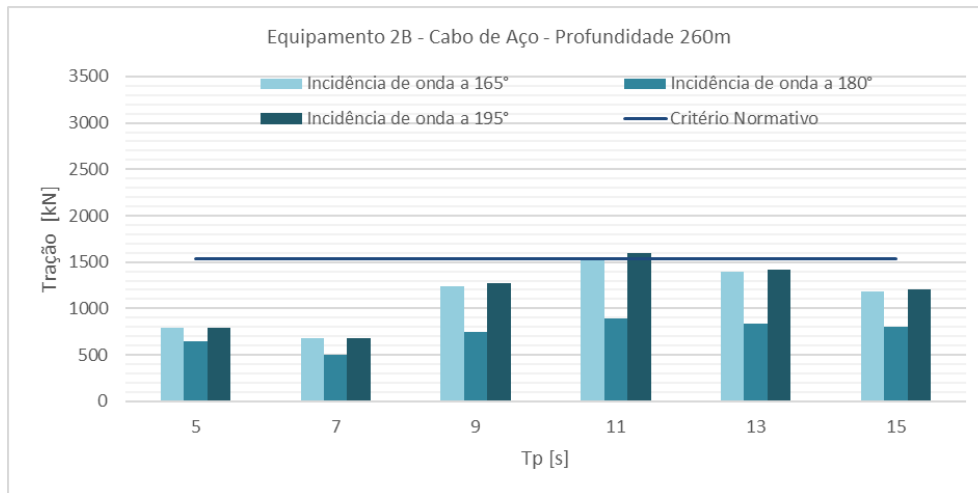


Figura 6.106 Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2B

A Tabela C.42 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 1290m. A Figura 6.107 e a Figura 6.108 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

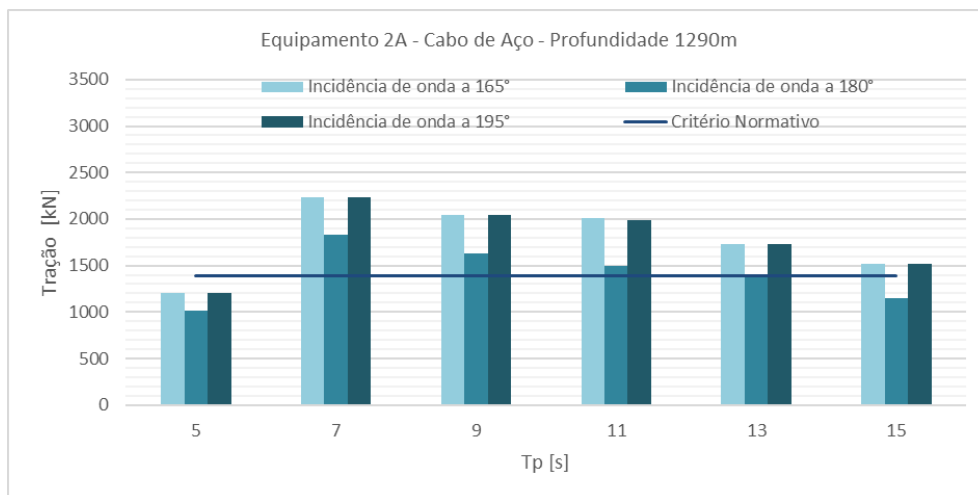


Figura 6.107 Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2A

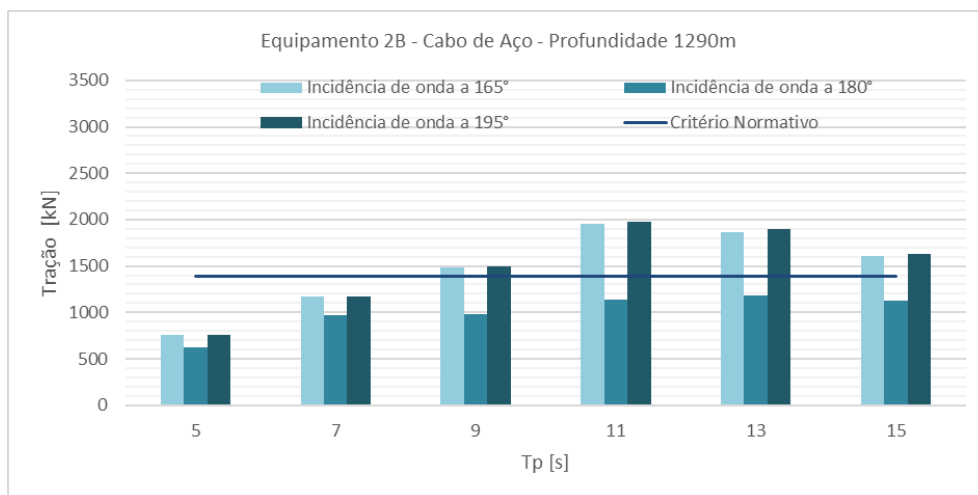


Figura 6.108 Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2B

A Tabela C.43 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 2150m. A Figura 6.109 e a Figura 6.110 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

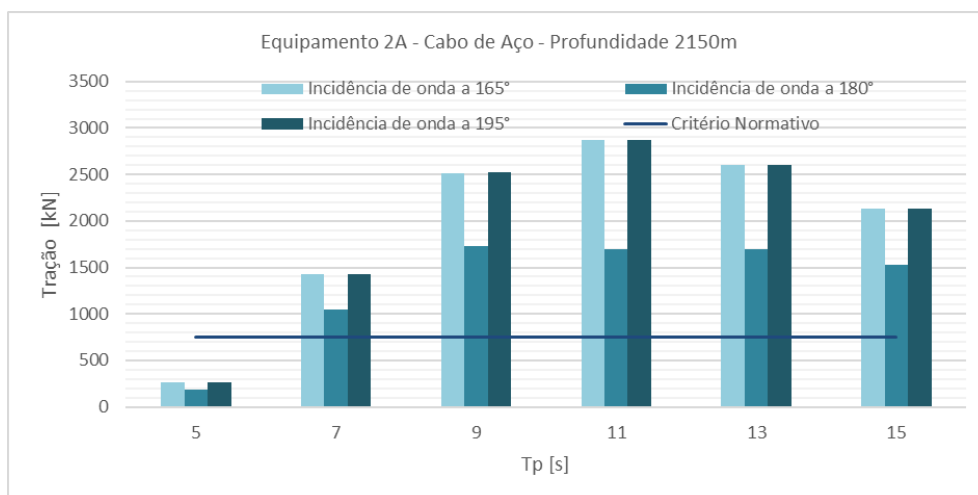


Figura 6.109 Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2A

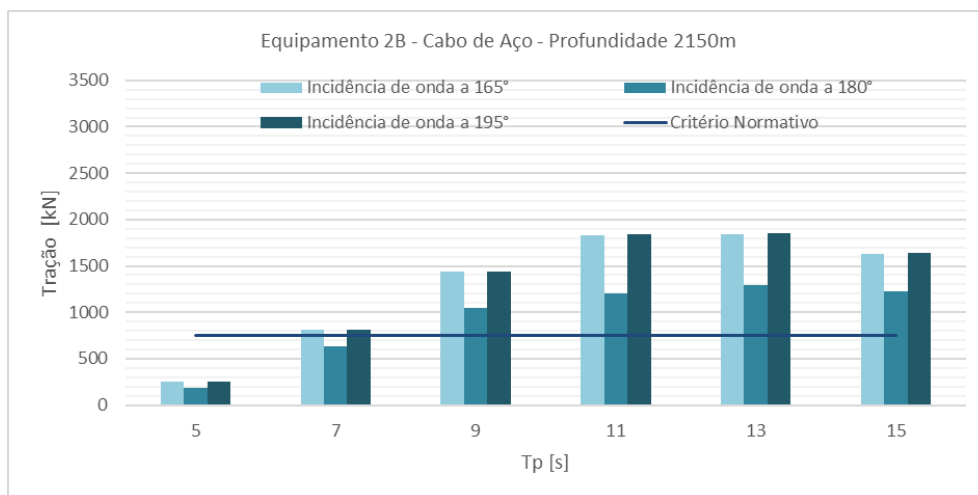


Figura 6.110 Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2B

A Tabela C.44 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de aço para a profundidade de 3000m. A Figura 6.111 e a Figura 6.112 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

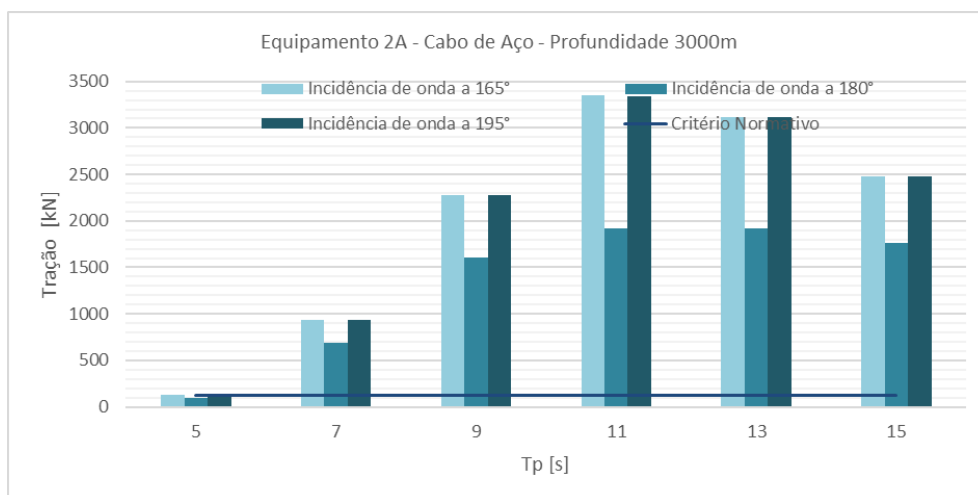


Figura 6.111 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2A

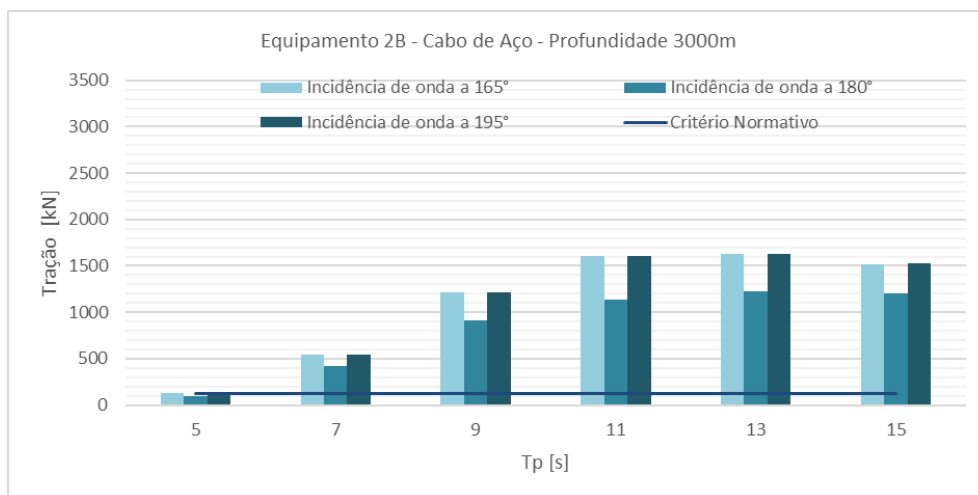


Figura 6.112 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2B

Dos valores de tração agrupados acima, é possível identificar os máximos para cada profundidade e equipamento, resultando na Tabela C.45 de valores críticos e o gráfico correlato da Figura 6.113. Dessa forma, observa-se que os valores críticos de tração para o Equipamento 2 ocorrem para a consideração de $C_d = 7,0$ nas profundidades iniciais de 40m, 150m e 260m – violando o critério normativo para esta última. Para as demais, os esforços obtidos com o coeficiente de arrasto considerado $C_d = 1,5$ são os críticos. De forma semelhante ao comportamento para o Equipamento 1, a parcela de arrasto da formulação de Morison tem um efeito amortecedor mais importante para o sistema em profundidades maiores, ou seja, na zona de ressonância para o sistema de instalação com cabo de aço.

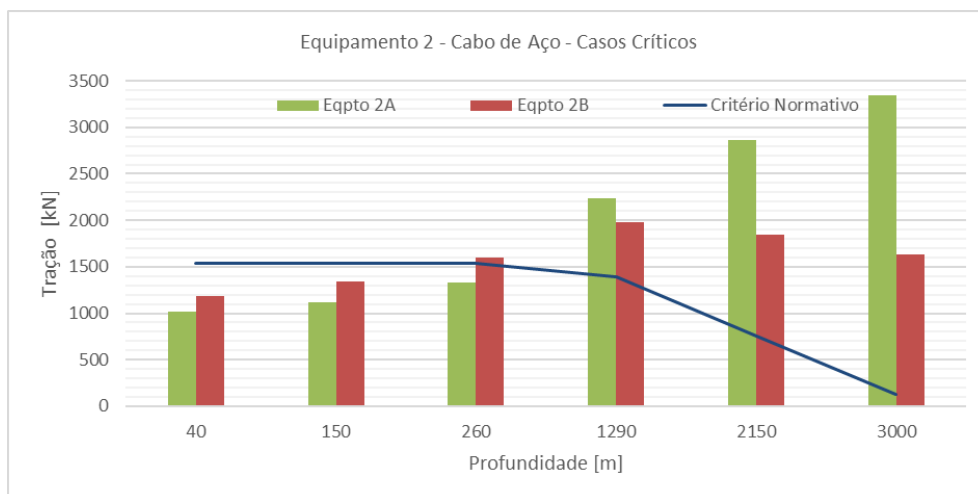


Figura 6.113 Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 2

6.3.5 TRAÇÃO CRÍTICA EM CADA PROFUNDIDADE – CABO DE POLIÉSTER

Para identificar valores máximos de parcela dinâmica de tração no topo do cabo de poliéster, tal qual realizado para o cabo de aço na seção 6.3.4, os resultados são ora agrupados por profundidade e coeficiente de arrasto adotado para o equipamento.

A Tabela C.46 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 40m. A Figura 6.114 e a Figura 6.115 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

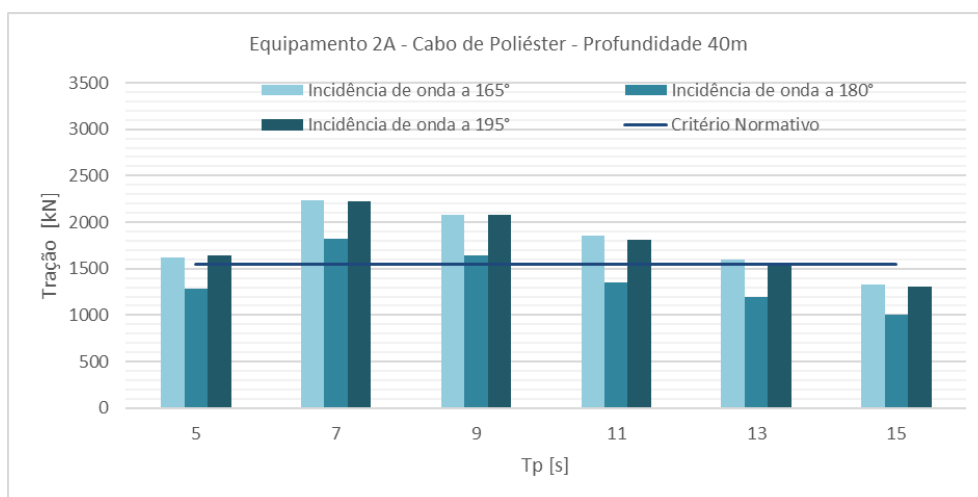


Figura 6.114 Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

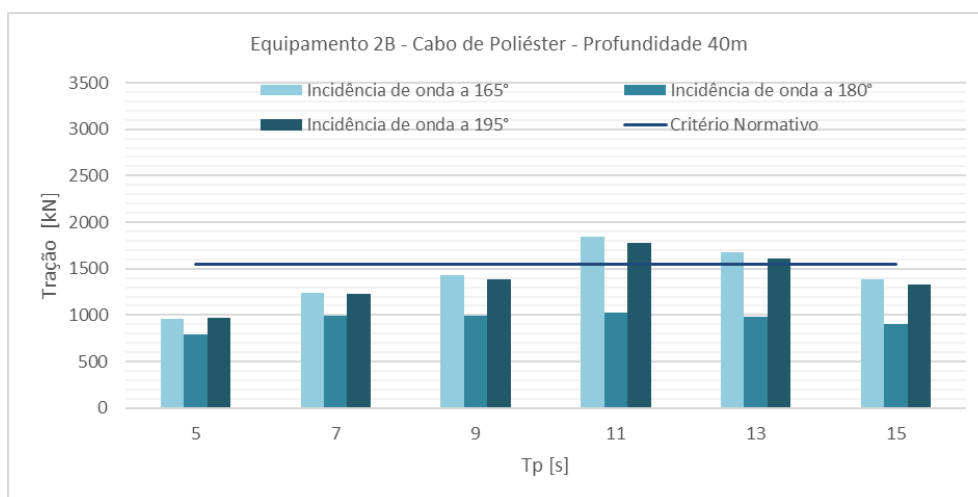


Figura 6.115 Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

A Tabela C.47 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 150m. A Figura 6.116 e a Figura 6.117 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

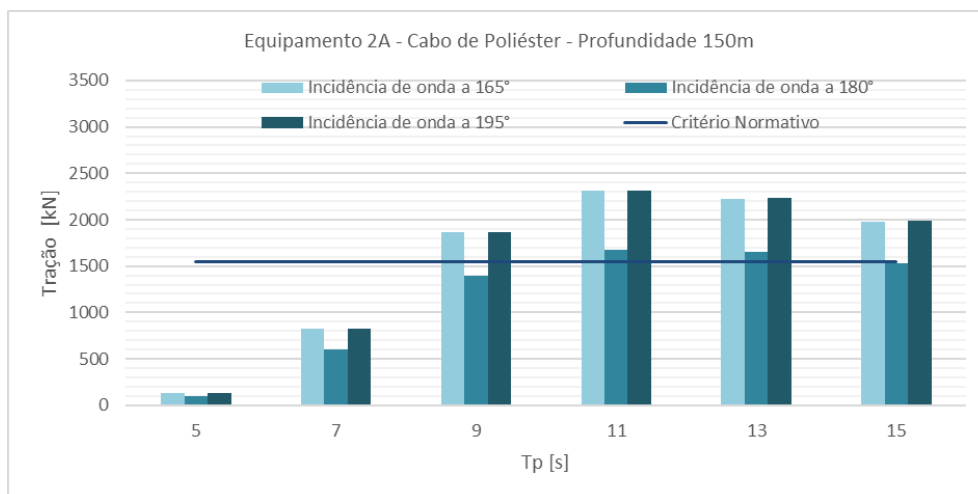


Figura 6.116 Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

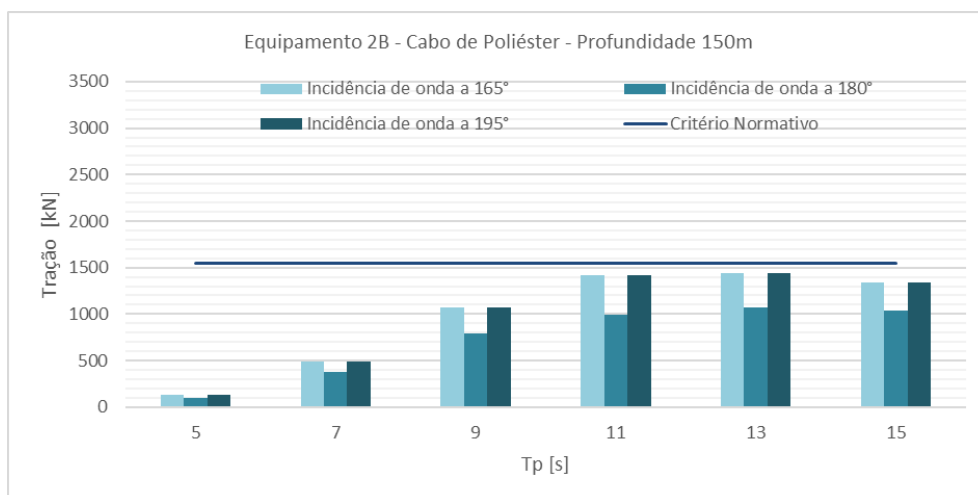


Figura 6.117 Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

A Tabela C.48 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 260m. A Figura 6.118 e a Figura 6.119 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

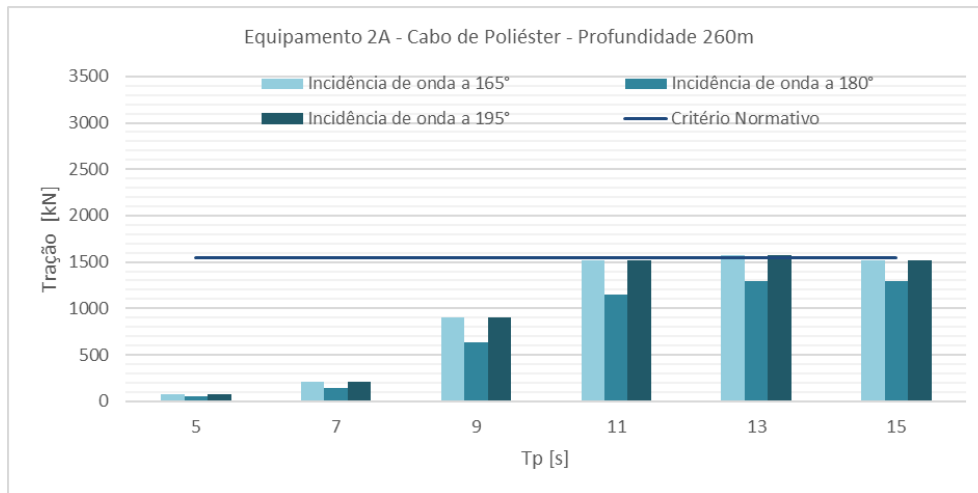


Figura 6.118 Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

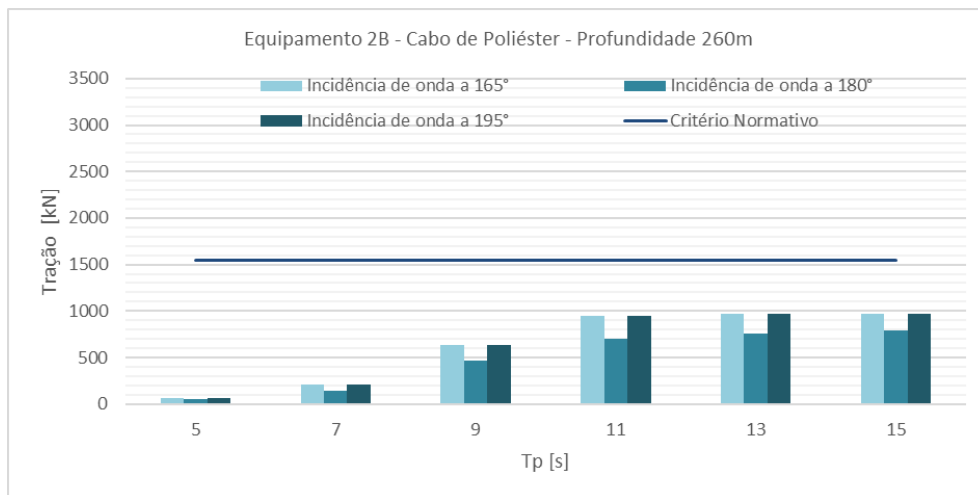


Figura 6.119 Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

A Tabela C.49 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 1290m. A Figura 6.120 e a Figura 6.121 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

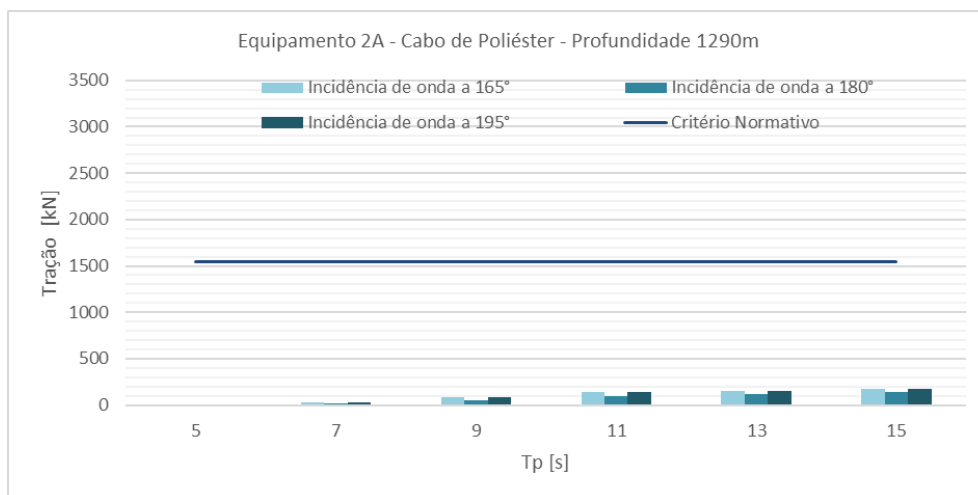


Figura 6.120 Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

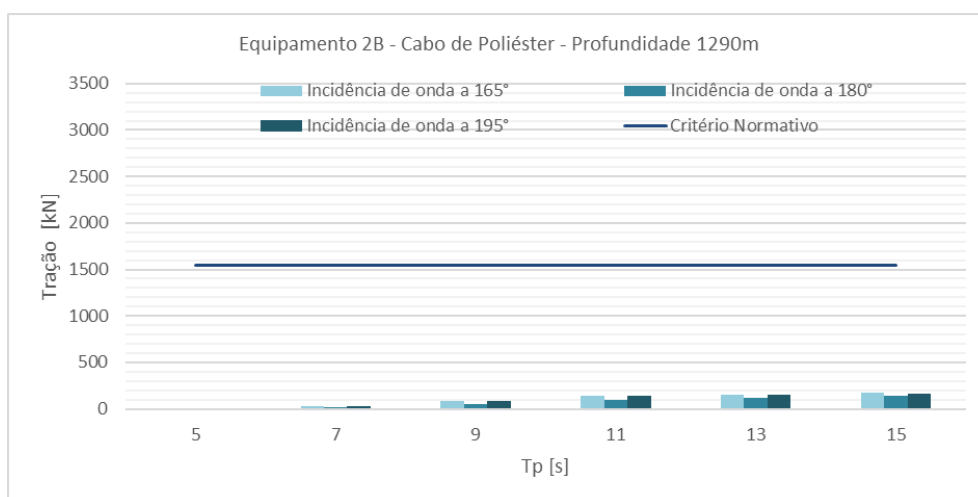


Figura 6.121 Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

A Tabela C.50 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 2150m. A Figura 6.122 e a Figura 6.123 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

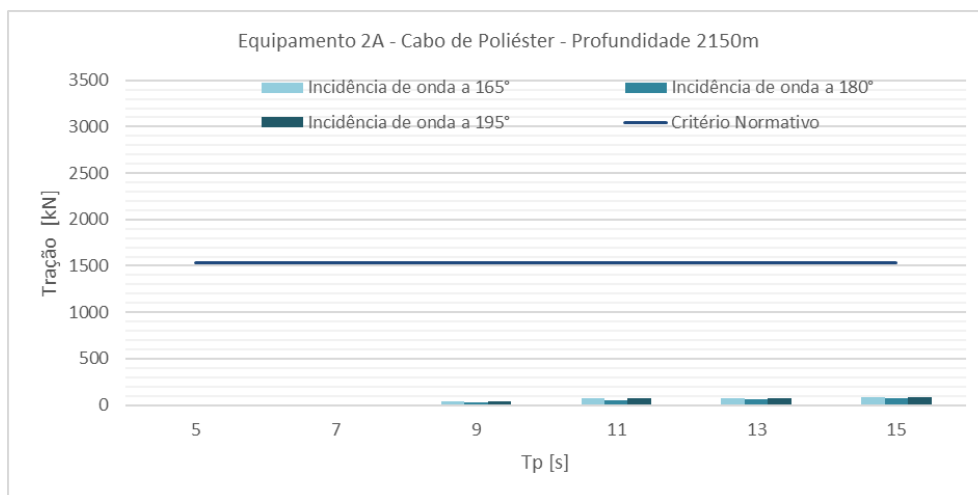


Figura 6.122 Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

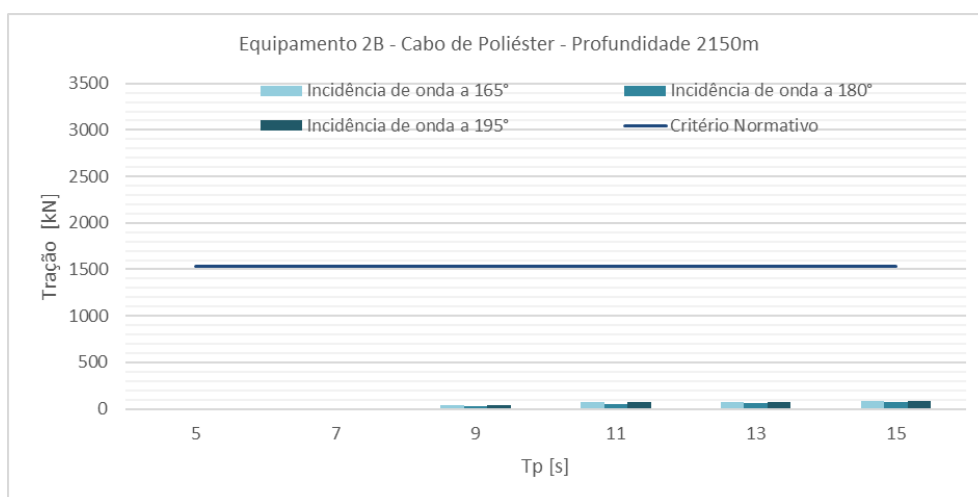


Figura 6.123 Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

A Tabela C.51 apresenta os resultados de parcela dinâmica de tração no cabo de poliéster para a profundidade de 3000m. A Figura 6.124 e a Figura 6.125 mostram graficamente estes resultados para os equipamentos 2A ($C_d = 1,5$) e 2B ($C_d = 7,0$), respectivamente.

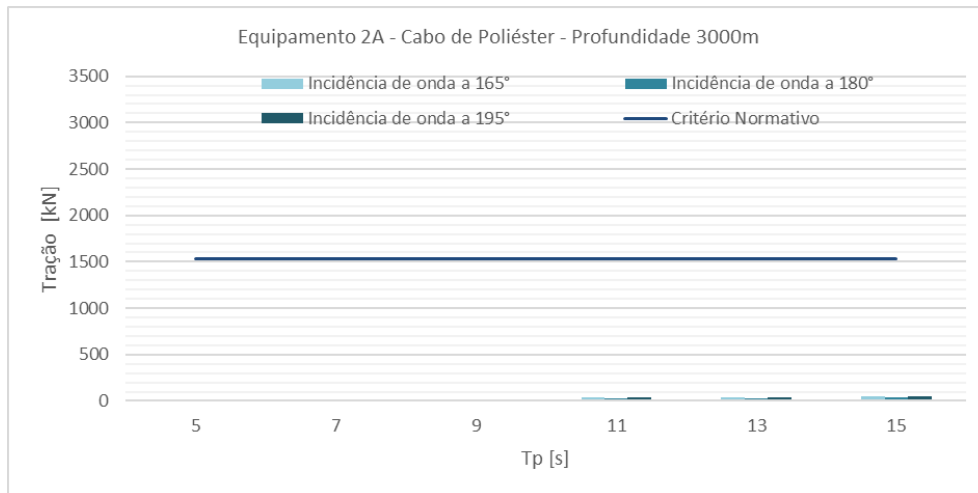


Figura 6.124 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2A

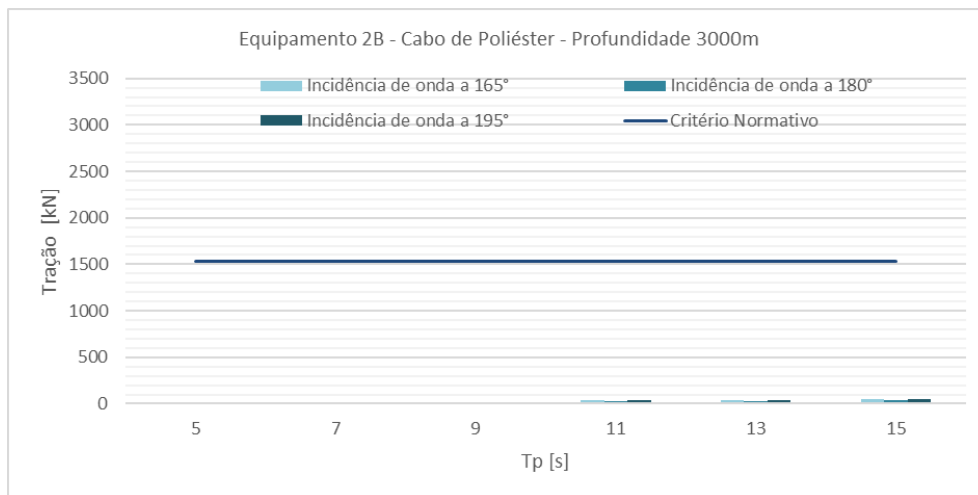


Figura 6.125 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2B

Dos valores de tração agrupados acima, é possível identificar os máximos para cada profundidade e equipamento, resultando na Tabela C.52 de valores críticos e o gráfico correlato da Figura 6.126. Também de forma paralela ao verificado com o Equipamento 1, para o cabo de poliéster, todos os casos críticos foram obtidos para o modelo do equipamento 2 com coeficiente de arrasto $C_d = 1,5$. As magnitudes mais importantes estão de fato na zona de ressonância esperada para o sistema de içamento com cabo de poliéster.

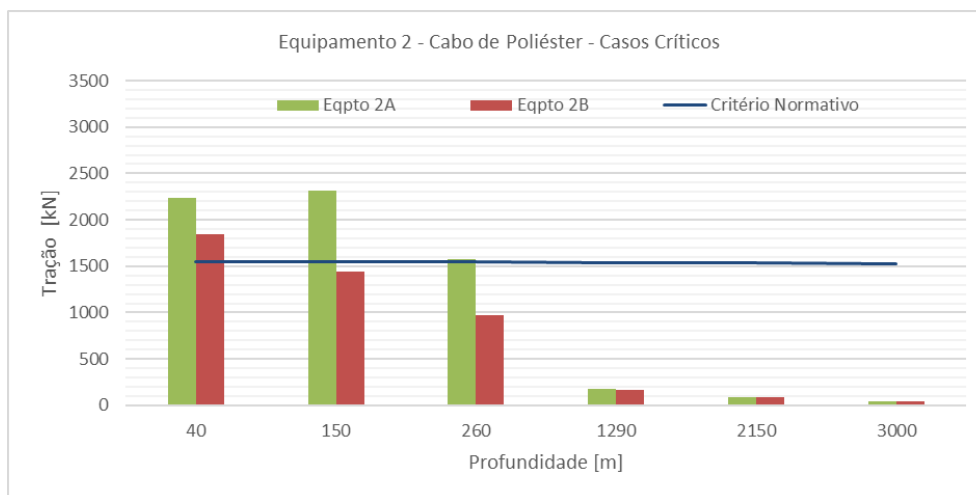


Figura 6.126 Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 2

6.3.6 COMPARATIVO DE TRAÇÕES CRÍTICAS – CABO DE AÇO VS. CABO DE POLIÉSTER

Das seções 6.3.4 e 6.3.5, extraem-se as trações críticas por profundidade, independentemente do coeficiente de arrasto adotado para o modelo do equipamento, e constrói-se a Tabela 6.6 e o gráfico da Figura 6.127 dos valores críticos de tração para ambos os materiais modelados para o cabo de içamento do equipamento, em comparação com seus respectivos critérios normativos.

Para o Equipamento 2, é possível perceber que a sua instalação com cabo de aço a partir da profundidade 260m é inviabilizada. Nesta profundidade pelo critério de *slack sling* e nas seguintes pela capacidade de carga do material. O cabo de poliéster, no entanto, permanece com uma margem de segurança para as profundidades a partir de 1290m. Temos, portanto, a inviabilização dos dois cabos na profundidade de 260m, com o poliéster tendo ultrapassado seu critério em 2,2%, e o aço, em 3,7%.

Para esta profundidade de transição de 260m, no entanto, é importante destacar que o valor crítico para o cabo de aço acontece no modelo com o Equipamento 2B, enquanto o do cabo de poliéster vem do modelo com Equipamento 2A. Ademais, o modelo com Equipamento 2A e cabo de aço não gera resultados de parcela dinâmica que excedam os critérios normativos nesta mesma profundidade, e o mesmo ocorre para o Equipamento 2B e cabo de poliéster.

Tabela 6.6 Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 2

Prof. [m]	Cabo de aço		Cabo de poliéster	
	Tração [kN]	Critério Normativo [kN]	Tração [kN]	Critério Normativo [kN]
40	1188	1540	2234	1546
150	1346	1541	2317	1546
260	1598	1541	1579	1545
1290	2236	1392	174	1540
2150	2868	756	85	1535
3000	3349	127	49	1531

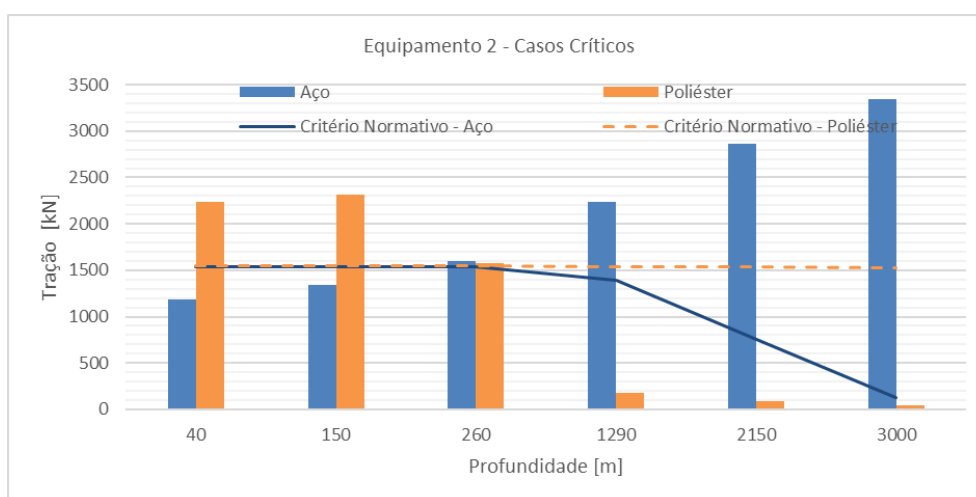


Figura 6.127 Resultados críticos para cabos de aço e de poliéster, Equipamento 2

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve por objetivos a investigação do fenômeno de ressonância de sistemas de instalação de equipamentos submarinos em águas ultraprofundas e o lançamento de diretrizes para a busca de alternativas viáveis de métodos para este tipo de procedimento operacional. Isto foi feito através da caracterização físico-matemática dos efeitos de ressonância em sistemas de instalação, do Estado da Arte para estas operações, da proposta do método com alternância de cabos de aço e de poliéster e, por fim, do estudo de caso relacionado.

Em referência aos resultados apresentados no capítulo 6 deste trabalho e considerando a proposta de procedimento operacional para instalação de equipamentos visando viabilização para águas profundas do item 4.5, é possível afirmar que o estudo de caso para o Equipamento 1, com peso no ar de 100ton é de fato inviável utilizando o Método Vertical tradicional com cabo de lançamento em aço para profundidades na zona de ressonância deste material. Nas simulações substituindo o cabo de aço por um equivalente de poliéster, percebe-se que este atenderia os critérios de norma para todas as profundidades simuladas para o equipamento de 100ton, o que sugere ainda que a alternância de cabos não seria necessária nessa situação.

Em que pesem as dificuldades operacionais não relatadas e, em especial, eventuais fatores minoradores de resistência devido à passagem de cabos de poliéster pelo equipamento de içamento e/ou aplicação angular de carga neste tipo de material, o cabo de poliéster se apresenta como alternativa promissora para métodos de instalação em águas profundas, mesmo para equipamentos da ordem de grandeza do Equipamento 1 – que foi inspirado em compressores submarinos.

Para o Equipamento 2, inspirado em *manifolds*, com peso no ar de 200ton, os resultados de tração no cabo de lançamento demonstram a dificuldade relatada na premissa do Método de Alternância de Cabos proposto no capítulo 4. Há transgressão dos critérios normativos de capacidade de carga e da condição de *slack sling* para ambos os

materiais utilizados, sendo o poliéster inadequado para as profundidades iniciais modeladas; e o aço, para as finais.

Há ainda a particularidade de, na profundidade de 260m – a última considerada para a zona de ressonância do poliéster – ambos os materiais apresentariam falha de acordo com os critérios adotados, o que inspira cuidados especiais e a necessidade de mais estudos que tratem da zona de transição do material dos cabos, de acordo com os procedimentos operacionais adotados. Contudo, é necessário salientar que, para um mesmo equipamento sem variação de coeficiente de arrasto vertical, decerto existe uma profundidade em que ambos os cabos cumprem com os requisitos de segurança apresentados, conforme descrito na seção 6.3.6.

Dessa forma, é possível afirmar que a premissa em que se baseia este trabalho de fato se verifica quando a situação é simulada com ferramenta computacional de cálculo de sistemas hidrodinâmicos típicos de operações *offshore*, com foco em exploração e produção de Petróleo e Gás. As zonas de ressonância para os materiais utilizados para instalação de equipamentos, quais sejam, aço e poliéster, inviabilizam a operação para equipamentos dessa ordem de grandeza e, por extensão, para outros mais pesados. Uma solução mista com o uso de ambos os materiais é a alternativa apresentada neste caso, de forma a dispensar o uso de equipamentos de compensação de *heave*.

Embora o desenvolvimento tecnológico possa oferecer, num futuro médio, soluções para as dificuldades e restrições operacionais ora existentes para o cabo de poliéster, não é vedado que mais soluções intermediárias e alternativas de método de instalação de equipamentos sejam consideradas, à luz dos resultados apresentados neste trabalho.

Destaca-se, portanto, a possibilidade de alteração da sugestão do procedimento operacional descrito no item 4.5.2 para um Método de Alternância de Cabos – Misto, em que se utilize uma única embarcação para o transporte do equipamento à locação de instalação, bem como para o içamento. Neste caso, a alternância de cabos se daria por meio de múltiplas lingadas acopladas uma à outra, eventualmente de materiais diferentes, conforme seja verificado necessário para evitar os efeitos deletérios de ressonância.

Assim sendo, tem-se uma única linha de içamento, de múltiplos materiais, de forma análoga a molas de coeficientes de rigidez diferentes associadas em série, podendo

ser aproximada por um sistema massa-mola em que a rigidez equivalente seria calculada pela expressão correspondente. Esta opção, caso viável, apresentaria ainda a vantagem de necessitar apenas de uma embarcação, desde que esta tenha capacidade para transporte e içamento compatíveis com o equipamento a ser instalado – o que potencialmente reduz os custos e a complexidade logística da operação.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As simulações realizadas neste trabalho mostram que há uma correlação entre a necessidade da alternância de cabos e a massa do equipamento a ser instalado. Desta forma, um trabalho de investigação a respeito da variável massa do equipamento é uma linha possível de expansão de pesquisa.

A respeito da definição das zonas de ressonância para cada material, destaca-se o resultado descrito em 6.2.3, que trata do caráter multimodal do espectro de resposta de movimento vertical do ponto de conexão do cabo de lançamento do equipamento na embarcação. Este caráter foi negligenciado no procedimento adotado. Sugere-se, portanto, inserção de uma nova rotina que identifique e considere múltiplos picos do espectro, para obtenção de resultados mais refinados nas etapas preliminares da pesquisa.

Sobre a filosofia de simulação adotada – a de *snapshots* do equipamento em cada profundidade – embora seja corrente para análises deste tipo, é desejável que sejam desenvolvidas ao ponto em que se simule a operação de içamento de forma contínua, passando por todas as etapas e profundidades durante a descida do equipamento ao leito marinho. Em especial, para métodos que se utilizem de operações de troca de cabos, a simulação numérica desta operação pode gerar informações importantes para o bom planejamento e proposta de operação.

Para a avaliação mais acurada do efeito de amplificação dinâmica sobre as trações resultantes nos cabos de lançamento, notadamente nas respostas obtidas para os equipamentos com coeficiente de arrasto vertical $C_d = 7,0$, sugere-se a realização das simulações numéricas considerando a Análise Acoplada do comportamento da unidade flutuante, equipamento e cabos.

Por fim, a pesquisa comparativa de outras alternativas de operação, como a descrita no item 7.1, bem como associadas a metodologias experimentais (como ensaios

de tanque em escala) e análises econômicas e de otimização de materiais é uma zona que se mantém em aberto para pesquisa na comunidade científica interessada neste assunto, podendo se converter em soluções tecnológicas de aplicação direta na indústria, viabilizando operações em regiões cada vez mais inóspitas do vasto leito marinho terrestre, e contribuindo para o melhor uso dos recursos financeiros, humanos e ambientais nesta atividade fundamental de exploração e produção de fontes energéticas para a humanidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMIEC-WÓJCIK, Iwona; FAŁAT, Paweł; MACZYŃSKI, Andrzej; WOJCIECH, Stanisław. *Load stabilisation in an A-frame – a type of an offshore crane*. The Archive of Mechanical Engineering, v. LVI, n. 1, 2009.

BAI, Yong; BAI, Qiang. *Subsea engineering handbook*. Elsevier, 2010.

BATALHA, Alessandro F. *Análise de fadiga de estruturas offshore tipo topside*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

CHAKRABARTI, Subrata K. *Handbook of offshore engineering*. 1. ed. Elsevier, 2005. (v. 1).

———. *Hydrodynamics of offshore structures*. Computational Mechanics Publications, 1987.

DANTAS, Claudio M. S. *Metodologia de análise de fadiga de risers rígidos no domínio da frequência com utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais linearizados*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

DNV GL AS. *Offshore standard DNV-OS-H205: Lifting operations (VMO Standard – Part 2-5)*. DNV, 2014.

———. *Offshore standard DNV-OS-H206: Loadout, transport and installation of subsea objects (VMO Standard – Part 2-6)*. DNV, 2014.

———. *Recommended practice DNV-RP-H103: Modelling and analysis of marine operations*. DNV, 2011.

GIRÓN, Aldo R. C. *Aplicação de metodologias de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers na exploração de petróleo offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

———. *Projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers em plataformas flutuantes de produção de petróleo*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

HALLSET, Jan O. *Subsea field development and production enhancement (IOR)*. Offshore Europe, Aberdeen/Escócia, 2009.

HERDEIRO, Marco A. N. *Instalação de sistemas submarinos de produção em áreas remotas*. Tese (Mestrado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

JACOB, Breno P. *Programa PROSIM: simulação numérica do comportamento de sistemas para exploração de petróleo offshore – manual teórico*. Versão 3.2, LAMCSO/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

JAHANGIRY, Tara. *Valuing flexibility in ship design – a real options approach*. Tese (Mestrado em Tecnologia Marinha), NTNU, Trondheim/Noruega, 2015.

JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W. *Offshore hydromechanics*. 1. ed. Delft University of Technology, 2001.

KEULEGAN, Garbis H.; CARPENTER, Lloyd H. *Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, v. 60, n. 5, 1958.

MACHADO, Rogério D. *Método pendular para instalação de equipamentos no fundo do mar em operações offshore*. Brasil patente PI 0306058-6 A. 10 dez. 2003, 16 ago. 2005.

MATTOS, José M. F. *Procedure for descent of equipment to bottom of sea*. Estados Unidos patente US 7954658 B2. 1 maio 2009, 7 jun. 2011.

———. *Processo para descida de equipamentos ao fundo do mar*. Brasil patente PI 08000140-5 A2. 1 fev. 2008, 20 out. 2009.

MELLO, Eduardo S. *Modelo de sistema passivo de compensação de heave para operações de instalação de equipamentos submarinos em águas ultraprofundas*. Tese (Mestrado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MORAIS, José M. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore*. IPEA/Petrobras, Brasília, 2013.

NEVES, Cassiano R. *Instalação de manifolds em águas profundas pelo método pendular à luz de ensaios com modelos reduzidos em tanque oceânico e verificação numérica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

ORTIZ, Luiza M. *Método matemático para resolução de problema de clusterização de poços através do uso de manifolds*. Projeto de Graduação (Engenharia de Petróleo), Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

OSHIRO, Anderson T. *Técnicas de controle para posicionamento de múltiplos navios em operações de lançamento de estruturas submarinas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica/USP, São Paulo, 2012.

RAO, Singiresu S. *Mechanical vibrations*. 5. ed. Prentice Hall, 2011.

RIBEIRO, Mario L. *Concepção de manifolds submarinos para lançamento pendular em águas ultra profundas*. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

RONCETTI, Leonardo. *Elaboração de diagramas de limite operacional para procedimentos de içamento offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

SILVEIRA, Marcos M. *Introdução ao apoio marítimo*. 1. ed. Edição do Autor, Niterói/RJ, 2013.

SOUZA, Carlos E. M. *Ferramenta submarina para compensação ativa de movimentos verticais na instalação de equipamentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

THORGERSEN, Simen. *Comparison study of deepwater installation methods*. Tese (Mestrado em Tecnologia Offshore), University of Stavanger, Stavanger/Noruega, 2014.

VENUGOPAL, Vengatesan; VARYANI, Kamlesh S.; BARLTROP, Nigel D. P. *Wave force coefficients for horizontally submerged rectangular cylinders*. Ocean Engineering, n. 33, 2006.

WANG, Yingying; DUAN, Menglan; WANG, Deguo; YUAN, Xu; TIAN, Kai. *An exploratory study on optimum layout of the cluster manifold*. OMAE, Rio de Janeiro, 2012.

APÊNDICE A NÚMEROS DE KEULEGAN-CARPENTER DO ESTUDO DE CASO

A matriz de carregamento do Estudo de Caso deste trabalho é composta por ondas de altura $H_s = 2,0\text{m}$ e períodos variando entre $T_p = 5\text{s}$ e $T_p = 15\text{s}$. Considerando, portanto, estas duas componentes de onda, pretende-se calcular o número de Keulegan-Carpenter do movimento oscilatório das partículas de fluido que as compõem.

Conforme equação (5.1), o número de Keulegan-Carpenter depende da amplitude da velocidade da partícula de fluido em movimento oscilatório (u_0), do período de onda (T) e da dimensão representativa do corpo submerso (D). Dados os períodos de onda da matriz de carregamento $T = 5\text{s}$ e $T = 15\text{s}$, tomando a largura dos equipamentos do estudo como dimensão representativa, necessita-se calcular a amplitude u_0 .

Para tanto, considerando a Teoria Linear de Onda, verifica-se a aplicabilidade das formulações para águas profundas da Tabela 3.2, conforme o critério apresentado na Tabela 3.1. Para os cálculos apresentados neste Apêndice, considera-se a aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Para $T = 5\text{s}$:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{gT^2}{2\pi} \\ L_0 &= 39,03 \text{ m} \end{aligned} \tag{A.1}$$

Para $T = 15\text{s}$:

$$L_0 = 351,3 \text{ m} \tag{A.2}$$

Com base nos comprimentos de onda de (A.1) e (A.2), bem como no critério da Tabela 3.1, as formulações para cálculo das grandezas cinemáticas das partículas de fluido em movimento oscilatório em águas profundas são válidas a partir das profundidades d em (A.3) e (A.4) para $T = 5\text{s}$ e $T = 15\text{s}$, respectivamente.

Para $T = 5\text{s}$:

$$\begin{aligned}\frac{d}{L} &\geq \frac{1}{2} \\ d &\geq 19,52 \text{ m}\end{aligned}\tag{A.3}$$

Para $T = 15\text{s}$:

$$d \geq 175,6 \text{ m}\tag{A.4}$$

Embora tenhamos modelos numéricos utilizados para as simulações do Estudo de Caso com profundidades de lâmina d'água a 40m e 150m, estes representam apenas $1/6$ de todos os modelos elaborados. Portanto, considera-se que as formulações para águas profundas são representativas para a verificação deste Apêndice.

A expressão completa para a velocidade da partícula de fluido variando com o tempo t e com sua posição (x, y) em relação ao sistema de referência da Figura 3.2 é reproduzida em (A.5). Desta é possível destacar a amplitude u_0 em (A.6).

$$u = \frac{gkH}{2\omega} e^{ky} \cos[k(x - ct)]\tag{A.5}$$

$$u_0 = \frac{gkH}{2\omega} e^{ky}\tag{A.6}$$

Vê-se que esta amplitude depende, além da aceleração da gravidade g e da posição vertical da partícula de fluido y , do número de onda k , da altura de onda (que é $H = 2,0\text{m}$ para o caso) e da frequência ω . A amplitude será máxima na posição vertical $y_{\text{máx}} = \frac{H}{2}$. Os parâmetros de número de onda e frequência são calculados em (A.7), (A.8), (A.9) e (A.10), resultando nas amplitudes de velocidade das equações (A.11) e (A.12).

Número de onda para $T = 5\text{s}$:

$$\begin{aligned}k &= \frac{2\pi}{L} \\ k &= 0,161 \text{ rad/m}\end{aligned}\tag{A.7}$$

Número de onda para $T = 15\text{s}$:

$$k = 0,0179 \text{ rad/m}\tag{A.8}$$

Frequência para $T = 5s$:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{2\pi}{T} \\ \omega &= 1,26 \text{ rad/s}\end{aligned}\tag{A.9}$$

Frequência para $T = 15s$:

$$\omega = 0,419 \text{ rad/s}\tag{A.10}$$

Amplitude máxima de velocidade da partícula de fluido para $T = 5s$:

$$u_0 = 1,47 \text{ m/s}\tag{A.11}$$

Amplitude máxima de velocidade da partícula de fluido para $T = 15s$:

$$u_0 = 0,427 \text{ m/s}\tag{A.12}$$

Por fim, calcula-se o número de Keulegan-Carpenter máximo, visto que calculado para $y_{m\acute{a}x}$. As expressões (A.13), (A.14), (A.15) e (A.16) mostram os resultados obtidos conforme os períodos de onda e os equipamentos considerados. Para as profundidades simuladas, portanto, estes valores tendem a diminuir conforme u_0 assume valores cada vez menores com $y < 0$.

Para $T = 5s$, equipamentos 1A e 1B:

$$\begin{aligned}KC &= u_0 \frac{T}{D} \\ KC &= 1,84\end{aligned}\tag{A.13}$$

Para $T = 15s$, equipamentos 1A e 1B:

$$KC = 1,60\tag{A.14}$$

Para $T = 5s$, equipamentos 2A e 2B:

$$KC = 0,613\tag{A.15}$$

Para $T = 15s$, equipamentos 2A e 2B:

$$KC = 0,534\tag{A.16}$$

APÊNDICE B ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS RESULTANTES

Os resultados serão apresentados seguindo a nomenclatura dos arquivos/modelos do SITUA, cuja forma segue o padrão: *Numeração do Equipamento* + “_” + *Profundidade* + “a” ou “p” (para cabo de lançamento em aço ou poliéster, respectivamente) + “_revX” (X sendo uma numeração de controle do autor). Como exemplo, a simulação do equipamento 2 com $C_d = 7,0$, por cabo de poliéster e na profundidade de 2150m tem por nome: “2B_2150p_rev1”.

B.1 EQUIPAMENTO 1A

As séries temporais resultantes das simulações do Equipamento 1A para cada profundidade e considerando todas as combinações ambientais têm as médias apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A

Modelo	Média [kN]
1A_230a_rev7	948
1A_230p_rev7	869
1A_650a_rev2	1099
1A_650p_rev2	886
1A_1070a_rev1	1249
1A_1070p_rev1	902
1A_2180a_rev1	1646
1A_2180p_rev1	946
1A_2590a_rev1	1793
1A_2590p_rev1	962
1A_3000a_rev1	1940
1A_3000p_rev1	979

Tabela B.2 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 165°

Modelo	Máximos [kN]					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1A_230a_rev7	1005	1019	1050	1078	1068	1051
1A_230p_rev7	1017	1111	1095	1089	1058	1037
1A_650a_rev2	1247	1223	1244	1293	1265	1236
1A_650p_rev2	900	968	1087	1142	1137	1116
1A_1070a_rev1	1537	1477	1445	1461	1440	1417
1A_1070p_rev1	909	925	997	1068	1076	1076
1A_2180a_rev1	1804	1955	1958	1977	1938	1895
1A_2180p_rev1	948	952	971	993	1003	1015
1A_2590a_rev1	1869	2040	2126	2166	2133	2078
1A_2590p_rev1	967	967	981	996	1003	1014
1A_3000a_rev1	1991	2183	2320	2367	2346	2288
1A_3000p_rev1	987	985	992	1005	1009	1017

Tabela B.3 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 180°

Modelo	Máximos [kN]					
	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1A_230a_rev7	989	999	1014	1029	1029	1023
1A_230p_rev7	991	1068	1048	1038	1019	995
1A_650a_rev2	1214	1195	1196	1214	1204	1193
1A_650p_rev2	896	945	1036	1075	1078	1068
1A_1070a_rev1	1474	1428	1395	1387	1381	1370
1A_1070p_rev1	907	917	968	1028	1046	1050
1A_2180a_rev1	1774	1907	1886	1876	1858	1830
1A_2180p_rev1	948	950	962	978	992	1007
1A_2590a_rev1	1852	1991	2030	2036	2022	1998
1A_2590p_rev1	966	966	974	985	995	1007
1A_3000a_rev1	1977	2133	2223	2220	2225	2194
1A_3000p_rev1	984	983	987	997	1004	1014

Tabela B.4 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1A, incidência de onda a 195°

Modelo	Máximos [kN]					
	C13	C14	C15	C16	C17	C18
1A_230a_rev7	1005	1019	1052	1082	1071	1053
1A_230p_rev7	1017	1111	1095	1089	1058	1038
1A_650a_rev2	1247	1223	1247	1299	1270	1239
1A_650p_rev2	900	968	1087	1143	1138	1116
1A_1070a_rev1	1537	1477	1448	1470	1448	1421
1A_1070p_rev1	909	925	997	1068	1076	1076
1A_2180a_rev1	1805	1955	1961	1975	1936	1897
1A_2180p_rev1	948	952	971	993	1003	1015
1A_2590a_rev1	1868	2041	2121	2166	2131	2075
1A_2590p_rev1	967	967	981	996	1003	1014
1A_3000a_rev1	1991	2186	2327	2367	2351	2291
1A_3000p_rev1	987	985	992	1005	1010	1017

Os máximos obtidos pela estatística de extremos considerando distribuição de máximos de Weibull no período de 3600s para cada modelo é apresentada na Tabela B.2, na Tabela B.3 e na Tabela B.4, para casos de carregamento com incidência de onda respectivamente a 165°, a 180° e a 195°.

B.2 EQUIPAMENTO 1B

As séries temporais resultantes das simulações do Equipamento 1B para cada profundidade e considerando todas as combinações ambientais têm as médias apresentadas na Tabela B.5.

Os máximos obtidos pela estatística de extremos considerando distribuição de máximos de Weibull no período de 3600s para cada modelo é apresentada na Tabela B.6, na Tabela B.7 e na Tabela B.8, para casos de carregamento com incidência de onda respectivamente a 165°, a 180° e a 195°.

Tabela B.5 Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B

Modelo	Média [kN]
1B_230a_rev11	948
1B_230p_rev4	869
1B_650a_rev2	1099
1B_650p_rev1	886
1B_1070a_rev1	1249
1B_1070p_rev1	902
1B_2180a_rev1	1646
1B_2180p_rev1	946
1B_2590a_rev1	1793
1B_2590p_rev1	962
1B_3000a_rev1	1940
1B_3000p_rev1	979

Tabela B.6 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 165°

Modelo	Máximos [kN]					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1B_230a_rev11	1005	1028	1060	1108	1108	1086
1B_230p_rev4	958	998	1033	1089	1083	1053
1B_650a_rev2	1207	1199	1268	1319	1297	1267
1B_650p_rev1	900	936	1002	1043	1047	1040
1B_1070a_rev1	1413	1395	1434	1505	1489	1457
1B_1070p_rev1	909	924	972	1007	1011	1012
1B_2180a_rev1	1752	1821	1882	1962	1950	1910
1B_2180p_rev1	948	952	970	989	993	997
1B_2590a_rev1	1860	1949	2042	2120	2110	2072
1B_2590p_rev1	967	967	980	994	998	1003
1B_3000a_rev1	1986	2087	2194	2273	2263	2238
1B_3000p_rev1	987	985	992	1003	1006	1011

Tabela B.7 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 180°

Modelo	Máximos [kN]					
	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1B_230a_rev11	989	1003	1018	1034	1041	1038
1B_230p_rev4	941	975	978	996	1003	997
1B_650a_rev2	1181	1173	1201	1226	1221	1212
1B_650p_rev1	896	924	972	998	1007	1007
1B_1070a_rev1	1379	1361	1372	1399	1403	1395
1B_1070p_rev1	907	917	952	979	988	993
1B_2180a_rev1	1733	1793	1806	1834	1849	1840
1B_2180p_rev1	948	950	962	976	984	990
1B_2590a_rev1	1845	1921	1968	1997	2012	2000
1B_2590p_rev1	966	966	974	984	991	997
1B_3000a_rev1	1975	2055	2121	2160	2167	2170
1B_3000p_rev1	984	983	987	995	1001	1007

Tabela B.8 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 1B, incidência de onda a 195°

Modelo	Máximos [kN]					
	C13	C14	C15	C16	C17	C18
1B_230a_rev11	1005	1028	1062	1111	1110	1088
1B_230p_rev4	958	1034	1034	1092	1086	1056
1B_650a_rev2	1207	1199	1272	1326	1302	1270
1B_650p_rev1	900	1002	1002	1044	1047	1040
1B_1070a_rev1	1413	1395	1438	1512	1496	1461
1B_1070p_rev1	909	972	972	1007	1011	1012
1B_2180a_rev1	1752	1822	1882	1966	1954	1919
1B_2180p_rev1	948	970	970	989	993	997
1B_2590a_rev1	1861	1950	2043	2116	2109	2079
1B_2590p_rev1	967	980	980	995	998	1003
1B_3000a_rev1	1987	2090	2193	2274	2266	2236
1B_3000p_rev1	987	992	992	1003	1006	1010

B.3 EQUIPAMENTO 2A

As séries temporais resultantes das simulações do Equipamento 2A para cada profundidade e considerando todas as combinações ambientais têm as médias apresentadas na Tabela B.9.

Os máximos obtidos pela estatística de extremos considerando distribuição de máximos de Weibull no período de 3600s para cada modelo é apresentada na Tabela B.10, na Tabela B.11 e na Tabela B.12, para casos de carregamento com incidência de onda respectivamente a 165°, a 180° e a 195°.

Tabela B.9 Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A

Modelo	Média [kN]
2A_40a_rev9	1763
2A_40p_rev5	1731
2A_150a_rev2	1844
2A_150p_rev1	1740
2A_260a_rev2	1925
2A_260p_rev1	1749
2A_1290a_rev1	2687
2A_1290p_rev1	1834
2A_2150a_rev1	3323
2A_2150p_rev1	1905
2A_3000a_rev1	3951
2A_3000p_rev1	1976

Tabela B.10 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 165°

Modelo	Máximos [kN]					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
2A_40a_rev9	2234	2313	2586	2779	2665	2527
2A_40p_rev5	3350	3965	3814	3585	3324	3063
2A_150a_rev2	2511	2451	2743	2932	2830	2698
2A_150p_rev1	1875	2564	3606	4053	3968	3723
2A_260a_rev2	3124	2798	2989	3216	3022	2848
2A_260p_rev1	1819	1960	2649	3265	3328	3271
2A_1290a_rev1	3888	4922	4735	4693	4419	4203
2A_1290p_rev1	1847	1860	1915	1979	1992	2008
2A_2150a_rev1	3585	4751	5840	6190	5920	5455
2A_2150p_rev1	1913	1916	1945	1976	1983	1990
2A_3000a_rev1	4086	4885	6232	7300	7070	6430
2A_3000p_rev1	1993	1989	1997	2014	2018	2025

Tabela B.11 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 180°

Modelo	Máximos [kN]					
	C7	C8	C9	C10	C11	C12
2A_40a_rev9	2120	2153	2281	2368	2352	2277
2A_40p_rev5	3015	3555	3369	3081	2922	2733
2A_150a_rev2	2344	2287	2421	2512	2515	2471
2A_150p_rev1	1840	2343	3136	3417	3398	3268
2A_260a_rev2	2913	2589	2603	2681	2659	2590
2A_260p_rev1	1802	1892	2386	2901	3048	3044
2A_1290a_rev1	3704	4519	4319	4184	4054	3838
2A_1290p_rev1	1845	1853	1886	1930	1953	1976
2A_2150a_rev1	3509	4373	5048	5017	5018	4850
2A_2150p_rev1	1913	1914	1931	1952	1964	1975
2A_3000a_rev1	4050	4637	5553	5876	5871	5713
2A_3000p_rev1	1988	1986	1990	2001	2009	2017

Tabela B.12 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2A, incidência de onda a 195°

Modelo	Máximos [kN]					
	C13	C14	C15	C16	C17	C18
2A_40a_rev9	2240	2305	2564	2763	2650	2509
2A_40p_rev5	3368	3960	3805	3537	3296	3036
2A_150a_rev2	2510	2454	2762	2967	2860	2717
2A_150p_rev1	1875	2564	3608	4057	3972	3726
2A_260a_rev2	3123	2799	3017	3259	3053	2870
2A_260p_rev1	1819	1960	2648	3263	3328	3272
2A_1290a_rev1	3888	4922	4735	4680	4416	4203
2A_1290p_rev1	1847	1860	1915	1978	1992	2008
2A_2150a_rev1	3585	4751	5844	6189	5922	5456
2A_2150p_rev1	1913	1916	1945	1976	1983	1990
2A_3000a_rev1	4086	4885	6231	7294	7068	6433
2A_3000p_rev1	1993	1989	1998	2014	2019	2025

B.4 EQUIPAMENTO 2B

As séries temporais resultantes das simulações do Equipamento 2B para cada profundidade e considerando todas as combinações ambientais têm as médias apresentadas na Tabela B.13.

Os máximos obtidos pela estatística de extremos considerando distribuição de máximos de Weibull no período de 3600s para cada modelo é apresentada na Tabela B.14, na Tabela B.15 e na Tabela B.16, para casos de carregamento com incidência de onda respectivamente a 165°, a 180° e a 195°.

Tabela B.13 Tração média, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B

Modelo	Média [kN]
2B_40a_rev5	1762
2B_40p_rev5	1731
2B_150a_rev2	1844
2B_150p_rev2	1740
2B_260a_rev1	1926
2B_260p_rev1	1749
2B_1290a_rev1	2687
2B_1290p_rev1	1834
2B_2150a_rev1	3323
2B_2150p_rev1	1905
2B_3000a_rev1	3951
2B_3000p_rev1	1976

Tabela B.14 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 165°

Modelo	Máximos [kN]					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
2B_40a_rev5	2224	2347	2662	2950	2898	2690
2B_40p_rev5	2693	2974	3163	3572	3404	3113
2B_150a_rev2	2392	2472	2853	3165	3118	2952
2B_150p_rev2	1875	2226	2806	3161	3178	3074
2B_260a_rev1	2717	2605	3170	3474	3320	3113
2B_260p_rev1	1818	1954	2387	2700	2724	2724
2B_1290a_rev1	3446	3858	4167	4640	4556	4299
2B_1290p_rev1	1843	1859	1915	1978	1990	2004
2B_2150a_rev1	3573	4131	4759	5154	5163	4954
2B_2150p_rev1	1910	1915	1944	1976	1983	1990
2B_3000a_rev1	4085	4499	5161	5554	5576	5469
2B_3000p_rev1	1993	1988	1997	2013	2018	2024

Tabela B.15 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 180°

Modelo	Máximos [kN]					
	C7	C8	C9	C10	C11	C12
2B_40a_rev5	2089	2172	2303	2402	2419	2358
2B_40p_rev5	2521	2729	2723	2759	2717	2637
2B_150a_rev2	2202	2282	2477	2586	2605	2575
2B_150p_rev2	1839	2113	2536	2733	2809	2780
2B_260a_rev1	2569	2424	2671	2813	2761	2724
2B_260p_rev1	1799	1889	2211	2447	2508	2545
2B_1290a_rev1	3309	3658	3673	3828	3871	3814
2B_1290p_rev1	1841	1851	1886	1929	1952	1972
2B_2150a_rev1	3506	3951	4368	4529	4621	4545
2B_2150p_rev1	1909	1912	1930	1952	1964	1974
2B_3000a_rev1	4050	4374	4859	5086	5174	5150
2B_3000p_rev1	1988	1985	1989	2001	2009	2017

Tabela B.16 Tração máxima, topo do cabo de lançamento, Equipamento 2B, incidência de onda a 195°

Modelo	Máximos [kN]					
	C13	C14	C15	C16	C17	C18
2B_40a_rev5	2230	2342	2629	2899	2843	2645
2B_40p_rev5	2701	2962	3119	3509	3334	3060
2B_150a_rev2	2392	2475	2880	3190	3138	2960
2B_150p_rev2	1875	2226	2807	3162	3179	3075
2B_260a_rev1	2716	2607	3198	3524	3348	3130
2B_260p_rev1	1818	1954	2386	2698	2723	2723
2B_1290a_rev1	3446	3859	4178	4664	4581	4318
2B_1290p_rev1	1843	1859	1915	1978	1990	2003
2B_2150a_rev1	3573	4131	4764	5164	5173	4963
2B_2150p_rev1	1910	1915	1944	1976	1983	1990
2B_3000a_rev1	4085	4499	5162	5557	5579	5473
2B_3000p_rev1	1993	1988	1997	2014	2019	2024

APÊNDICE C PARCELA DINÂMICA DAS TRAÇÕES RESULTANTES

C.1 EQUIPAMENTO 1

C.1.1 POR ESTADO DE MAR EM CADA PROFUNDIDADE

Tabela C.1 Resultados, profundidade 230m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	56	57	147	88	41	41	122	72	57	57	147	88
7	71	80	241	129	50	55	198	106	71	80	241	165
9	102	112	225	164	66	70	179	109	104	114	226	165
11	130	160	220	219	81	86	168	127	134	163	220	222
13	120	160	188	213	81	92	150	133	123	162	188	216
15	103	138	168	184	75	90	126	128	105	140	169	186

Tabela C.2 Resultados, profundidade 650m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	148	108	14	14	115	83	10	115	148	108	14	14
7	125	101	82	51	96	75	60	96	124	101	82	116
9	145	170	201	116	97	102	150	97	148	174	201	116
11	195	220	257	158	115	128	189	115	200	227	257	158
13	167	199	251	161	105	123	192	105	171	204	252	161
15	138	169	230	154	95	114	183	95	141	171	231	154

Tabela C.3 Resultados, profundidade 1070m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	288	164	7	7	225	130	5	5	288	164	7	7
7	228	146	22	21	179	112	15	15	228	146	22	69
9	196	185	95	70	146	123	65	50	199	189	95	69
11	212	256	165	105	138	150	126	77	221	263	165	105
13	191	240	174	109	132	154	144	85	199	247	174	108
15	168	208	173	110	121	146	148	90	172	212	173	110

Tabela C.4 Resultados, profundidade 2180m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	157	106	2	2	128	86	1	1	159	105	2	2
7	309	175	6	6	260	146	4	4	308	175	6	24
9	311	236	25	24	239	159	16	15	314	235	25	24
11	330	316	47	43	230	187	32	30	328	320	47	43
13	291	304	56	47	212	202	45	38	290	308	56	47
15	249	263	68	51	184	193	61	43	251	272	68	51

Tabela C.5 Resultados, profundidade 2590m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	76	66	5	5	59	52	4	3	75	68	5	5
7	247	156	5	5	198	128	3	3	248	157	5	18
9	333	249	18	18	237	174	12	11	328	250	18	18
11	373	326	34	32	243	204	23	22	373	323	34	32
13	340	317	40	36	229	219	32	29	338	316	40	36
15	285	279	51	40	205	206	45	34	282	285	51	40

Tabela C.6 Resultados, profundidade 3000m, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
5	51	46	8	8	37	35	6	6	51	47	8	8
7	243	147	6	6	193	115	4	4	246	150	6	13
9	380	254	13	13	283	181	9	9	387	253	14	13
11	427	333	26	25	280	220	18	17	427	334	27	25
13	406	323	30	28	285	227	25	22	411	326	31	28
15	348	298	38	32	254	230	35	28	351	296	39	32

C.1.2 POR PROFUNDIDADE EM CADA ESTADO DE MAR

Tabela C.7 Resultados, onda com período de pico de 5s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	56	57	147	88	41	41	122	72	57	57	147	88
650	148	108	14	14	115	83	10	10	148	108	14	14
1070	288	164	7	7	225	130	5	5	288	164	7	7
2180	157	106	2	2	128	86	1	1	159	105	2	2
2590	76	66	5	5	59	52	4	3	75	68	5	5
3000	51	46	8	8	37	35	6	6	51	47	8	8

Tabela C.8 Resultados, onda com período de pico de 7s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	71	80	241	129	50	55	198	106	71	80	241	165
650	125	101	82	51	96	75	60	38	124	101	82	116
1070	228	146	22	21	179	112	15	15	228	146	22	69
2180	309	175	6	6	260	146	4	4	308	175	6	24
2590	247	156	5	5	198	128	3	3	248	157	5	18
3000	243	147	6	6	193	115	4	4	246	150	6	13

Tabela C.9 Resultados, onda com período de pico de 9s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	102	112	225	164	66	70	179	109	104	114	226	165
650	145	170	201	116	97	102	150	87	148	174	201	116
1070	196	185	95	70	146	123	65	50	199	189	95	69
2180	311	236	25	24	239	159	16	15	314	235	25	24
2590	333	249	18	18	237	174	12	11	328	250	18	18
3000	380	254	13	13	283	181	9	9	387	253	14	13

Tabela C.10 Resultados, onda com período de pico de 11s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	130	160	220	219	81	86	168	127	134	163	220	222
650	195	220	257	158	115	128	189	112	200	227	257	158
1070	212	256	165	105	138	150	126	77	221	263	165	105
2180	330	316	47	43	230	187	32	30	328	320	47	43
2590	373	326	34	32	243	204	23	22	373	323	34	32
3000	427	333	26	25	280	220	18	17	427	334	27	25

Tabela C.11 Resultados, onda com período de pico de 13s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	120	160	188	213	81	92	150	133	123	162	188	216
650	167	199	251	161	105	123	192	121	171	204	252	161
1070	191	240	174	109	132	154	144	85	199	247	174	108
2180	291	304	56	47	212	202	45	38	290	308	56	47
2590	340	317	40	36	229	219	32	29	338	316	40	36
3000	406	323	30	28	285	227	25	22	411	326	31	28

Tabela C.12 Resultados, onda com período de pico de 15s, Equipamento 1

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
230	103	138	168	184	75	90	126	128	105	140	169	186
650	138	169	230	154	95	114	183	122	141	171	231	154
1070	168	208	173	110	121	146	148	90	172	212	173	110
2180	249	263	68	51	184	193	61	43	251	272	68	51
2590	285	279	51	40	205	206	45	34	282	285	51	40
3000	348	298	38	32	254	230	35	28	351	296	39	32

C.1.3 TRAÇÕES CRÍTICAS PARA CABO DE AÇO

Tabela C.13 Resultados, profundidade 230m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	56	41	57	57	41	57
7	71	50	71	80	55	80
9	102	66	104	112	70	114
11	130	81	134	160	86	163
13	120	81	123	160	92	162
15	103	75	105	138	90	140

Tabela C.14 Resultados, profundidade 650m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	148	115	148	108	83	108
7	125	96	124	101	75	101
9	145	97	148	170	102	174
11	195	115	200	220	128	227
13	167	105	171	199	123	204
15	138	95	141	169	114	171

Tabela C.15 Resultados, profundidade 1070m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	288	225	288	164	130	164
7	228	179	228	146	112	146
9	196	146	199	185	123	189
11	212	138	221	256	150	263
13	191	132	199	240	154	247
15	168	121	172	208	146	212

Tabela C.16 Resultados, profundidade 2180m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	157	128	159	106	86	105
7	309	260	308	175	146	175
9	311	239	314	236	159	235
11	330	230	328	316	187	320
13	291	212	290	304	202	308
15	249	184	251	263	193	272

Tabela C.17 Resultados, profundidade 2590m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	76	59	75	66	52	68
7	247	198	248	156	128	157
9	333	237	328	249	174	250
11	373	243	373	326	204	323
13	340	229	338	317	219	316
15	285	205	282	279	206	285

Tabela C.18 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	51	37	51	46	35	47
7	243	193	246	147	115	150
9	380	283	387	254	181	253
11	427	280	427	333	220	334
13	406	285	411	323	227	326
15	348	254	351	298	230	296

Tabela C.19 Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 1

Prof. [m]	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Tração [kN]	Onda		Tração [kN]	Onda	
		Tp	Incidência		Tp	Incidência
230	134	11s	195°	163	11s	195°
650	200	11s	195°	227	11s	195°
1070	288	5s	165°	263	11s	195°
2180	330	11s	165°	320	11s	195°
2590	373	11s	165°	326	11s	165°
3000	427	11s	195°	334	11s	195°

C.1.4 TRAÇÕES CRÍTICAS PARA CABO DE POLIÉSTER

Tabela C.20 Resultados, profundidade 230m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	147	122	147	88	72	88
7	241	198	241	129	106	165
9	225	179	226	164	109	165
11	220	168	220	219	127	222
13	188	150	188	213	133	216
15	168	126	169	184	128	186

Tabela C.21 Resultados, profundidade 650m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	14	10	14	14	10	14
7	82	60	82	51	38	116
9	201	150	201	116	87	116
11	257	189	257	158	112	158
13	251	192	252	161	121	161
15	230	183	231	154	122	154

Tabela C.22 Resultados, profundidade 1070m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	7	5	7	7	5	7
7	22	15	22	21	15	69
9	95	65	95	70	50	69
11	165	126	165	105	77	105
13	174	144	174	109	85	108
15	173	148	173	110	90	110

Tabela C.23 Resultados, profundidade 2180m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	2	1	2	2	1	2
7	6	4	6	6	4	24
9	25	16	25	24	15	24
11	47	32	47	43	30	43
13	56	45	56	47	38	47
15	68	61	68	51	43	51

Tabela C.24 Resultados, profundidade 2590m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	5	4	5	5	3	5
7	5	3	5	5	3	18
9	18	12	18	18	11	18
11	34	23	34	32	22	32
13	40	32	40	36	29	36
15	51	45	51	40	34	40

Tabela C.25 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 1

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	8	6	8	8	6	8
7	6	4	6	6	4	13
9	13	9	14	13	9	13
11	26	18	27	25	17	25
13	30	25	31	28	22	28
15	38	35	39	32	28	32

Tabela C.26 Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 1

Prof. [m]	Equipamento 1A			Equipamento 1B		
	Tração [kN]	Onda		Tração [kN]	Onda	
		Tp	Incidência		Tp	Incidência
230	241	7s	165°	222	11s	195°
650	257	11s	195°	161	13s	195°
1070	174	13s	165°	110	15s	165°
2180	68	15s	165°	51	15s	165°
2590	51	15s	165°	40	15s	165°
3000	39	15s	195°	32	15s	165°

C.2 EQUIPAMENTO 2

C.2.1 POR ESTADO DE MAR EM CADA PROFUNDIDADE

Tabela C.27 Resultados, profundidade 40m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	472	462	1620	962	358	326	1284	790	477	468	1637	970
7	551	584	2234	1243	390	410	1825	998	542	580	2229	1231
9	823	899	2083	1432	518	540	1638	992	802	866	2074	1388
11	1016	1188	1855	1841	606	640	1350	1028	1001	1137	1807	1778
13	902	1135	1593	1673	590	656	1191	986	888	1080	1565	1603
15	764	928	1332	1382	514	595	1002	906	747	882	1305	1329

Tabela C.28 Resultados, profundidade 150m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	667	548	135	135	500	358	100	99	666	548	135	135
7	606	627	824	486	443	438	603	373	610	631	824	486
9	898	1009	1866	1066	577	633	1396	796	918	1036	1868	1067
11	1087	1320	2313	1421	668	742	1677	993	1123	1346	2317	1422
13	986	1274	2227	1438	671	761	1658	1069	1016	1294	2232	1439
15	854	1108	1983	1334	627	731	1528	1040	873	1116	1986	1335

Tabela C.29 Resultados, profundidade 260m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	1198	791	69	69	987	643	53	50	1198	791	69	69
7	872	679	211	205	663	499	143	140	873	681	211	205
9	1064	1244	900	638	677	745	636	462	1091	1273	899	637
11	1291	1549	1515	951	756	887	1152	698	1333	1598	1514	949
13	1096	1394	1579	975	734	836	1299	759	1127	1423	1579	974
15	923	1188	1522	975	664	798	1295	796	945	1204	1523	974

Tabela C.30 Resultados, profundidade 1290m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	1201	759	12	9	1017	622	11	7	1202	759	12	9
7	2235	1171	25	24	1832	971	19	17	2236	1171	25	24
9	2048	1480	81	81	1632	985	52	52	2048	1490	81	80
11	2007	1953	145	144	1497	1140	95	95	1993	1977	144	143
13	1732	1869	158	156	1367	1183	118	117	1729	1894	158	156
15	1516	1611	174	169	1151	1126	141	138	1516	1630	173	169

Tabela C.31 Resultados, profundidade 2150m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	262	250	8	4	186	184	8	3	262	250	8	4
7	1428	808	11	10	1050	628	9	7	1429	808	11	10
9	2517	1436	39	39	1725	1045	25	25	2521	1441	39	39
11	2868	1831	70	70	1694	1206	46	47	2866	1841	70	70
13	2597	1840	77	77	1695	1298	58	58	2599	1850	78	77
15	2132	1631	85	84	1527	1222	69	69	2133	1640	85	84

Tabela C.32 Resultados, profundidade 3000m, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
5	134	134	17	17	99	99	12	12	134	134	17	17
7	934	548	13	12	685	423	10	9	934	548	13	13
9	2281	1210	21	21	1601	908	14	13	2279	1211	22	21
11	3349	1603	38	37	1924	1135	25	25	3343	1605	38	38
13	3119	1624	42	42	1920	1223	33	33	3116	1628	43	43
15	2479	1518	49	48	1761	1199	41	41	2481	1522	49	48

C.2.2 POR PROFUNDIDADE EM CADA ESTADO DE MAR

Tabela C.33 Resultados, onda com período de pico de 5s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	472	462	1620	962	358	326	1284	790	477	468	1637	970
150	667	548	135	135	500	358	100	99	666	548	135	135
260	1198	791	69	69	987	643	53	50	1198	791	69	69
1290	1201	759	12	9	1017	622	11	7	1202	759	12	9
2150	262	250	8	4	186	184	8	3	262	250	8	4
3000	134	134	17	17	99	99	12	12	134	134	17	17

Tabela C.34 Resultados, onda com período de pico de 7s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	551	584	2234	1243	390	410	1825	998	542	580	2229	1231
150	606	627	824	486	443	438	603	373	610	631	824	486
260	872	679	211	205	663	499	143	140	873	681	211	205
1290	2235	1171	25	24	1832	971	19	17	2236	1171	25	24
2150	1428	808	11	10	1050	628	9	7	1429	808	11	10
3000	934	548	13	12	685	423	10	9	934	548	13	13

Tabela C.35 Resultados, onda com período de pico de 9s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	823	899	2083	1432	518	540	1638	992	802	866	2074	1388
150	898	1009	1866	1066	577	633	1396	796	918	1036	1868	1067
260	1064	1244	900	638	677	745	636	462	1091	1273	899	637
1290	2048	1480	81	81	1632	985	52	52	2048	1490	81	80
2150	2517	1436	39	39	1725	1045	25	25	2521	1441	39	39
3000	2281	1210	21	21	1601	908	14	13	2279	1211	22	21

Tabela C.36 Resultados, onda com período de pico de 11s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	1016	1188	1855	1841	606	640	1350	1028	1001	1137	1807	1778
150	1087	1320	2313	1421	668	742	1677	993	1123	1346	2317	1422
260	1291	1549	1515	951	756	887	1152	698	1333	1598	1514	949
1290	2007	1953	145	144	1497	1140	95	95	1993	1977	144	143
2150	2868	1831	70	70	1694	1206	46	47	2866	1841	70	70
3000	3349	1603	38	37	1924	1135	25	25	3343	1605	38	38

Tabela C.37 Resultados, onda com período de pico de 13s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	902	1135	1593	1673	590	656	1191	986	888	1080	1565	1603
150	986	1274	2227	1438	671	761	1658	1069	1016	1294	2232	1439
260	1096	1394	1579	975	734	836	1299	759	1127	1423	1579	974
1290	1732	1869	158	156	1367	1183	118	117	1729	1894	158	156
2150	2597	1840	77	77	1695	1298	58	58	2599	1850	78	77
3000	3119	1624	42	42	1920	1223	33	33	3116	1628	43	43

Tabela C.38 Resultados, onda com período de pico de 15s, Equipamento 2

Prof. [m]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]											
	Onda a 165°				Onda a 180°				Onda a 195°			
	Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster		Cabo Aço		Cabo Poliéster	
	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
40	764	928	1332	1382	514	595	1002	906	747	882	1305	1329
150	854	1108	1983	1334	627	731	1528	1040	873	1116	1986	1335
260	923	1188	1522	975	664	798	1295	796	945	1204	1523	974
1290	1516	1611	174	169	1151	1126	141	138	1516	1630	173	169
2150	2132	1631	85	84	1527	1222	69	69	2133	1640	85	84
3000	2479	1518	49	48	1761	1199	41	41	2481	1522	49	48

C.2.3 TRAÇÕES CRÍTICAS PARA CABO DE AÇO

Tabela C.39 Resultados, profundidade 40m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	472	358	477	462	326	468
7	551	390	542	584	410	580
9	823	518	802	899	540	866
11	1016	606	1001	1188	640	1137
13	902	590	888	1135	656	1080
15	764	514	747	928	595	882

Tabela C.40 Resultados, profundidade 150m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	667	500	666	548	358	548
7	606	443	610	627	438	631
9	898	577	918	1009	633	1036
11	1087	668	1123	1320	742	1346
13	986	671	1016	1274	761	1294
15	854	627	873	1108	731	1116

Tabela C.41 Resultados, profundidade 260m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	1198	987	1198	791	643	791
7	872	663	873	679	499	681
9	1064	677	1091	1244	745	1273
11	1291	756	1333	1549	887	1598
13	1096	734	1127	1394	836	1423
15	923	664	945	1188	798	1204

Tabela C.42 Resultados, profundidade 1290m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	1201	1017	1202	759	622	759
7	2235	1832	2236	1171	971	1171
9	2048	1632	2048	1480	985	1490
11	2007	1497	1993	1953	1140	1977
13	1732	1367	1729	1869	1183	1894
15	1516	1151	1516	1611	1126	1630

Tabela C.43 Resultados, profundidade 2150m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	262	186	262	250	184	250
7	1428	1050	1429	808	628	808
9	2517	1725	2521	1436	1045	1441
11	2868	1694	2866	1831	1206	1841
13	2597	1695	2599	1840	1298	1850
15	2132	1527	2133	1631	1222	1640

Tabela C.44 Resultados, profundidade 3000m, cabo de aço, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	134	99	134	134	99	134
7	934	685	934	548	423	548
9	2281	1601	2279	1210	908	1211
11	3349	1924	3343	1603	1135	1605
13	3119	1920	3116	1624	1223	1628
15	2479	1761	2481	1518	1199	1522

Tabela C.45 Resultados críticos, cabo de aço, Equipamento 2

Prof. [m]	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Tração [kN]	Onda		Tração [kN]	Onda	
		Tp	Incidência		Tp	Incidência
40	1016	11s	165°	1188	11s	165°
150	1123	11s	195°	1346	11s	195°
260	1333	11s	195°	1598	11s	195°
1290	2236	7s	195°	1977	11s	195°
2150	2868	11s	165°	1850	13s	195°
3000	3349	11s	165°	1628	13s	195°

C.2.4 TRAÇÕES CRÍTICAS PARA CABO DE POLIÉSTER

Tabela C.46 Resultados, profundidade 40m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	1620	1284	1637	962	790	970
7	2234	1825	2229	1243	998	1231
9	2083	1638	2074	1432	992	1388
11	1855	1350	1807	1841	1028	1778
13	1593	1191	1565	1673	986	1603
15	1332	1002	1305	1382	906	1329

Tabela C.47 Resultados, profundidade 150m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	135	100	135	135	99	135
7	824	603	824	486	373	486
9	1866	1396	1868	1066	796	1067
11	2313	1677	2317	1421	993	1422
13	2227	1658	2232	1438	1069	1439
15	1983	1528	1986	1334	1040	1335

Tabela C.48 Resultados, profundidade 260m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	69	53	69	69	50	69
7	211	143	211	205	140	205
9	900	636	899	638	462	637
11	1515	1152	1514	951	698	949
13	1579	1299	1579	975	759	974
15	1522	1295	1523	975	796	974

Tabela C.49 Resultados, profundidade 1290m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	12	11	12	9	7	9
7	25	19	25	24	17	24
9	81	52	81	81	52	80
11	145	95	144	144	95	143
13	158	118	158	156	117	156
15	174	141	173	169	138	169

Tabela C.50 Resultados, profundidade 2150m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	8	8	8	4	3	4
7	11	9	11	10	7	10
9	39	25	39	39	25	39
11	70	46	70	70	47	70
13	77	58	78	77	58	77
15	85	69	85	84	69	84

Tabela C.51 Resultados, profundidade 3000m, cabo de poliéster, Equipamento 2

Tp [s]	Parcela Dinâmica de Tração [kN]					
	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°	Onda 165°	Onda 180°	Onda 195°
5	17	12	17	17	12	17
7	13	10	13	12	9	13
9	21	14	22	21	13	21
11	38	25	38	37	25	38
13	42	33	43	42	33	43
15	49	41	49	48	41	48

Tabela C.52 Resultados críticos, cabo de poliéster, Equipamento 2

Prof. [m]	Equipamento 2A			Equipamento 2B		
	Tração [kN]	Onda		Tração [kN]	Onda	
		Tp	Incidência		Tp	Incidência
40	2234	7s	165°	1841	11s	165°
150	2317	11s	195°	1439	13s	195°
260	1579	13s	165°	975	13s	165°
1290	174	15s	165°	169	15s	165°
2150	85	15s	165°	84	15s	165°
3000	49	15s	195°	48	15s	195°