

FELIPE RATEIRO PEREIRA

**CONFRONTAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA DINÂMICA DE
SISTEMA FLUTUANTE, CONSIDERANDO SEU ACOPLAMENTO
COM LINHAS DE PRODUÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

São Paulo

2010

FELIPE RATEIRO PEREIRA

**CONFRONTAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA DINÂMICA DE
SISTEMA FLUTUANTE, CONSIDERANDO SEU ACOPLAMENTO
COM LINHAS DE PRODUÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica**

**Orientador:
Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra**

**São Paulo
2010**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 7 de maio de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Felipe Rateiro

**Confrontação numérico-experimental da dinâmica de sistema flutuante, considerando seu acoplamento com linhas de produção / F.R. Pereira. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
p. 197**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Engenharia naval e oceânica 2. Análise experimental de estruturas 3. Dinâmica das estruturas 4. Análise numérica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

AGRADECIMENTOS

À minha família por ter possibilitado que eu chegasse até aqui na minha vida. Ao meu pai por ter ajudado na revisão do texto e me introduzir a carreira de engenharia. À Joyce por me acompanhar durante quase toda vida na USP e sempre me incentivar nas difíceis decisões a serem tomadas.

Ao meu professor orientador, André Fugarra, por toda a orientação antes e durante o mestrado.

Ao professor Kazuo Nishimoto pela confiança e por todos esses anos de trabalho no TPN.

Aos amigos que ajudaram na execução dos ensaios, Edgard Malta, Rodrigo Amarante e Daniel Prata. Especial agradecimento ao Edgard pelas conversas, dicas e rotinas utilizadas na dissertação. A toda equipe de projetos do TPN.

Ao pessoal do tanque do IPT que ajudou muito na execução dos ensaios.

Ao Sr. Jairson de Lima e ao Professor Hernani Brinatti pela confiança atribuída na concessão da bolsa de mestrado. À ANP, por ter financiado parte da pesquisa através da concessão da bolsa de estudos de Mestrado.

A Deus por tudo isso.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo fundamental a apresentação de análises e comparações, que visam fazer parte do processo de aprimoramento constante do método numérico de simulação de unidades flutuantes produtoras de petróleo, chamado TPN – Tanque de Provas Numérico.

Para tanto, foram executados ensaios com modelo em escala reduzida, cujos resultados foram comparados com o modelo numérico do TPN. A unidade padrão utilizada nos ensaios foi a plataforma semi-submersível ITTC-SR192, escala 1:105, ensaios estes realizados no tanque de provas do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Por meio de comparação com os resultados dos ensaios, foram verificadas as habilidades do TPN em reproduzir os movimentos do casco, a tração no topo das linhas de produção e o amortecimento induzido pelas mesmas.

Importante destacar que os parâmetros verificados tiveram a finalidade adicional de confrontar os resultados numérico-experimentais com foco na investigação da influência das linhas de produção na própria dinâmica do sistema flutuante. Tendo em vista esse objetivo complementar, todos os ensaios foram realizados com e sem a presença de linhas de produção, no texto referenciadas apenas por *risers*, modeladas como um grupo de estruturas bastante flexíveis e de grande diâmetro, a fim de prover um aumento significativo no amortecimento do sistema.

Sendo assim, o comportamento dinâmico dos casos com e sem *risers* foram comparados buscando observar as diferenças nos movimentos do sistema em ondas e correnteza. Além disso, utilizando o método recomendado pela API, referência [3], doravante denominado apenas por método “*Near and Far*”, a tração de topo de um dos *risers* foi simulada numericamente com a imposição de movimentos obtidos nos experimentos, dando assim meios para comparação dos critérios de projeto, considerando a influência das linhas conectadas nas plataformas de petróleo.

Palavras chave: ensaios em tanque de provas, modelos escala reduzida, confrontação numérico-experimental, Tanque de Provas Numérico - TPN.

ABSTRACT

This research aims to present analysis and comparisons, intended to make part of the constant improvement of the oil platform analysis software, called Numerical Offshore Tank (*Tanque de Provas Numérico* - TPN).

For this purpose, small-scale model tests were performed, and the results compared with the numerical model in TPN. The standard unit used in these model tests was the semi-submersible ITTC-SR192, at scale 1:105, and the tests were performed at IPT (State of São Paulo Institute for Technological Research) towing tank.

By means of the model tests results comparisons, the ability of the TPN in reproduce the hull motions, the risers top tensions and damping induced by these lines was evaluated.

Importantly, these parameters were verified with the further purpose of comparing the numerical and the experimental results, focusing on the influence of the production lines in the dynamics of the floating system. Taking into account this additional objective, all the model tests were performed with and without production lines, i.e. risers, modeled as a group of highly flexible and large diameter structures, in order to provide a significant increment in the damping of the system.

Thus, the dynamic behaviors of the cases with and without risers were compared, giving means to observe motion differences in waves and current. Moreover, using the method recommend by API, reference [3] , hereinafter called “Near and Far”, the top tension of one riser was numerically simulated with the imposition of the motions obtained in the experiments, giving means to compare the riser design criteria, considering the influence of lines attached to the oil platforms.

Key-Words: towing tank model tests, small-scale model tests, numerical-experimental confrontation, Numerical Offshore Tank - TPN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma do projeto de <i>risers</i> (adaptado da referência [5]).....	2
Figura 2 Limites operacionais do <i>riser</i> em catenária	3
Figura 3 Configuração do sistema de amarração DICAS (referência [33])	10
Figura 4 Configuração do sistema de amarração da MonoBR desenvolvido para instalação no Golfo do México (referência [34])	11
Figura 5 Configuração do sistema de amarração FPSO-TLWP (referência [35])	11
Figura 6 Aspecto geral do pré-processador do TPN – PREA3D	13
Figura 7 <i>Cluster</i> para processamento do TPN.....	14
Figura 8 Imagem do pós-processador do TPN	14
Figura 9 Sistemas de coordenadas no TPN	17
Figura 10 Modelo de catenária utilizado na geração de malha (referência [20])	24
Figura 11 Malha de elementos finitos (referência [2])	27
Figura 12 Amplitude de <i>sway</i> (referência [11]).....	32
Figura 13 Amplitude de <i>heave</i> (referência [11])	33
Figura 14 Amplitude de <i>roll</i> (referência [11]).....	33
Figura 15 Comparação do RAO de <i>heave</i> com diferentes métodos (referência [11])	34
Figura 16 Comparação do RAO de <i>roll</i> com diferentes métodos (referência [11]).....	35
Figura 17 Dimensões do modelo utilizado escala 1:64 (referência [11]).....	36
Figura 18 Movimento de <i>sway</i> (referência [11] na escala do modelo)	37
Figura 19 Movimento de <i>heave</i> (referência [11] na escala do modelo)	38
Figura 20 Movimento de <i>roll</i> (referência [11] na escala do modelo).....	38
Figura 21 Comparação do RAO de <i>sway</i> , ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo)	41
Figura 22 Comparação do RAO de <i>heave</i> , ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo).....	41
Figura 23 Comparação do RAO de <i>roll</i> , ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo).....	42
Figura 24 Comparação do RAO de <i>roll</i> , TPN e WAMIT, para períodos altos	42
Figura 25 Configuração da onda com a profundidade (referência [41])	44
Figura 26 Comparação do RAO de <i>sway</i> com profundidade finita.....	45
Figura 27 Configuração do ensaio com <i>risers</i>	48
Figura 28 Perspectiva do arranjo experimental	49
Figura 29 Vista lateral do arranjo experimental	49
Figura 30 Vista superior do arranjo experimental	49
Figura 31 Foto submersa do ensaio	50
Figura 32 Imagem da plataforma ITTC no tanque do IPT	50
Figura 33 Dimensões da plataforma ITTC, vista frontal.....	51
Figura 34 Dimensões da plataforma ITTC, vista lateral	51
Figura 35 Dimensões da plataforma ITTC, vista superior	51
Figura 36 Visualização do eixo de coordenadas da plataforma (malha gerada para as simulações numéricas no TPN)	53
Figura 37 Eixo de coordenadas, vista frontal	53

Figura 38 Eixo de coordenadas, vista lateral.....	53
Figura 39 Eixo de coordenadas, vista superior.....	54
Figura 40 Configuração do sistema de amarração.....	54
Figura 41 Arranjo dos <i>risers</i> no modelo do TPN.....	56
Figura 42 Saída dos <i>risers</i> no modelo do ensaio.....	57
Figura 43 Foto do arranjo dos <i>risers</i> no ensaio.....	57
Figura 44 Foto submersa do arranjo dos <i>risers</i> no ensaio.....	58
Figura 45 Detalhe do topo dos <i>risers</i> utilizados no ensaio.....	59
Figura 46 Comparação dos espectros de mar e de onda transiente.....	62
Figura 47 Espectro da onda transiente longa.....	63
Figura 48 Decaimento de <i>sway</i> : ensaio 1 sem <i>risers</i>	66
Figura 49 Espectro de potência do decaimento de <i>sway</i> 1 sem <i>risers</i>	66
Figura 50 Análise de amortecimento de <i>sway</i> 1 sem <i>risers</i>	68
Figura 51 Decaimento de <i>heave</i> : ensaio 1 sem <i>risers</i>	69
Figura 52 Espectro de potência do decaimento de <i>heave</i> 1 sem <i>risers</i>	70
Figura 53 Análise de amortecimento de <i>heave</i> 1 sem <i>risers</i>	71
Figura 54 Decaimento de <i>roll</i> : ensaio 1 sem <i>risers</i>	72
Figura 55 Espectro de potência do decaimento de <i>roll</i> 1 sem <i>risers</i>	72
Figura 56 Análise de amortecimento de <i>roll</i> 1 sem <i>risers</i>	73
Figura 57 RAO de <i>sway</i>	75
Figura 58 RAO de <i>heave</i>	75
Figura 59 RAO de <i>roll</i>	76
Figura 60 RAO de <i>sway</i> com profundidade finita.....	76
Figura 61 RAO de <i>sway</i> com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	79
Figura 62 RAO de <i>heave</i> com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	79
Figura 63 RAO de <i>roll</i> com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	80
Figura 64 RAO de <i>Heave</i> com e sem correnteza, incluindo RAO obtido com a onda irregular 2.....	81
Figura 65 Decaimento de <i>heave</i> com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	82
Figura 66 Espectro de potência do decaimento de <i>heave</i> com e sem correnteza.....	82
Figura 67 Série de figuras, retirada de vídeo do ensaio, mostrando formação de vórtices.....	84
Figura 68 Séries temporais de onda irregular 1, semente aleatória 1 (escala real).....	85
Figura 69 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1 (escala real).....	85
Figura 70 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1 (escala real).....	86
Figura 71 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1 (escala real).....	86
Figura 72 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1 com correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	87
Figura 73 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1 com correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	88
Figura 74 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1 com correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real).....	88

Figura 75 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1 com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	89
Figura 76 Comparação da inclinação da plataforma	90
Figura 77 Decaimento de <i>sway</i> : ensaio 1 com <i>risers</i>	91
Figura 78 Espectro de potência do decaimento de <i>sway</i> 1 com <i>risers</i>	92
Figura 79 Análise de amortecimento de <i>sway</i> 1 com <i>risers</i>	93
Figura 80 Decaimento de <i>heave</i> : ensaio 1 com <i>risers</i>	94
Figura 81 Espectro de potência do decaimento de <i>heave</i> 1 com <i>risers</i>	94
Figura 82 Análise de amortecimento de <i>heave</i> 1 com <i>risers</i>	95
Figura 83 Decaimento de <i>roll</i> : ensaio 1 com <i>risers</i>	96
Figura 84 Espectro de potência do decaimento de <i>roll</i> 1 com <i>risers</i>	97
Figura 85 Análise de amortecimento de <i>roll</i> 1 com <i>risers</i>	98
Figura 86 RAO de <i>sway</i> com <i>risers</i>	99
Figura 87 RAO de <i>heave</i> com <i>risers</i>	100
Figura 88 RAO de <i>roll</i> com <i>risers</i>	100
Figura 89 Resposta de tração no topo do <i>riser</i>	101
Figura 90 Série temporal de tração no topo do <i>riser</i>	101
Figura 91 RAO de <i>sway</i> com e sem correnteza, casos com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	104
Figura 92 RAO de <i>heave</i> com e sem correnteza, casos com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	104
Figura 93 RAO de <i>roll</i> com e sem correnteza, casos com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	105
Figura 94 Resposta de tração no <i>riser</i> com e sem correnteza (U=2.05m/s na escala real)	106
Figura 95 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1, caso com <i>risers</i>	108
Figura 96 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1, caso com <i>risers</i>	108
Figura 97 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, caso com <i>risers</i>	109
Figura 98 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1, caso com <i>risers</i>	109
Figura 99 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1, com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	110
Figura 100 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1, com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	111
Figura 101 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	111
Figura 102 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1, com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	112
Figura 103 Comparação entre resultados experimentais com e sem <i>risers</i> do decaimento de <i>sway</i>	114
Figura 104 Espectro de potência dos decaimentos de <i>sway</i> com e sem <i>risers</i>	114
Figura 105 Comparação entre resultados experimentais com e sem <i>risers</i> do decaimento de <i>heave</i>	115
Figura 106 Espectro de potência dos decaimentos de <i>heave</i> com e sem <i>risers</i>	116
Figura 107 Comparação entre resultados experimentais com e sem <i>risers</i> do decaimento de <i>roll</i>	116

Figura 108 Espectro de potência dos decaimentos de <i>roll</i> com e sem <i>risers</i>	117
Figura 109 RAO de <i>sway</i> : comparação com e sem <i>risers</i>	117
Figura 110 RAO de <i>heave</i> : comparação com e sem <i>risers</i>	118
Figura 111 RAO de <i>roll</i> : comparação com e sem <i>risers</i>	119
Figura 112 RAO de <i>sway</i> : comparação com e sem <i>risers</i> , em correnteza (U=2.05m/s na escala real)	120
Figura 113 RAO de <i>heave</i> : comparação com e sem <i>risers</i> , em correnteza (U=2.05m/s na escala real)	120
Figura 114 RAO de <i>roll</i> : comparação com e sem <i>risers</i> , em correnteza (U=2.05m/s na escala real).....	121
Figura 115 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>sway</i>	125
Figura 116 Espectro de potência dos decaimentos de <i>sway</i> : numérico e experimental	126
Figura 117 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>heave</i>	127
Figura 118 Espectro de potência dos decaimentos de <i>heave</i> : numérico e experimental.....	127
Figura 119 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>roll</i>	128
Figura 120 Espectro de potência dos decaimentos de <i>roll</i> : numérico e experimental	128
Figura 121 RAO de <i>sway</i> : numérico e experimental.....	129
Figura 122 RAO de <i>heave</i> : numérico e experimental	130
Figura 123 RAO de <i>roll</i> : numérico e experimental	130
Figura 124 RAO de <i>sway</i> : experimental e numérico (com e sem dados hidrodinâmicos de profundidade finita)	131
Figura 125 RAO de <i>sway</i> : numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real).....	132
Figura 126 RAO de <i>heave</i> : numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real).....	132
Figura 127 RAO de <i>roll</i> : numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	133
Figura 128 Espectro de potência do movimento de <i>sway</i> onda irregular 1	134
Figura 129 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> onda irregular 1.....	135
Figura 130 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> onda irregular 1	135
Figura 131 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> (referência [18]).....	136
Figura 132 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> (referência [18])	136
Figura 133 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> e da onda irregular 1 em rad/s	137
Figura 134 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> e da onda irregular 1 em rad/s.....	137
Figura 135 Espectro de potência do movimento de <i>sway</i> onda irregular 2.....	138
Figura 136 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> onda irregular 2.....	138
Figura 137 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> onda irregular 2	139
Figura 138 Exemplo de onda irregular com e sem a aplicação de filtro	141
Figura 139 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>sway</i> com <i>risers</i>	144

Figura 140 Espectro de potência dos decaimentos de <i>sway</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	144
Figura 141 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>heave</i> com <i>risers</i>	145
Figura 142 Espectro de potência dos decaimentos de <i>heave</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	145
Figura 143 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de <i>roll</i> com <i>risers</i>	146
Figura 144 Espectro de potência dos decaimentos de <i>roll</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	146
Figura 145 RAO de <i>sway</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	147
Figura 146 RAO de <i>heave</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	148
Figura 147 RAO de <i>roll</i> : numérico e experimental com <i>risers</i>	148
Figura 148 Resposta de tração no <i>riser</i> numérica e experimental.....	150
Figura 149 RAO de <i>sway</i> : numérico e experimental com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	150
Figura 150 RAO de <i>heave</i> : numérico e experimental com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	151
Figura 151 RAO de <i>roll</i> : numérico e experimental com correnteza e com <i>risers</i> (U=2.05m/s na escala real)	151
Figura 152 Resposta de tração no <i>riser</i> numérico e experimental e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	152
Figura 153 Espectro de potência do movimento de <i>sway</i> onda irregular 1 com <i>risers</i>	153
Figura 154 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> onda irregular 1 com <i>risers</i>	154
Figura 155 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> onda irregular 1 com <i>risers</i>	154
Figura 156 Espectro de potência de tração no topo do <i>riser</i> onda irregular 1	155
Figura 157 Espectro de potência do movimento de <i>sway</i> onda irregular 2 com <i>risers</i>	155
Figura 158 Espectro de potência do movimento de <i>heave</i> onda irregular 2 com <i>risers</i>	156
Figura 159 Espectro de potência do movimento de <i>roll</i> onda irregular 2 com <i>risers</i>	156
Figura 160 Espectro de potência de tração no topo do <i>riser</i> onda irregular 2	157
Figura 161 Linha modelada no ANFLEX	159
Figura 162 Espectro de potência das ondas irregulares.....	160
Figura 163 Espectro de potência com onda irregular 1 e dinâmica imposta 1	161
Figura 164 Espectro de potência com onda irregular 1 e dinâmica imposta 2.....	162
Figura 165 Espectro de potência com onda irregular 2 e dinâmica imposta 1	163
Figura 166 Espectro de potência com onda irregular 2 e dinâmica imposta 2.....	164
Figura 167 Espectro de potência experimental de <i>sway</i>	166
Figura 168 Espectro de potência experimental de <i>heave</i>	167
Figura 169 Espectro de potência experimental de <i>roll</i>	167
Figura 170 Espectro de potência da tração no topo do <i>riser</i> gerada com o ANFLEX somente com onda irregular.....	168
Figura 171 Resultado da envoltória obtida na análise com ANFLEX	170
Figura 172 Sobreposição dos <i>riser</i> em dois <i>steps</i> da análise com ANFLEX.....	171

Figura 173 Esquema do ensaio SHI (referência [11]).....	183
Figura 174 Esquema do ensaio IHI (referência [11]).....	183
Figura 175 Esquema do ensaio YNU (referência [11]).....	184
Figura 176 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2.....	185
Figura 177 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2.....	185
Figura 178 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2.....	186
Figura 179 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2.....	186
Figura 180 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2 com correnteza	187
Figura 181 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2 com correnteza	187
Figura 182 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2 com correnteza	188
Figura 183 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2 com correnteza	188
Figura 184 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2, caso com <i>risers</i>	189
Figura 185 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2, caso com <i>risers</i>	189
Figura 186 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2, caso com <i>risers</i>	190
Figura 187 Espectro de potência da onda do mar 2 semente aleatória 2, caso com <i>risers</i>	190
Figura 188 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2, com correnteza e com <i>risers</i>	191
Figura 189 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2, com correnteza e com <i>risers</i>	191
Figura 190 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2, com correnteza e com <i>risers</i>	192
Figura 191 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2, com correnteza e com <i>risers</i>	192
Figura 192 Massa adicional, amortecimento potencial e força de excitação de onda de <i>sway</i>	193
Figura 193 RAO de <i>sway</i> e fase	194
Figura 194 Massa adicional, amortecimento potencial e força de excitação de onda de <i>heave</i>	194
Figura 195 RAO de <i>heave</i> e fase	195
Figura 196 Massa adicional, amortecimento potencial e momento de excitação de onda de <i>roll</i>	195
Figura 197 RAO de <i>roll</i> e fase.....	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Explicação da simbologia dos resultados dos ensaios (adaptado da referência [11] na escala do modelo)	37
Tabela 2 Resultados de período natural (adaptado da referência [11] na escala do modelo)...	39
Tabela 3 Critério de ondas em águas rasas (escala do modelo)	43
Tabela 4 Dimensões principais na escala real e na escala do modelo.....	52
Tabela 5 Dados utilizados nos ensaios de correnteza.....	52
Tabela 6 Composição das linhas de amarração	55
Tabela 7 Características físicas das molas.....	55
Tabela 8 Características físicas dos <i>risers</i>	58
Tabela 9 Dados de modelagem dos <i>riser</i> (escala real)	58
Tabela 10 Composição dos <i>risers</i> na escala real	59
Tabela 11 Ondas irregulares utilizadas nos ensaios	61
Tabela 12 Características da linha utilizada para amarração.....	61
Tabela 13 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>sway</i> sem <i>risers</i>	67
Tabela 14 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>sway</i> sem <i>risers</i>	68
Tabela 15 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>heave</i> sem <i>risers</i>	70
Tabela 16 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>heave</i> sem <i>risers</i>	71
Tabela 17 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>roll</i> sem <i>risers</i>	73
Tabela 18 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>roll</i> sem <i>risers</i>	74
Tabela 19 Ondas regulares utilizadas para caso sem <i>risers</i> e sem correnteza.....	77
Tabela 20 Resposta dos casos sem <i>risers</i> e sem correnteza	78
Tabela 21 Ondas regulares utilizadas para caso sem <i>risers</i> e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	78
Tabela 22 Resposta dos casos sem <i>risers</i> e com correnteza (U=2.05m/s na escala real).....	80
Tabela 23 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>sway</i> com <i>risers</i>	92
Tabela 24 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>sway</i> com <i>risers</i>	93
Tabela 25 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>heave</i> com <i>risers</i>	95
Tabela 26 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>heave</i> com <i>risers</i>	96
Tabela 27 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de <i>roll</i> com <i>risers</i>	97
Tabela 28 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de <i>roll</i> com <i>risers</i>	98
Tabela 29 Ondas regulares utilizadas para caso com <i>risers</i> e sem correnteza	102
Tabela 30 Resposta dos casos com <i>risers</i> e sem correnteza.....	102
Tabela 31 Ondas regulares utilizadas para caso com <i>risers</i> e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	103
Tabela 32 Resposta dos casos com <i>risers</i> e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)	107
Tabela 33 Estatísticas para ondas irregulares 1	121
Tabela 34 Estatísticas para ondas irregulares 2	122
Tabela 35 Matriz de massa e inércia do caso sem <i>riser</i>	123
Tabela 36 Centro de gravidade do caso sem <i>riser</i>	124

Tabela 37 Matriz de restauração hidrostática do caso sem <i>riser</i>	124
Tabela 38 Matriz de amortecimento linear do caso sem <i>riser</i>	124
Tabela 39 Matriz de amortecimento quadrático do caso sem <i>riser</i>	125
Tabela 40 Estatísticas para ondas irregulares 1: numérico e experimental	140
Tabela 41 Estatísticas para ondas irregulares 2: numérico e experimental	140
Tabela 42 Matriz de massa e inércia do caso com <i>risers</i>	142
Tabela 43 Centro de gravidade do caso com <i>risers</i>	143
Tabela 44 Matriz de restauração hidrostática do caso com <i>risers</i>	143
Tabela 45 Estatísticas para ondas irregulares 1: numérico e experimental com <i>risers</i>	157
Tabela 46 Estatísticas para ondas irregulares 2: numérico e experimental com <i>risers</i>	158
Tabela 47 Estatísticas para onda irregular 1 com dinâmica imposta 1.....	161
Tabela 48 Estatísticas para onda irregular 1 com dinâmica imposta 2.....	162
Tabela 49 Estatísticas para onda irregular 2 com dinâmica imposta 1.....	163
Tabela 50 Estatísticas para onda irregular 2 com dinâmica imposta 2.....	164
Tabela 51 Modos de vibrar do <i>riser</i>	169
Tabela 52 Lista dos programas utilizados para comparação de resultados numéricos (referência [11]).....	181
Tabela 53 Dimensões principais dos modelos utilizados nos ensaios (referência [11])	182

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{cl}	Área longitudinal exposta à correnteza.
A_{ct}	Área transversal exposta à correnteza.
a_R	Coefficiente de massa adicional da linha de produção.
B	Boca da plataforma.
C_{cx}	Coefficiente de força de correnteza na direção do eixo “x” do sistema local de coordenadas, adimensionalizado pela área transversal exposta à correnteza.
C_{cy}	Coefficiente de força de correnteza na direção do eixo “y” do sistema local de coordenadas, adimensionalizado pela área transversal exposta à correnteza.
C_{cz}	Coefficientes de momento no plano “xy” do sistema local de coordenadas, devido à atuação da correnteza e adimensionalizado pela área longitudinal exposta à correnteza vezes o comprimento da plataforma.
C_R	Matriz de amortecimento dos elementos de linha.
C_D	Coefficiente de arrasto utilizado na formulação de Morison. Tem componentes transversais e longitudinais, indicadas pelos índices “t” e “l”, respectivamente.
C_M	Coefficiente de massa utilizado na formulação de Morison, sendo $C_M = C_A + 1$.
C_A	Coefficiente de massa adicional.
d	Distância de lançamento horizontal da linha de produção ou linha de amarração.
D	Diâmetro hidrodinâmico da linha de produção.
F_i	Força inercial adicional.
F_w	Força de onda de primeira ordem.
F_{md}	Força de onda de deriva média.
F_{sd}	Força de onda de deriva lenta.
F_{rh}	Forças de restauração hidrostática.
F_{pd}	Força devido ao amortecimento potencial.
F_{ed}	Força devido ao amortecimento externo.
F_{ed2}	Força devido ao amortecimento externo quadrático.
F_{wdd}	Força devido ao amortecimento de deriva de onda.

F_c	Força devido à correnteza, considerando a velocidade relativa entre a unidade flutuante e a correnteza do mar.
F_v	Força devido ao vento, considerando a velocidade relativa entre a unidade flutuante e a velocidade do vento.
F_{ld}	Força devido ao amortecimento das linhas.
F_{ldr}	Força de arrasto das linhas.
F_{lvd}	Força de carga dinâmica vertical das linhas.
F_{RI}	Forças inerciais dos elementos de linha.
F_{RExt}	Forças externas dos elementos de linha.
F_{RInt}	Forças internas dos elementos de linha.
g	Aceleração da gravidade.
H	Pontal da plataforma.
H_S	Altura significativa de uma onda aleatória.
H_R	Altura da onda regular.
h	Profundidade da lâmina d'água.
k	Número de onda.
K_R	Matriz de rigidez dos elementos de linha.
L	Comprimento da plataforma.
M	Matriz de massa e inércia do corpo flutuante.
M_R	Matriz de massa e inércia dos elementos de linha.
m_R	Massa linear imersa da linha de produção.
m_{Ra}	Massa linear adicional da linha de produção.
n	Número do modo de vibrar da linha de produção.
T	Calado da plataforma.
T	Tração na direção da linha de produção ou linha de amarração.
T_H	Tração horizontal da linha de produção ou linha de amarração.
T_V	Tração vertical da linha de produção ou linha de amarração.
T_P	Período de pico da onda aleatória.
T_e	Período de encontro da onda.
T_n	Período natural de oscilação.
T_R	Período da onda regular.

U	Velocidade de correnteza.
U_r	Velocidade de correnteza relativa ao sistema local de coordenadas. Tem componentes normais e transversais, indicadas pelos índices “n” e “t”, respectivamente.
\dot{U}_{wn}	Aceleração da correnteza projetada na direção normal do elemento da linha de produção.
\dot{U}_{pn}	Aceleração do elemento da linha de produção na direção normal.
$v \ \dot{v} \ \ddot{v}$	Respectivamente de posição, velocidade e aceleração dos nós em modelagem de linha de produção por elemento finito.
$x \ \dot{x} \ \ddot{x}$	Respectivamente de posição, velocidade e aceleração do corpo flutuante.
x_v	Centro de pressão da força de correnteza na direção “x” do sistema local de coordenadas.
y_v	Centro de pressão da força de correnteza na direção “y” do sistema local de coordenadas.
z_v	Centro de pressão da força de correnteza na direção “z” do sistema local de coordenadas.
θ	Ângulo da linha de produção com o plano horizontal nos elementos.
θ_L	Ângulo de topo da linha de produção com o plano horizontal.
λ	Comprimento de onda.
Λ_n	Parâmetro para o cálculo da frequência natural de um modo de vibrar da linha de produção.
ρ_a	Densidade da água.
Ψ_c	Ângulo de incidência da correnteza.
ω_n	Frequência angular natural de oscilação.
ω	Frequência angular da onda regular.
ω_e	Frequência angular de encontro da onda.
Ω_n	Frequência natural de um modo de vibrar da linha de produção.

GLOSSÁRIO

CG	Centro de gravidade de uma embarcação ou estrutura oceânica.
<i>API</i>	<i>American Petroleum Institute.</i>
<i>RAO</i>	<i>Response Amplitude Operator.</i>
<i>Riser</i>	Tubos que ligam a plataforma de petróleo ao fundo do mar, com o objetivo de trazer a produção de óleo e/ou gás. Podem ser rígidos ou flexíveis. Neste texto, também denominado por linha de produção.
<i>Surge</i>	Movimento de translação na direção do eixo “x” do sistema de coordenadas.
<i>Sway</i>	Movimento de translação na direção do eixo “y” do sistema de coordenadas.
<i>Heave</i>	Movimento de translação na direção do eixo “z” do sistema de coordenadas.
<i>Roll</i>	Movimento de rotação em torno do eixo “x” do sistema de coordenadas.
<i>Pitch</i>	Movimento de rotação em torno do eixo “y” do sistema de coordenadas.
<i>Yaw</i>	Movimento de rotação em torno do eixo “z” do sistema de coordenadas.
<i>Beam sea</i>	Situação em que as ondas incidem no través da plataforma.
Carro- Dinamométrico	Carro de reboque que corre ao longo do tanque de provas, ao qual o modelo está amarrado e no qual estão os instrumentos que fazem medições de estudo.
Ondômetro ou <i>Wave-probe</i>	Dispositivo para medição de altura de onda.
TPN	Tanque de Provas Numérico. Neste texto, nome do algoritmo de simulação numérica da dinâmica de sistemas navais oceânicos. Em algumas passagens, pode também fazer referência ao nome do laboratório, no qual o algoritmo vem sendo desenvolvido e é utilizado em sua plenitude.
TPNView	Algoritmo desenvolvido pela equipe que compõe o laboratório do TPN, para visualização científica em tempo real dos resultados calculados pelo simulador TPN.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

TDP	<i>Touch Down Point</i> – TDP. Ponto em que os <i>risers</i> tocam o leito do mar. Durante a excitação dinâmica do <i>riser</i> , este ponto se altera o que acaba por caracterizar uma região de pontos de toque, ou <i>Touch Down Zone</i> – TDZ.
WAMIT	Algoritmo de análises hidrodinâmicas potenciais, desenvolvido no MIT.
ANFLEX	Algoritmo de projeto de linhas oceânicas (produção e amarração), desenvolvido pelo CENPES em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro.
CENPES	Centro de pesquisas da Petrobras.
PREADYN	Algoritmo de projeto de linhas oceânicas (produção e amarração), utilizado no TPN.
<i>Lumped Mass</i>	Método de modelagem de linhas, nos quais a massa do elemento é concentrada em um nó.
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i> . Tipo de plataforma de petróleo, cuja característica principal é a capacidade de armazenamento da produção. Normalmente são cascos de navios petroleiros convertidos em plataformas.
Mono-coluna	Tipo especial de FPSO, com casco cilíndrico. No caso específico do projeto chamado MonoBR (desenvolvido através da parceria entre Petrobras e USP), essa tem uma grande reserva de estabilidade e níveis de movimento muito reduzidos, especialmente o movimento vertical (<i>heave</i>), devido a um grande orifício central, vertical e interno ao casco (chamado <i>moonpool</i>), no qual o movimento da água pode atuar no sentido de atenuar o movimento vertical da plataforma.
Semi-submersível	Tipo de plataforma que não tem grande capacidade de armazenamento de petróleo, mas possui baixo nível de movimento, comparado com os FPSOs usuais.
<i>Pontoon</i> ou pontão	Parte submersa da plataforma semi-submersível, aos quais as colunas são conectadas.
DICAS	<i>Differentiated Compliance Anchoring System</i> . Sistema de amarração em que parte das linhas tem certa complacência e que, portanto, permite que a plataforma (normalmente do tipo FPSO) tenha a possibilidade de se posicionar de maneira melhor com relação às condições ambientais.

<i>Turret</i>	Sistema de amarração em que todas as linhas (amarração e de produção) são conectadas ao <i>turret</i> , uma estrutura portante que permite que a plataforma (normalmente do tipo FPSO) gire em torno das linhas e fique alinhada com a condição ambiental predominante.
SMS	<i>Spread Mooring System</i> . Sistema em que a plataforma fica ancorada por diversos pontos. Pode ser utilizada em semi-submersíveis ou FPSOs.
TLP	<i>Tension Leg Platform</i> . Tipo de amarração em que a plataforma tem amarração vertical, feita por tendões de aço extremamente tracionados.
<i>Cluster</i>	Grupo de processadores com alta capacidade, no qual é possível fazer a paralelização dos processos matemáticos que compõem a simulação numérica.
Número K-C	Número de Keulegan-Carpenter. Adimensional que descreve a importância relativa entre a força de arrasto e a inércia de um sistema oscilando em um fluido.
Número de Reynolds	Número adimensional que corresponde à razão entre a força inercial e a força viscosa em um escoamento. Com isso, pode ser utilizado em mecânica dos fluidos para determinação do regime do escoamento, turbulento ou laminar.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	I
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSSÁRIO	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. APRESENTAÇÃO DO TEXTO	5
2. CONTEXTO DA PESQUISA E OBJETIVOS CONSOLIDADOS.....	7
3. SUBSÍDIOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS PARA A PESQUISA	9
3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO NUMÉRICO DO TPN.....	9
3.1.1. Apresentação do TPN.....	9
3.1.2. Análise acoplada	15
3.1.3. Simulações no domínio do tempo	16
3.1.4. Sistema de coordenadas	17
3.1.5. Equação do movimento	18
3.1.6. Forças e momentos inerciais adicionais	19
3.1.7. Forças e momento de forças de onda	19
3.1.8. Forças e momentos de restauração hidrostática.....	20
3.1.9. Forças e momentos decorrentes do amortecimento potencial.....	20
3.1.10. Forças e momentos decorrentes do amortecimento externo	21
3.1.11. Forças e momentos decorrentes do amortecimento de deriva de onda.....	21
3.1.12. Forças e momentos de forças de correnteza.....	22
3.1.13. Forças e momentos de forças de vento.....	23
3.1.14. Modelagem de linhas.....	23
3.1.15. Catenária pura	24
3.1.16. Modelagem física e numérica da linha.....	26
3.1.17. Forças e momento decorrente do arrasto de linhas	27
3.1.18. Forças e momentos de forças hidrodinâmicas em ondas	28
3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS EM ESCALA REDUZIDA	29
3.3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PRÉ-EXISTENTES A RESPEITO DA ITTC-SR192....	31
3.3.1. Resultados numéricos	31
3.3.1. Resultados experimentais	36
4. O TPN APLICADO A UM CASO EXEMPLO E SEUS REFLEXOS NA CONCEPÇÃO DOS EXPERIMENTOS DESTA PESQUISA	40
4.1. PRÉ-ANÁLISES VIA TPN	40
4.2. CONCEPÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA PESQUISA.....	45
5. EXPERIMENTO.....	47
5.1. O ARRANJO EXPERIMENTAL	47
5.2. CONFIGURAÇÃO GERAL DOS EXPERIMENTOS.....	49
5.3. DIMENSÕES PRINCIPAIS DO MODELO	50
5.4. SISTEMA DE COORDENADAS DO MODELO	52
5.5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AMARRAÇÃO	54
5.6. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE RISERS.....	56
5.7. CONDIÇÕES AMBIENTAIS ENSAIADAS	60
5.7.1. Onda irregular (mar).....	60
5.7.2. Onda regular	61
5.7.3. Onda transiente	62
5.7.4. Correnteza.....	63
5.7.5. Calibração.....	64

5.8.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS SEM <i>RISERS</i>	65
5.8.1.	<i>Resultados de decaimentos</i>	65
5.8.2.	<i>Resultados de RAO</i>	74
5.8.3.	<i>Resultados em ondas regulares</i>	77
5.8.4.	<i>Resultados em ondas regulares com correnteza</i>	78
5.8.5.	<i>Resultados em ondas irregulares</i>	85
5.8.6.	<i>Resultados em ondas irregulares com correnteza</i>	87
5.9.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM <i>RISERS</i>	91
5.9.1.	<i>Resultados de decaimentos</i>	91
5.9.2.	<i>Resultados de RAO</i>	99
5.9.3.	<i>Resultados em ondas regulares</i>	102
5.9.4.	<i>Resultados em ondas regulares com correnteza</i>	103
5.9.5.	<i>Resultados em ondas irregulares</i>	107
5.9.6.	<i>Resultados em ondas irregulares com correnteza</i>	110
5.10.	CONCLUSÕES A RESPEITO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS: COMPARAÇÃO COM E SEM <i>RISERS</i> 113	
5.10.1.	<i>Comparação de decaimentos com e sem risers</i>	113
5.10.2.	<i>Comparação de RAO com e sem risers</i>	117
5.10.3.	<i>Comparação de RAO com e sem risers com correnteza</i>	119
5.10.4.	<i>Comparação de ondas irregulares com e sem risers</i>	121
6.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DO TPN.....	123
6.1.	RESULTADOS SEM <i>RISERS</i>	123
6.1.1.	<i>Dados de entrada</i>	123
6.1.2.	<i>Resultados de decaimentos</i>	125
6.1.3.	<i>Resultados em ondas regulares</i>	129
6.1.4.	<i>Resultados em ondas regulares com correnteza</i>	132
6.1.5.	<i>Resultados em ondas irregulares</i>	134
6.2.	RESULTADOS COM <i>RISERS</i>	142
6.2.1.	<i>Dados de entrada</i>	142
6.2.2.	<i>Resultados de decaimentos</i>	143
6.2.3.	<i>Resultados em ondas regulares</i>	147
6.2.4.	<i>Resultados em ondas regulares com correnteza</i>	150
6.2.5.	<i>Resultados em ondas irregulares</i>	153
7.	ANÁLISE DO CRITÉRIO API.....	159
7.1.	MODELAGEM DO <i>RISER</i>	159
7.2.	RESULTADOS.....	160
7.2.1.	<i>Onda irregular 1 com dinâmica imposta 1</i>	161
7.2.2.	<i>Onda irregular 1 com dinâmica imposta 2</i>	162
7.2.3.	<i>Onda irregular 2 com dinâmica imposta 1</i>	163
7.2.4.	<i>Onda irregular 2 com dinâmica imposta 2</i>	164
7.3.	ANÁLISES COMPLEMENTARES QUANTO AO COMPORTAMENTO E ÀS FREQUÊNCIAS NATURAIS DO <i>RISER</i> 165	
8.	CONCLUSÕES.....	173
8.1.	PROGRAMAS NUMÉRICOS.....	173
8.2.	RESULTADOS NO TPN.....	174
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
ANEXO A	PUBLICAÇÕES SOBRE ANÁLISE COM A PLATAFORMA ITTC-SR192.....	181
ANEXO B	RESULTADOS DE ONDAS IRREGULARES.....	185
ANEXO C	RESULTADOS DE ONDAS IRREGULARES COM <i>RISERS</i>.....	189
ANEXO D	DADOS HIDRODINÂMICOS.....	193
ANEXO E	ROTINA PARA ANÁLISE DOS MODOS NATURAIS DE VIBRAR.....	197

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Com a atual demanda mundial de produção de petróleo, é cada vez maior o interesse no estudo da viabilidade de sistemas flutuantes de produção em águas ultraprofundas, ou seja, da ordem de 3000 metros, ou superiores. Tendo isso em vista, um dos aspectos atualmente ainda pouco explorado e que pode ter impacto determinante no desenvolvimento do projeto de um sistema oceânico é a influência do amortecimento dos sistemas de *risers* e de linhas de amarração no comportamento dinâmico do sistema como um todo.

Atualmente, a consideração do efeito dessas linhas sobre o sistema flutuante é desprovida de estudos mais detalhados e adequados às grandes lâminas d'água, exceto pelas extrapolações a partir de estudos em menores profundidades. Um dos principais problemas neste tipo de estudo diz respeito a pouca profundidade dos tanques de provas, que normalmente não são adequados para realização de ensaios na escala completa. O truncamento das linhas é uma alternativa ao problema, porém, acaba por gerar dúvidas em relação ao amortecimento imposto ao sistema flutuante.

Um exemplo do procedimento atual adotado por algumas empresas produtoras de petróleo no processo de dimensionamento de linhas oceânicas é o método proposto pela API (*American Petroleum Institute*), referência [5], utilizado para os cálculos de tração, momento, vida útil e raio de curvatura, entre outros. A Figura 1 apresenta o fluxograma básico das atividades desenvolvidas no processo de dimensionamento dessas linhas.

Como pode ser observado, um dos dados de entrada é o próprio movimento da plataforma, que já deveria considerar a presença dos *risers*, normalmente uma informação não disponível de antemão.

Em virtude desta indisponibilidade prévia, as análises geralmente partem para uma abordagem conservadora, considerando a dinâmica da unidade flutuante desacoplada dos *risers*. Essa situação, pelo menos em princípio, pode ser mais severa em termos dos movimentos devidos à excitação de onda, pois o sistema está sendo analisado com um menor nível de amortecimento.

Por esse motivo, o presente estudo optou por avaliar um caso experimental em que essa influência fosse significativa, buscando iniciar um processo de compreensão de quão conservadora esta abordagem pode se mostrar.

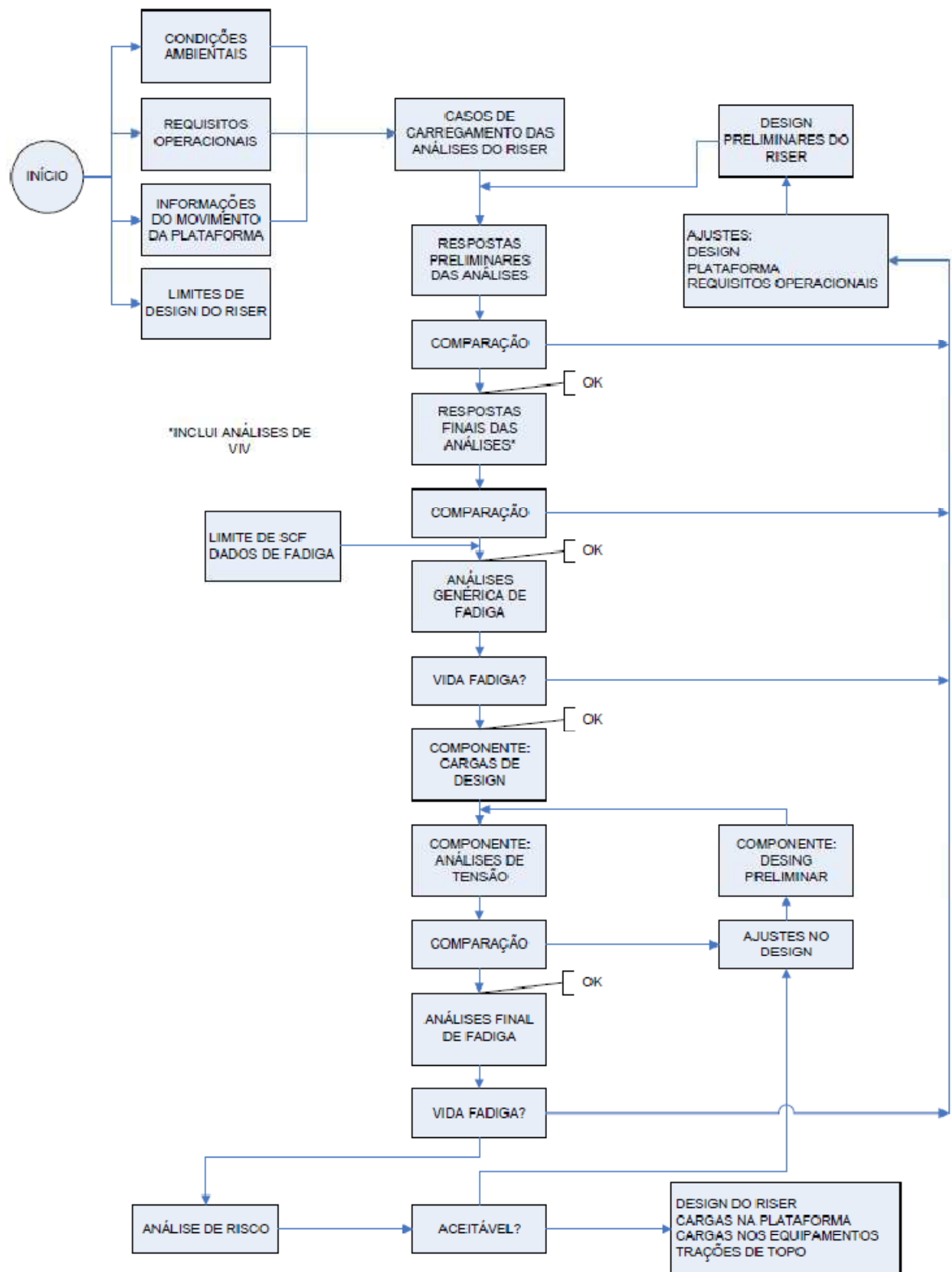


Figura 1 Fluxograma do projeto de *risers* (adaptado da referência [5])

Ainda de acordo com a API, a referência [3] apresenta um método que define uma condição preliminar para a configuração estática da linha, de acordo com a posição inicial do sistema flutuante. A partir dessa condição estática, chamada de condição neutra, o sistema é carregado com diferentes condições ambientais. Com esses carregamentos, a unidade flutuante se move no plano horizontal, entre uma posição limite-mínimo e uma posição limite-máximo, as quais definem os extremos operacionais da linha. A Figura 2 apresenta essas configurações, sendo que as posições “NEAR” e “FAR” representam os limites operacionais mínimo e máximo, respectivamente.

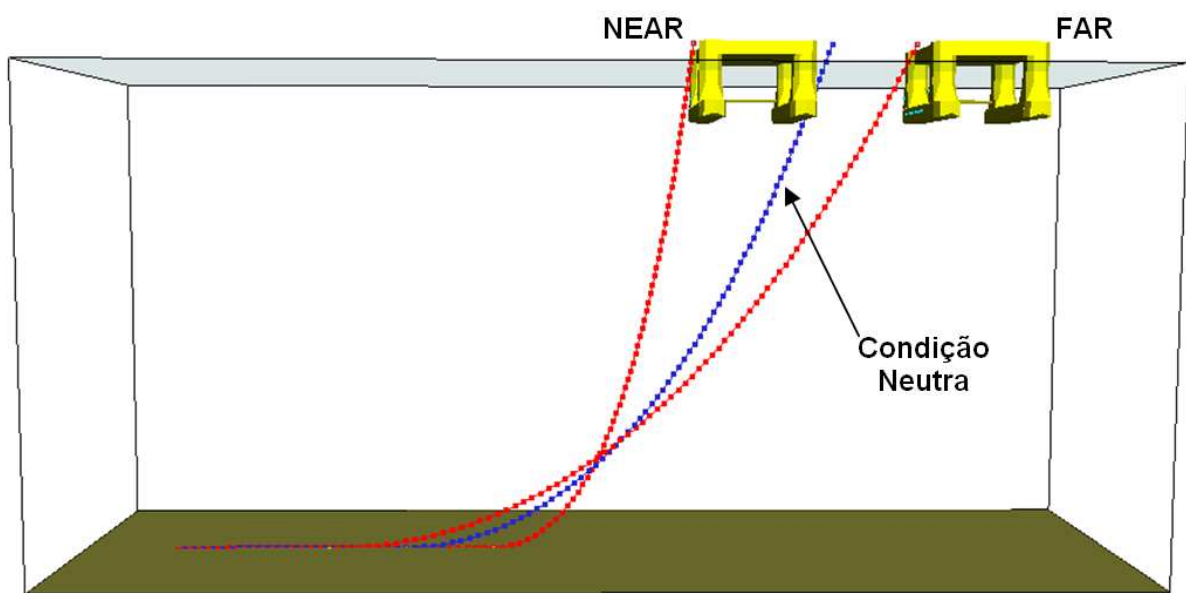


Figura 2 Limites operacionais do riser em catenária

A posição “NEAR” é crítica para o riser principalmente no que diz respeito à sua curvatura na região em que toca o solo – *Touch Down Point* ou TDP. A posição “FAR”, por sua vez, é crítica principalmente para as trações no topo do riser, ou seja, cargas excessivas no ponto de conexão com a unidade flutuante.

Conforme mencionado, e baseado nestas definições, o dimensionamento usual de linhas inicia-se com a análise da hidrodinâmica da unidade flutuante sem a consideração do efeito das linhas acopladas à mesma. Essa análise pode contar com o auxílio duplo de: ensaios em tanque de provas e simulações numéricas através de algoritmos como o WAMIT®, por exemplo. Entretanto, segundo ponderações feitas nas referências [1] e [6], pode haver uma grande influência das linhas nos movimentos das unidades flutuantes, o que implicaria em alguma discrepância no projeto das mesmas.

Independente deste último aspecto, no procedimento de análise de linhas de produção, após a obtenção do comportamento hidrodinâmico da plataforma, diversos códigos como, por exemplo: o ANFLEX, o ORCAFLEX¹ e o POLIFLEX², fazem a análise e dimensionamento dos *risers* e demais linhas de operação. No caso específico desse estudo, mais adiante detalhado, os dados de movimento da unidade foram impostos ao topo dos *risers*, com a utilização do código ANFLEX. O ANFLEX foi desenvolvido pelo CENPES – Centro de Pesquisa da Petrobras para análises não lineares de *risers* e linhas de amarração, aplicando o Método de Elementos Finitos – MEF.

Especificamente com relação ao TPN, para a parte de modelagem de *risers* existe outro código numérico, chamado PREADYN, desenvolvido para o cálculo de linhas a partir de elementos finitos com massas concentradas (chamado também de *lumped mass*), referência [2]. Embora o ANFLEX também permita tal tarefa, nas análises acopladas realizadas para este estudo foi utilizado o PREADYN, que permite uma análise mais rápida da dinâmica acoplada do sistema flutuante associado aos *risers*, com uma maior capacidade de processamento de informação utilizando a computação paralela, devido a sua integração direta com o TPN.

O ANFLEX isoladamente foi utilizado nos casos em que a dinâmica da plataforma foi imposta aos *risers*, buscando focar nos aspectos relacionados às diferenças de comportamento dos mesmos, mediante a imposição de excitações de topo advindas de análises acopladas e também desacopladas.

Qualquer que seja o código de análise das linhas é importante deixar claro que o procedimento de dimensionamento a partir da dinâmica apenas da unidade flutuante é usual, comumente conhecido como análise desacoplada e caracterizado pela consideração conservadora de que a dinâmica da unidade flutuante não é afetada pela presença das linhas. O item 3.1.2 descreverá as diferenças entre análises acopladas e desacopladas.

Neste ponto cumpre enfatizar ao leitor que os resultados apresentados neste texto avaliarão algumas diferenças entre os dois tipos de análise, tendo como ponto de partida um ensaio realizado com e sem a presença de linhas, apoiado em simulações numéricas de mesma natureza. Neste último caso, a utilização de um simulador como o TPN pode auxiliar na avaliação da abordagem desacoplada, avaliando se este procedimento é conservador ou não.

¹ Algoritmo comercial de projeto de linhas oceânicas (produção e amarração), desenvolvido pela empresa Orcina Ltd., referência [45].

² Algoritmo de projeto de linhas oceânicas (produção e amarração), desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, referência [31].

Outro aspecto importante a se considerar é o fato de que existem diversos tipos de sistemas flutuantes de produção de petróleo em águas cada vez mais profundas, como por exemplo: FPSOs, semi-submersíveis e mono-colunas. Para estes sistemas também estão sendo desenvolvidos novos arranjos de *risers* e de linhas de amarração, o que torna praticamente imperativa a realização de experimentos em escala reduzida, geralmente considerando apenas a unidade flutuante. Em etapa posterior, simulações numéricas acopladas com ferramentas numéricas como o TPN podem, então, ampliar o espectro de condições ambientais analisadas e, portanto, permitir uma verificação melhor do sistema.

1.2. APRESENTAÇÃO DO TEXTO

Após a introdução do problema, o texto discorre com maior profundidade sobre o contexto e os objetivos do estudo, tendo como base as questões já apresentadas. Portanto, o capítulo 2 apresenta os motivos que deram origem aos ensaios, quais os procedimentos e quais as dificuldades até então encontradas. Então, com base nesses elementos, o capítulo 2 consolida os objetivos a serem alcançados com o estudo em questão.

O Capítulo 3, por sua vez, desenvolve uma revisão bibliográfica focada na teoria pertinente à pesquisa. Como mote geral para o estudo, a revisão bibliográfica é dividida em três partes principais: uma concentrada no arcabouço teórico (analítico-numérico), outra sobre considerações de ensaios em escala reduzida e a última nos resultados numéricos e experimentais até então disponíveis para o sistema flutuante em estudo, a ITTC SR192. Como o leitor poderá perceber no decorrer desta dissertação, a dualidade entre o numérico e o experimental é recorrente, já que grande parte dos objetivos e conclusões se baseia na confrontação entre estas duas abordagens. Por conseguinte, a seção 3.1 apresenta de maneira sintética os principais aspectos que envolvem o código numérico do TPN, mostrando como são executados os diversos componentes envolvidos na modelagem do problema de uma unidade flutuante exposta a diversos tipos de carregamentos. Já a seção 3.2 apresenta, de forma mais sintética, aspectos sobre a realização de experimentos em escala reduzida, abordando discussões sobre como se deve proceder aos ensaios com linhas e o quanto a escala influi nos experimentos. Este capítulo termina com o item 3.3, que apresenta resultados numéricos e experimentais publicados sobre a ITTC-SR192. Ainda sobre resultados experimentais publicados sobre a ITTC-SR192, o capítulo 4 os compara com o modelo

numérico executado no TPN. Com isso, um caso de comparação numérico-experimental é exemplificado, dando subsídios para definição da metodologia de ensaios adotada no estudo.

Dando seqüência ao texto, o capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos com os ensaios do modelo de plataforma ITTC. São apresentados itens que descrevem os ensaios, como na seção 5.1 e 5.2, além dos próprios resultados auferidos, apresentados na seção 5.8 e 5.9. No que diz respeito à apresentação desses resultados, cumpre adiantar que os mesmos se encontram divididos em situações com e sem a presença de *risers*. Conforme já discutido, trata-se de um aspecto muito importante, pois permite a avaliação das diferenças na dinâmica da unidade estudada. Ainda com relação aos resultados experimentais, vale acrescentar que estes foram divididos em: ensaios de decaimento, ensaios para obtenção do RAO (ensaios em ondas regulares e ensaios em ondas regulares com correnteza) e ensaios em ondas irregulares (mares). Todos eles apresentados, portanto, para as duas situações básicas mencionadas: ITTC sem *risers* (seção 5.8) e ITTC com *risers* (seção 5.9). Após a apresentação dos resultados experimentais, o capítulo 5 é finalizado com a seção 5.10 que discorre sobre as conclusões, principalmente no que diz respeito às comparações dos resultados experimentais em si.

Concluído o capítulo experimental, o capítulo 6 apresenta os resultados das comparações numérico-experimentais. Da mesma maneira que aquela adotada para o capítulo anterior, essas comparações também são feitas em duas etapas: a primeira considerando a ITTC sem *risers* (seção 6.1) e a segunda a ITTC com *risers* (seção 6.2).

Com o material obtido, o Capítulo 7 repercute sobre a utilização do método proposto pela API no projeto de *risers*. Além disso, são discutidos pontos importantes de como os resultados obtidos podem aperfeiçoar, numa continuação deste estudo, o projeto de *risers* e linhas de amarração, quando se leva em consideração o amortecimento que esses geram na dinâmica das unidades flutuantes. Como exemplos são apresentadas análises numéricas com o ANFLEX, com a finalidade de discutir a questão.

Finalmente o Capítulo 8 faz uma síntese dos resultados obtidos e apresenta as considerações finais sobre o trabalho.

2. CONTEXTO DA PESQUISA E OBJETIVOS CONSOLIDADOS

Em 2003, teve início uma campanha de ensaios no IPT com o objetivo de obter resultados para o processo de confrontação e aperfeiçoamento do TPN. Já naquela época pretendia-se comparar os resultados experimentais obtidos a partir da dinâmica de uma unidade amplamente conhecida, a ITTC SR192, com os respectivos resultados advindos de simulações a partir do modelo numérico no TPN. Algumas inferências e avaliações puderam ser realizadas, porém sem a abrangência e profundidade idealizadas.

A partir daquela oportunidade houve uma evolução tecnológica considerável nos dispositivos existentes para a coleta de parâmetros de interesse, o que contribuiu para uma nova campanha entre 2008 e 2009, desta vez focada em resultados mais abrangentes e precisos. Detalhes executivos desta campanha de ensaios e mais informações sobre os dispositivos utilizados podem ser obtidas integralmente no texto da referência [7] . A presente dissertação foca a análise e confrontação dos resultados numérico-experimentais desta nova campanha.

Embora não satisfatória, a análise exaustiva dos resultados da campanha de 2003 (referência [6]), fez com que se pudesse adotar uma série de medidas para facilitar a preparação, execução e análise dos ensaios realizados na nova campanha. Uma das principais medidas foi a modelagem numérica prévia dos casos de estudo, o que permitiu antever e solucionar grande parte dos problemas enfrentados nos ensaios de 2003. Desta forma, os novos ensaios foram realizados com várias características pré-estabelecidas de forma mais completa e precisa, dentre elas: a pré-tração das linhas, o passeio máximo da unidade e os níveis de tração máximos nas células de carga. Além destas características, foram identificados e definidos procedimentos experimentais para estudar melhor aspectos importantes à boa consecução dos objetivos de confrontação.

A título de informação, além da menor abrangência e precisão, outro aspecto que dificultou as análises dos ensaios de 2003 foi a ausência de monitoração constante de alguns parâmetros como, por exemplo, a tração nas linhas de amarração, fato este que dificultou as análises dos resultados. Além disso, na nova campanha procurou-se verificar, documentar e analisar os resultados logo após a realização dos ensaios, diminuindo as incertezas e aumentando a quantidade de resultados válidos auferidos.

Tendo a pesquisa contextualizada cabe, então, deixar bem claro ao leitor quais são os objetivos do trabalho, mesmo que parte deles já tenha sido mencionada anteriormente.

Assim, são dois os objetivos fundamentais da pesquisa, a saber:

O primeiro diz respeito à obtenção de resultados experimentais que sejam passíveis de reprodução no código numérico do TPN, compondo um processo de confrontação e aperfeiçoamento do seu algoritmo. Conforme mais adiante documentado, a busca pelo seu atendimento necessitou um extenso trabalho de planejamento dos ensaios, definindo quais condições ambientais e características do modelo em escala reduzida deveriam ser garantidas para a melhor comparação com o modelo numérico. Este processo contou também com um levantamento das diversas funcionalidades numéricas que compõe o código TPN (como por exemplo, códigos de modelagem de linha e dados sobre a hidrodinâmica do sistema flutuante), a fim de investigar o seu correto funcionamento e, eventualmente, corrigir discrepâncias nas atividades de modelagem numérica capazes de comprometer o processo de comparação.

O segundo objetivo, por sua vez, relaciona-se à análise da influência que as linhas de produção, ou *risers*, exercem sobre sistemas flutuantes de produção de petróleo. Buscando o atendimento deste objetivo, foram executados ensaios em tanque de provas físico com e sem a presença dessas estruturas. Essa abordagem se mostrou necessária, pois atualmente o dimensionamento de *risers* não leva em consideração a maneira como o comportamento da plataforma é afetado pela presença das linhas.

Obviamente, o segundo objetivo está contido no processo de atendimento do primeiro, na medida em que o código numérico do TPN realiza intrinsecamente a análise acoplada entre linhas e unidade flutuante. Portanto, a verificação da influência dos *risers* na dinâmica da plataforma, para o caso específico do ensaio realizado, é naturalmente avaliada pelo TPN a partir da estratégia adotada.

3. SUBSÍDIOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS PARA A PESQUISA

Neste capítulo são apresentados os subsídios teórico-experimentais mais importantes para a pesquisa pretendida. São trazidos aspectos gerais dos modelos teóricos utilizados pelo TPN, bem como uma descrição do seu funcionamento básico. Além disso, são apresentadas e discutidas análises numéricas e experimentais realizadas previamente por outras instituições, todas elas focadas no estudo da plataforma ITTC-SR192. Estas análises aumentam o conhecimento a respeito do sistema em estudo, facilitam o processo de concepção do ensaio apresentado no capítulo seguinte e também contribuem para o processo de confrontação numérico-experimental pretendido.

3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO NUMÉRICO DO TPN

Neste item são apresentadas as características gerais do TPN, desde uma descrição das configurações principais e funcionamento do código (item 3.1.1), até a descrição de alguns aspectos da teoria utilizada para a consideração dos efeitos dos agentes ambientais principais sobre a dinâmica de sistemas oceânicos típicos (onda, vento e correnteza).

3.1.1. Apresentação do TPN

O TPN – Tanque de Provas Numérico é um simulador dinâmico no domínio do tempo baseado na paralelização de processos matemáticos e dedicado às análises hidrodinâmicas e estruturais de sistemas navais e oceânicos, inclusive com a consideração de arranjos multicorpos. Trata-se de um código desenvolvido de forma conjunta entre a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; a Petrobras e outras instituições parceiras, dentre as quais: a Pontifícia Universidade Católica do Rio; a Universidade Federal de Alagoas e a Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Em linhas bem gerais e simplificadas, o TPN é um integrador de equações diferenciais. Pode ser utilizado para projetos de diversos tipos de sistemas navais e oceânicos, com diferentes tipos de amarração. Apesar de sistemas não convencionais, os exemplos listados a seguir apresentam a capacidade de modelagem dos sistemas no TPN:

- DICAS (*Differentiated Compliance Anchoring System*): sistema de amarração desenvolvido pela Petrobras para amarração de FPSOs. É basicamente um sistema de amarração tradicional de FPSOs, o SMS (ver glossário), mas com rigidez diferente na popa e na proa do navio. Essa diferença de rigidez permite que o FPSO alinhe-se parcialmente com as condições ambientais que incidem sobre o sistema. Com isso, não é necessária a utilização do *turret*, reduzindo assim o custo de produção. A referência [32] apresenta os resultados de experimentos e simulações que deram subsídios para discussões dos critérios de desenvolvimento desse sistema. A Figura 3 (obtida a partir da referência [33]) apresenta a configuração deste sistema de amarração.

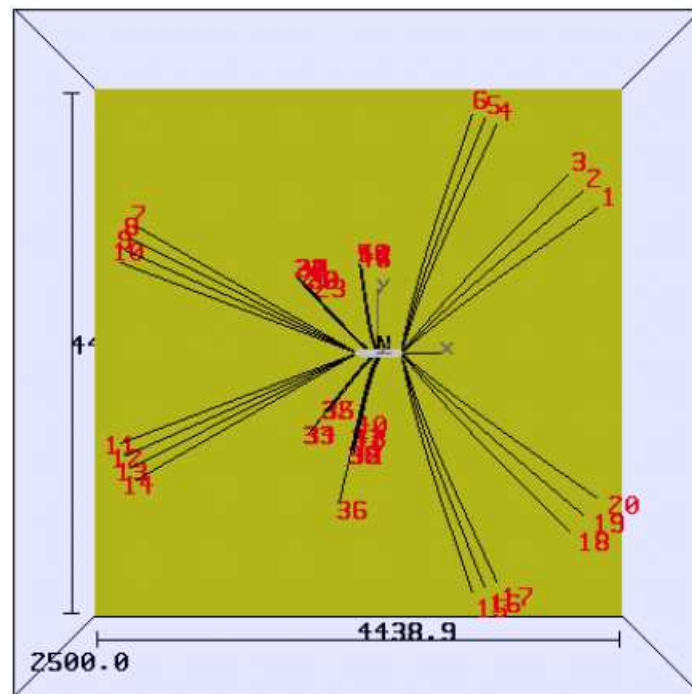


Figura 3 Configuração do sistema de amarração DICAS (referência [33])

- MPSO (MonoGoM ou MonoBR): sistema de amarração desenvolvido para plataformas de petróleo do tipo mono-coluna (ver glossário). No caso da referência [34] , não só o tipo de plataforma necessita um novo arranjo de amarração, mas também o fato de novas condições ambientais, que não haviam sido compreendidas nas estatísticas utilizadas nos procedimentos atuais de dimensionamento, necessitam de novos critérios de projeto. O texto discute as implicações dos eventos causados pelas condições ambientais dos furacões Ivan e Katrina, que necessitaram o dimensionamento do sistema de amarração para condições de retorno de onda, vento e correnteza de até 1000 anos. A Figura 4 apresenta o sistema de amarração desenvolvido para utilização da plataforma MonoBR no Golfo do México.

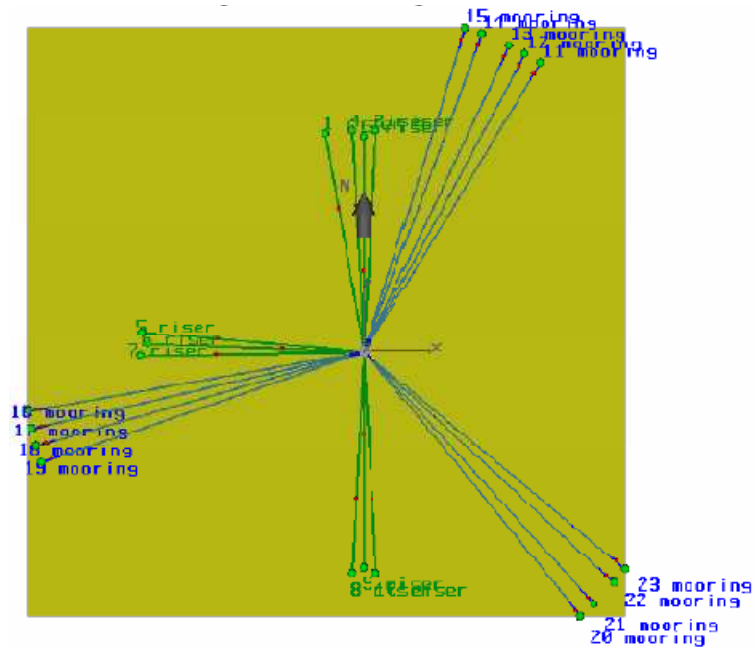


Figura 4 Configuração do sistema de amarração da MonoBR desenvolvido para instalação no Golfo do México (referência [34])

- FPSO-TLP: sistema em que uma plataforma do tipo TLP e um FPSO trabalham acoplados, com uma distância relativamente pequena. Com isso é possível unir a vantagem das duas plataformas em somente um sistema: a TLP tem movimentos bastante reduzidos e o FPSO tem alta capacidade de armazenamento de petróleo. A Figura 5 (referência [35]) apresenta o complexo sistema de amarração envolvendo as duas unidades flutuantes.

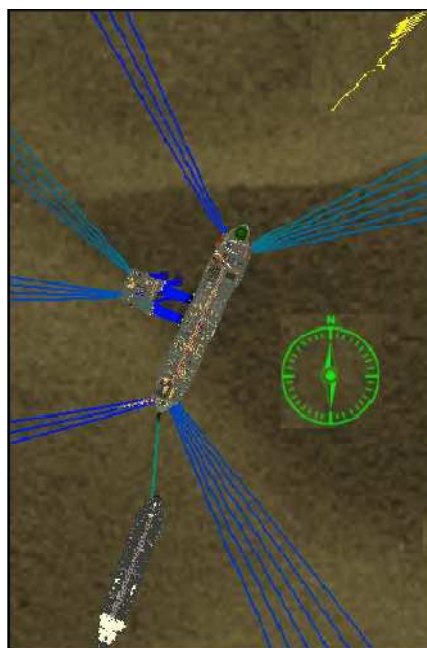


Figura 5 Configuração do sistema de amarração FPSO-TLWP (referência [35])

Portanto, conforme citado, para diversos tipos de sistemas oceânicos o código do TPN simula os efeitos da interação entre as condições ambientais (vento, onda e correnteza) e os sistemas em estudo, buscando determinar os níveis de esforços aos quais esses sistemas e seus subsistemas associados estão sujeitos.

Dentre os subsistemas pertinentes, o mais importante é aquele formado pelas linhas de amarração e de produção de petróleo. Essas linhas podem ser modeladas de duas formas: uma primeira através da utilização do método de elementos finitos com massa distribuída, a cargo do código ANFLEX, e a outra pelo método das massas concentradas, *lumped mass*, a cargo do código PREADYN. Portanto, independente do método, o TPN conta com códigos bastante adequados para execução de análises e identificação de parâmetros importantes da dinâmica dos sistemas e subsistemas em estudo.

O código TPN como um todo foi desenvolvido em C++, tendo o seu funcionamento dividido em três partes fundamentais: o pré-processador, o processador e o pós-processador. De acordo com a referência [19], esta é uma divisão usual em simulações computacionais de grande porte como as executadas pelo TPN.

O pré-processador é caracterizado pelo código conhecido como PREA3D, cujo ambiente de trabalho é apresentada na Figura 6. Nele é possível modelar unidades flutuantes ancoradas e suas respectivas linhas de operação. É onde são atribuídas todas as características físicas dos sistemas e subsistemas que se deseja analisar, dentre as quais: parâmetros hidrodinâmicos do(s) corpo(s) flutuante(s), dados de rigidez e massa linear das linhas. Além destas características, no PREA3D também são definidas de maneira simples as características das condições ambientais.

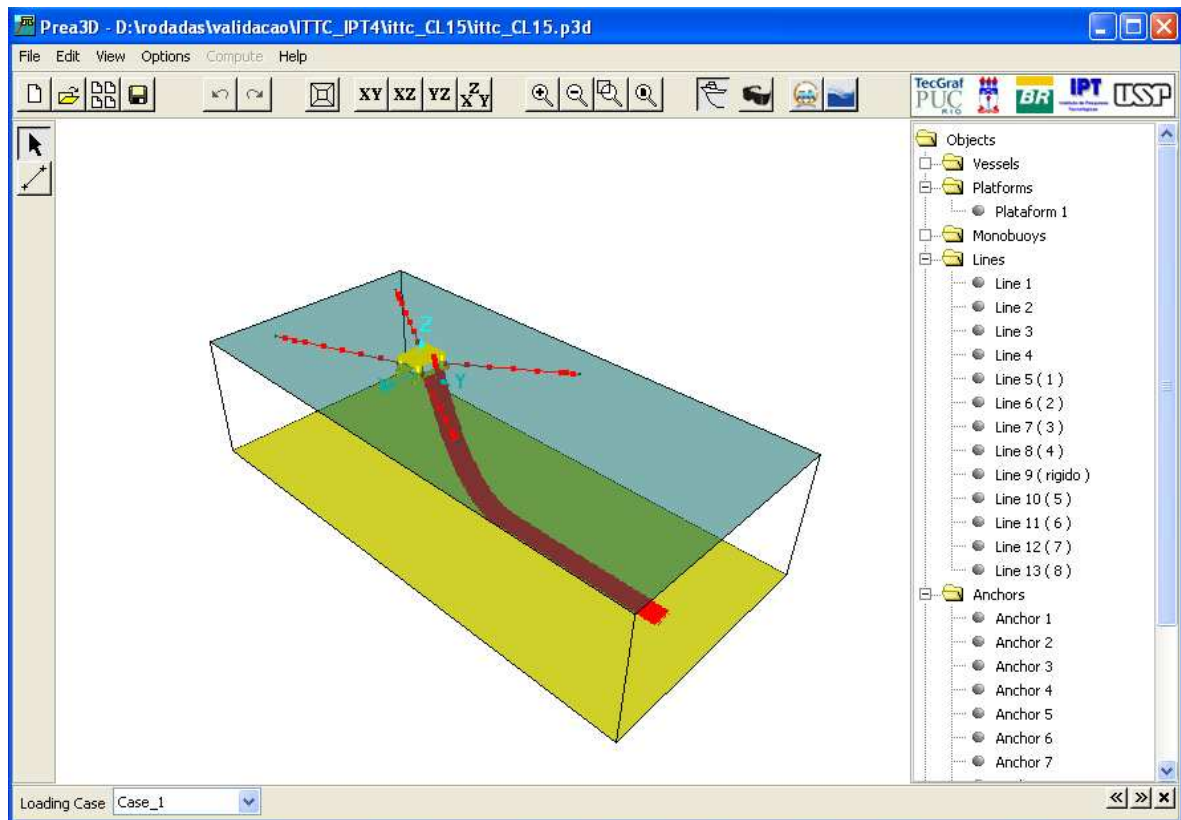


Figura 6 Aspecto geral do pré-processador do TPN – PREA3D

O código TPN foi desenvolvido para a execução de tarefas matemáticas em paralelo, desenvolvidas através de um *cluster* de processadores de alta capacidade, ver Figura 7. Desta forma, na análise de um modelo com várias linhas de operação, cada processador é encarregado de calcular a dinâmica de uma dessas linhas, sendo que os resultados são transmitidos e consolidados por um processador central que, a cada momento, retransmite o resultado em cada passo da interação no tempo para a unidade flutuante. A unidade flutuante, por sua vez, retorna seus movimentos para o topo de cada uma das linhas, cujas dinâmicas são novamente calculadas. Este processo iterativo ocorre até o final da simulação, a partir do qual se obtém todas as séries temporais de movimentos da unidade flutuante, além das séries de tração no topo e outros parâmetros de interesse nas linhas de operação.



Figura 7 Cluster para processamento do TPN

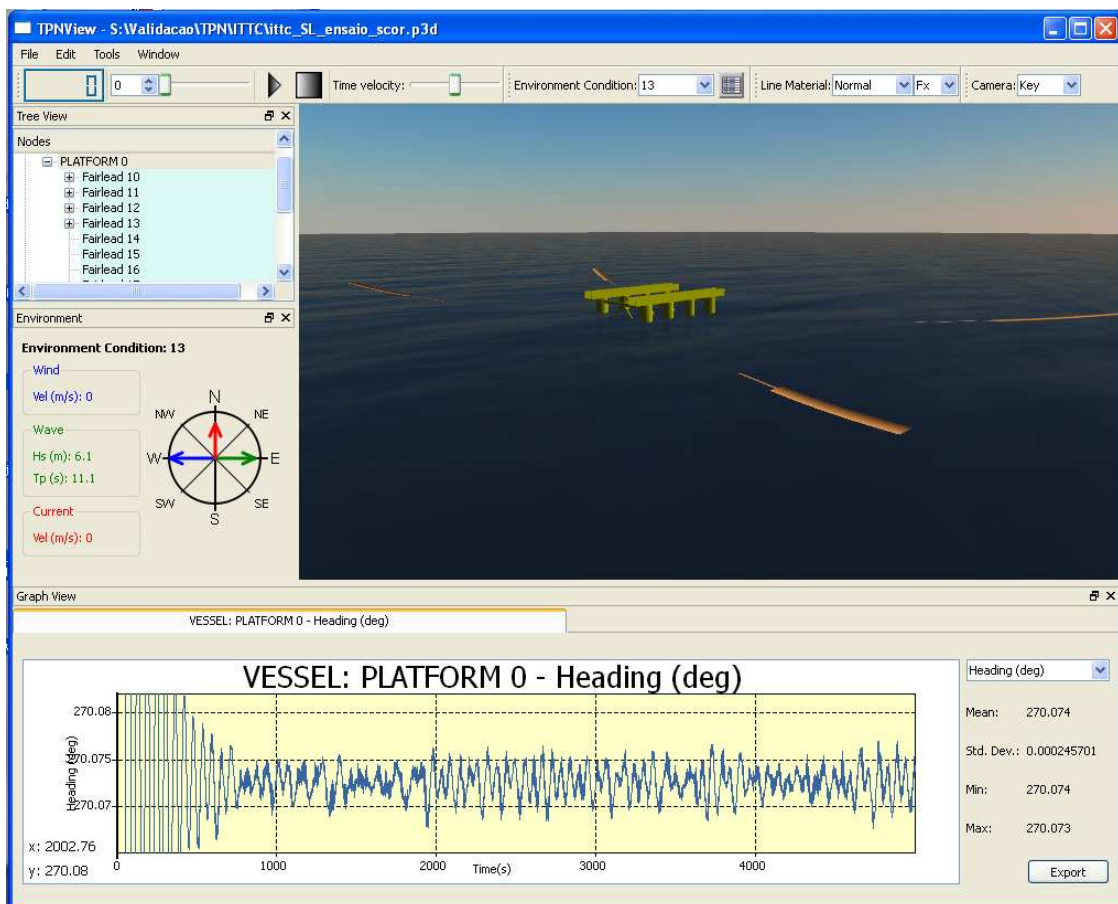


Figura 8 Imagem do pós-processador do TPN

O processador em si é o próprio núcleo do TPN, onde são executadas todas as simulações numéricas, inclusive aquelas advindas de códigos solidários à execução das tarefas de processamento. Maiores detalhes são dados adiante em uma seção específica.

O pós-processador permite visualizar os resultados das séries temporais da plataforma nos seis graus de liberdade e para qualquer ponto solidário ao sistema flutuante em estudo. Este pós-processamento é deixado a cargo do aplicativo TPNView, cujo ambiente pode ser visto na Figura 8, caracterizado pela visualização científica em tempo real. No ambiente TPNView, ou pós-processador, é possível visualizar o comportamento global da unidade através de imagens tridimensionais, além das estatísticas a respeito dos comportamentos dinâmicos simulados.

3.1.2. Análise acoplada

Conforme comentado na Introdução deste texto, os procedimentos adotados para o processo de dimensionamento de linhas de operação normalmente não levam em consideração sua interação com a dinâmica das unidades flutuantes. Em outras palavras, esse tipo de análise é realizado com a unidade flutuante considerada de forma hidrodinamicamente isolada, por esse motivo denominado de análise desacoplada.

No entanto, de acordo com referências como [1] e [6], sabe-se que as linhas podem exercer uma influência significativa no comportamento das unidades, já que parâmetros como o amortecimento e a massa adicional, entre outros, podem sofrer alterações expressivas nas suas grandezas.

Levando-se em conta que existem diversos parâmetros que podem afetar o comportamento das unidades flutuantes operando em mar aberto, o TPN foi desenvolvido para considerar de maneira acoplada as diversas forças atuando no sistema flutuante e nas linhas de operação simultaneamente. Desta forma, em cada passo da análise os efeitos (forças e momentos) advindos da ação dos agentes ambientais sobre os sistemas e subsistemas envolvidos são computados conjuntamente, o que permite caracterizar as simulações numéricas via TPN como análises acopladas. Este tipo de análise, em tese, pode resultar em projetos mais precisos e confiáveis, já que leva em consideração uma quantidade maior de

parâmetros variantes e interdependentes; portanto, uma condição mais próxima do problema real. No entanto, a análise acoplada necessita de estudos mais profundos, já que nem todos os fenômenos de interação encontram-se plenamente compreendidos e suas formulações matemáticas totalmente desenvolvidas. Daí a dependência maior de experimentos como os apresentados nesta pesquisa.

3.1.3. Simulações no domínio do tempo

Conforme comentado, o simulador do TPN foi desenvolvido para execução de análises no domínio do tempo. A abordagem no domínio do tempo permite lidar com efeitos de natureza não-linear como, por exemplo, o problema do amortecimento viscoso (referência [21]) e a restauração das linhas do sistema. No entanto, a maioria dos simuladores no domínio do tempo utiliza coeficientes hidrodinâmicos, advindos da teoria potencial, de programas que utilizam o domínio da frequência para apresentação dos seus resultados.

No código do TPN essa situação é observada, na medida em que os dados hidrodinâmicos da plataforma são obtidos com a utilização do aplicativo WAMIT®, que calcula os coeficientes potenciais no domínio da frequência. Portanto, é necessária uma transformação dos resultados hidrodinâmicos para que possam ser utilizados no domínio do tempo.

No entanto, um corpo flutuante em movimento induz um potencial de velocidades no fluido que o suporta, sendo que, mesmo depois do corpo flutuante voltar para o repouso, esse fluido ainda realizará movimentos. Ou seja, o escoamento fluido durante um intervalo de tempo será influenciado pelo movimento que o fluido tinha nos instantes anteriores e, da mesma forma, influenciará o escoamento nos instantes posteriores. Portanto, o fluido apresenta certa memória daquilo que ocorreu com o escoamento em instantes passados (referência [21]).

Tendo isso em vista, Cummins (referência [36]) e Ogilvie (referência [37]) desenvolveram a equação do movimento de um corpo flutuante no domínio do tempo utilizando coeficientes calculados no domínio da frequência, através do emprego de uma expressão chamada de função de memória, que leva em consideração o comportamento do fluido em instantes anteriores. Desta forma, é possível realizar análises no domínio do tempo com coeficientes potenciais no domínio da frequência.

3.1.4. Sistema de coordenadas

Para o estudo dos movimentos das unidades nos seis graus de liberdade, o TPN funciona com dois sistemas de coordenadas.

O sistema de coordenadas global, OXYZ, é fixo e o sistema local, Gxyz, é solidário ao sistema flutuante. As respostas dos movimentos do sistema flutuante em função do tempo são dadas como movimento (translação e rotação) do sistema local em relação ao sistema global. Na Figura 9 o sistema global é representado em vermelho e o local em azul.

O código permite também análises com diversas unidades flutuantes e/ou objetos submersos (análises multicorpos), como por exemplo, o lançamento de bombas submarinas executadas por embarcações de apoio oceânico. Para esses casos, existem diversos eixos locais, atrelado a cada um dos corpos, flutuantes ou não, sendo que o programa calcula as equações de movimento de cada elemento, dando como resultados as respectivas séries temporais de posição.

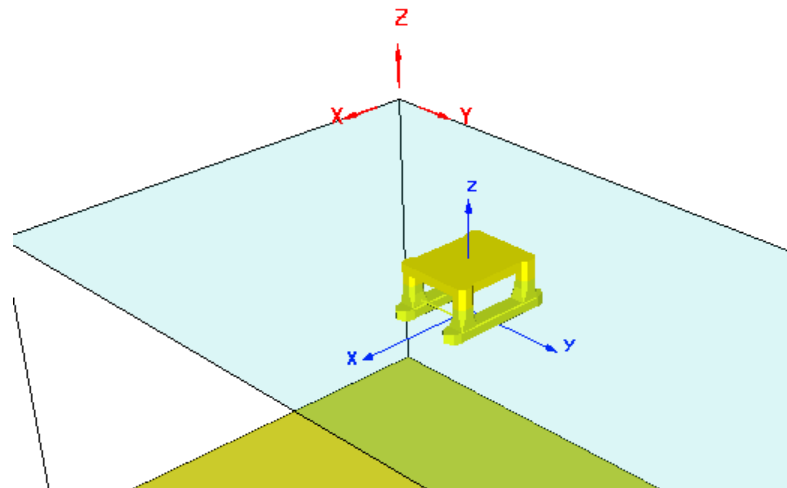


Figura 9 Sistemas de coordenadas no TPN

Para a transformação da resposta de movimento de um corpo em um sistema de coordenadas local para outro sistema é utilizado uma matriz de transformação, utilizando ângulos de Euler.

3.1.5. Equação do movimento

Considerando a segunda lei de Newton, a seguinte equação diferencial descreve o movimento de uma unidade flutuante no referencial inercial OXYZ.

$$[M]\ddot{\vec{x}} = \vec{F}_i + \vec{F}_w + \vec{F}_{md} + \vec{F}_{sd} + \vec{F}_{rh} + \vec{F}_{pd} + \vec{F}_{ed} + \vec{F}_{ed2} + \vec{F}_{wdd} + \vec{F}_{ld} + \vec{F}_{ldr} + \vec{F}_{lvd} + \vec{F}_c + \vec{F}_v \quad 3.1$$

Onde:

F_i é a força ou momento de força inercial adicional.

F_w , F_{md} e F_{sd} são as forças ou momentos de forças decorrentes da ação de ondas no sistema flutuante; representam, respectivamente, a força de primeira ordem, a força de deriva média e a força de deriva lenta.

F_{rh} representa a força ou momento de força de restauração hidrostática, decorrente da variação do empuxo atuando no sistema, quando este se movimenta.

F_{pd} , F_{ed} e F_{ed2} representam, respectivamente, a força ou momento de força decorrente do amortecimento potencial, a força ou momento força de amortecimento externo e a força ou momento de força de amortecimento externo quadrático.

F_{wdd} é a força ou momento de força decorrente do amortecimento de deriva de onda.

F_c e F_v representam, respectivamente, a força ou momento de força de correnteza e a força ou momento de força de vento, considerando sempre a velocidade relativa entre a unidade flutuante e a velocidade característica desses dois agentes ambientais.

F_{ld} , F_{ldr} e F_{lvd} representam, respectivamente, as focas ou momento de forças decorrente do amortecimento das linhas, do arrasto das linhas e da carga dinâmica vertical das linhas.

M é a matriz de inércia do corpo flutuante, que não apresenta termos cruzados quando OXYZ coincide com Gxyz e quando Gxyz são eixos principais de inércia.

$\ddot{\vec{x}}$ é a matriz coluna contendo as acelerações do corpo.

3.1.6. Forças e momentos inerciais adicionais

As forças inerciais hidrodinâmicas (F_i) ou massas e inércias adicionais de um corpo flutuante representam do ponto de vista físico a quantidade de fluido que é acelerado quando este corpo se movimenta em uma determinada direção. Essas quantidades são diferentes (a menos que o corpo seja simétrico) em cada grau de liberdade e dependem da direção do movimento do corpo. No entanto, é necessário certo cuidado com essa analogia no caso de coeficientes cruzados (fora da diagonal principal da matriz de massa adicional), visto que implicam em forças inerciais hidrodinâmicas com direção diferente da aceleração do corpo e que podem, inclusive, ter valores negativos (referência [21]). A teoria detalhada sobre os cálculos dos coeficientes de massa adicional pode ser encontrada na referência [25].

No caso do código do TPN, as massas e inércias adicionais utilizadas são obtidas em forma de coeficientes adimensionais, através do aplicativo WAMIT® descrito mais adiante. Conforme comentado no item 3.1.3, esses coeficientes estão no domínio da frequência, sendo necessárias transformações, para sua utilização no simulador no domínio do tempo.

3.1.7. Forças e momento de forças de onda

A unidade flutuante, quando sujeita a ondas irregulares ou regulares, está exposta a forças de onda que no modelo numérico são divididas em três componentes, segundo a referência [1].

Componente de alta frequência F_w , chamada de força de primeira ordem. Esse tipo de componente induz movimentos na plataforma na mesma frequência da onda, sendo o movimento proporcional à amplitude da onda. O cálculo dos movimentos induzido por essa componente de força de onda em estruturas flutuantes pode ser encontrado na referência [10], capítulo 3.

Componente constante F_{md} , chamada de força de deriva média. É uma das duas parcelas da solução do problema de segunda ordem. A outra parcela é a força de deriva lenta.

Componente de baixa frequência F_{sd} , chamada de força de deriva lenta. Esta parcela de força de onda vem da interação entre duas componentes harmônicas de frequências próximas e tem frequência igual a “frequência diferença” que representa o espectro de deriva lenta.

Por ser proporcional à amplitude de onda, a primeira parcela é dita linear ou de primeira ordem. Já as duas últimas são proporcionais a amplitude quadrática de onda sendo, portanto componentes de segunda ordem ou não lineares. Na teoria de segunda ordem, a condição do escoamento sobre o corpo, na sua posição instantânea, é levada em consideração de forma mais apropriada. Com isso é possível igualar de forma mais precisa a pressão do fluido com a pressão atmosférica na posição instantânea da superfície livre e levar em consideração as não linearidades da velocidade das partículas do fluido na superfície livre (a teoria das parcelas de força de onda de segunda ordem pode ser encontrada no capítulo 5 da referência [10]).

3.1.8. Forças e momentos de restauração hidrostática

As componentes de força e momento de restauração hidrostática (F_{rh}) ocorrem quando há algum tipo de movimento fora do plano horizontal da unidade flutuante, isto é, são restaurações advindas de variações na força de empuxo, proporcionais a massa de água deslocada pelo corpo. Portanto, só existem forças de restauração hidrostática nos movimentos de *heave*, correspondente a força de empuxo menos a força peso da unidade, e em *roll* e *pitch*, nas quais se têm um momento restaurador devido à inclinação do sistema flutuante.

Essas forças também são calculadas pelo WAMIT® em forma de coeficientes adimensionais. No entanto, nesse caso os coeficientes não são dependentes da frequência de movimento do casco, não sendo necessária a utilização da função de memória já mencionada.

3.1.9. Forças e momentos decorrentes do amortecimento potencial

A força de amortecimento potencial do casco (F_{pd}) pode ser descrita como a dissipação de energia devido à radiação de ondas, as quais são geradas quando a unidade flutuante se movimenta. No simulador do TPN, esta parcela de força externa, que faz parte da equação do movimento da plataforma, tem seus coeficientes calculados pelo aplicativo WAMIT® (descrito no item 3.1.18). Esses resultados são apresentados através de coeficientes adimensionais, dados em função da frequência de movimento e que multiplicados pela velocidade da plataforma, em cada grau de liberdade, resultam nas forças de amortecimento. Novamente, como os resultados do WAMIT® estão no domínio da frequência, é necessária a utilização da função de memória.

3.1.10. Forças e momentos decorrentes do amortecimento externo

Existem outras parcelas de amortecimento que não são de origem potencial. Essas parcelas, que no simulador do TPN são chamadas de “externas”, são de origem viscosa e não são calculadas pelo WAMIT®. Estas forças podem ser obtidas com a utilização de aplicativos CFD – *Computational Fluid Dynamics* ou através de ensaios em tanques de provas físicos, através da análise das séries temporais de decaimentos e de ensaios de oscilação forçada.

No presente estudo foi utilizado o procedimento experimental para obtenção dessas forças, que serão apresentadas na seção 5.8.1. Nesses ensaios, foram obtidos os coeficientes de amortecimento da plataforma, que englobam a parcela potencial e a viscosa. No entanto, a parcela de amortecimento potencial pode ser obtida no aplicativo WAMIT®, sendo possível assim, isolar a parcela de amortecimento viscoso.

Por sua vez, o amortecimento viscoso é dividido em duas componentes: linear (F_{ed}) e quadrática (F_{ed2}). A parcela linear atua de forma semelhante à potencial, pois é linear na velocidade. Já a quadrática é proporcional à velocidade e ao módulo da mesma, ou seja, é proporcional a um termo quadrático na velocidade. Portanto, esses valores multiplicados pela velocidade e pela velocidade quadrática, respectivamente, resultam nas forças de amortecimento externo.

No TPN é possível atribuir somente um valor para o amortecimento externo linear e outro para o amortecimento externo quadrático, não sendo, portanto forças dependentes da frequência de movimento. Desta forma, para análises com frequências de movimento muito diferentes, é necessário fazer uma reavaliação dos coeficientes externos de amortecimento. Ou seja, para os casos dos movimentos de *surge* ou *sway*, por exemplo, nos quais o período natural é muito alto (100 a 300 segundos), talvez seja necessária uma reavaliação do amortecimento externo em análises com ondas irregulares típicas (5 a 15 segundos).

3.1.11. Forças e momentos decorrentes do amortecimento de deriva de onda

O modelo de *wave drift damping*, F_{wdd} , considerado no código do TPN, é baseado no procedimento proposto por Aranha (referência [26]). Essa força é decorrente da interação das ondas com a correnteza e/ou a velocidade do corpo, que acaba por alterar a sua frequência de encontro.

3.1.12. Forças e momentos de forças de correnteza

No caso de análises com navios, seja com ou sem movimento, esses ficam sujeitos a diversas fontes de forças devido à incidência da correnteza no casco, semelhante ao comportamento de fólios. Dentro do código do TPN existem algumas formulações para consideração dessas forças. A referência [1] compara os resultados dessas diferentes formulações para as forças de correnteza.

No entanto, para o caso de plataforma semi-submersível, foco deste trabalho, o TPN utiliza fórmulas clássicas de arrasto hidrodinâmico que atuam nas partes submersas do casco, descritas na referência [38]. A correnteza é sempre considerada constante em intensidade e direção e suas componentes de força, F_c , são calculadas por:

$$\begin{aligned}
 F_{c1} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{cx} (\Psi_{cr}) A_{ct} U_r^2 \\
 F_{c2} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{cy} (\Psi_{cr}) A_{cl} U_r^2 \\
 F_{c3} &= 0 \\
 F_{c4} &= -F_{c2} z_v \\
 F_{c5} &= F_{c1} z_v \\
 F_{c6} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{cz} (\Psi_{cr}) A_{cl} L U_r^2
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Onde:

Os índices de 1 a 3 representam forças nas direções dos eixos do sistema de coordenadas local e 4 a 6 os momentos neste mesmo sistema.

A_{cl} e A_{ct} representam, respectivamente, a área longitudinal e a transversal expostas à correnteza.

L representa o comprimento da plataforma.

C_{cx} e C_{cy} representam, respectivamente, os coeficientes de forças de correnteza no eixo “x” e no eixo “y” do sistema local de coordenadas, adimensionalizados pelas áreas transversal e longitudinal expostas à correnteza.

C_{cz} representa o coeficiente de momento no plano “xy” do sistema local de coordenadas devido à atuação da correnteza, adimensionalizado pela área longitudinal vezes o comprimento da plataforma.

x_v , y_v e z_v são, respectivamente, as coordenadas do centro de pressão da força de correnteza nas direções “x”, “y” e “z” do sistema local de coordenadas.

ρ_a é a densidade da água.

U_r é a velocidade da correnteza relativa ao sistema local de coordenadas da unidade, ou seja:

$$U_r = \sqrt{u_{cr}^2 + v_{cr}^2} \quad 3.3$$

Onde as componentes relativas da correnteza em relação à unidade são:

$$\begin{aligned} u_{cr} &= \dot{x}_1 - U \cos(\Psi_c - x_6) \\ v_{cr} &= \dot{x}_2 - U \sin(\Psi_c - x_6) \end{aligned} \quad 3.4$$

O ângulo instantâneo de incidência da correnteza é:

$$\Psi_{cr} = \arctan\left(\frac{-v_{cr}}{-u_{cr}}\right) \quad 3.5$$

3.1.13. Forças e momentos de forças de vento

Nas simulações com plataformas de petróleo, o TPN utiliza para as fórmulas de arrasto devido ao vento, equações análogas às apresentadas no item anterior. As alterações ocorrem na consideração das áreas não submersas exposta ao vento, nos coeficientes de vento, na densidade utilizada e, finalmente, nas velocidades utilizadas que devem ser as de vento e não as de correnteza.

A formulação completa das forças de vento utilizadas no TPN pode ser encontrada na referência [1]. Cumpre destacar que estas forças não fazem parte dos estudos numérico-experimentais mais adiante apresentados.

3.1.14. Modelagem de linhas

Além das forças atuantes no corpo, em cada passo da resolução das equações de movimento o TPN também considera as forças e amortecimentos de linhas de amarração e *risers*. Como comentado, nas análises com o TPN, foi utilizado o código PREADYN, que pode calcular esforços e momentos em todos os graus de liberdade em qualquer elemento da

malha da linha previamente especificada. Com isso, esse código pode reproduzir as forças e momentos que atuam para modificar o comportamento dinâmico da unidade flutuante, bem como, analisar regiões críticas do *riser* como, por exemplo, o TDP.

O código do PREADYN pode resolver o problema das forças de arrasto atuantes nas linhas de amarração e *risers*, devido à correnteza incidente. Essas forças podem aumentar a deriva das unidades flutuantes ancoradas, bem como podem aumentar o amortecimento dos movimentos em todos os graus de liberdade.

Assim como no processo de simulações com o TPN, apresentado no item 3.1.1, as simulações com o PREADYN também são divididas em três etapas (referência [2]): pré-processamento, processamento e pós-processamento. A primeira caracteriza-se pela entrada de dados, como geometria e propriedades físicas dos materiais utilizados, gerando a malha inicial da linha. Com isso, a análise numérica pode ser iniciada, com a determinação dos deslocamentos, das velocidades e das acelerações em cada um dos nós, bem como os esforços atuantes nos elementos. O pós-processamento visualiza os resultados obtidos. As tarefas com o PREADYN também podem ser realizadas automaticamente via TPN.

3.1.15. Catenária pura

A geração da malha inicial é feita com o equilíbrio estático das linhas baseado na equação da catenária. A Figura 10 apresenta um segmento de linha em equilíbrio estático.

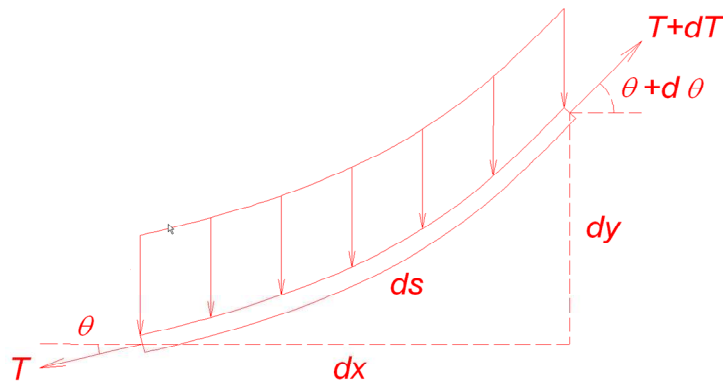


Figura 10 Modelo de catenária utilizado na geração de malha (referência [20])

As equações 3.6 e 3.7 indicam, respectivamente, o equilíbrio horizontal e vertical da equação da catenária.

$$T \cos \theta = T_H = cte \quad 3.6$$

$$m_R = \frac{d}{ds}(T \sin \theta) \quad 3.7$$

T é a tração na direção da linha, m_R é o peso linear, θ é o ângulo com a horizontal, T_H é a tração na direção horizontal e T_V é a tração na direção vertical.

Do equilíbrio de momentos tem-se:

$$T \cos \theta dy = T \sin \theta dx \quad 3.8$$

Que resulta na relação geométrica:

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta \quad 3.9$$

Portanto as relações geométricas são:

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \quad \frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad \frac{dy}{dx} = \tan \theta \quad 3.10$$

Utilizando os equilíbrios de força e as relações geométricas, chega-se na seguinte equação diferencial:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{m_R}{T_H} \frac{ds}{dx} = 0 \quad 3.11$$

Que com a seguinte relação geométrica:

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \Rightarrow \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad 3.12$$

Pode ser escrita como:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{m_r}{T_H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = 0 \quad 3.13$$

Que tem como solução:

$$y(x) = \pm \frac{T_H}{m_R} \cosh\left(\frac{m_R}{T_H} x + A\right) + B \quad 3.14$$

Utilizando as condições iniciais e condição de contorno no topo, obtém-se:

$$h = \frac{T_H}{m_r} \left[\cosh\left(\frac{m_R}{T_H} d\right) - 1 \right] \quad 3.15$$

Onde h representa a profundidade e d a distância de lançamento horizontal.

3.1.16. Modelagem física e numérica da linha

Com a geração da malha da linha é possível prosseguir com a análise numérica. Assim como na solução da equação de movimento da plataforma, o código numérico da linha nada mais é que a solução de sistemas de equações diferenciais, onde serão determinadas as respostas do problema a cada instante de tempo. Estas respostas envolvem a determinação das acelerações, velocidades e deslocamentos em cada nó da malha, além dos esforços em cada elemento (referência [2]).

De uma maneira geral, essas equações podem ser escritas como:

$$\vec{F}_{RI}(t) + \vec{F}_{RInt}(t) = \vec{F}_{RExt}(t) \quad 3.16$$

Onde F_{RI} são forças inerciais, F_{RExt} forças externas e F_{RInt} forças internas, divididas em:

$$\vec{F}_{RInt}(t) = \vec{F}_{Amortecimento}(t) + \vec{F}_{Elásticas}(t) \quad 3.17$$

A equação 3.16 pode ser escrita em função dos deslocamentos, velocidades e acelerações ($\vec{v}(t)$, $\dot{\vec{v}}(t)$, $\ddot{\vec{v}}(t)$ respectivamente) de cada nó definido na malha da linha:

$$\vec{F}_{RI}(t) = [M_R] \ddot{\vec{v}}(t) \quad 3.18$$

$$\vec{F}_{RInt} = \vec{F}_{Amortecimento}(t) + \vec{F}_{Elásticas}(t) = [C_R] \dot{\vec{v}}(t) + [K_R] \vec{v}(t)$$

$$[M_R] \ddot{\vec{v}}(t) + [C_R] \dot{\vec{v}}(t) + [K_R] \vec{v}(t) = \vec{F}_{ext}(t, \vec{v}(t)) \quad 3.19$$

Onde M_R é a matriz de massa, K_R a de rigidez dos elementos e C_R a de amortecimento estrutural da linha.

Para a obtenção da resposta do sistema estrutural é necessária a utilização de um algoritmo de integração apropriado. Silveira (referência [2]) estudou as respostas de algoritmos e comparou-as para concluir qual seria a mais adequada aos problemas usuais em estruturas de amarração e produção. Os algoritmos estudados foram o Método das Diferenças Centrais (MDC) [2] , o Algoritmo de Chung e Lee [22] , o Método Explícito Generalizado- α (MEG- α) ou o algoritmo de Hulbert e Chung [23] . Após comparação detalhada, o último método foi escolhido.

A Figura 11 apresenta o esquema de configuração das linhas no PREADYN.

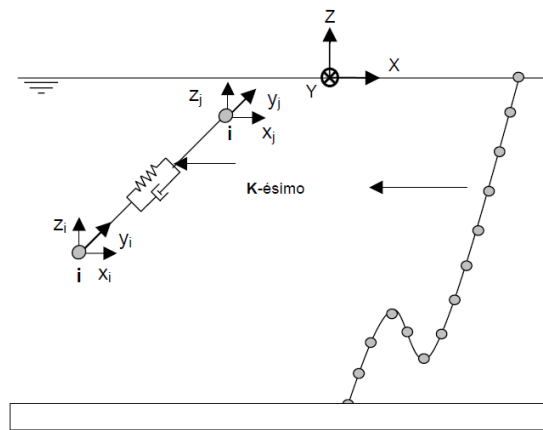


Figura 11 Malha de elementos finitos (referência [2])

Neste modelo a linha é dividida em um número finito de elementos, que são considerados como um sistema massa-mola-amortecedor, sendo que a massa fica concentrada nos nós do elemento (método *lumped mass*). Existem duas opções para reposta do código: treliça e pórtico. No primeiro, cada um dos nós tem três graus de liberdade, descrito pelos deslocamentos em x , y e z , resultando na força axial devido a esses deslocamentos. No segundo, são incluídos os momentos e as torções. O primeiro tem a vantagem de ser numericamente menos oneroso, e o segundo tem uma precisão maior nos resultados.

3.1.17. Forças e momento decorrente do arrasto de linhas

A interação do fluido com as linhas de amarração e *risers* ocasiona uma força de arrasto, levada em consideração no cálculo da dinâmica das linhas. Essa interação pode ocorrer devido à ação da correnteza ou devido à resistência do fluido ao movimento da estrutura. Para esse cálculo é utilizada a formulação de Morison [24] :

$$\vec{f}_m = \frac{1}{2} C_{dt} \rho_a D \vec{U}_m |\vec{U}_m| \vec{n} + \frac{1}{2} C_{dl} \rho_a D \vec{U}_{rt} |\vec{U}_{rt}| \vec{t} + \left(\rho_a \frac{\pi D^2}{4} C_m \vec{U}_{wn} - \rho_a \frac{\pi D^2}{4} (C_m - 1) \vec{U}_{pn} \right) \vec{n}$$

3.20

Onde C_{dt} e C_{dl} são os coeficientes de arrasto transversal e longitudinal respectivamente, C_m é o coeficiente de inércia, ρ_a é a densidade da água, D é o diâmetro hidrodinâmico da linha, U_m e U_{rt} são as velocidades relativas entre o fluido e a linha, nas direções normal (\vec{n}) e tangencial (\vec{t}) ao membro estrutural, respectivamente e \dot{U}_{wn} e \dot{U}_{pn} são as acelerações na direção normal (\vec{n}) do fluido e da estrutura, respectivamente.

Na equação, as duas primeiras parcelas correspondem às forças de arrasto (proporcionais à velocidade), e as outras duas às forças inerciais, sendo a primeira proporcional a aceleração do fluido normal a linha, e a segunda considera a modificação no escoamento do fluido devido à presença do corpo.

3.1.18. Forças e momentos de forças hidrodinâmicas em ondas

Conforme já citado, para obter os parâmetros hidrodinâmicos das unidades flutuantes, o TPN optou por usar os dados obtidos com base no aplicativo WAMIT® (*Wave Analysis MIT*), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Este programa pode analisar a interação entre ondas de superfície e as estruturas oceânicas, conforme observado nas referências [14] e [25]. É baseado no método dos painéis em três dimensões, o que permite estimar os parâmetros hidrodinâmicos de interesse. A interação entre corpo e fluido pode ser analisada considerando casos em profundidade finita ou infinita. Os campos que descrevem o fenômeno são potenciais e harmônicos.

As análises tridimensionais calculadas pelo WAMIT® resultam em características como massas e inércias adicionais, em função da incidência de onda, restauração hidrostática do sistema, amortecimentos potenciais, resultados de excitação de forças e momentos, considerando sua amplitude e fase. O aplicativo permite também o uso de parâmetros externos como amortecimento viscoso ou força atuando no corpo flutuante.

3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS EM ESCALA REDUZIDA

A realização de experimentos em escala reduzida é uma prática bastante difundida para o estudo de fenômenos em diversos campos da engenharia. No entanto, são necessários diversos cuidados na elaboração destes experimentos, já que existem questões que devem ser respondidas quando se pretende extrapolar os resultados obtidos em escala reduzida para a escala real.

Em um cenário ideal, todos os experimentos deveriam ser realizados na sua escala real de funcionamento. No entanto, diversas questões como custo, disponibilidade de equipamentos, entre outros, não permitem que esta metodologia seja aplicada na maioria dos casos. No campo da engenharia naval e oceânica, a grande maioria dos experimentos é realizada em escala reduzida, devido às grandes dimensões em que seus objetos de estudos são construídos.

No caso de um ensaio de comportamento em ondas de uma plataforma de petróleo, a obtenção dos dados mais confiáveis seria com o sistema no mesmo local onde este iria operar e em escala real, pois só assim seria possível obter os movimentos do sistema com precisão. Mas como arriscar milhões de dólares para construir um modelo em escala real sem prever o seu correto funcionamento?

Além da questão do custo, outra grande fonte de incerteza são as condições ambientais que excitam os movimentos do sistema. Em um ensaio deste tipo seria impossível controlar as condições ambientais que estão incidindo sobre o modelo. Já em um ensaio em tanque de provas, onda, vento e correnteza são gerados de acordo com o fenômeno que se deseja estudar. Além disso, nos ensaios em campo as condições ambientais não são isoladas, o que pode causar incertezas sobre qual parcela é preponderante na excitação do modelo. No tanque de provas é possível estudar os fenômenos separadamente, verificando assim a influência de cada parcela.

No entanto, existem limitações nos ensaios em tanques de provas com escala reduzida. No campo da engenharia naval, um dos principais entraves na utilização de escala é o regime de turbulência do fluido. É praticamente impossível ajustar, simultaneamente os números de Reynolds e Froude do modelo reduzido e da escala real (referência [27]). Normalmente, observa-se o fluido em regime turbulento na escala real, já nos ensaios em escala reduzida, o

fluido normalmente está em regime laminar. Existem artifícios que podem ajudar nesta questão, como a utilização de elementos que introduzem turbulência no escoamento do fluido nos ensaios em escala reduzida, o que viabiliza a realização destes ensaios.

Já na engenharia oceânica, talvez o maior desafio tecnológico existente, seja a questão da profundidade em que as plataformas flutuantes são instaladas. Para sua correta avaliação seria necessária a realização de ensaios completos, com linhas de amarração e *risers*. No entanto, com lâminas d'água que chegam a 3000 metros de profundidade, é muito difícil compatibilizar as escalas das linhas e dos modelos, além da necessidade de utilização de tanques de provas com uma profundidade muito grande. A maioria dos tanques de provas utiliza experimentos, nos quais a profundidade do ensaio não é a mesma (em escala) do que aquela do caso real. Nestes casos, as linhas (*risers* e amarração) são truncadas, ou seja, somente parte das mesmas é mantida, com propriedades equivalentes. Existem dúvidas quanto à utilização desse tipo de ensaio, e a sua aplicação vem sendo bastante analisada e discutida nos dias atuais.

Outra questão que deve ser levantada diz respeito ao tempo de realização de ensaios. A grande maioria dos tanques de provas não utiliza ferramentas de absorção de onda que sejam efetivas para a não reflexão de ondas em direção ao modelo. Portanto, o tempo de ensaio deve ser calculado em função do tempo entre a onda passar pelo modelo, ir até o final do tanque e voltar a atingir o mesmo (referência [9]). Essa onda refletida não pode ser considerada nos movimentos da plataforma, já que não é possível ter o controle das condições ambientais que são consideradas. Novos tanques no mundo estão tentando resolver este problema utilizando o processo de absorção ativa de ondas, no qual o tanque possui mecanismos que absorvem ativamente as ondas na extremidade oposta à geração. Tal procedimento pode ser observado na referência [39] .

Tendo em vista esses fatores é possível concluir que a realização de um ensaio em escala reduzida ideal é extremamente complicada. Existem diversas limitações de recursos, técnicas e teóricas que impedem a completa avaliação de um caso em suas diversas características. É importante lembrar que alguns modelos, como o da plataforma ITTC-SR192, já foram bastante estudados de maneira isolada, como apresentado a seguir, mas necessitam de estudos com presença de linhas, o que serviu de grande motivação para realização desses ensaios. No entanto, como já exposto, existiram limitações que serão explicitadas na discussão sobre os resultados obtidos.

3.3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PRÉ-EXISTENTES A RESPEITO DA ITTC-SR192

Neste item serão apresentados alguns resultados e as respectivas conclusões a respeito da unidade flutuante em estudo no presente trabalho. Esta revisão se baseia em publicações pré-existentes sobre simulações numéricas e experimentos que tiveram como sistema de estudo a plataforma ITTC-SR192.

3.3.1. Resultados numéricos

Parte dos procedimentos adotados pela ITTC – *International Towing Tank Conference* para a simulação do comportamento de estruturas flutuantes em ondas, apresentado na referência [13] , são baseados na comparação entre diversos métodos numéricos utilizados para análise do modelo de plataforma ITTC-SR192.

De acordo com esta referência, estes métodos numéricos podem ser divididos em 5 categorias principais:

1. A que utiliza a teoria potencial tri-dimensional com ou sem correção de força de amortecimento viscoso;
2. A que utiliza o Método de Hooft, referência [12] , com a fórmula de Morison com ou sem a utilização de coeficientes corrigidos para interação e/ou efeitos tri-dimensionais;
3. A que utiliza o Método de Hooft com teoria potencial bi-dimensional com ou sem correção de força de amortecimento viscoso;
4. A que combina as duas primeiras categorias desta lista;
5. A que combina a segunda e a terceira categorias desta lista.

A mesma referência [13] apresenta alguns resultados das comparações dos métodos citados. A referência [11] , no entanto, publicada um ano após, apresenta resultados (na escala do modelo 1:64) mais detalhados a respeito desta comparação e, portanto, serve de base para a apresentação que se segue.

Os resultados publicados compreendem diversas incidências de onda. No entanto, o foco foi dado para os casos com onda incidindo a 90 graus em relação à unidade flutuante, situação conhecida como *beam sea*. Essa mesma incidência foi utilizada nos experimentos realizados para essa pesquisa.

A área hachurada na Figura 12 indica a região coberta pelos resultados de amplitude adimensionalizada de *sway* obtida a partir dos diversos métodos numéricos considerados: 34 no total (o ANEXO B apresenta a lista de todos os códigos utilizados). Além desses, a figura também apresenta um resultado experimental médio (resultado médio entre vários ensaios que serão apresentados no próximo item), bem como resultado em profundidade infinita, que nem sempre se apresentam dentro da região dos resultados numéricos.

Analogamente, a Figura 14 apresenta os resultados de *roll* obtidos pelos mesmos métodos, também em *beam sea*.

Para o *heave*, ao contrário dos demais graus de liberdade, os resultados são apresentados para incidência de 45 graus (Figura 13), pois os movimentos neste grau de liberdade vertical não sofrem alterações consideráveis para diferentes incidências de ondas, segundo a referência. Além deste aspecto, o texto ainda cita o movimento de *heave* como o único que apresenta diferenças nos resultados de acordo com a altura de onda incidente no modelo.

Todos os resultados foram obtidos com ondas de altura 0.046 metros (escala do modelo, 1:64). Os períodos de onda na escala do modelo correspondem a um oitavo do valor na escala real.

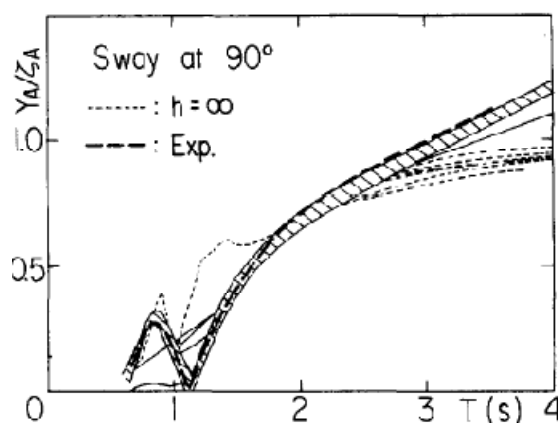


Figura 12 Amplitude de sway (referência [11])

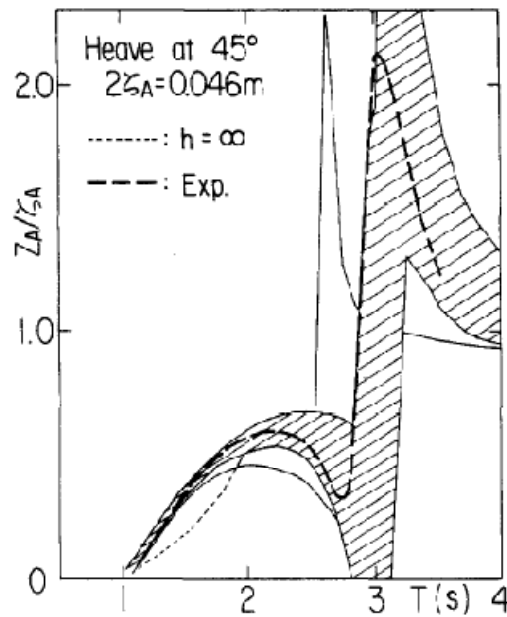


Figura 13 Amplitude de *heave* (referência [11])

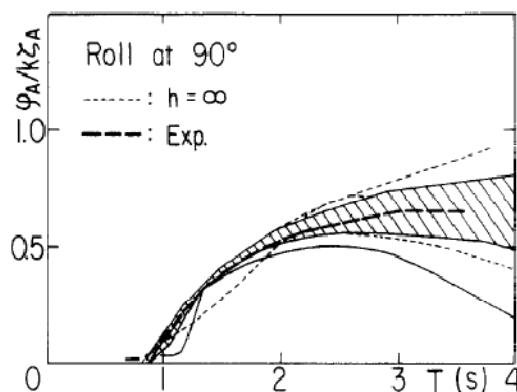


Figura 14 Amplitude de *roll* (referência [11])

Com base nos gráficos, percebe-se que para o movimento de *sway* existe uma equivalência satisfatória entre os resultados numéricos, os quais também são equivalentes ao resultado experimental médio. É possível verificar o efeito da profundidade principalmente em períodos maiores de excitação de onda. Para os movimentos de *heave* e *roll* existe uma maior discrepância entre os resultados numéricos, principalmente para períodos maiores, o que o faz merecer uma análise mais aprofundada quanto à origem.

A Figura 15 apresenta a análise de *heave* com mais detalhes. Nesta figura são apresentados os resultados numéricos do grupo 1, baseados na teoria potencial, além de parte dos resultados do grupo 2, baseados na fórmula de Morison. O pico ressonante diverge nos dois casos, sendo que os resultados do grupo 2 estão mais de acordo com o experimento.

Segundo o texto, os demais resultados do grupo 2 são semelhantes com os do grupo 1, assim como os resultados dos grupos 3, 4 e 5 (estes últimos não incorporados à figura para facilitar as análises).

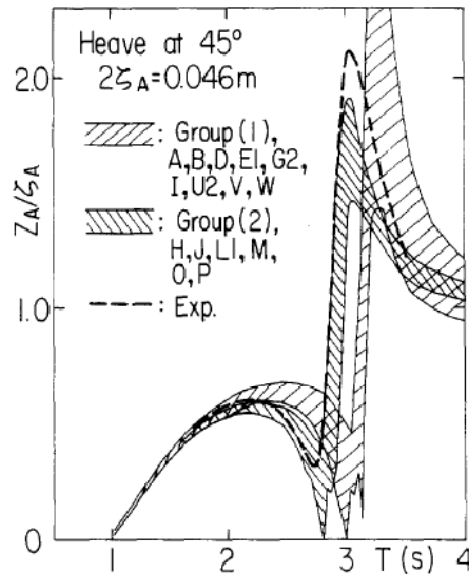


Figura 15 Comparação do RAO de *heave* com diferentes métodos (referência [11])

De acordo com a separação apresentada na Figura 15, são geradas as seguintes conclusões na referência [11] :

- Os cálculos baseados na formulação de Morison levaram a diferentes resultados, dependendo do código utilizado. As escolhas dos coeficientes C_D e C_M foram satisfatórias, já que os resultados estão de acordo com os experimentos.
- Os resultados com teoria potencial 3-D mostraram boa aderência entre os diversos códigos.
- Os resultados para os grupos 3, 4 e 5, que calculam as forças hidrodinâmicas dos *pontoons* utilizando teoria potencial 2-D, obtiveram resultados com boa aderência entre si.
- A teoria potencial não foi suficiente para prever o movimento de *heave* sendo necessário levar em consideração outros parâmetros como o efeito do número K-C e Reynolds no cálculo das forças hidrodinâmicas das colunas e dos *pontoons*, já que estes têm dimensões, para as quais o efeito de difração de ondas não é dominante.

A Figura 16 apresenta os resultados do período natural de *roll* para os diferentes grupos.

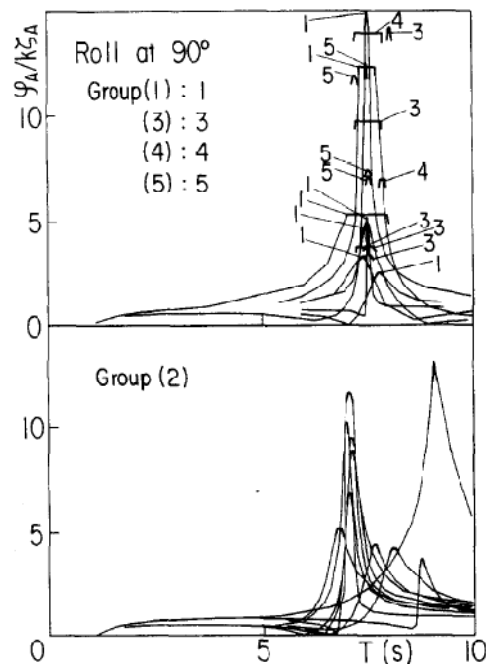


Figura 16 Comparação do RAO de *roll* com diferentes métodos (referência [11])

Os valores do grupo 1 ficaram perto dos 7,5 segundos e os dos grupos 3, 4 e 5 tiveram uma tendência similar. No entanto, os resultados do grupo 2 ficaram perto de 7 segundos. Existem, ainda, alguns valores dispersos. Vários resultados tiveram um ponto de cancelamento antes do pico ressonante. Isso depende, segundo a referência, da precisão no cálculo do momento de inércia virtual e do amortecimento viscoso. A diferença nos resultados leva a mesma conclusão observada na Figura 13, sobre a dispersão de valores para períodos mais altos.

É interessante observar os valores de período natural de *roll*, pois serão importantes nas comparações entre resultados experimentais e numéricos via TPN (considerando o efeito das linhas de amarração no comportamento do sistema) que serão apresentadas no capítulo 4. Esta é, portanto, uma boa verificação da ocorrência de alterações significativas no período natural e/ou amortecimento do sistema.

3.3.1. Resultados experimentais

Outro conjunto de resultados apresentados na referência [11] diz respeito à compilação de diversos experimentos com a plataforma ITTC-SR192 em escala 1:64, ver Figura 17.

É importante deixar claro, no entanto, que a configuração da ITTC-SR192 para tais ensaios é diferente daquela utilizada nos ensaios realizados para o presente estudo, em escala 1:105. Além da escala, outra diferença entre os ensaios deste estudo e os da referência diz respeito à condição de carregamento. Devido à introdução de *risers* no ensaio desta pesquisa, o calado é outro parâmetro distinto daquele utilizado nos ensaios pré-existentes e compilados na referência [11].

Independente destas diferenças é interessante apresentar ao menos qualitativamente os resultados experimentais pré-existentes.

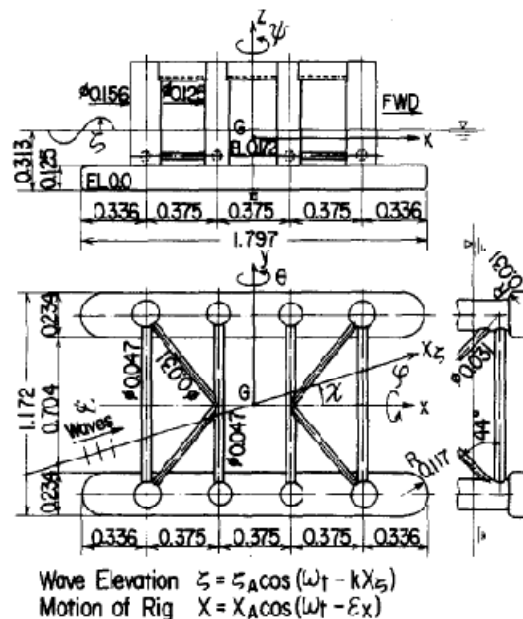


Figura 17 Dimensões do modelo utilizado escala 1:64 (referência [11])

Os gráficos apresentados a seguir representam a compilação de diversos resultados (na escala do modelo 1:64) de ensaios realizados por três instituições diferentes: Universidade Nacional de Yokohama, Sumitomo Indústrias Pesadas Ltda. e Ishikawajima-Harima Indústrias Pesadas Ltda., respectivamente designadas como YNU, SHI e IHI. As condições dos modelos utilizados em cada uma das instituições estão apresentadas na Tabela 53 do

ANEXO A, bem como a configuração dos ensaios na Figura 173, para a SHI, Figura 174, para a IHI, e Figura 175, para a YNU. Os dois primeiros experimentos utilizam um sistema mecânico para medida dos movimentos do modelo e o último utiliza um sistema óptico-eletrônico.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 18, na Figura 19 e na Figura 20, para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente. A Tabela 1 explica a simbologia utilizada na apresentação dos resultados.

Também é interessante notar que, além dos resultados experimentais, o IHI apresenta adicionalmente resultados calculados.

Tabela 1 Explicação da simbologia dos resultados dos ensaios (adaptado da referência [11] na escala do modelo)

Organização	SHI		IHI		YNU	
	Profundidade (m)					
	2.5		3.0		3.5	
Altura de onda (m)	Onda Regular				Transiente	
	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
0.046	●		○	—		
0.160	▲		△	+	⊙	
0.280	■		□			
0.310	◆		◇			

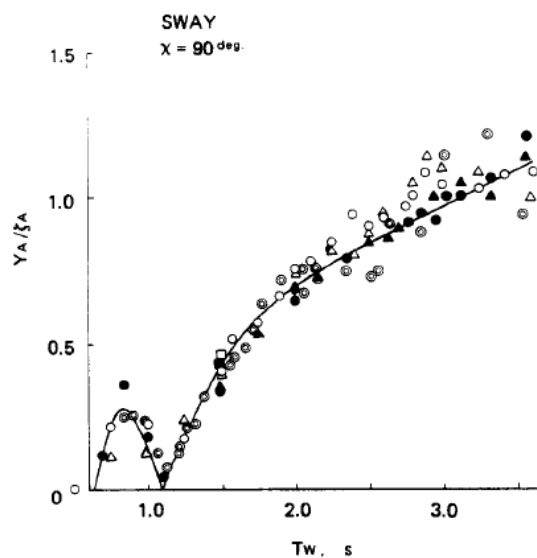


Figura 18 Movimento de *sway* (referência [11] na escala do modelo)

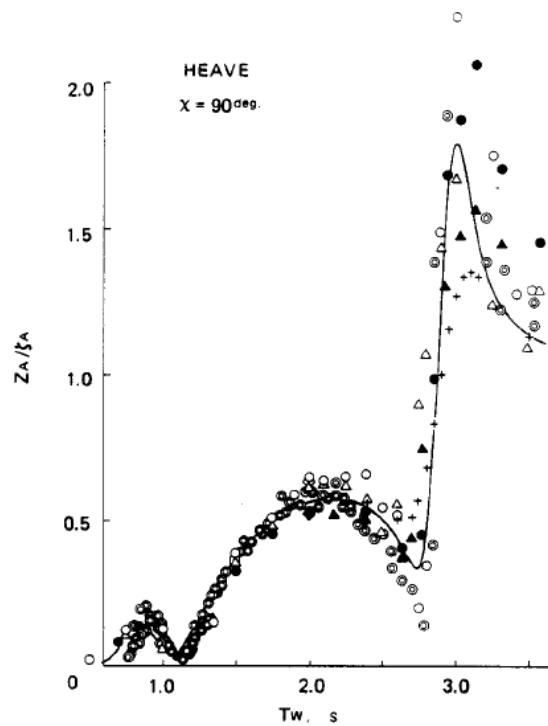


Figura 19 Movimento de *heave* (referência [11] na escala do modelo)

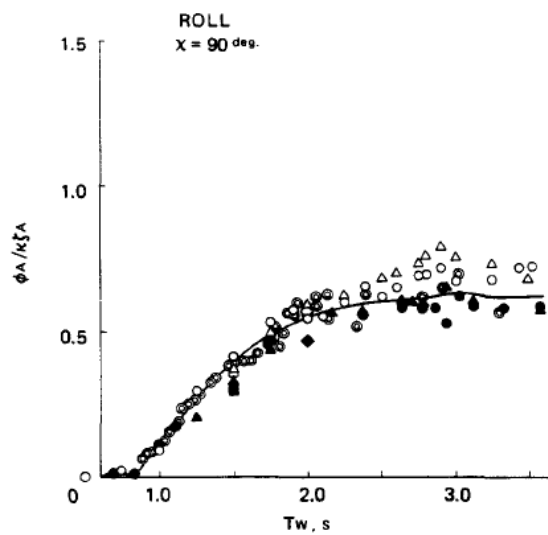


Figura 20 Movimento de *roll* (referência [11] na escala do modelo)

Segundo as figuras anteriores, os resultados apresentam boa concordância, apesar dos diferentes arranjos experimentais e diferentes profundidades de tanque de provas. É possível dizer que os resultados experimentais e o calculado pelo IHI são bastante representativos, no que diz respeito ao comportamento do modelo.

Além desses, também são disponíveis resultados (na escala do modelo 1:64) de ensaios de decaimento em *heave* e em *roll*. Os resultados estão apresentados na Tabela 2, adaptada da Tabela 53 no ANEXO A.

De acordo com esta tabela é possível notar que o período natural de *heave* ficou bem próximo nas três instituições, o mesmo não acontecendo com o grau de liberdade em *roll*, onde se identificam pequenas diferenças. A referência [11] destaca a dificuldade na realização de medidas precisas para o período natural de *roll*, devido ao longo período de oscilação e ao rápido amortecimento das mesmas. É interessante notar a diferença entre períodos naturais de *roll* dos ensaios e os numéricos apresentados na Figura 16. Este assunto é discutido com mais detalhes adiante.

Tabela 2 Resultados de período natural (adaptado da referência [11] na escala do modelo)

Período Natural (s)	Modelo		
	YNU	SHI	IHI
<i>Heave</i>	3.00	2.98	2.99
<i>Roll</i>	6.54	6.84	6.18

4. O TPN APLICADO A UM CASO EXEMPLO E SEUS REFLEXOS NA CONCEPÇÃO DOS EXPERIMENTOS DESTA PESQUISA

A partir das funcionalidades do TPN e dos resultados prévios acerca da ITTC-SR192, neste capítulo são testados e discutidos detalhes a respeito de sua utilização em análise numérica típica. Concomitantemente, com base nos aspectos abordados até o presente ponto, será apresentada a concepção de todas as análises numéricas e experimentais, que fazem parte da metodologia adotada para obtenção das conclusões sobre a confrontação e sobre a influência do acoplamento entre linhas e unidade flutuante.

4.1. PRÉ-ANÁLISES VIA TPN

Tendo apresentado, no item anterior, os resultados experimentais da ITTC-SR192, levantados a partir de trabalhos previamente realizados por outras instituições, foram feitas análises para verificar a aderência entre os resultados publicados e aqueles advindos da análise numérica atual, via TPN.

Neste sentido, a plataforma ITTC-SR192 foi modelada no TPN, e também no WAMIT® isoladamente, com as mesmas características físicas do modelo utilizado pelo tanque do Sumitomo Indústrias Pesadas Ltda. (SHI).

Os dados hidrodinâmicos da plataforma, apresentados na Tabela 53 do ANEXO A, foram introduzidos no simulador TPN, no qual o modelo numérico foi dinamicamente avaliado para diversos períodos de onda. Com esses resultados foram construídos os *RAOs* – *Response Amplitude Operator* dos movimentos (na escala do modelo 1:64) de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente apresentados na Figura 21, na Figura 22 e na Figura 23.

Estes resultados foram então, sobrepostos àqueles retirados da referência [11] , possibilitando a comparação que se segue. Importante salientar que as figuras também apresentam os resultados obtidos nas análises com o WAMIT®³ isolado, permitindo avaliar a influência das linhas de amarração horizontais nos resultados de movimento da plataforma.

³ As análises com o WAMIT® podem ser executadas com um valor de restauração externa (simulando, por exemplo, o efeito de linhas). No entanto, sistemas oceânicos possuem restaurações não-lineares, sendo difícil estabelecer um valor único para cada grau de liberdade. As simulações no TPN definem essa grandeza a cada interação do seu cálculo, possibilitando uma maior precisão na previsão do comportamento de unidades flutuantes.

O movimento que sofreu maior influência das linhas de amarração foi o de *sway*, que também tem grande influência do acoplamento com o movimento de *roll*. As linhas de amarração horizontais criam uma força restauradora que modifica o período natural de *roll*, afetando assim o movimento de *sway*.

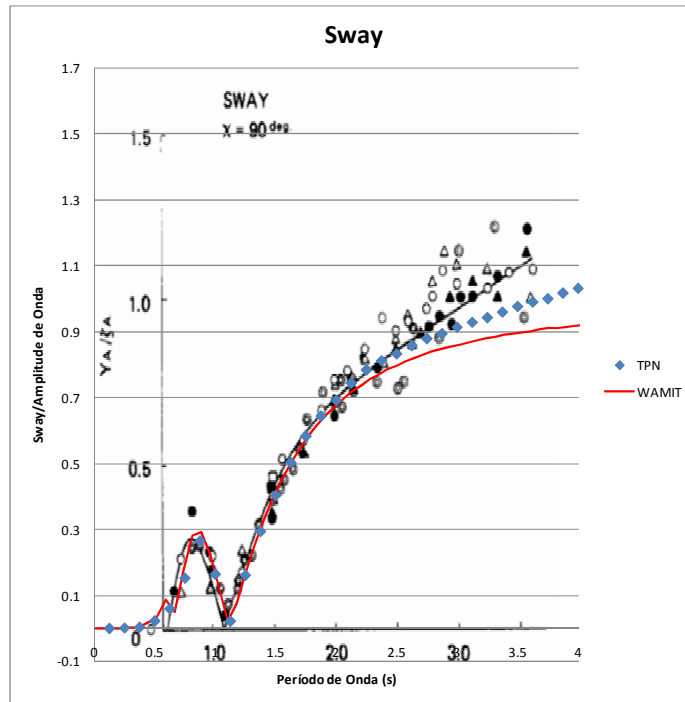


Figura 21 Comparação do RAO de *sway*, ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo)

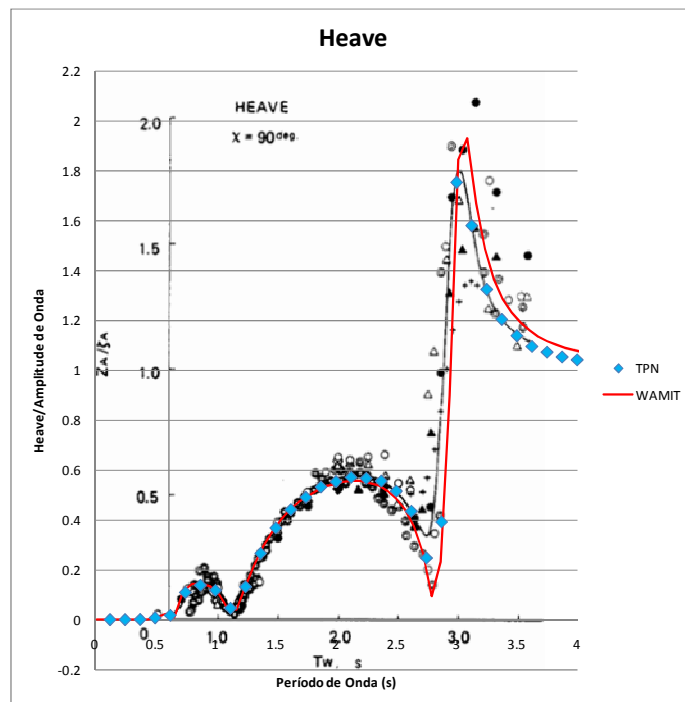


Figura 22 Comparação do RAO de *heave*, ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo)

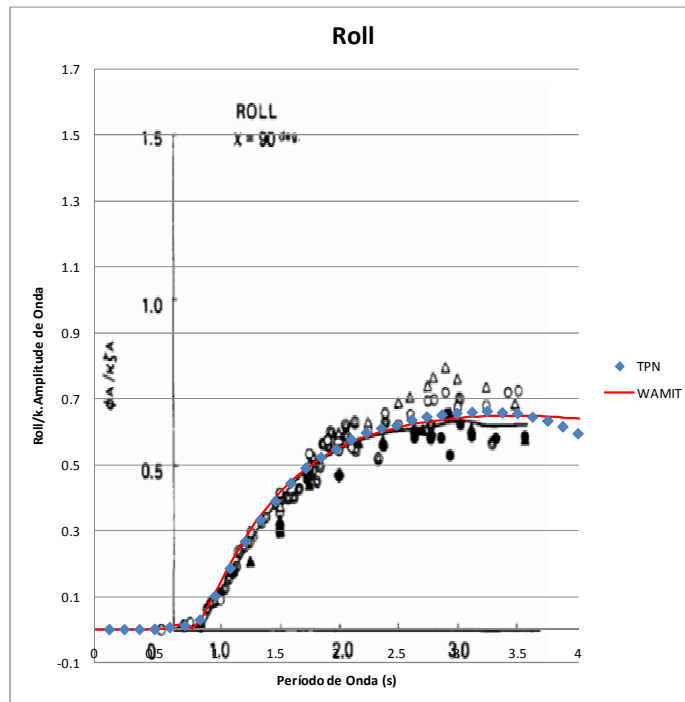


Figura 23 Comparação do RAO de *roll*, ensaio, TPN e WAMIT (escala do modelo)

No gráfico do movimento de *roll*, Figura 23, não é possível notar grandes diferenças entre os resultados com e sem linhas. No entanto, a Figura 24 apresenta o mesmo gráfico (na escala do modelo) para períodos altos. É possível verificar que a introdução das linhas deslocou o período natural para próximo de 6 segundos. Tal influência alterou também o movimento de *sway*, devido ao acoplamento entre os dois graus de liberdade.

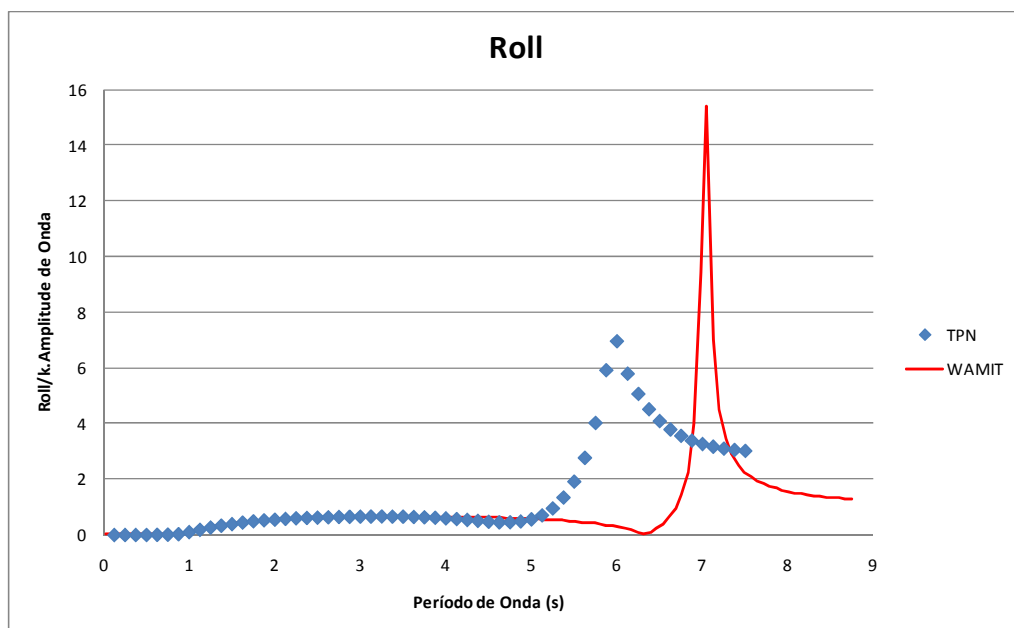


Figura 24 Comparação do RAO de *roll*, TPN e WAMIT, para períodos altos

A alteração do período natural de *roll* com a introdução da amarração horizontal pode ser observada também pela análise da Figura 16 e da Tabela 2. A figura apresentou os resultados dos códigos numéricos que não consideram a restauração das linhas de amarração, no entanto, na tabela os períodos naturais experimentais apresentados têm a influência das linhas horizontais responsáveis por ancorar o modelo. Portanto, fica evidente a alteração no período natural deste grau de liberdade com a introdução das linhas de amarração horizontais.

Como observado na Figura 21, que apresentou as comparações dos RAOs de *sway*, há uma diferença entre os resultados apresentados na bibliografia e os obtidos na presente pesquisa (TPN e WAMIT) para períodos acima de 2.5 segundos. Essa diferença pode ser explicada pelas baixas profundidades dos tanques, nos quais foram obtidos os resultados experimentais da referência utilizada. Conforme apresentado na Tabela 1 as profundidades variam de 2.5 a 3.5 metros em uma escala de 1:64, representando uma variação de 160 a 224 metros de profundidade na escala real.

A referência [41] apresenta a formulação que define um critério para a consideração da formação de ondas em águas rasas ou em profundidade infinita:

$$h / \lambda > \frac{1}{2} \quad 4.1$$

Onde:

$$\lambda = \frac{gT_R^2}{2\pi} \text{ representa o comprimento de onda} \quad 4.2$$

T_R é o período da onda regular

Com base no critério descrito, a Tabela 3 apresenta sua aplicação para ondas de 1.8 a 2.3 segundos em profundidade de 3.5 metros na escala do modelo.

Tabela 3 Critério de ondas em águas rasas (escala do modelo)

T_R (s)	λ (m)	h/λ
1.8	5.06	0.69
1.9	5.64	0.62
2.0	6.25	0.56
2.1	6.89	0.51
2.2	7.56	0.46
2.3	8.26	0.42

Como observado, para ondas com períodos maiores que 2.2 segundos já não é possível considerar o seu comportamento como sendo aquele em profundidade infinita. Na Figura 25 (referência [41]) é fica evidente o “achatoamento” da onda com a diminuição da lâmina d’água.

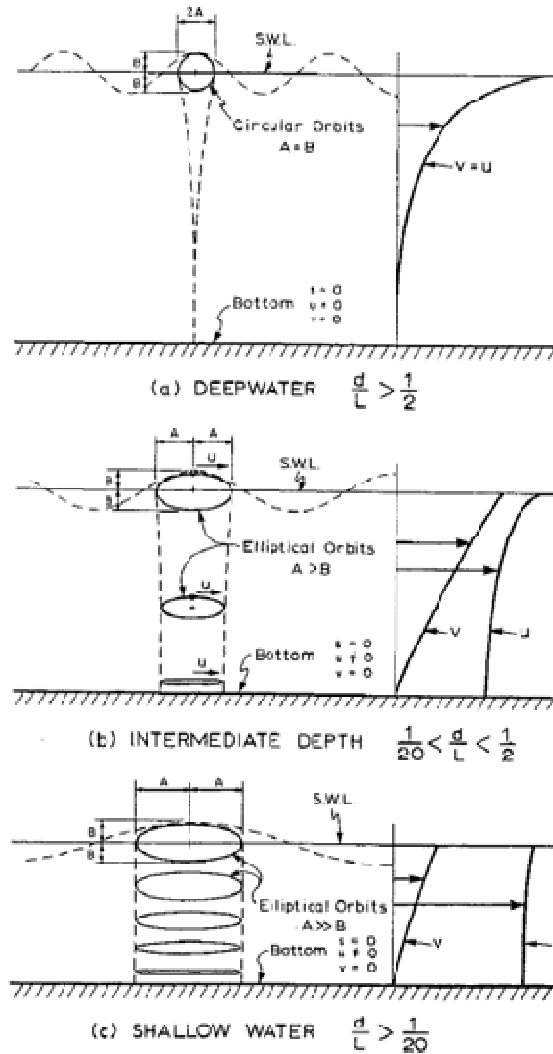


Figura 25 Configuração da onda com a profundidade (referência [41])

De fato, a Figura 26 apresenta uma nova análise de *sway* com o resultado do WAMIT® com profundidade de 224 metros (escala real), bem como os resultados do TPN utilizando esses novos dados hidrodinâmicos. É ainda possível perceber o efeito observado na Figura 21, de alteração do RAO de *sway* com a introdução das linhas de ancoragem. Com a nova consideração de ondas em águas intermediárias, os resultados ficaram mais próximos dos obtidos na bibliografia. Isso ocorreu, pois o “achatoamento” da onda aumentou o movimento de *sway* da plataforma, resultado em uma resposta mais alta nesse grau de liberdade.

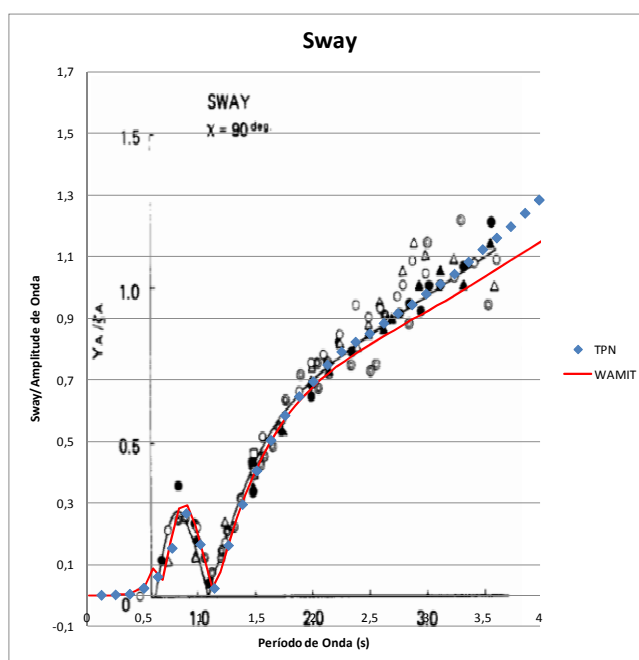


Figura 26 Comparação do RAO de *sway* com profundidade finita

A partir desta pré-avaliação com o TPN, e isoladamente com o WAMIT®, foi possível perceber uma boa coerência numérico-experimental. As respostas nos três graus de liberdade apresentados mostraram bons resultados, sendo que o TPN reproduziu o acoplamento entre as linhas de amarração e modelo de forma bastante consistente. Deste modo, é possível notar que a amarração exerce influência importante no comportamento do modelo.

Estes resultados permitiram a utilização do TPN como ferramenta de concepção dos experimentos pretendidos para a presente pesquisa, associado às considerações de ordem prática descritas nas seções a seguir.

4.2. CONCEPÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA PESQUISA

Tendo em vista os objetivos apresentados, juntamente com a verificação da possibilidade de utilização do TPN como ferramenta de verificação da influência de *risers* e linhas de amarração na dinâmica de unidades flutuantes, foi possível definir a concepção da matriz de ensaio adotada para o atendimento dos objetivos estabelecidos. Com isso, foram definidos e executados quatro tipos de ensaios:

Ensaio do grupo A: verificação experimental do comportamento da unidade, sem linhas conectadas, cujos resultados estão apresentados no item 5.8. Este ensaio foi realizado

somente com a unidade flutuante, sem *risers* acoplados. Com isso, definiu-se a dinâmica de 1ª e 2ª ordem da plataforma sem linhas. Após essa verificação, o mesmo modelo foi reproduzido no código numérico do TPN, com a finalidade de verificação da aderência entre os dois resultados e a calibração de parâmetros como, por exemplo, o amortecimento do modelo numérico. Os resultados dessa comparação estão apresentados no item 6.1.

Ensaio do grupo B: as séries temporais de movimento da plataforma obtidos na fase anterior – ensaios do grupo A – foram transferidas⁴ para o ponto de conexão com o *riser* instrumentado⁵. Com isso, essas séries temporais transcritas foram impostas no topo do modelo numérico da respectiva linha instrumentada, através da utilização do código ANFLEX. Esse procedimento possibilitou a comparação entre os resultados numéricos e experimentais da tração no topo do *riser* instrumentado, para o caso em que a dinâmica da plataforma sem *risers* foi imposta. Esses resultados estão respectivamente apresentados nos itens 7.2.2 e 7.2.4 para as duas ondas irregulares executadas nos ensaios físicos.

Ensaio do grupo C: verificação experimental do comportamento da unidade, com linhas conectadas; esses resultados estão apresentados no item 5.9. O item 5.10 apresenta as comparações dos resultados dos casos com e sem *risers* (ensaios dos grupos A e C) e discute seus resultados. Com isso foi possível auferir a influência dessas linhas no comportamento do sistema acoplado. Após essas verificações, foi feita a reprodução dos ensaios com *risers* no código numérico do TPN, verificando, assim, a aderência entre os resultados numéricos e experimentais. Esses últimos apresentados no item 6.2.

Ensaio do grupo D: idem ao ensaio B, no entanto, com a utilização dos movimentos obtidos no ensaio C (dinâmica da plataforma com *risers* acoplados). Com isso, foi imposto ao *riser* instrumentado as séries temporais transcritas da unidade flutuante com linhas, através do mesmo modelo numérico do ANFLEX utilizado no ensaio B. Esses resultados estão respectivamente apresentados nos itens 7.2.1 e 7.2.3 para as duas ondas irregulares executadas nos ensaios físicos. A comparação dos resultados dos ensaios dos grupos B e D permitem a avaliação da influência da consideração da dinâmica acoplada no comportamento da tração no topo do *riser* instrumentado.

⁴ Somente os movimentos de *surge*, *sway* e *heave* foram transferidos para o referido ponto, já que as séries temporais de rotação são uma propriedade cinemática do corpo rígido.

⁵ Nos ensaios do grupo A não foram utilizados *risers*, no entanto, o referido ponto de conexão diz respeito ao ponto no qual a linha instrumentada, cujas características são descritas adiante, foi conectada no modelo da unidade flutuante nos ensaios do grupo C (ensaios com *risers*).

5. EXPERIMENTO

Neste capítulo serão descritos todos os aspectos envolvidos na realização dos ensaios. Primeiramente serão apresentadas todas as características gerais, como tipo de testes realizados, dimensões principais, linhas, sistemas de coordenadas e condições ambientais utilizadas.

Também serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios, primeiro para o caso sem *risers*, depois para o caso com os mesmos conectados. Nas duas situações haverá condições com e sem correnteza.

O capítulo termina com a conclusão acerca desses resultados, onde são apresentadas as devidas comparações dos casos com e sem linhas, e outros aspectos que se mostram importantes para a conclusão do trabalho.

Todos os resultados apresentados a seguir são em escala real. Apesar da plataforma utilizada no estudo experimental ser um modelo em escala reduzida e não existir na escala real, os programas utilizados, WAMIT® e TPN, estão preparados para receber dados de entrada nessa última escala. Portanto, os resultados experimentais foram transformados para o que seria uma escala real e comparados com os numéricos de mesma grandeza. Mesmo assim, os dados de modelagem da plataforma estão apresentados nas duas escalas.

5.1. O ARRANJO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram conduzidos no tanque de provas do Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). O tanque possui 240 metros de comprimento, 6 metros de largura e 4 metros de profundidade. É possível simular efeito de onda através de um gerador único do tipo cunha, bem como efeitos de correnteza, através do movimento de fundo falso conectado no carro de reboque, que pode percorrer toda a extensão do tanque com uma velocidade máxima de 3 m/s.

Além disso, o tanque conta com um sistema ótico para registro de séries temporais de deslocamentos e ângulos, que pode ser instalado no aparato experimental, juntamente com células de carga solidárias às linhas que representam *risers* e às linhas de amarração.

Ensaio de decaimento, onda regular e onda transiente foram executados para obtenção do RAO – *Response Amplitude Operator*. Estes ensaios foram realizados com e sem a presença de *risers* conectados ao modelo, sendo que um dos *risers* foi instrumentado com uma célula de carga para medir os níveis de tração induzidos pelo movimento da unidade flutuante. O sistema ótico registrou todas as séries temporais de deslocamento nos diversos graus de liberdade, além dos ângulos do modelo.

Os resultados de comparação numérica da tração nos *risers*, junto com a comparação dos RAOs compõem o material para as conclusões finais da pesquisa. Além disso, a comparação das estatísticas obtidas nos ensaios em ondas irregulares (mares) se mostram de fundamental importância para utilização do TPN como ferramenta de projeto de unidades e linhas. Neste caso, somente as estatísticas e os espectros de potência serão comparados, já que a geração de ondas é aleatória e, portanto, somente as estatísticas e os momentos espectrais devem ser coerentes entre si.

As séries temporais de decaimento são muito importantes para calibrar o modelo do TPN, este foi o primeiro passo das análises, pois só assim foi possível comparar os níveis de amortecimento viscoso, que não é calculado pelo código WAMIT®. Portanto, esses amortecimentos foram obtidos com ensaios físicos em escala reduzida e incorporados posteriormente nos modelos numéricos de maneira mais adequada.

A unidade utilizada nos ensaios em tanque de provas foi a plataforma semi-submersíveis ITTC – SR192, em escala 1:105. Trata-se de uma plataforma padrão definida pela *International Towing Tank Conference* – ITTC (Conferencia Internacional de Tanques de Provas), cujas propriedades já foram bastante estudadas.



Figura 27 Configuração do ensaio com *risers*

5.2. CONFIGURAÇÃO GERAL DOS EXPERIMENTOS

Os ensaios com a ITTC foram realizados em uma condição na qual o modelo recebe as ondas e correnteza de través, sendo que nesse caso foram estudados os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*. O arranjo geral do ensaio realizado é apresentado nas figuras seguintes.

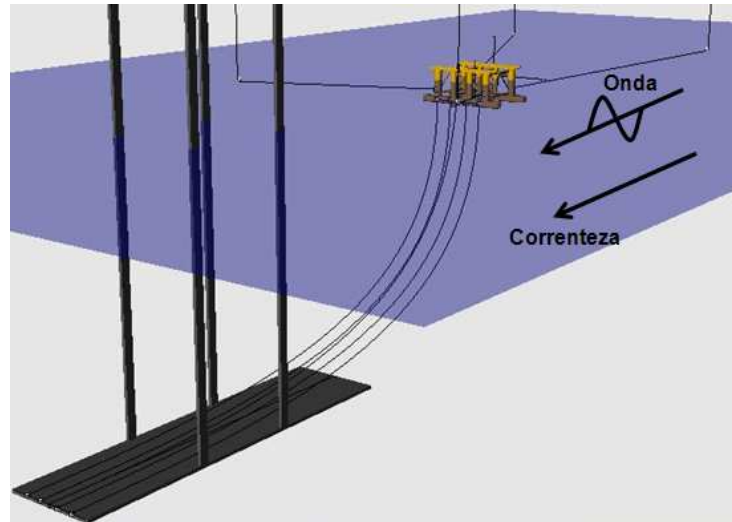


Figura 28 Perspectiva do arranjo experimental

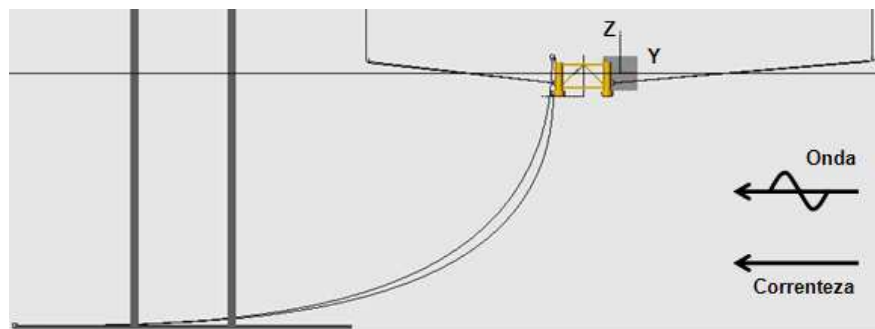


Figura 29 Vista lateral do arranjo experimental

Na Figura 29 e na Figura 30 é possível visualizar, ao lado direito do modelo, o sistema global de coordenadas.

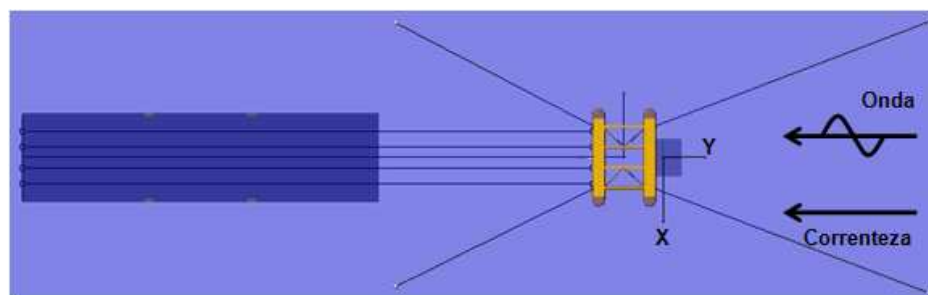


Figura 30 Vista superior do arranjo experimental

A Figura 31 apresenta a imagem do visor submerso do tanque do IPT.

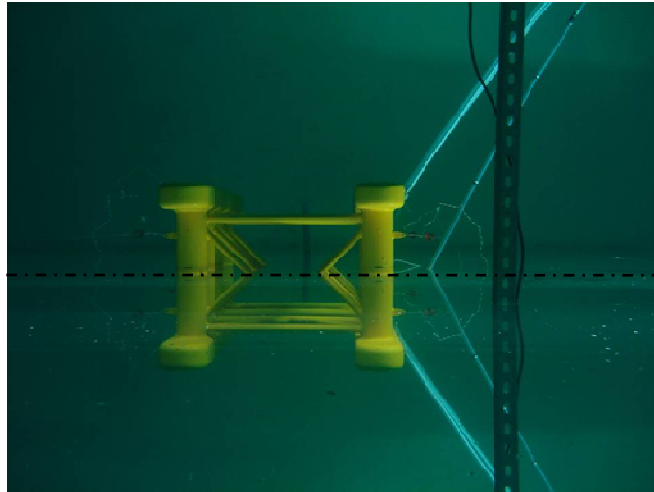


Figura 31 Foto submersa do ensaio

5.3. DIMENSÕES PRINCIPAIS DO MODELO

A plataforma ITTC é uma plataforma tipo semi-submersível criada pela *International Towing Tank Conference*, cujas características servem como base de dados, pois estas são muito bem conhecidas.

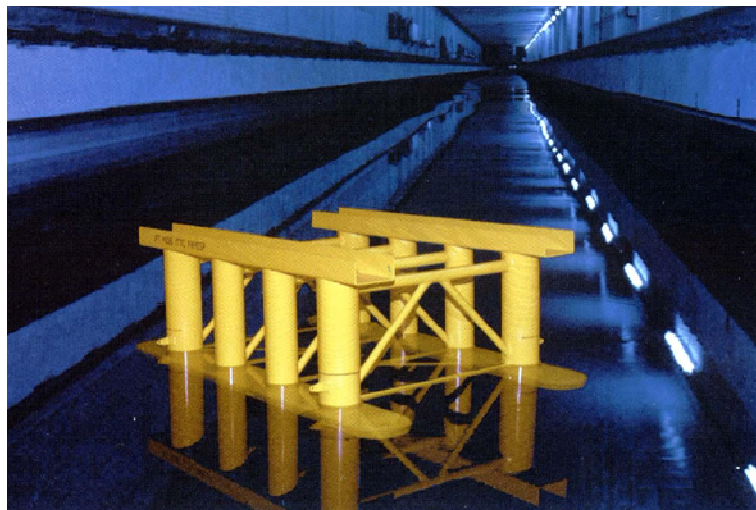


Figura 32 Imagem da plataforma ITTC no tanque do IPT

Sua geometria apresenta oito colunas ligadas a dois pontões simétricos. Quatro dessas colunas têm um diâmetro maior e estão dispostas nas extremidades dos pontões. As outras quatro, de menor diâmetro, estão dispostas simetricamente mais ao centro da plataforma.

Além dessas estruturas, a ITTC-SR192 conta com uma série de contraventamentos para enrijecimento da estrutura como um todo. No modelo, não existem conveses ou estruturas que simulem a presença de equipamentos de produção. As dimensões (referências [8] e [11]) das colunas e dos pontões estão apresentadas na Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

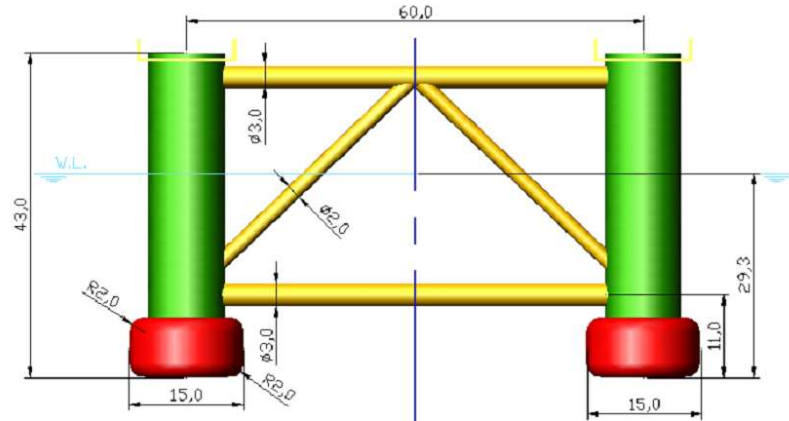


Figura 33 Dimensões da plataforma ITTC, vista frontal

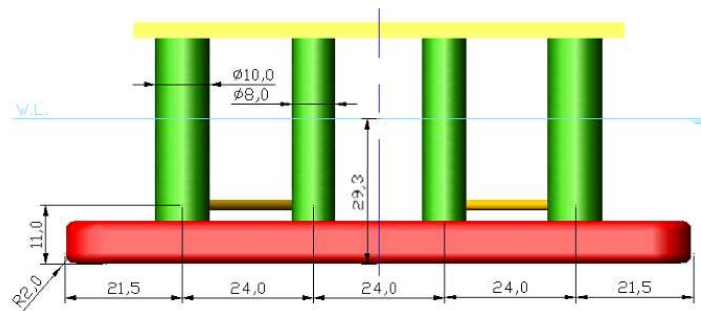


Figura 34 Dimensões da plataforma ITTC, vista lateral

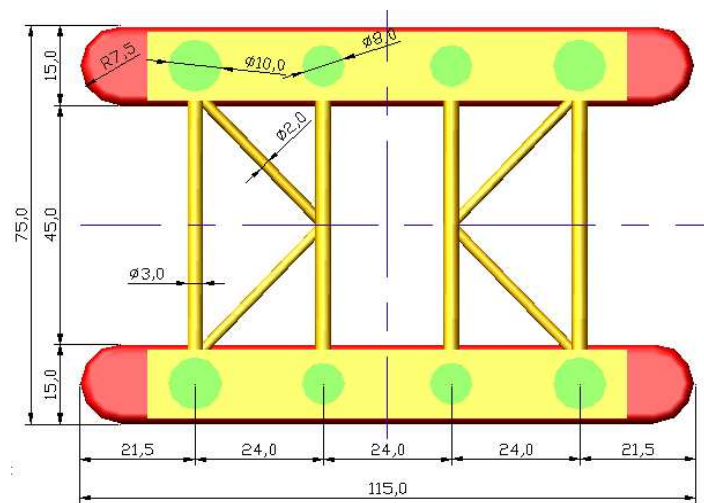


Figura 35 Dimensões da plataforma ITTC, vista superior

Na Tabela 4 são apresentadas as dimensões principais da unidade flutuante na escala real e na escala do modelo.

Tabela 4 Dimensões principais na escala real e na escala do modelo

Dimensões Principais		
Dimensão	Escala Real	Escala Modelo
Comprimento Total	115.0 m	109.5 cm
Boca	75.0 m	71.4 cm
Calado	29.3 m	27.9 cm
Pontal	43.0 m	41.0 cm
Deslocamento	39270.1 m ³	33.9 cm ³
Massa sem risers	39354.0 ton	34.0 kg
Massa com risers	38050.0 ton	32.9 kg

Lembrando que a escala utilizada foi de 1:105.

A Tabela 5 apresenta os dados relevantes para a elaboração dos ensaios com correnteza. O equacionamento do modelo numérico de força de correnteza foi apresentado no item 3.1.13. No entanto, alguns desses valores foram alterados para obtenção dos resultados numéricos compatíveis, já que alguns efeitos viscosos que podem ter ocorrido durante o ensaio, não são considerados no modelo numérico do TPN. Essa discussão será retomada na conclusão dos resultados experimentais e na conclusão dos resultados numéricos.

Tabela 5 Dados utilizados nos ensaios de correnteza

	Escala Real	Escala Modelo
Área Lateral Projetada	1664.0 m ²	1509.3 cm ²
Centro de Pressão (Altura em Relação a Quilha)	9.8 m	9.3 cm
Coefficiente de arrasto	1.42 *	1.42 *

*Dado obtido na referência [8] .

5.4. SISTEMA DE COORDENADAS DO MODELO

As figuras seguintes apresentam o sistema local de coordenadas utilizado nas análises. Como observado, esse sistema foi posicionado na quilha e no centro longitudinal e transversal da plataforma. Para as análises com o WAMIT® a plataforma foi disposta de maneira que o sistema de coordenadas global ficasse posicionado no seu centro de gravidade. Já para as análises experimentais e com o TPN o sistema global ficou posicionado na linha d'água.

As figuras apresentadas dizem respeito à malha numérica gerada para execução das análises com o WAMIT®. Para essas análises foram utilizadas 1261 equações (modelo *higher-order*) com o modelo em dupla simetria para a convergência dos resultados numéricos. As análises foram feitas considerando profundidade infinita.

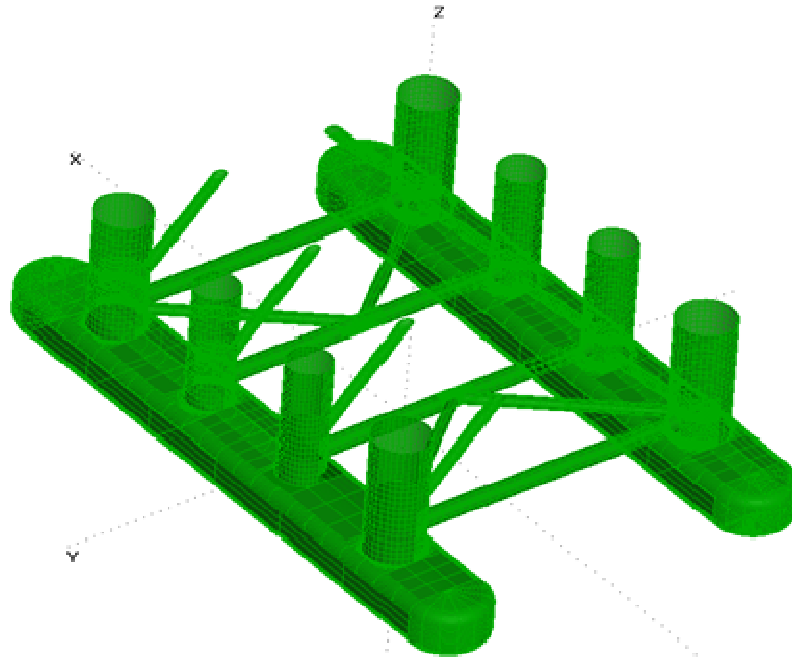


Figura 36 Visualização do eixo de coordenadas da plataforma (malha gerada para as simulações numéricas no TPN)

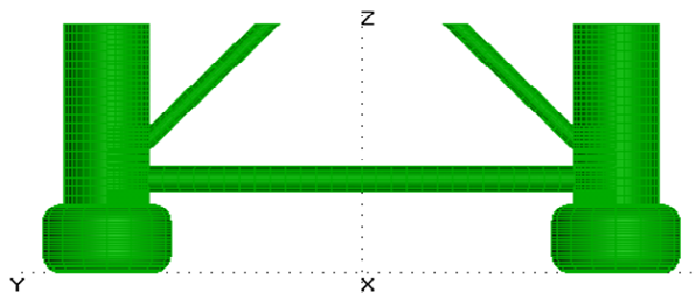


Figura 37 Eixo de coordenadas, vista frontal

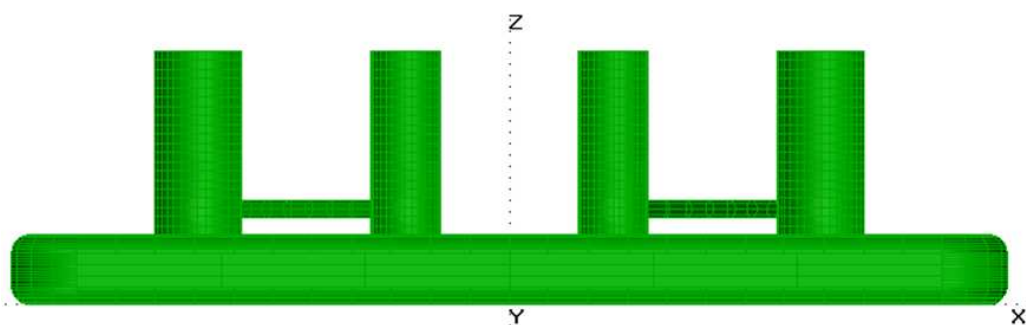


Figura 38 Eixo de coordenadas, vista lateral

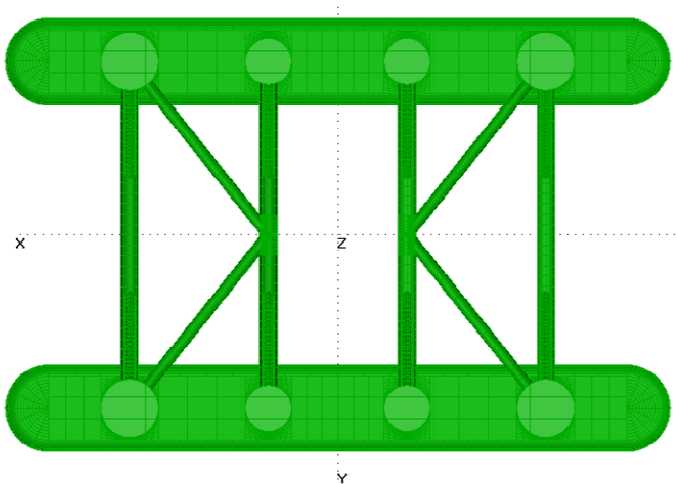


Figura 39 Eixo de coordenadas, vista superior

5.5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AMARRAÇÃO

O sistema de amarração foi simplificado, adotando-se uma configuração passível de reprodução em escala reduzida. Para tanto, adotou-se um conjunto de quatro molas horizontais, com um pequeno ângulo em relação à direção de incidência das ondas e da correnteza, com restauração suficiente para garantir movimentos compatíveis com os fundos de escala dos transdutores de deslocamento e de ângulos. Portanto, a rigidez da mola foi determinada, com base na estimativa de todas as forças atuantes no sistema e no limite operacional do equipamento óptico de obtenção de movimentos. Além disso, o TPN também foi utilizado para auxiliar na estimativa da rigidez da mola, com análises preliminares para avaliação dos movimentos do modelo. As linhas em vermelho da Figura 40 mostram o esquema em que as molas foram dispostas.

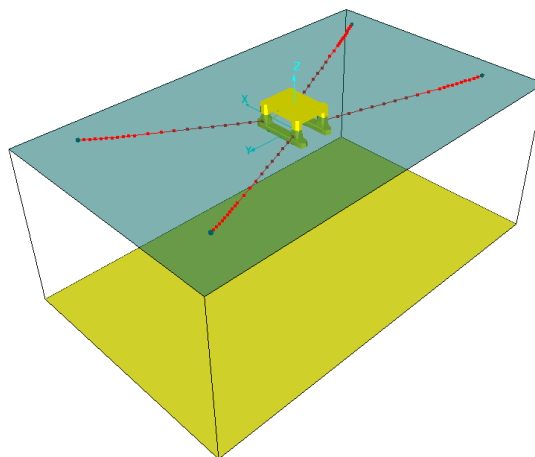


Figura 40 Configuração do sistema de amarração

Além das molas, cada linha de amarração é composta por um trecho de cabo com grande rigidez (considerado inextensível em relação à rigidez da mola), para possibilitar a montagem e calibração da pré-tração do sistema.

Ainda com relação ao dimensionamento da amarração simplificada, foram consideradas molas de comprimento e alongamento suficiente para garantir uma condição de operação sempre em tração, ou seja, para que mesmo nos extremos de deriva da unidade nunca fosse permitido o “fechamento” dessas molas.

Na Tabela 6 são apresentados os comprimentos, tanto da mola quanto do cabo inextensível, de cada uma das linhas de amarração utilizadas nos ensaios. Vale destacar, ainda, que nos ensaios com a presença de linhas de produção foi considerado o passeio estático do modelo devido ao desbalanceamento de forças causado pelos *riser*. Os valores são apresentados na escala real e na escala do modelo.

Tabela 6 Composição das linhas de amarração

Amarração	Comprimento Escala Real (m)		Comprimento Escala Modelo (mm)		Pré-Tração Escala Real (kN)		Pré-Tração Escala Modelo (g)	
	Cabo	Mola	Cabo	Mola	Sem risers	Com risers	Sem risers	Com risers
Linha 1	217.4	12.4	2070.0	118.0	3917.4	6097.9	345.0	537.0
Linha 2	218.8	12.3	2083.5	117.5	3872.5	6064.3	341.0	534.0
Linha 3	214.0	12.3	2038.5	117.5	3929.0	1841.4	346.0	162.1
Linha 4	221.4	12.4	2108.5	118.5	3860.0	1763.7	339.9	155.3

A Tabela 7 apresenta as características físicas da mola utilizada nos ensaios. Novamente os valores são apresentados na escala real e na escala do modelo.

Tabela 7 Características físicas das molas

	Escala Real	Escala Modelo
Diâmetro	2.100 m	2.000 cm
Rigidez axial	661.982 kN	0.572 N
Rigidez axial	5.446 tonf/m	0.494 kgf/m
Peso linear	25.000 kN/m	2.268 N/m

5.6. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE *RISERS*

Assim como foi comentado, em parte dos ensaios foram introduzidos dutos de borracha com a finalidade de emular o efeito equivalente à presença de *risers*. No total foram utilizadas quatro linhas, com efeito hidrodinâmico equivalente a 36 *risers* na escala real, sendo que a equivalência foi obtida pela equivalência da área composta pelos diâmetros hidrodinâmicos dos *risers* na escala real e do modelo. Vale salientar que, por se tratar de um estudo comparativo, os *risers* aqui descritos não representam estruturalmente um caso real. Optou-se por um modelo que fosse passível de reprodução nos tanques de provas físico e numérico.

Além disso, uma linha mais rígida de *riser* também foi incorporada ao modelo, na qual foi instalada uma célula de carga para possibilitar a obtenção dos níveis de tração devidos aos movimentos impostos pela unidade. A Figura 41, retirada do PREA3D, ilustra essa configuração de *risers*.

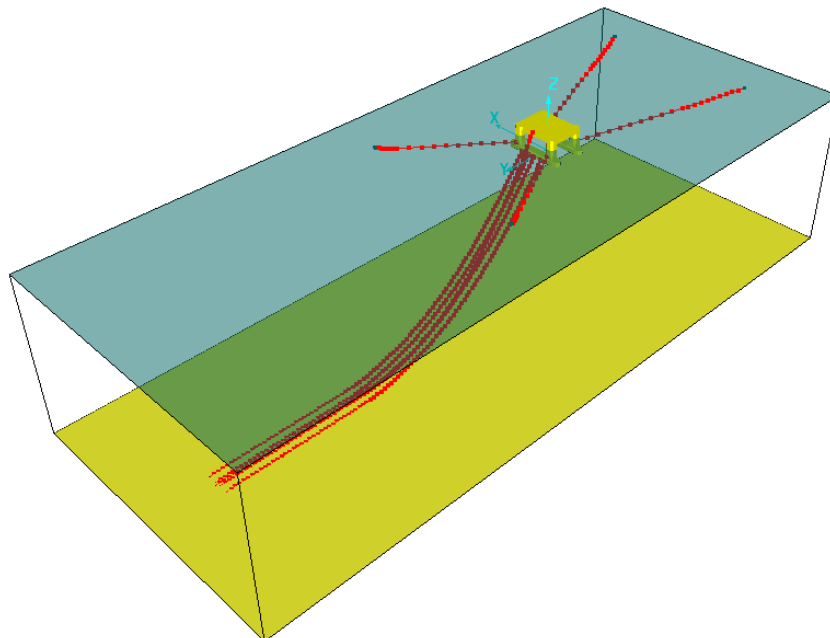


Figura 41 Arranjo dos *risers* no modelo do TPN

A Figura 42 e a Figura 43 apresentam imagens da configuração dos *risers* nos experimentos.

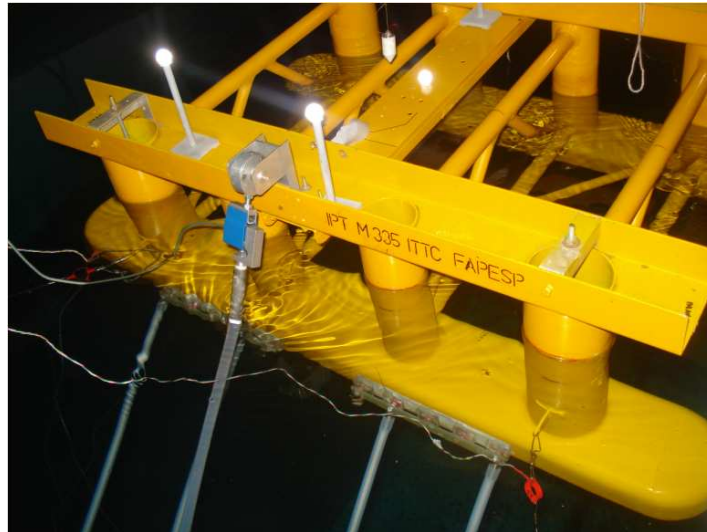


Figura 42 Saída dos *risers* no modelo do ensaio

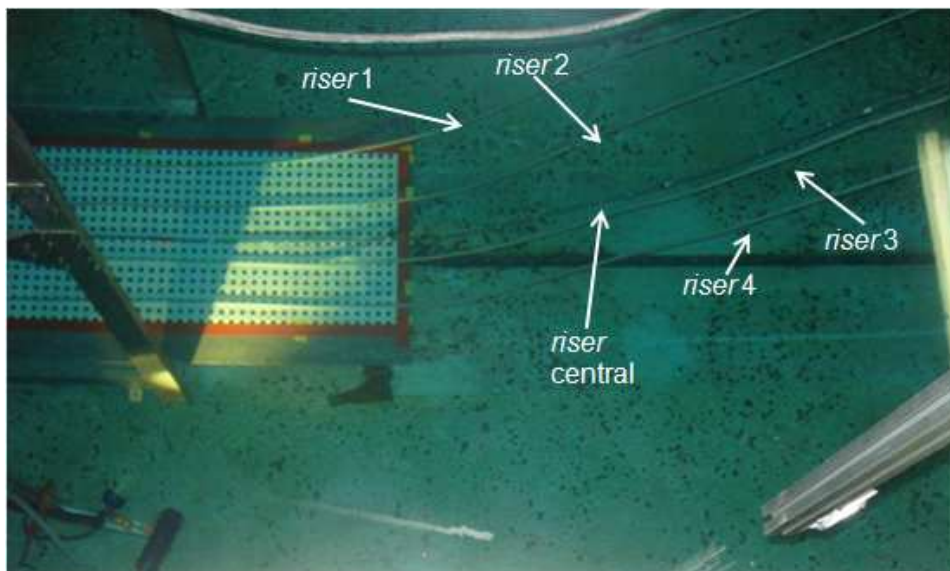


Figura 43 Foto do arranjo dos *risers* no ensaio

A Figura 44 apresenta uma imagem de câmera de vídeo submersa, com a região do TDP dos *risers* utilizados.

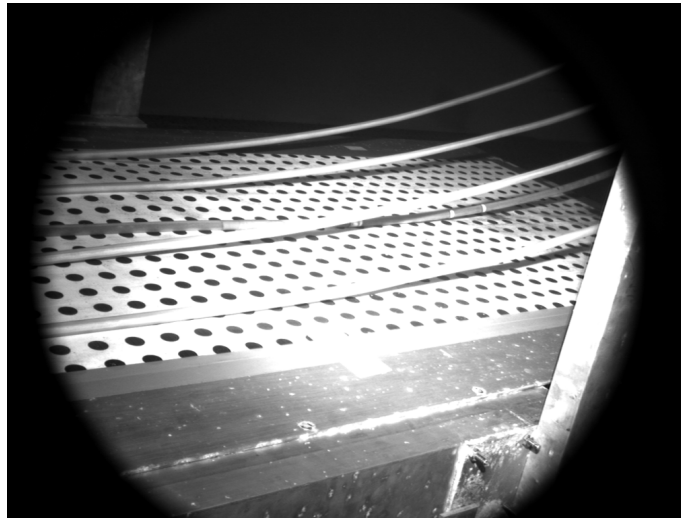


Figura 44 Foto submersa do arranjo dos *risers* no ensaio

A Tabela 8 apresenta as características físicas das linhas de *riser* utilizadas no ensaio. Novamente, esses parâmetros são apresentados nas escala real e do modelo (1:105). A Tabela 9 apresenta os dados de modelagem da linha, sendo a profundidade de lançamento dos *risers* 315 metros. O ponto de conexão dos *risers* fica a 5.25 metros da quilha enquanto do *riser* instrumentado fica 50.4 metros (ponto fora da água devido à célula de carga)

Tabela 8 Características físicas dos *risers*

Características	<i>Risers</i>		<i>Riser Instrumentado</i>	
	Escala Real	Escala Modelo	Escala Real	Escala Modelo
Diâmetro externo	1.470 m	14.000 mm	1.470 m	14.000 mm
Rigidez axial	604280.250 kN	522.000 N	567815.060 kN	490.500 N
Rigidez flexional	167.450 kN.m ²	13.120 N.mm ²	167.450 kN.m ²	13.120 N.mm ²
Peso linear emerso	25.150 kN/m	2.281 N/m	19.860 kN/m	1.801 N/m
Peso linear imerso	10.150 kN/m	0.921 N/m	3.100 kN/m	0.281 N/m
C_M	2.000	2.000	2.000	2.000
C_D	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabela 9 Dados de modelagem dos *riser* (escala real)

Risers	Ângulo de Topo (graus)	Pré-Tração (kN)	Distância Horizontal (m)
Riser 1	56.0	2349.2	709.9
Riser 2	55.1	2437.2	709.9
Riser instrumentado	62.3	6329.3	903.4
Riser 3	56.4	2326.2	709.9
Riser 4	55.5	2317.0	709.9
Soma das Pré-Trações		15758.9 kN	
		1606.4 ton	
Deslocamento do Modelo		39354.0 ton	
% em Relação ao Deslocamento		4.1%	

A Tabela 9 também apresenta a somatória das pré-trações dos *risers*, que totalizam 1606.4 toneladas. Esse valor representa 4.1% da massa da plataforma.

Para tentar minimizar os erros existentes na comparação numérico-experimental, foram consideradas no modelo numérico das linhas as suas respectivas tampas, que foram utilizadas para evitar que os *risers* ficassem cheios de água. As massas lineares dessas tampas, que foram confeccionadas em aço, bem como os respectivos comprimentos estão apresentados na Tabela 10. Também nesta tabela é apresentado o comprimento e a massa linear da célula de carga e seus conectores.



Figura 45 Detalhe do topo dos *risers* utilizados no ensaio

Tabela 10 Composição dos *risers* na escala real

Risers	Comprimento (m)	Comprimento tampa / célula (m)	Peso Linear tampa / célula (kN/m)
Riser 1	808.50	2.63	83.50
Riser 2	805.46	3.15	77.15
Riser instrumentado	845.25	14.70	147.86
Riser 3	809.13	2.94	78.03
Riser 5	808.92	2.21	78.28

5.7. CONDIÇÕES AMBIENTAIS ENSAIADAS

Os ensaios no tanque de provas do IPT foram realizados com ondas e correnteza⁶. Foram realizadas doze ondas regulares e duas ondas irregulares, além de duas ondas transientes. As ondas foram calibradas pelo IPT conforme as especificações que foram adotadas na fase de planejamento do ensaio. Essas especificações serão apresentadas mais adiante. Em todos os casos as ondas foram ensaiadas para apenas um aproamento, incidência de través (*beam sea*). A incidência das condições ambientais foi apresentada na Figura 28, na Figura 29 e na Figura 30.

5.7.1. Onda irregular (mar)

Foram realizadas nos ensaios duas ondas irregulares, cujas características estão apresentadas na Tabela 11. Essas ondas foram escolhidas com base em três critérios principais: limites operacionais do tanque do IPT, proximidade dos parâmetros com os do ensaio realizado em 2003 e, finalmente, parâmetros próximos dos mares verificados na Baía de Campos.

A duração das ondas geradas correspondeu a 3 horas de mar na escala real. Esse valor é usualmente utilizado nesse tipo de análise, pois é um tempo suficiente para obtenção de estatísticas confiáveis. Ainda, com intuito de obter estatísticas que represente bem os casos estudados, foram utilizadas duas sementes aleatórias diferentes para geração dos mares. Com a comparação das estatísticas das duas sementes, pode-se verificar a ergodicidade das mesmas.

As ondas irregulares, apresentadas na Tabela 11, foram geradas com e sem correnteza. Como a correnteza é gerada com o movimento do carro dinamométrico sobre o tanque, as ondas com correnteza devem ser dimensionadas para ter frequência de encontro idêntica nos dois casos. Portanto, no caso da onda irregular 1 são necessárias duas ondas: uma com o período de pico (T_p) de 11.1 segundos, para o caso sem correnteza e outra com o período maior no caso com correnteza, de tal forma que, com o movimento do carro, tenha o mesmo período de encontro do caso sem correnteza. Isso vale também para a onda irregular 2.

⁶ Conforme mencionado, a correnteza no tanque do IPT é gerada com o movimento do carro dinamométrico sobre o tanque.

Tabela 11 Ondas irregulares utilizadas nos ensaios

Onda	Tp (s)	Hs (m)	Espectro	Gama	Alpha
Irregular 1	11.36	4.84	Jonswap	2.55467	0.00521
Irregular 2	15.60	6.36	Jonswap	2.50377	0.00255

Os dados da tabela estão apresentados na escala real.

5.7.2. Onda regular

Assim como explanado no item anterior, foram requisitadas no ensaio 12 ondas regulares, com e sem correnteza, o que resulta em 24 condições de ensaio. As características dessas ondas estão apresentadas na Tabela 12.

Essas ondas foram escolhidas, a fim de obter uma boa delineação do RAO do modelo. Foi respeitado também o limite operacional do tanque, o qual não gera ondas com períodos maiores que 30 segundos e menores que 8 segundos, na escala de 1:105.

Tabela 12 Características da linha utilizada para amarração

Onda	H _R (m)	T _R (s)
Regular 1	1.0	8.0
Regular 2	1.5	10.0
Regular 3	2.0	12.0
Regular 4	3.0	14.0
Regular 5	5.0	20.0
Regular 6	5.0	21.0
Regular 7	6.0	22.0
Regular 8	7.0	23.0
Regular 9	8.0	24.0
Regular 10	8.0	25.0
Regular 11	8.0	26.0
Regular 12	8.0	30.0

Os dados da tabela estão apresentados na escala real. “H_R” corresponde à altura da onda regular e “T_R” ao período da onda regular.

5.7.3. Onda transiente

Além das ondas regulares, que tem o intuito de obter os RAOs do modelo, foram geradas ondas transientes para a definição das curvas de resposta da unidade. Em uma análise no domínio da frequência, as ondas transientes têm energia em uma banda de frequência mais larga, ou seja, com uma única onda é possível avaliar a resposta (RAO) do modelo, em uma faixa grande de frequências. A Figura 46 compara um espectro de mar com um espectro obtido a partir de uma onda transiente. Como é possível observar, a faixa de período em que existe energia na onda transiente é maior que no mar.

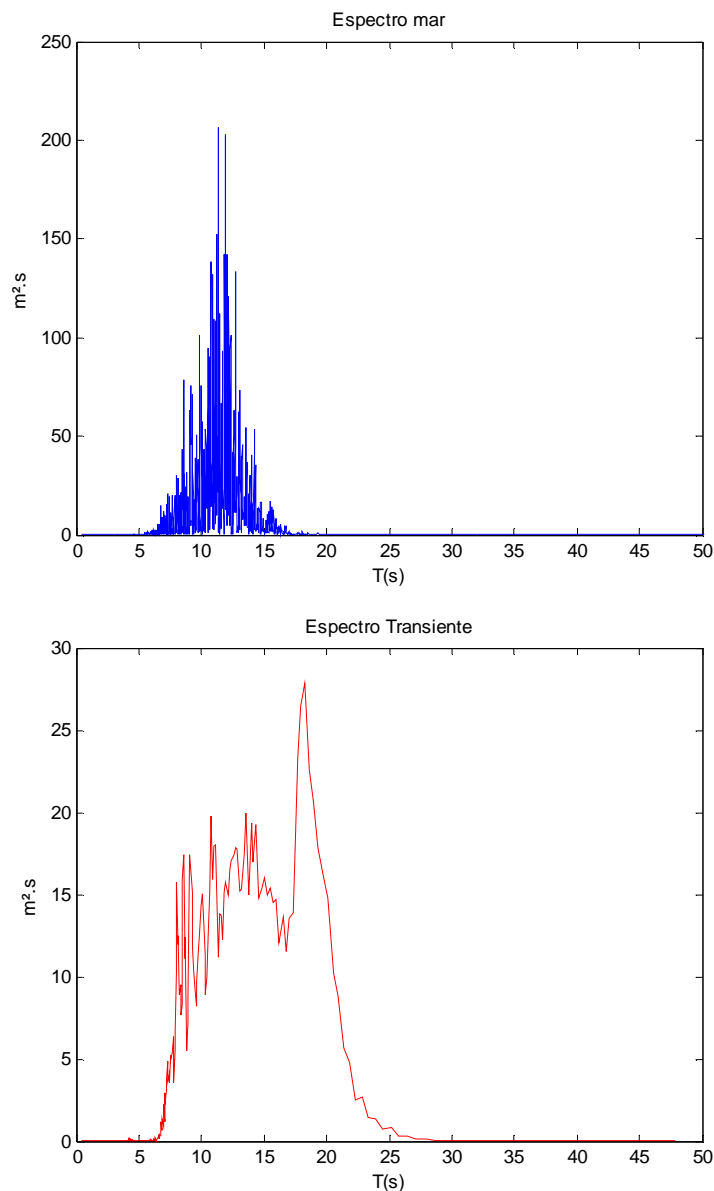


Figura 46 Comparação dos espectros de mar e de onda transiente

Foram geradas duas ondas transientes, uma que contempla a região de períodos baixos e outra a de períodos altos. A onda transiente da Figura 46 abrange os períodos baixos do ensaio, de 8 a 20 segundos. A Figura 47 apresenta o espectro de potência da onda transiente longa, que tem energia significativa entra os períodos de 15 a 30 segundos.

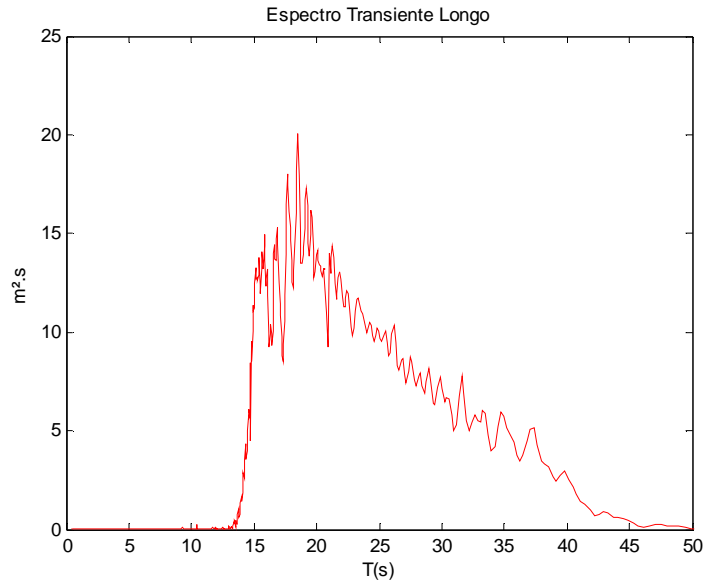


Figura 47 Espectro da onda transiente longa

5.7.4. Correnteza

Todas as ondas apresentadas, com exceção das transientes, foram geradas com e sem correnteza. O valor da velocidade de correnteza, que corresponde à velocidade do carro dinamométrico, foi de 0.2 m/s (escala do tanque). Essa velocidade corresponde a pouco mais de 2 m/s na escala real⁷, que significa a um valor viável de ocorrer na natureza, mas somente em casos extremos. Este valor alto foi escolhido, com a finalidade dos *risers* exercerem uma influência significativa na dinâmica do modelo.

Como comentado, a geração de ondas nos casos sem correnteza tem que ser diferente dos casos com correnteza, pois a frequência de encontro da onda com o modelo deve ser a mesma nos dois casos.

⁷ Nesse caso foi mantida a escala de Froude. Conforme discutido no item 3.2 os regimes de turbulência são diferentes na escala real e do modelo, já que os números de Reynolds não são os mesmos.

A referência [9] apresenta um texto sobre a interação de ondas e correnteza. A frequência de encontro de ondas colineares com correnteza é dada por:

$$\omega_e = \omega + Uk \tag{5.1}$$

Onde ω_e é a frequência de encontro e U a velocidade da correnteza, positiva na direção da propagação da onda. k é o número de onda dado por:

$$k = \omega^2 / g \tag{5.2}$$

No caso do presente ensaio o sentido da correnteza é o mesmo sentido da propagação da onda, portanto o seu valor deve ser positivo na formulação 5.1. Como a frequência de encontro deve ser a mesma nos casos com e sem correnteza, o valor da frequência da onda emitida pelo gerador, no caso com correnteza, deve ter uma frequência menor do que a emitida no caso sem correnteza. Com isso, o efeito de correnteza irá gerar uma frequência de encontro igual à frequência da onda gerada no caso sem correnteza.

O texto da referência [9] cita também a influência da correnteza na amplitude da onda. No entanto, esse fenômeno não se aplica para o presente estudo, já que a correnteza não é propriamente gerada e sim induzida pelo movimento do carro dinamométrico. Portanto, não há alterações na amplitude das ondas geradas nos dois casos.

5.7.5. Calibração

Foi necessária a calibração das ondas regulares e irregulares, para a realização dos ensaios no tanque do IPT. Na calibração, são ensaiadas as ondas sem a presença do modelo de plataforma. No lugar do modelo, é colocado um dispositivo que mede a amplitude das ondas, o ondômetro ou *wave-probe*. Esta calibração prévia é fundamental, já que nos ensaios com o modelo, há uma grande reflexão de onda devido ao seu movimento, que torna inviável a obtenção correta da onda que incide sobre o experimento. O critério de aceitação tanto da onda regular quanto da onda irregular foi de 5% de diferença para altura significativa e para o período de pico.

Durante a realização dos ensaios, também há uma constante calibração das condições ambientais. Para isso, foram medidas as características da onda, através da utilização de *wave-probes*, nas seguintes posições: logo após o batedor de ondas; à frente do carro dinamométrico (localizado antes da onda passar pelo modelo); e na lateral do modelo.

5.8. RESULTADOS EXPERIMENTAIS SEM *RISERS*

Tendo todos os dados de entrada calibrados para a correta modelagem do sistema, prosseguiu-se com as comparações dos resultados obtidos experimentalmente. Primeiramente serão apresentados os resultados dos casos sem a presença de *risers*.

Foram feitas seis análises distintas:

- Comparação dos ensaios de decaimento;
- Comparação dos ensaios de obtenção de RAOs (ondas transientes);
- Comparação de séries temporais de ensaios com ondas regulares;
- Comparação de séries temporais de ensaios com ondas regulares mais correnteza;
- Comparação de séries temporais de ensaios com ondas irregulares;
- Comparação de séries temporais de ensaios com ondas irregulares mais correnteza.

5.8.1. Resultados de decaimentos

As primeiras análises experimentais realizadas foram as de decaimento. Os decaimentos consistem em liberar o modelo de uma posição determinada, diferente do equilíbrio, verificando assim o seu amortecimento na frequência natural e o seu período natural de oscilação.

A seguir serão apresentados os resultados das séries temporais de decaimento, bem como as respectivas análises em espectro de potência. As análises de espectro de potência são feitas utilizando a função “*pwelch*” do MATLAB®. Esta função calcula a densidade espectral de potência de uma determinada série temporal, aferindo assim qual são os períodos de potência predominantes na série. Maiores detalhes sobre este procedimentos podem ser encontrados na referência [7] e na referência [9].

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam, respectivamente, a série temporal e o espectro de potência do decaimento obtido a partir do experimento de *sway* sem *risers*.

Em todos os graus de liberdade de interesse foram realizados três ensaios para verificar a aderência entre os resultados obtidos. Com a finalidade de não estender muito esse texto, somente para um dos ensaios foram apresentados os gráficos. No entanto, a Tabela 13 mostra os resultados de período e frequência natural para os três ensaios.

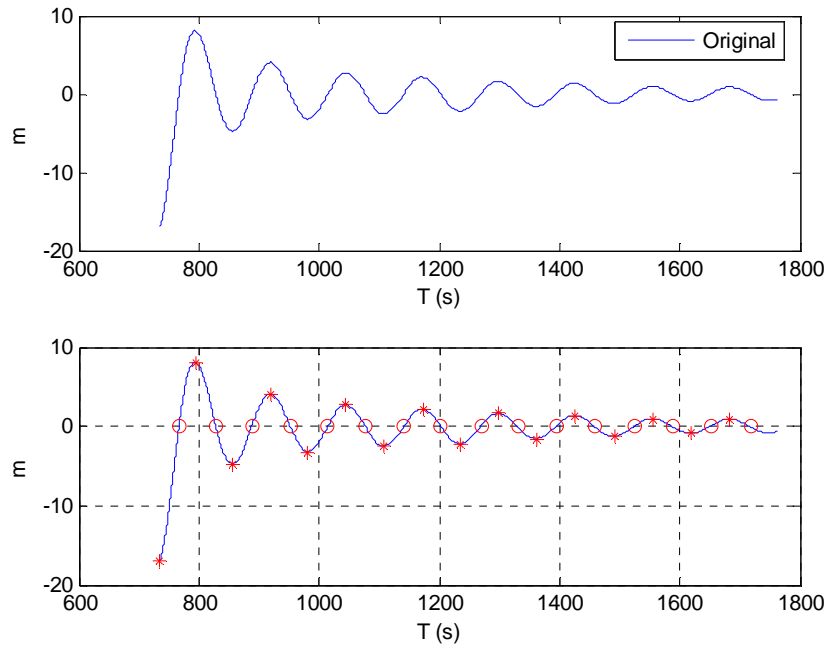


Figura 48 Decaimento de *sway*: ensaio 1 sem *risers*

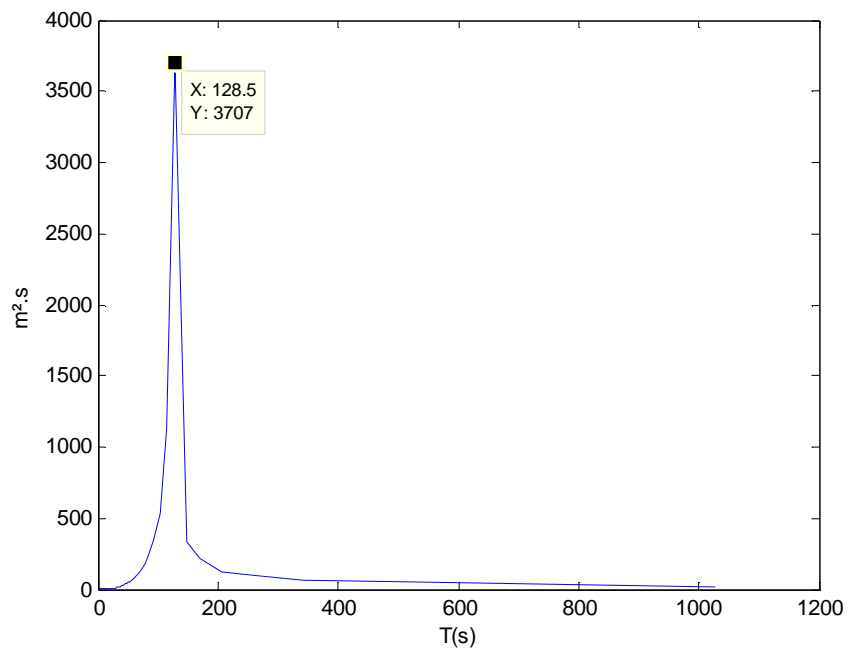


Figura 49 Espectro de potência do decaimento de *sway* 1 sem *risers*

Tabela 13 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de sway sem risers

Ensaio de decaimento	Período Natural Tn (s)	Frequência Natural (rad/s)
Ensaio 1	126.759	0.050
Ensaio 2	126.720	0.050
Ensaio 3	126.386	0.050
Média	126.622	0.050

O resultado de período natural obtido na análise espectral (128.5 segundos) foi um pouco diferente do apresentado na Tabela 13 (126.6 segundos). Isso ocorreu, pois os métodos de avaliação do período são diferentes; como comentado, a Figura 49 apresenta uma análise de espectro de potência e a Tabela 13 apresenta o resultado do cálculo do período através da análise da série temporal apresentada na Figura 48. Nesta última, pode-se observar que a série temporal foi marcada com pontos de máximo e de mínimo e pontos onde a série cruza o eixo das abscissas. Com essa marcação é possível determinar qual o tempo médio que o modelo leva para cruzar duas vezes consecutivas o zero (eixo das abscissas), determinando assim qual o seu período natural. Apesar da diferença, o erro entre as duas metodologias ficou menor 1.5%, o que indica um bom resultado, segundo a referência [7].

A Figura 50 apresenta o gráfico de ponderação do amortecimento, que é obtido através da utilização da função “*polyfit*” do MATLAB®. Os pontos de máximo ou de mínimo, apresentados na Figura 48, são descritos através de uma função polinomial. A *polyfit* acha os coeficientes desta função, que correspondem aos coeficientes de amortecimento linear e quadrático do decaimento. Maiores detalhes sobre este procedimento podem ser encontrados na referência [7] e na referência [9].

O gráfico da Figura 50 apresenta os resultados de um dos ensaios de sway realizados. Além disso, a Tabela 14 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos (em m^{-1}) e linear (em porcentagem do amortecimento crítico), para os três ensaios de decaimento deste grau de liberdade.

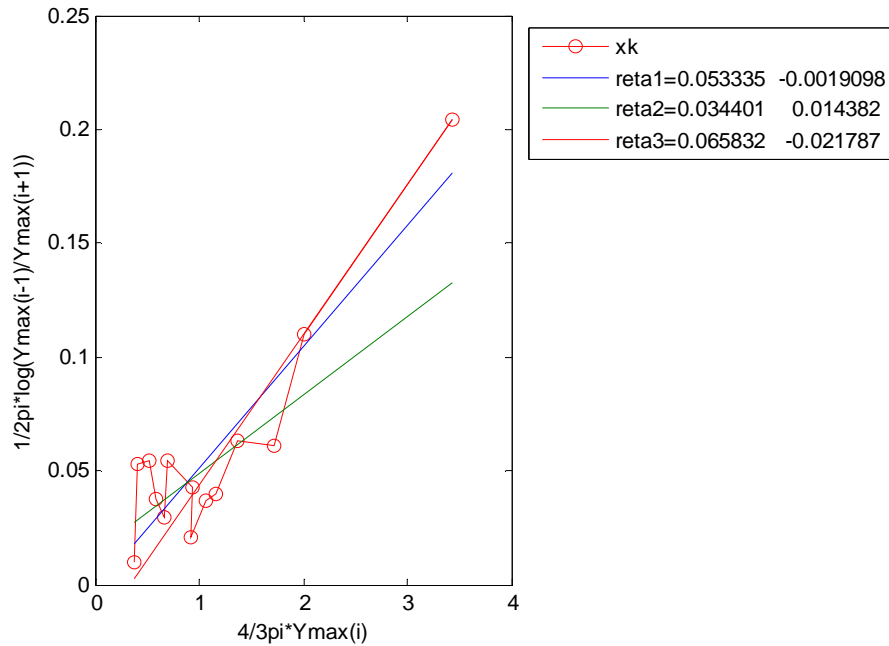


Figura 50 Análise de amortecimento de *sway* 1 sem *risers*

Tabela 14 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *sway* sem *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})
Ensaio 1	-0.190%	0.053	1.440%	0.034	-2.180%	0.066
Ensaio 2	-0.630%	0.057	-0.040%	0.050	0.750%	0.056
Ensaio 3	-0.310%	0.055	1.030%	0.040	1.920%	0.054
Média	-0.377%	0.055	0.810%	0.042	0.163%	0.058

As retas apresentadas na Figura 50 representam os amortecimentos retirados dos ensaios de decaimento, considerando diferentes trechos da série temporal (Figura 48). A reta 1 considera todos os pontos da série temporal, a reta 2 considera somente os pontos finais e a reta 3 considera somente os pontos iniciais. Com essa metodologia é possível diferenciar com melhor precisão quais são os coeficientes lineares e quadráticos da série de decaimento.

No exemplo apresentado, pode-se observar que no começo da série temporal existem grandes amplitudes de movimento, que decaem mais rapidamente do que no final da série. Esse comportamento vem do fato de que no começo da série a velocidade do modelo é bem maior do que no final. Como o amortecimento quadrático é multiplicado pela velocidade

quadrática, (ver item 3.1.10) no começo da série pode-se atribuir mais amortecimento deste tipo ao modelo. Com isso, se for considerado somente os pontos iniciais da série (reta 3) pode-se ter uma estimativa melhor do amortecimento quadrático. De fato, a Tabela 14 mostra resultados de amortecimento quadrático maior para as análises com a reta 3. Esse comportamento só ocorre nos graus de liberdade em que o movimento decai rapidamente nos primeiros ciclos, o que é o caso do decaimento de *sway*.

Outra observação a se fazer sobre a Tabela 14 é o fato de existirem coeficientes negativos, que são ocasionados pelo fato da reta de ponderação do amortecimento cruzar o eixo da ordenada em um valor negativo. Isso ocorre, pois há uma grande dispersão dos pontos calculados pela teoria de amortecimento utilizada, quando se considera certos trechos da série de decaimento. Esse valor não tem sentido físico (pelo menos para termos da diagonal principal da matriz de amortecimento), pois seria como algo excitando o modelo, o que não acontece no ensaio de decaimento.

A Figura 51 e a Figura 52 apresentam, respectivamente, a série temporal e o espectro de potência do decaimento obtido no experimento de *heave* sem *risers*. A Tabela 15 mostra os resultados de período e frequência natural dos três ensaios realizados.

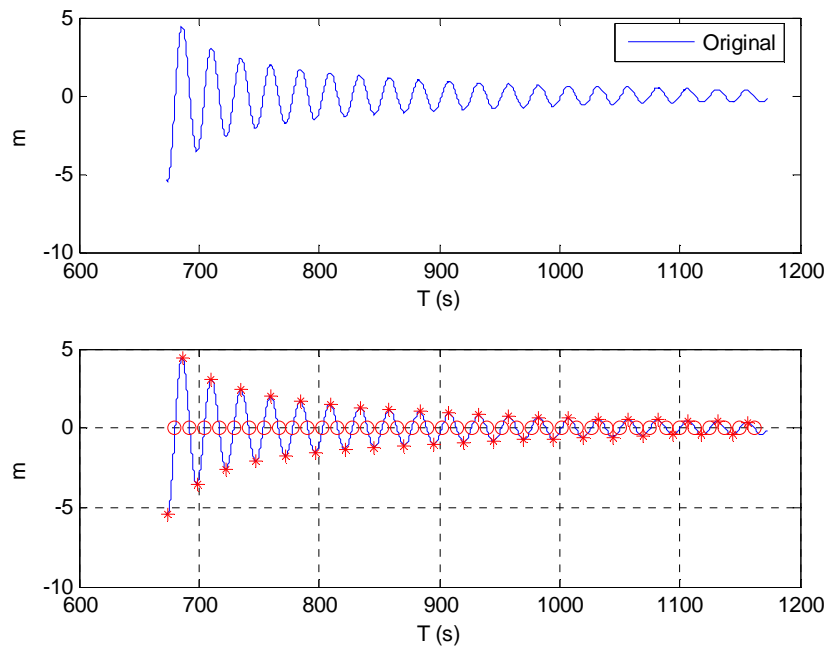


Figura 51 Decaimento de *heave*: ensaio 1 sem *risers*

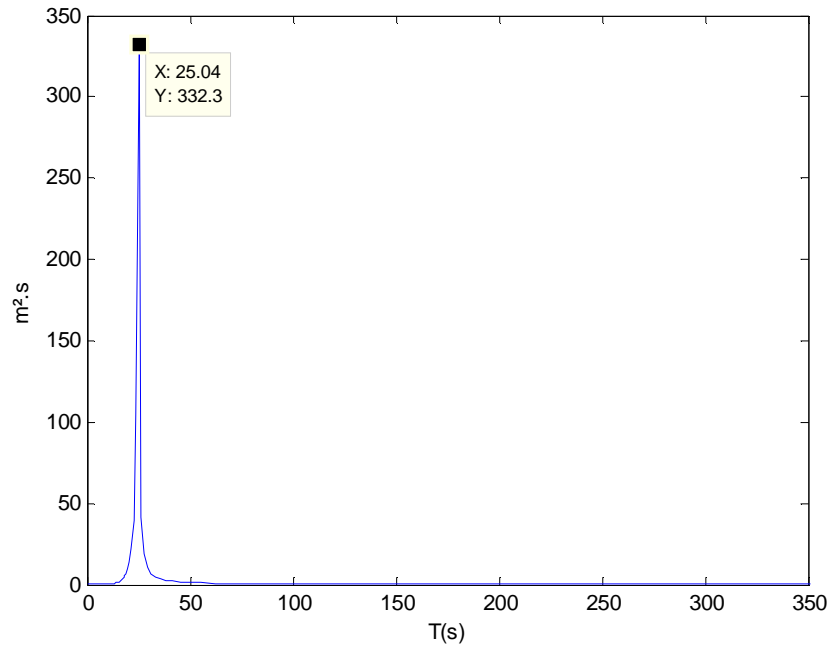


Figura 52 Espectro de potência do decaimento de *heave* 1 sem *risers*

Tabela 15 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de *heave* sem *risers*

Ensaio de decaimento	Período Natural Tn (s)	Frequência Natural (rad/s)
Ensaio 1	24.726	0.254
Ensaio 2	24.756	0.254
Ensaio 3	24.782	0.254
Média	24.755	0.254

Novamente é possível observar uma pequena diferença (inferior a 1%) entre os resultados de período natural obtidos a partir da análise ilustrada na Figura 52 e consolidada na Tabela 15.

A Figura 53 apresenta o gráfico de ponderação de amortecimento do decaimento de *heave*. A Tabela 16 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos e linear para os três ensaios de decaimento de *heave* realizados.

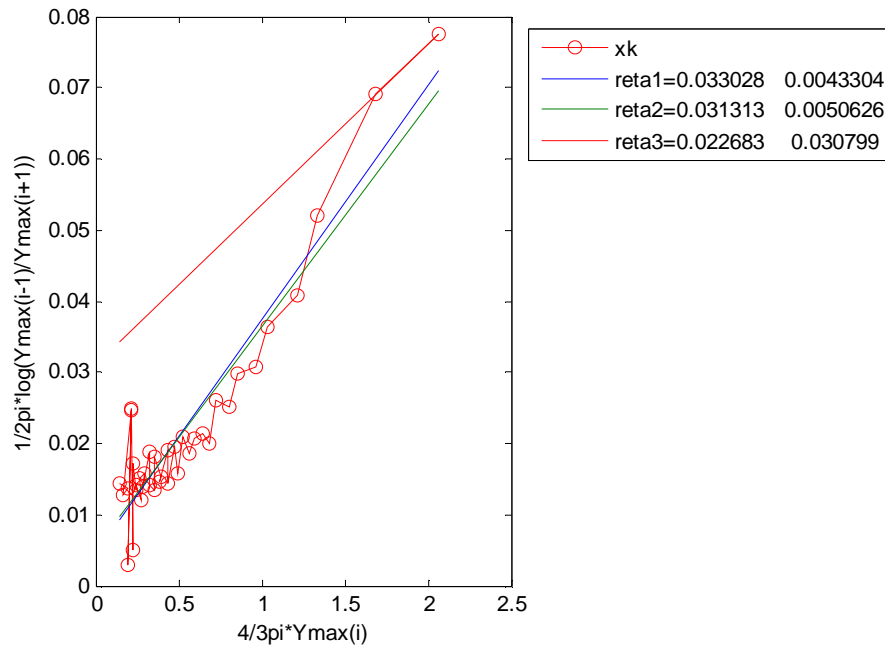


Figura 53 Análise de amortecimento de *heave* 1 sem *risers*

Tabela 16 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *heave* sem *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})
Ensaio 1	0.430%	0.033	0.510%	0.031	3.080%	0.023
Ensaio 2	0.430%	0.032	0.500%	0.030	0.620%	0.033
Ensaio 3	0.260%	0.036	0.320%	0.034	3.240%	0.024
Média	0.373%	0.033	0.443%	0.032	2.313%	0.027

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam, respectivamente, a série temporal e o espectro de potência do decaimento obtido no experimento de *roll* sem *risers*. A Tabela 17 mostra os resultados de período e frequência natural dos três ensaios realizados.

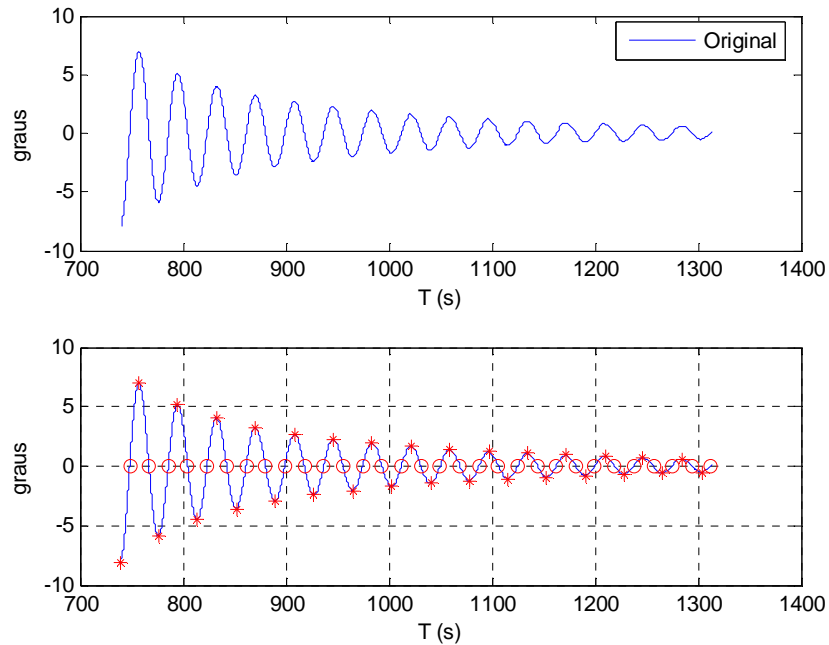


Figura 54 Decaimento de *roll*: ensaio 1 sem *risers*

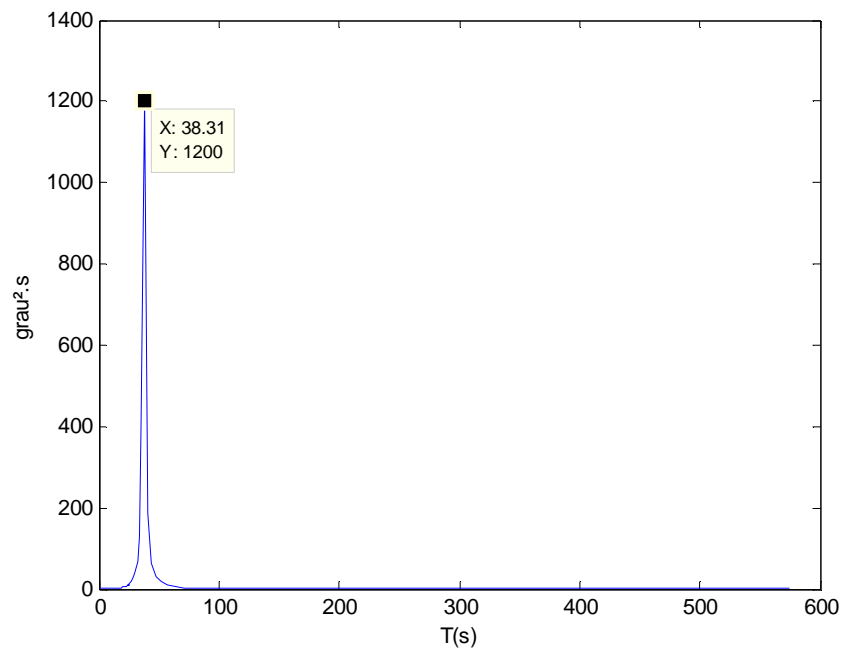


Figura 55 Espectro de potência do decaimento de *roll* 1 sem *risers*

Tabela 17 Resultados de período e freqüência natural dos ensaios de *roll* sem *risers*

Ensaio de decaimento	Período Natural Tn (s)	Freqüência Natural (rad/s)
Ensaio 1	37.595	0.167
Ensaio 2	37.601	0.167
Ensaio 3	37.668	0.167
Média	37.621	0.167

O decaimento de *roll* foi o que apresentou maior diferença entre o período natural obtido pelo espectro de potência (38.31 segundos) e pela análise da série temporal (37.62 segundos). Mesmo assim, a diferença foi pequena, inferior a 1.85% de erro.

Em todos os ensaios de decaimento, houve uma boa aderência entre os valores de período natural obtidos nas diferentes repetições realizadas (Tabela 13, Tabela 15 e Tabela 17).

A Figura 56 apresenta o gráfico de ponderação de amortecimento do decaimento de *roll*. A Tabela 18 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos e linear para os três ensaios de decaimento de *roll* realizados.

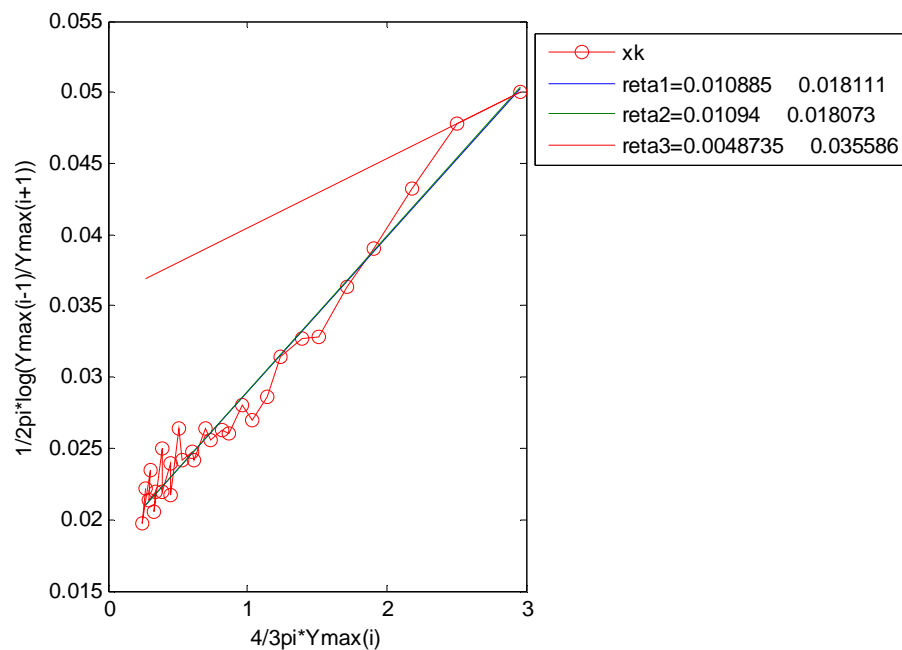
**Figura 56 Análise de amortecimento de *roll* 1 sem *risers***

Tabela 18 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *roll* sem *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})
Ensaio 1	1.810%	0.011	1.810%	0.011	3.560%	0.005
Ensaio 2	1.750%	0.012	1.760%	0.012	4.480%	0.004
Ensaio 3	1.880%	0.011	1.860%	0.011	4.740%	0.001
Média	1.813%	0.011	1.810%	0.011	4.260%	0.003

O decaimento de roll foi o que apresentou menores coeficientes de amortecimento quadráticos. Em geral, observou-se que coeficientes quadráticos com valores menores fazem com que a reta 3 (ver Figura 56) se distancie das demais. Isso ocorre, pois com a consideração somente dos pontos iniciais não é possível ter uma boa estimativa do amortecimento linear, que é calculado pela inclinação da reta. Esse comportamento pode ser observado também no decaimento de *heave*, apresentado na Figura 53, porém com menor intensidade, já que os coeficientes quadráticos não são tão pequenos.

As análises de coeficientes de amortecimento serviram para dar uma estimativa da ordem de grandeza dos amortecimentos que devem ser utilizados no modelo numérico. É bastante difícil usar exatamente os valores calculados, sendo que foram feitas algumas variações dos valores utilizados, em função dos resultados obtidos, mas sempre tendo como base as tabelas apresentadas.

5.8.2. Resultados de RAO

O RAO – *Response Amplitude Operator* é a função de transferência, resultado da resposta do sistema a diferentes frequências de uma excitação de onda com amplitude unitária.

Os RAOs apresentados a seguir foram obtidos com base em experimentos físicos no tanque de provas do IPT, no caso em que as linhas de *risers* não estavam conectadas ao modelo.

Para cada um dos três graus de liberdade serão apresentados os gráficos de RAO obtidos a partir de ondas regulares, a partir de ondas transientes (curta representando os períodos baixos e longa representando os períodos mais altos). Além disso, nos gráficos são

apresentados também os resultados das análises numéricas obtidas através do aplicativo WAMIT®.

Portanto, a Figura 57, a Figura 58 e a Figura 59 apresentam os gráficos de RAO citados, para os graus de liberdade de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente. As curvas em azul representando o transiente curto vão de, aproximadamente, 8 a 20 segundos, e as do transiente longo vão de, aproximadamente 15 a 28 segundos.

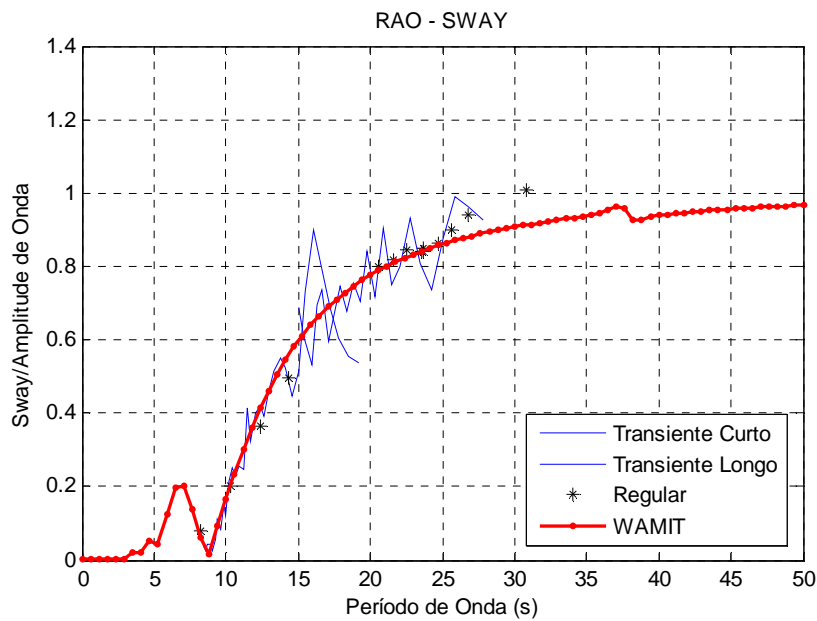


Figura 57 RAO de *sway*

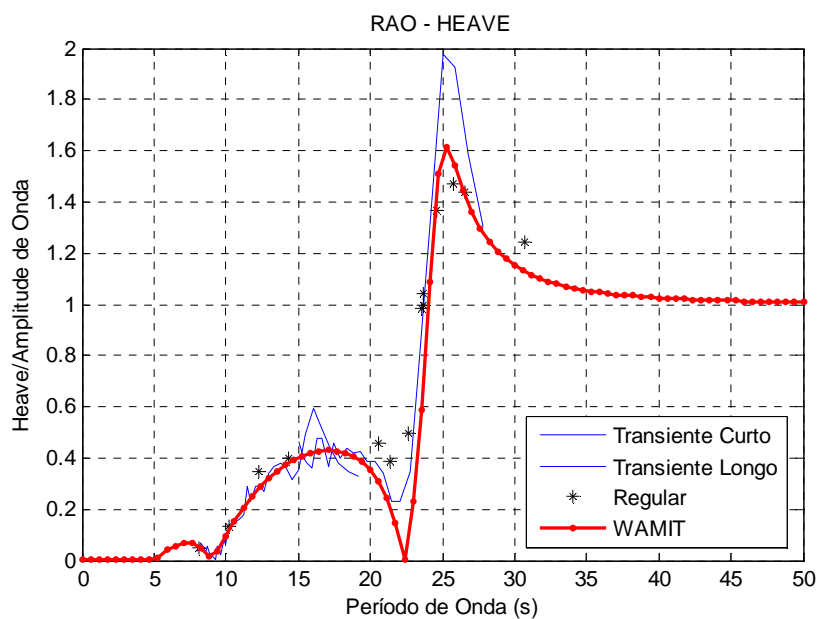


Figura 58 RAO de *heave*

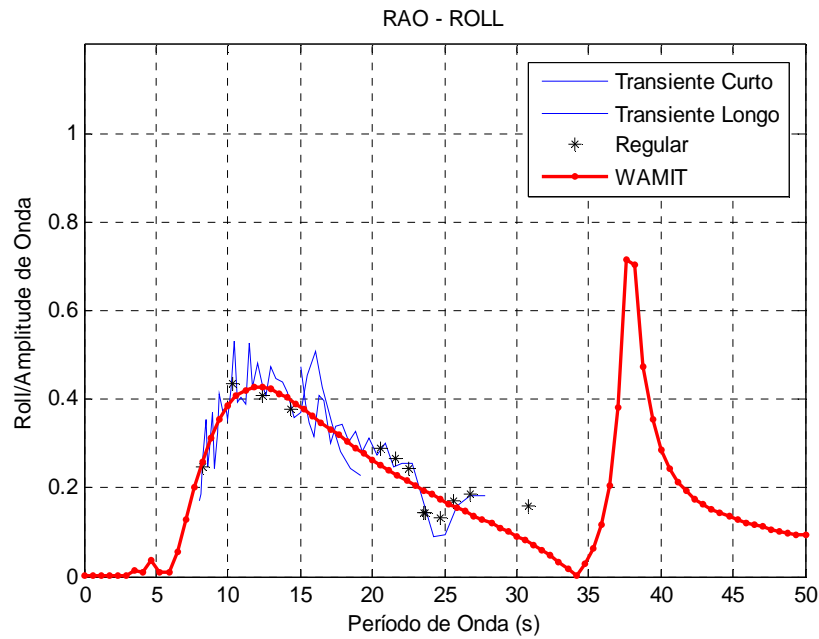


Figura 59 RAO de roll

Em geral os resultados de RAO para os ensaios sem *risers* foram bem reproduzidos pelas análises numéricas com o aplicativo WAMIT®, principalmente para períodos baixos. No entanto, para períodos mais altos (acima de 25 segundos) o WAMIT® apresenta diferenças, que podem ser decorrentes da profundidade do tanque de provas, conforme discutido no item 4.1. A Figura 60 apresenta o resultado do WAMIT® para profundidade de 420 metros na escala real (4 metros na escala do modelo, sendo essa a profundidade do tanque do IPT).

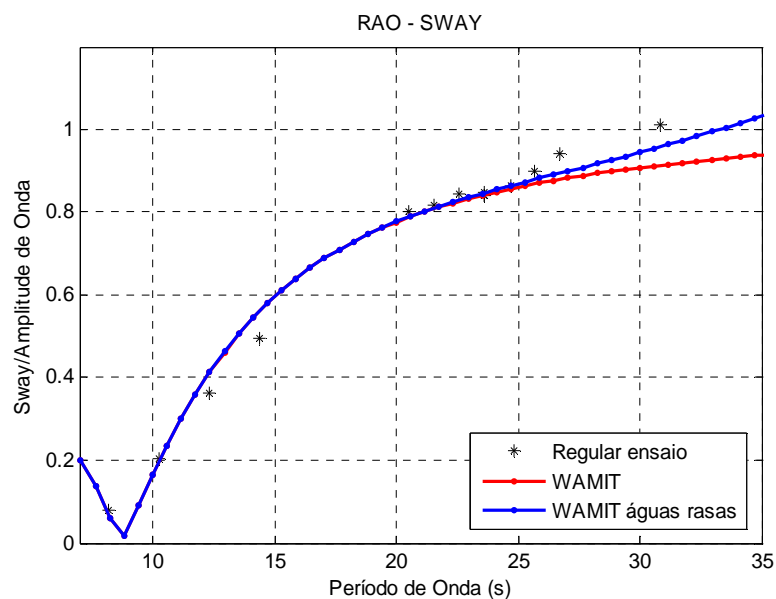


Figura 60 RAO de sway com profundidade finita

Como é possível observar para períodos maiores que 25 segundos existe uma diferença entre os resultados obtidos com a rodada do WAMIT® com profundidade infinita e com águas intermediárias. No entanto, o resultado ainda não ficou igual ao obtido com o ensaio, diferença essa que pode provir da introdução das linhas horizontais que ancoram o modelo. Essa questão será retomada na comparação dos resultados com o TPN (capítulo 6).

Além disso, no tanque de provas não é possível ensaiar ondas com períodos muito maiores que 30 segundos, o que dificulta um pouco as análises, principalmente de *sway* e *roll* que tem altos períodos naturais.

5.8.3. Resultados em ondas regulares

Neste item serão apresentados quais foram as ondas regulares utilizadas nos ensaios sem a presença de *risers* e sem correnteza. A Tabela 19 apresenta as ondas utilizadas para os ensaios em ondas regulares, na escala real e na do modelo. Esses valores puderam ser obtidos através das análises dos dados de calibração de onda fornecidos pelo IPT, no qual são ensaiadas as ondas sem a presença do modelo de plataforma.

Tabela 19 Ondas regulares utilizadas para caso sem *risers* e sem correnteza

Ensaio onda regular	Escala Real		Escala Modelo	
	Período de onda (s)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)	Altura de onda (mm)
Ensaio 1	8.208	1.066	0.801	10.152
Ensaio 2	10.280	1.599	1.003	15.229
Ensaio 3	12.336	2.932	1.204	27.924
Ensaio 4	14.365	3.453	1.402	32.886
Ensaio 5	20.510	5.555	2.002	52.905
Ensaio 6	21.580	5.706	2.106	54.343
Ensaio 7	22.576	5.476	2.203	52.152
Ensaio 8	23.634	7.926	2.306	75.486
Ensaio 9	24.702	8.787	2.411	83.686
Ensaio 10	25.677	9.306	2.506	88.629
Ensaio 11	26.732	9.523	2.609	90.695
Ensaio 12	30.846	8.720	3.010	83.048

Tendo os valores de calibração de onda, juntamente com os valores de amplitude de movimento em cada ensaio, é possível obter os gráficos de RAO apresentados na a Figura 57, a Figura 58 e a Figura 59. A Tabela 20 apresenta os valores destes gráficos em forma de tabela. Como observado, os movimentos lineares (*sway* e *heave*) são adimensionais, ou seja, obtém-se a amplitude de movimento do ensaio e divide-se pela amplitude de onda. Já nos movimentos angulares (*roll*) a unidade apresentada é de grau de movimento, dividido por metro de onda, resultando em uma unidade grau/metro.

Tabela 20 Resposta dos casos sem risers e sem correnteza

Ensaio onda regular	Período de onda (s)	RAO de sway (m/m)	RAO de heave (m/m)	RAO de roll (grau/m)
Ensaio 1	8.208	0.080	0.052	0.249
Ensaio 2	10.280	0.204	0.128	0.435
Ensaio 3	12.336	0.365	0.253	0.407
Ensaio 4	14.365	0.496	0.344	0.376
Ensaio 5	20.510	0.801	0.379	0.290
Ensaio 6	21.580	0.816	0.277	0.268
Ensaio 7	22.576	0.847	0.350	0.245
Ensaio 8	23.634	0.841	0.957	0.143
Ensaio 9	24.702	0.864	1.400	0.133
Ensaio 10	25.677	0.901	1.560	0.170
Ensaio 11	26.732	0.942	1.485	0.186
Ensaio 12	30.846	1.010	1.195	0.160

5.8.4. Resultados em ondas regulares com correnteza

Neste item serão apresentados os RAOs, obtidos a partir de onda regular, com correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo. Juntamente, será feita a comparação dos casos com e sem correnteza, para efeito de averiguação da influência da correnteza nos movimentos do modelo. A Tabela 21 apresenta as ondas utilizadas nestes ensaios.

Tabela 21 Ondas regulares utilizadas para caso sem risers e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Ensaio onda regular	Escala Real U=2.05m/s		Escala Modelo U=0.20m/s	
	Período de onda (s)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)	Altura de onda (cm)
Ensaio 1	8.211	0.969	0.801	0.923
Ensaio 2	10.264	1.619	1.002	1.542
Ensaio 3	12.320	2.381	1.202	2.268
Ensaio 4	14.357	3.281	1.401	3.125
Ensaio 5	20.534	6.276	2.004	5.977
Ensaio 6	21.578	6.002	2.106	5.716
Ensaio 7	22.589	7.532	2.204	7.173
Ensaio 8	23.571	8.692	2.300	8.278
Ensaio 9	24.647	10.190	2.405	9.705
Ensaio 10	25.631	10.910	2.501	10.390
Ensaio 11	26.717	10.340	2.607	9.848
Ensaio 12	30.700	10.410	2.996	9.914

A Figura 61, a Figura 62 e a Figura 63 apresentam as comparações de RAO com e sem correnteza, para *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente. Todos os pontos dos RAOs apresentados foram calculados com a utilização da série temporal da onda obtida no *wave-probe* instalado no carro dinamométrico, portanto já considerando as diferenças de períodos decorrentes do encontro da onda com o carro, como apresentado no item 5.7.4.

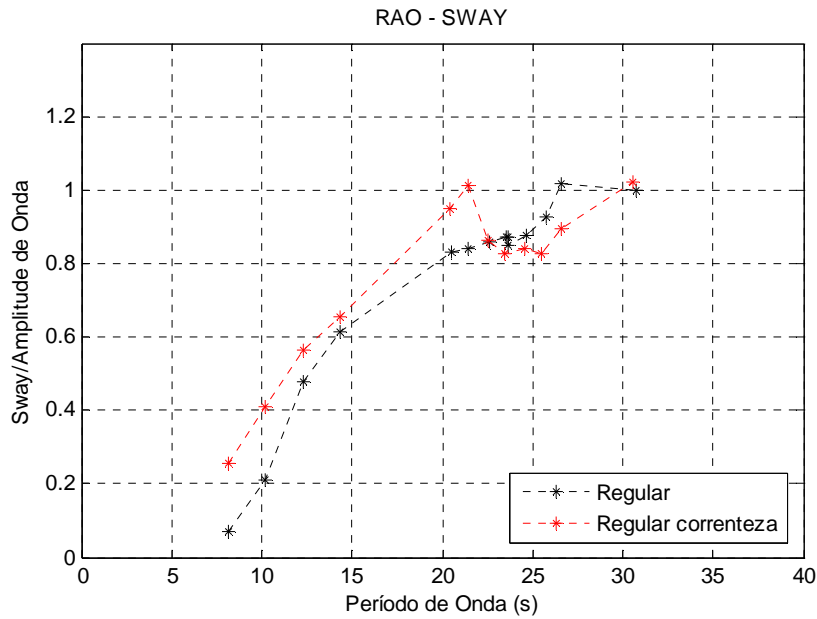


Figura 61 RAO de *sway* com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

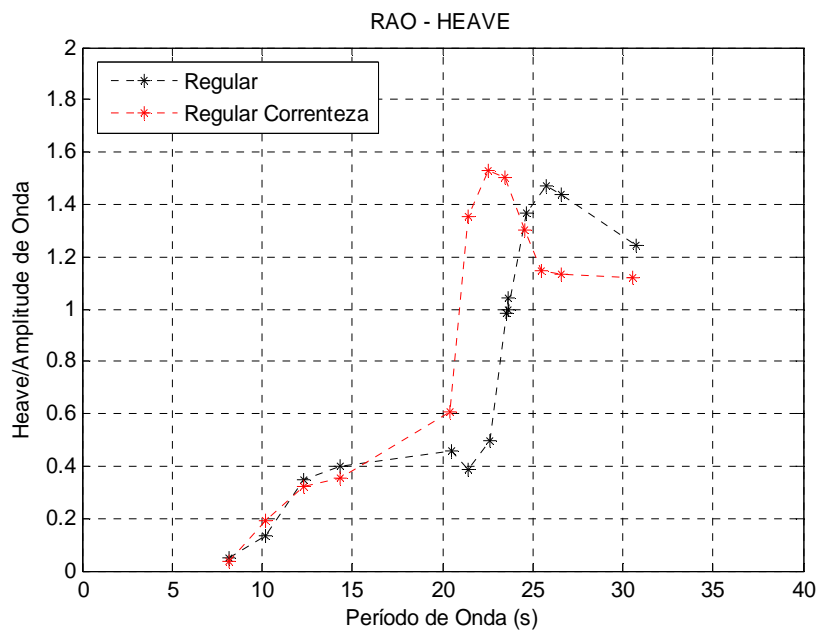


Figura 62 RAO de *heave* com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

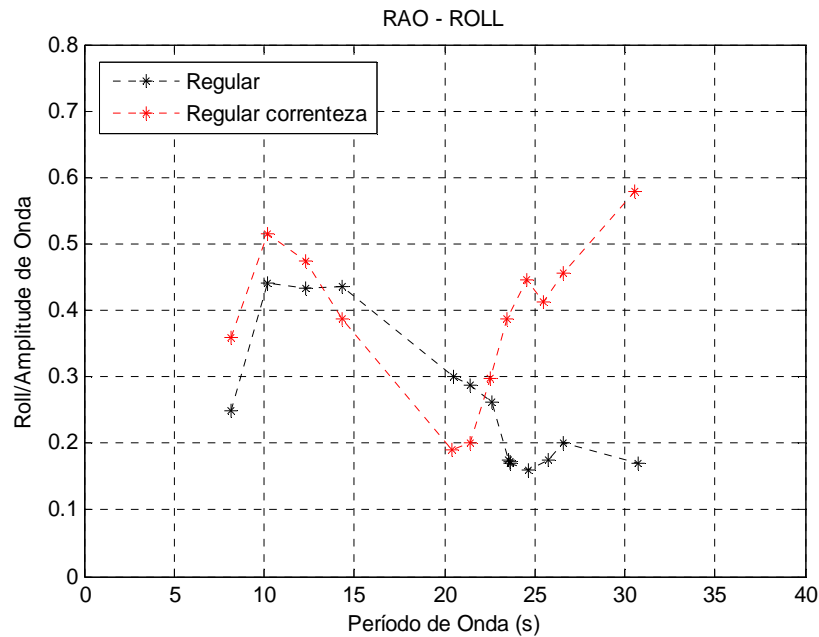


Figura 63 RAO de *roll* com e sem correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Assim como no caso sem correnteza, a Tabela 22 apresenta os valores dos gráficos de RAO em forma de tabela. Os valores de período de onda são os períodos de encontro entre o carro dinamométrico, que gera a correnteza, e a onda incidente. Lembrando que o valor da correnteza para esse ensaio é de 2.05m/s na escala real.

Tabela 22 Resposta dos casos sem *risers* e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Ensaio onda regular	Período de onda (s)	RAO de sway (m/m)	RAO de heave (m/m)	RAO de roll (grau/m)
Ensaio 1	8.211	0.059	0.034	0.379
Ensaio 2	10.264	0.326	0.193	0.514
Ensaio 3	12.320	0.452	0.290	0.441
Ensaio 4	14.357	0.542	0.338	0.387
Ensaio 5	20.534	0.884	0.533	0.154
Ensaio 6	21.578	0.886	1.162	0.155
Ensaio 7	22.589	0.830	1.395	0.250
Ensaio 8	23.571	0.768	1.375	0.343
Ensaio 9	24.647	0.765	1.259	0.363
Ensaio 10	25.631	0.791	1.116	0.329
Ensaio 11	26.717	0.803	1.057	0.377
Ensaio 12	30.700	0.877	1.069	0.615

Como foi observado na comparação dos resultados com e sem correnteza, houve uma significativa diferença na resposta do modelo para os dois casos. No RAO de *sway* parece haver um acoplamento na região do período natural de *heave*, que não foi identificado no caso sem correnteza. De fato, nas análises numéricas no TPN, apresentadas mais adiante, esse comportamento também foi observado.

No RAO de *heave* pode-se notar um deslocamento do pico ressonante para um período um pouco menor. Com essa alteração o ponto de cancelamento⁸ ficou em uma faixa de períodos que não foram ensaiadas. No entanto, foi feito um RAO a partir da onda irregular 2 (apresentada na seção 5.7.1), que tem período de pico perto de 15 segundos. Esse gráfico está apresentado na Figura 64. Essa figura mostra que também há um deslocamento para períodos menores no ponto de cancelamento de *heave*. O mesmo fenômeno parece acontecer no RAO de *roll*, mas neste caso é possível observar o cancelamento próximo de 20 segundos, sendo que no caso sem correnteza este ponto está em 25 segundos.

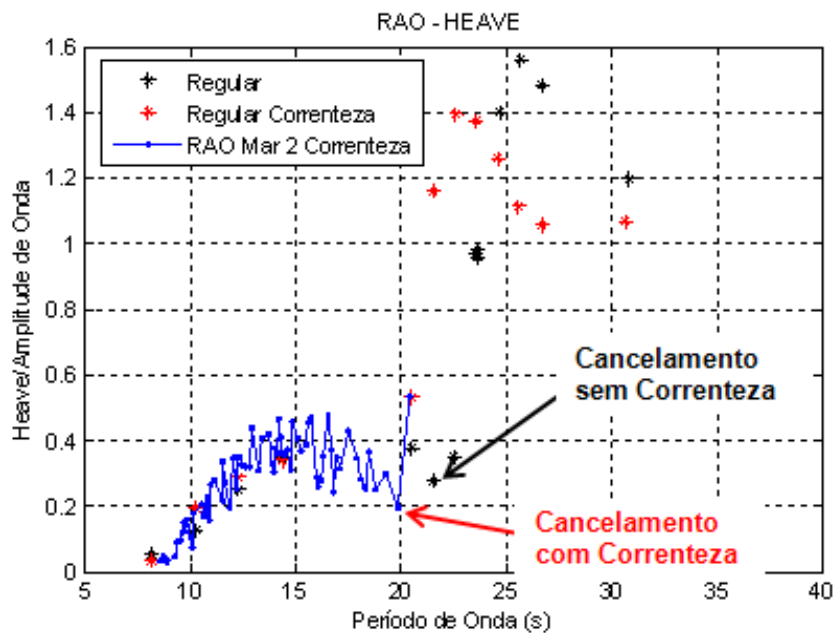


Figura 64 RAO de *Heave* com e sem correnteza, incluindo RAO obtido com a onda irregular 2

⁸ Ponto em que uma onda, de determinado período, tem metade de seu comprimento igual ao tamanho da boca do modelo. Com isso a crista da onda está em uma coluna e o seu cavado em outra, fazendo com que haja uma redução no movimento de *heave*.

Para uma melhor investigação da mudança do período natural de *heave*, foi realizado especificamente para esse grau de liberdade um ensaio de decaimento, mas agora com correnteza. A Figura 65 apresenta a comparação das séries temporais de decaimento de *heave* para os casos com e sem correnteza de 2.05 m/s na escala real. A Figura 66 apresenta o respectivo espectro de potência. Portanto, é possível observar a mesma situação obtida nas análises do RAO, na qual houve uma considerável redução do período natural deste grau de liberdade.

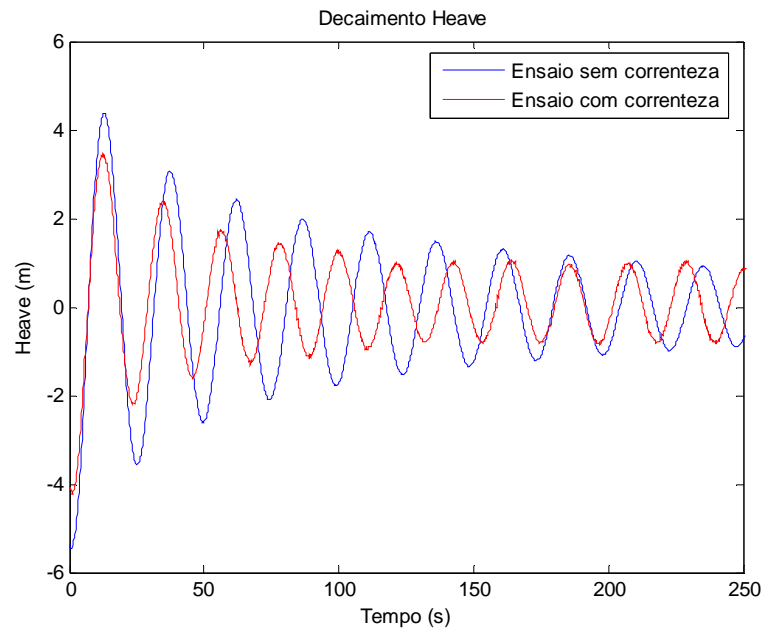


Figura 65 Decaimento de *heave* com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

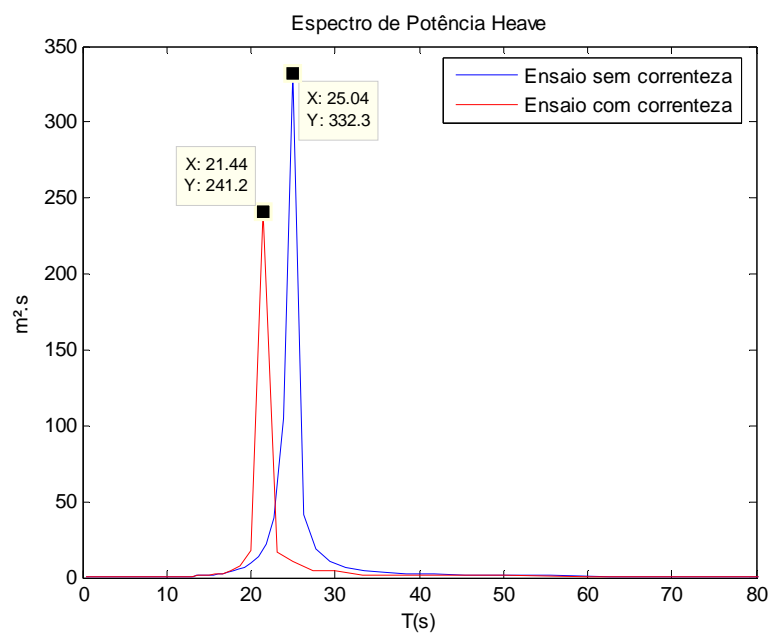


Figura 66 Espectro de potência do decaimento de *heave* com e sem correnteza

Com base nas observações dos ensaios de decaimento e dos gráficos de RAO de *heave*, juntamente com a fórmula do seu período natural, apresentada a seguir, é possível concluir que há duas fontes para alteração do período natural: alteração na massa ou massa adicional do sistema ou alteração na restauração imposta pelas linhas de amarração horizontais.

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad 5.3$$

Onde m_h representa a massa somada com a massa adicional e k_h a restauração do sistema em *heave*.

A primeira consideração sobre a fórmula do período natural de *heave* é sobre a massa do sistema. Durante todos os ensaios sem *risers* essa massa foi mantida constante. Portanto os resultados apresentados na Figura 65 e na Figura 66 têm a mesma condição de carregamento nos casos com e sem correnteza. Houve uma modificação na posição longitudinal de um dos lastros do modelo no caso com correnteza, para que esse obtivesse uma inclinação inicial, afim de que quando em correnteza, a plataforma não apresentasse mais inclinação. Maiores detalhes sobre a inclinação da plataforma com o efeito da correnteza serão apresentados no item 5.8.6. No entanto, o deslocamento longitudinal de um lastro do modelo não afeta a massa total da plataforma e, portanto não altera o seu período natural de *heave*.

A segunda consideração diz respeito à restauração da unidade flutuante no movimento de *heave*. Como o sistema de amarração do modelo tem um formato em “X”, conforme apresentado na seção 5.1, este não apresenta restauração linear quando a plataforma sofre deslocamentos no plano horizontal. Ou seja, as componentes de força devido à amarração sofrem alterações durante o movimento de deriva do modelo. Nas análises com correnteza, o modelo sofre um deslocamento considerável no plano horizontal, podendo, portanto apresentar variações na restauração de *heave* entre os casos com e sem correnteza. No entanto, análises no TPN variando a posição das linhas de amarração, mostraram pequena diferença no comportamento de *heave* do modelo, já que a restauração obtida com a amarração horizontal exerce pouca influência no movimento vertical da plataforma.

Adicionalmente, durante a execução dos ensaios com correnteza, foi observado um comportamento bastante irregular do fluido passando pelo modelo. A seqüência de fotos da Figura 67, retiradas de um vídeo de um dos ensaios com correnteza, apresenta a formação de um grande vórtice a partir da coluna. Como até aqui todos os modelo numéricos estudados

utilizam teoria potencial para os cálculos do comportamento do sistema flutuantes acredita-se que as mudanças nos períodos naturais podem decorrer de fenômenos não contemplados por essa teoria. A formação de vórtices é um desses casos, e pode ter alterado a massa adicional nos casos em que há presença de correnteza.



Figura 67 Série de figuras, retirada de vídeo do ensaio, mostrando formação de vórtices

Portanto, sem alterações significativas na massa e na restauração de *heave* do modelo, é possível que a mudança no comportamento da unidade nos casos com correnteza, exemplificado pela alteração do período natural de *heave*, pode estar ligada a mudanças na massa adicional do sistema devido a efeitos não potenciais. Além disso, outros efeitos não potenciais, como o aparecimento de forças de sustentação nos *pontoons*, podem estar ligados com essa mudança. O item 5.8.6 também discute considerações sobre essas forças.

5.8.5. Resultados em ondas irregulares

Neste item serão apresentados os resultados de ondas irregulares (mares) executados nos ensaios. A Figura 68 mostra as séries temporais de ondas irregulares gerada no ensaio, bem como a resposta do sistema nos três graus de liberdade analisados, *sway*, *heave* e *roll*, todos na escala real. Essa figura corresponde à onda irregular 1, já apresentada no item 5.7.1, referente à semente aleatória 1. Os resultados para semente aleatória 2 estão apresentados no ANEXO A. A Figura 69 apresenta o gráfico de espectro de potência do mar correspondente à onda 1 com semente aleatória 1.

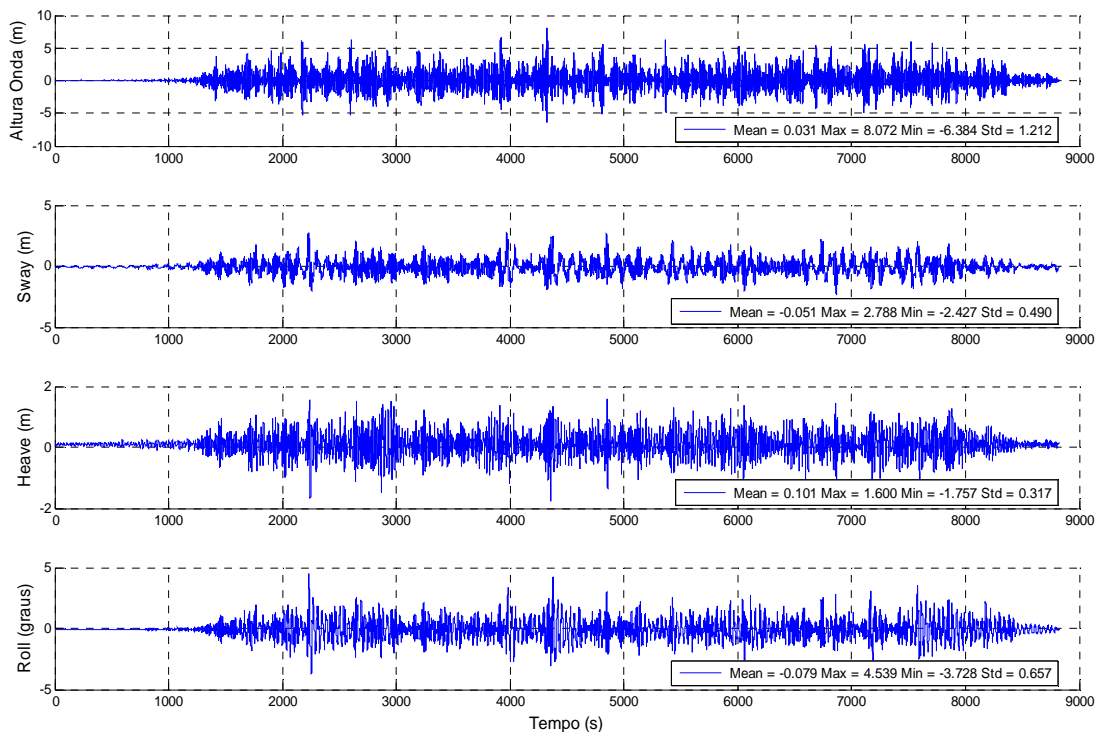


Figura 68 Séries temporais de onda irregular 1, semente aleatória 1 (escala real)

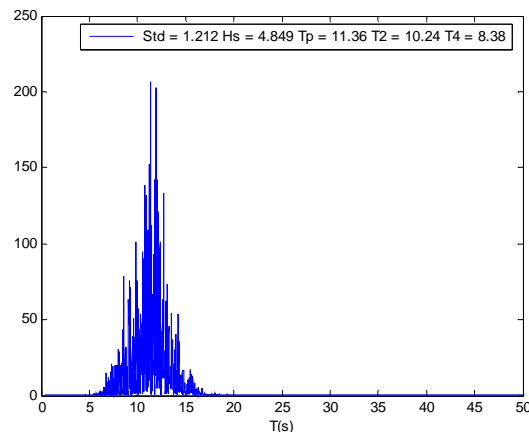


Figura 69 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1 (escala real)

A Figura 70 apresenta as séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, bem como as séries das respostas de *sway*, *heave* e *roll*. A Figura 71 mostra o espectro de potência desta onda.

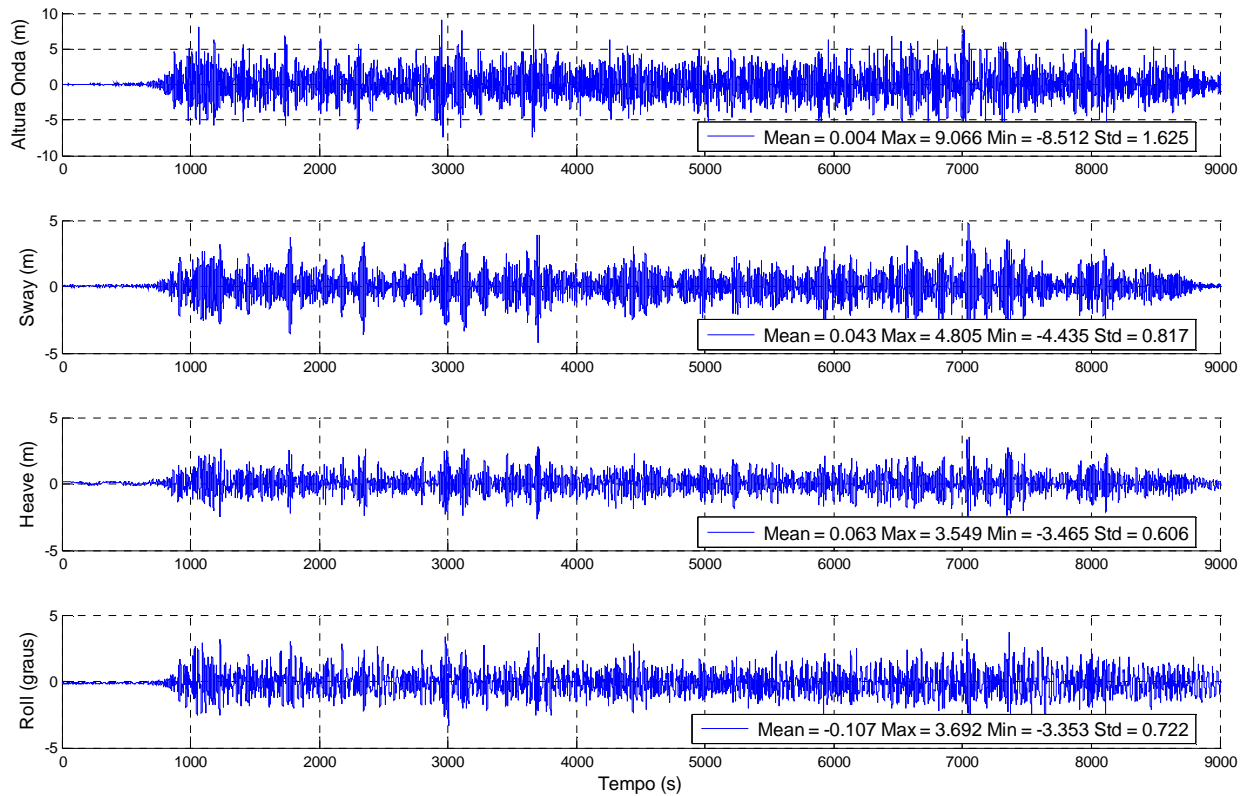


Figura 70 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1 (escala real)

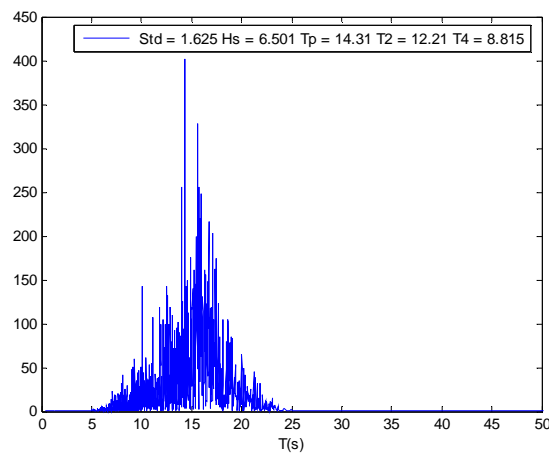


Figura 71 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1 (escala real)

Comparando os gráficos da Figura 69 e da Figura 71, observa-se a diferença do período predominante nas duas ondas. Na primeira, a região com maior energia está perto dos 11 segundos e na segunda perto dos 15 segundos. Este resultado é coerente com o que foi apresentado nas definições das condições ambientais.

5.8.6. Resultados em ondas irregulares com correnteza

Assim como no item anterior, serão apresentadas as séries temporais de onda irregular, agora para os casos com correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo. Novamente, somente os casos da primeira semente aleatória serão apresentados, sendo a outra semente apresentada no ANEXO A.

A Figura 72 apresenta os resultados para onda irregular 1, semente aleatória 1, além de série temporal da onda para o caso com correnteza. A Figura 73 apresenta o espectro de potência desta onda.

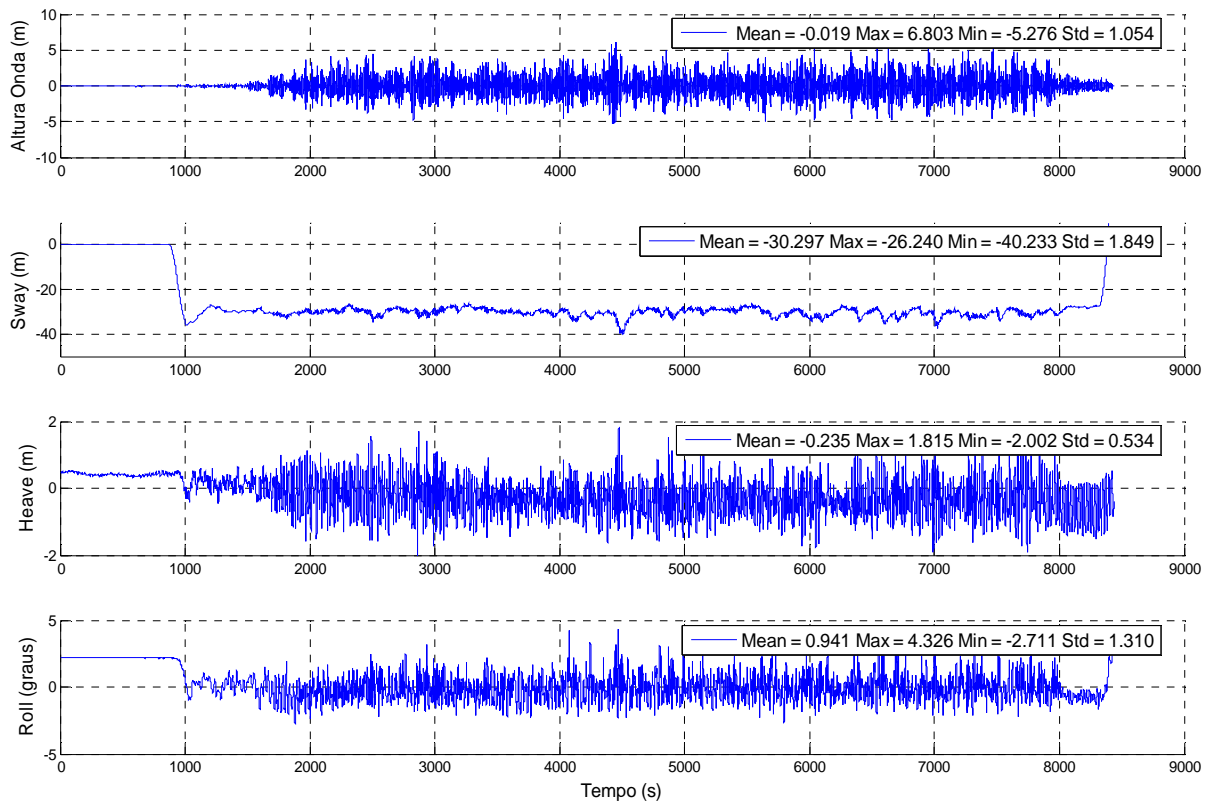


Figura 72 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1 com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

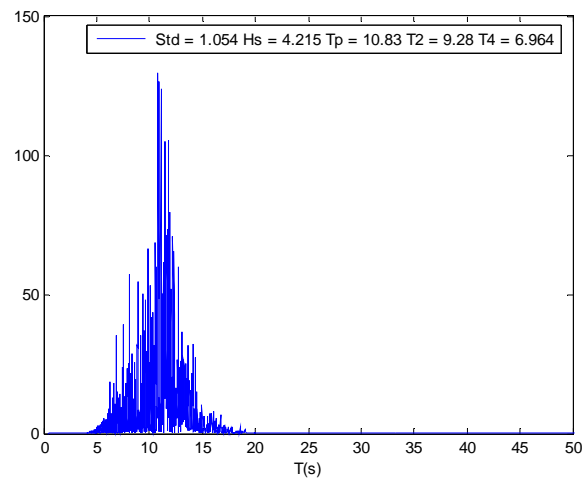


Figura 73 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1 com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

A Figura 74 e a Figura 75 apresentam os mesmo resultados, mas agora para onda irregular 2, semente aleatória 1, do caso com correnteza.

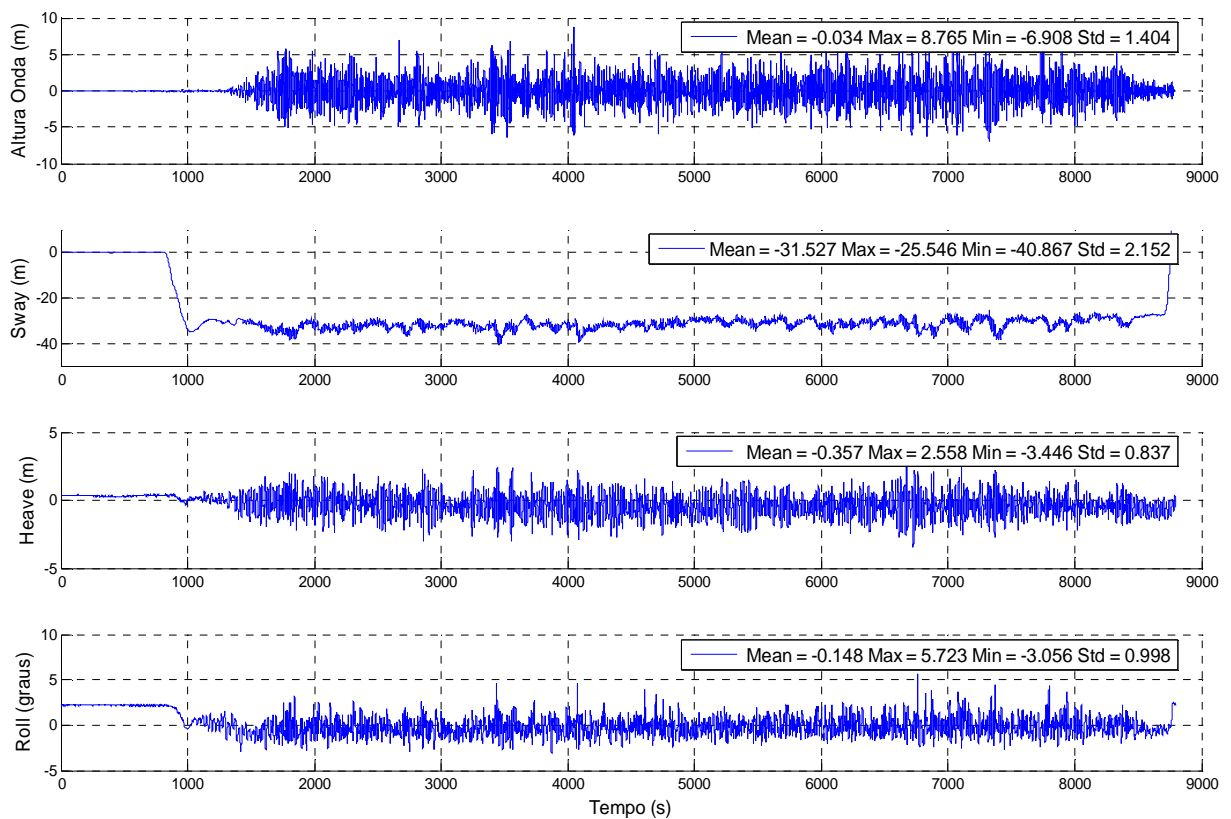


Figura 74 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1 com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

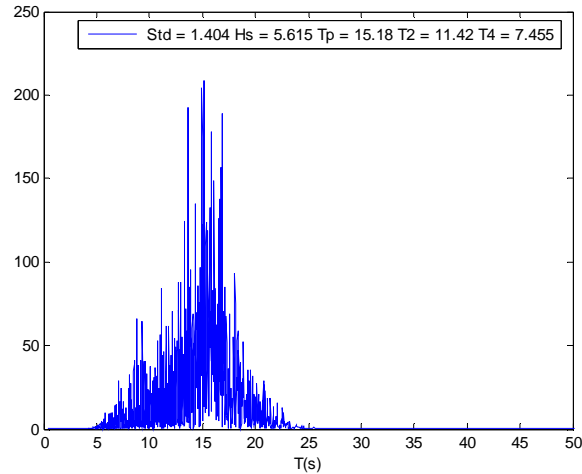


Figura 75 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1 com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Assim como no caso sem correnteza as ondas geradas tiveram as características dentro do esperado. Na Figura 72 e na Figura 74 é interessante observar a deriva do modelo na série temporal de *sway*. Nos dois casos a deriva ficou perto de 30 metros na escala real.

Além disso, nos gráficos de *roll* vale destacar a inclinação inicial, de 2.2 graus, imposta ao modelo, com a finalidade de mantê-lo sem inclinação quando com correnteza. Esse procedimento foi adotado a fim de que a comparação do comportamento em ondas do modelo, entre os casos com e sem correnteza fossem sempre sem inclinação. Para tanto, o modelo foi inclinado 2.2 graus no sentido das linhas que representam os *risers*. A Figura 76 apresenta a direção da inclinação inicial do modelo, bem como a comparação com o caso em que o modelo está sob influência da correnteza, sem inclinação. A figura mostra a configuração com *risers*, que como será apresentado no item 5.9.6, necessita de uma maior inclinação inicial para ficar com média de *roll* próxima de zero, quando com correnteza.

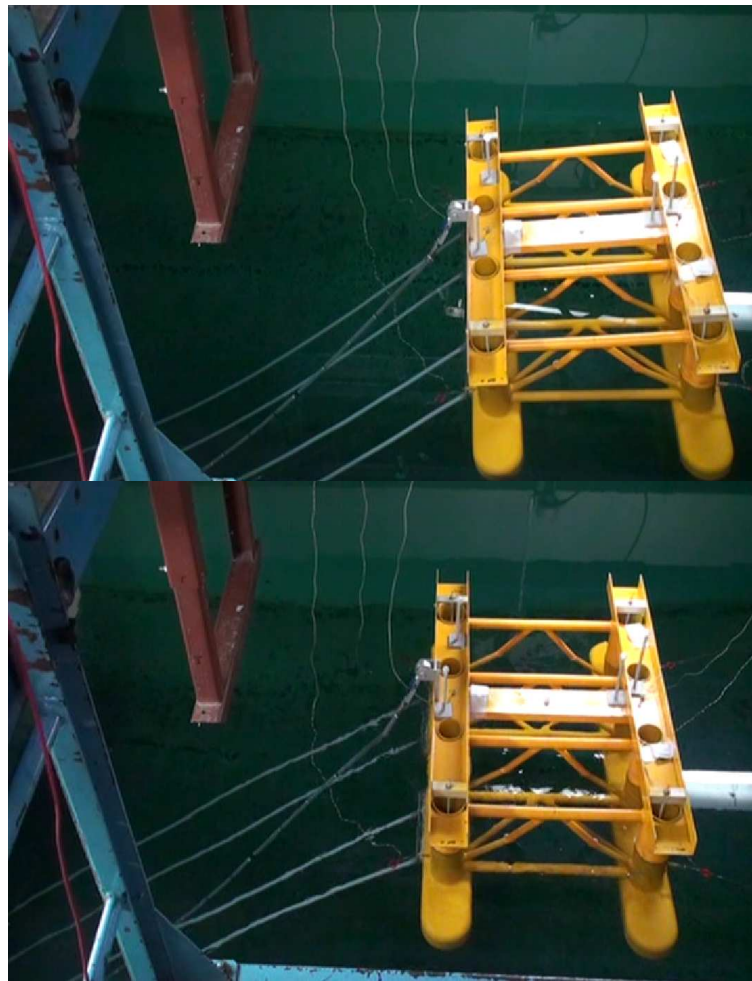


Figura 76 Comparação da inclinação da plataforma

Tendo em vista o fato da necessidade de uma maior inclinação inicial nos casos com *risers*, pode-se concluir que existem, provavelmente, duas fontes principais de forças que atuam no sentido de movimentar o modelo no grau de liberdade de *roll*.

Como no caso sem *risers* foi observado também a necessidade de uma inclinação inicial, é possível que existam forças de sustentação atuando no *pontoon*, que causam um momento no sentido de emborcar a plataforma. De fato, essa constatação também foi observada por Maeda, referência [8].

Outra possível fonte seria o efeito decorrente de forças atuando sobre o arranjo de linhas, já que no caso com *risers* foi imposta uma maior inclinação inicial ao modelo e, no entanto, sua configuração e a velocidade de correnteza são idênticas nos dois casos. De fato, foi constatado no ensaio e também pode ser observado na Figura 76 que os *risers* sofrem uma força que diminui sua carga vertical sobre a plataforma, aumentando a inclinação do modelo quando em correnteza.

5.9. RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM *RISERS*

Assim como no caso sem *risers*, esta seção apresentará os resultados de decaimentos, RAO, ondas regulares e irregulares com e sem a presença de correnteza, nos casos em que os *risers* estavam conectados ao modelo.

5.9.1. Resultados de decaimentos

A seguir serão apresentados os resultados das séries temporais de decaimento, bem como os respectivos espectros de potência, dos ensaios de decaimento com a presença de *risers*.

A Figura 77 e a Figura 78 apresentam, respectivamente, a série temporal e o espectro de potência, do decaimento obtido no experimento de *sway* com *risers*.

Como no caso sem *risers*, em todos os ensaios foram realizadas três repetições para verificar a aderência dos resultados obtidos. No entanto, somente para um dos ensaios são apresentados os gráficos. A Tabela 23 mostra os resultados de período e frequência natural para os três ensaios.

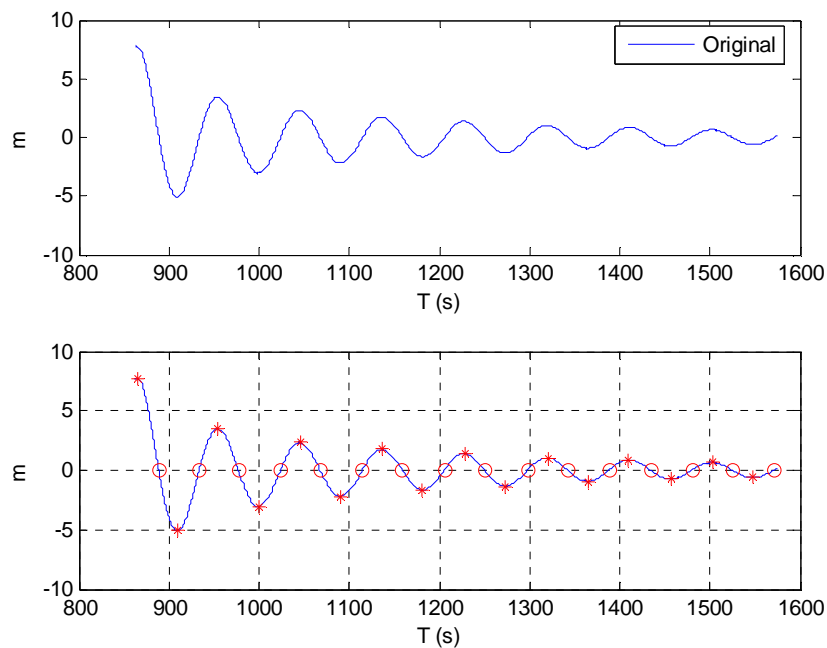


Figura 77 Decaimento de *sway*: ensaio 1 com *risers*

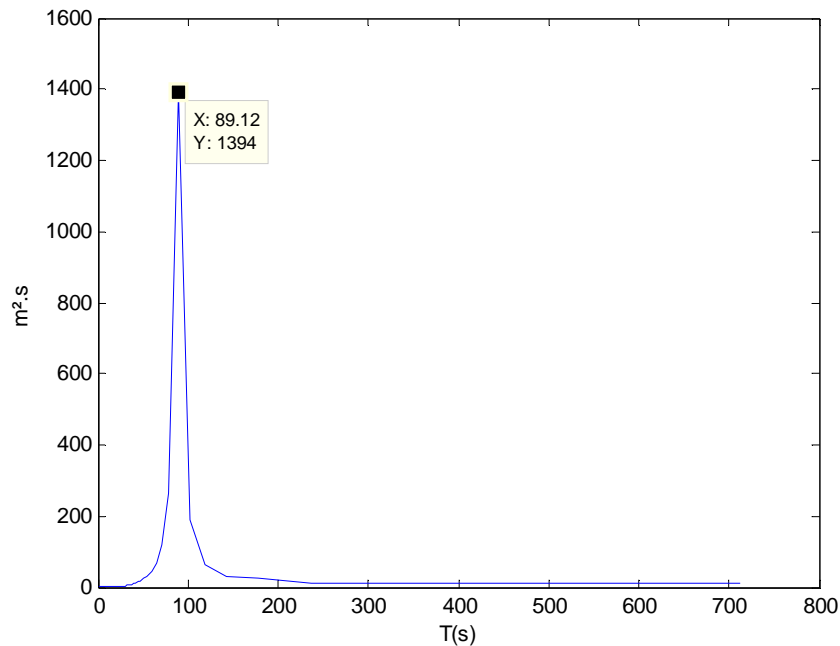


Figura 78 Espectro de potência do decaimento de *sway* 1 com *risers*

Tabela 23 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de *sway* com *risers*

Ensaio de decaimento	Período Natural T_n (s)	Frequência Natural (rad/s)
Ensaio 1	91.102	0.069
Ensaio 2	90.877	0.069
Ensaio 3	90.967	0.069
Média	90.982	0.069

Com esse resultado, pode-se começar a perceber a influência dos *risers* na dinâmica do modelo, já que no caso sem *risers* o período de *sway* era consideravelmente maior. A discussão sobre os efeitos dos *risers* serão retomadas com maiores detalhes na seção 5.10.

Também para os resultados de decaimento da plataforma com *risers*, foram utilizadas duas metodologias para determinação dos períodos naturais a partir dos ensaios de decaimento. A primeira, apresentada na Figura 78, calcula o período natural através da análise espectral feita com a função “*pwelch*” do MATLAB® e a segunda, por sua vez, utiliza a própria série temporal (Figura 77) para contagem do período dos ciclos. Em geral, a diferença entre os dois métodos ficou um pouco maior do que as obtidas no caso sem *risers*. No caso do decaimento de *sway* da plataforma com *risers* a diferença foi de 2.09%.

A Figura 79 apresenta o gráfico de ponderação de amortecimento, que foi obtido com a mesma metodologia utilizada no caso sem *risers*. A Tabela 24 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos e lineares, em porcentagem do amortecimento crítico, para os três ensaios realizados.

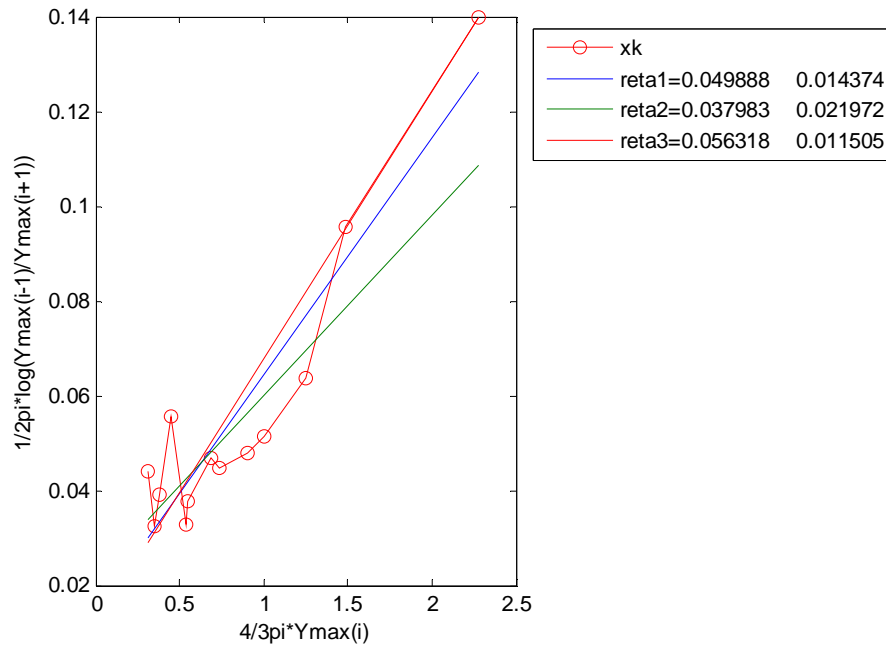


Figura 79 Análise de amortecimento de *sway* 1 com *risers*

Tabela 24 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *sway* com *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m ⁻¹)	Linear (adm.)	Quadrático (m ⁻¹)	Linear (adm.)	Quadrático (m ⁻¹)
Ensaio 1	1.440%	0.050	2.200%	0.038	1.150%	0.056
Ensaio 2	1.590%	0.045	2.390%	0.032	-2.010%	0.069
Ensaio 3	1.670%	0.048	2.160%	0.040	1.920%	0.050
Média	1.567%	0.048	2.250%	0.037	0.353%	0.058

Em comparação com o caso sem *risers*, foi observado um grande aumento dos coeficientes de amortecimento linear de *sway*. Os coeficientes quadráticos permaneceram praticamente constantes.

Vale ressaltar a existência de um coeficiente negativo, que ocorreu devido a uma grande dispersão dos pontos calculados pela teoria de amortecimento utilizada. Esse valor não tem sentido físico e foi desconsiderado no cálculo dos amortecimentos.

A Figura 80 e a Figura 81 apresentam, respectivamente, as séries temporais e análise de espectro de potência do decaimento para o resultado experimental de *heave* com *risers*. A Tabela 25 mostra os resultados de período e frequência natural dos três ensaios realizados.

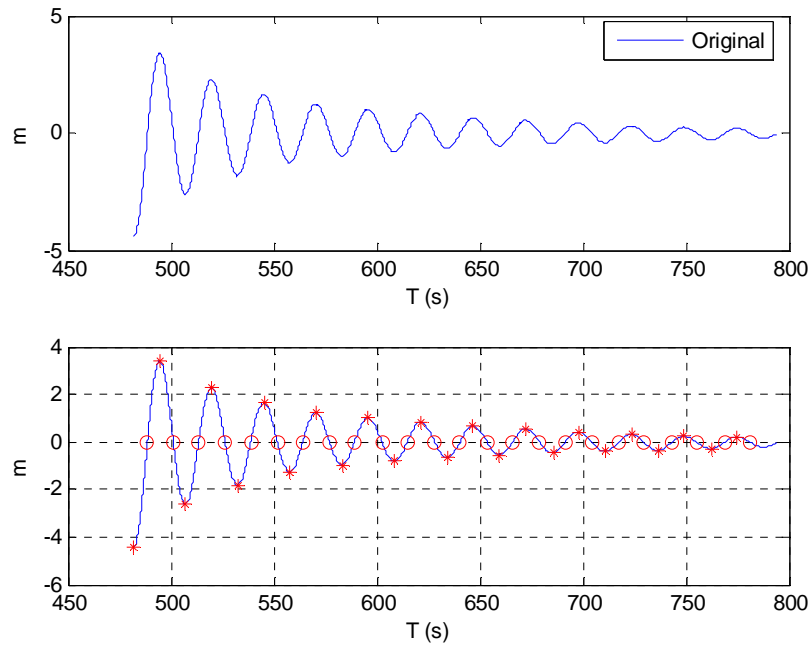


Figura 80 Decaimento de *heave*: ensaio 1 com *risers*

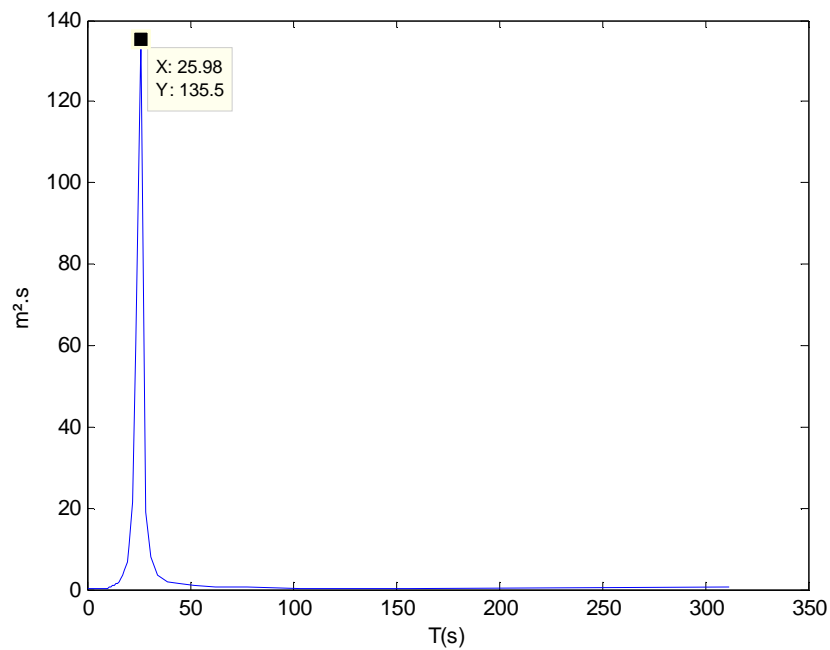


Figura 81 Espectro de potência do decaimento de *heave* 1 com *risers*

Tabela 25 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de *heave* com *risers*

Ensaio de decaimento	Período Natural Tn (s)	Freqüência Natural (rad/s)
Ensaio 1	25.433	0.247
Ensaio 2	25.454	0.247
Ensaio 3	25.408	0.247
Média	25.432	0.247

A diferença entre o valor de período natural calculado pelo espectro de potência (25.98 segundos) e pela análise da série temporal (25.43 segundos) ficou em 2.11%. No caso sem *risers*, o erro foi de 0.96%. Essa diferença pode decorrer do fato que nos casos com *risers*, há uma menor quantidade de pontos para o cálculo do espectro de potência, pois o número de ciclos ficou menor com a introdução dos *risers*. Esse menor número de pontos pode ser prejudicial para a estimativa do período natural. De fato, comparando a Figura 52 e Figura 81, que apresentam, respectivamente, os espectros dos decaimentos de *heave* sem e com *risers*, nota-se um pequeno estreitamento da faixa de energia no caso sem *risers*, o que denota a melhoria na estimativa do período natural.

A Figura 82 apresenta o gráfico de ponderação de amortecimento. A Tabela 26 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos e linear para os três ensaios realizados.

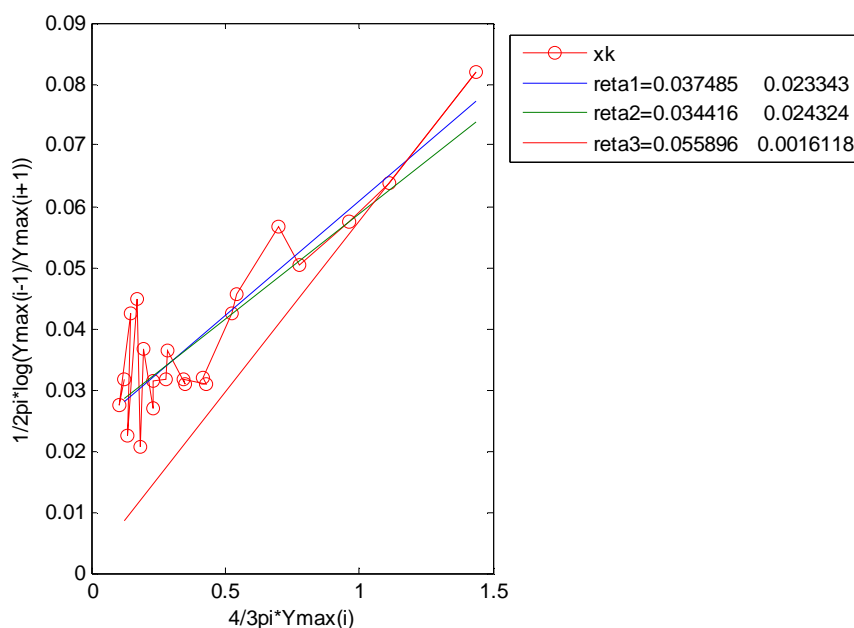
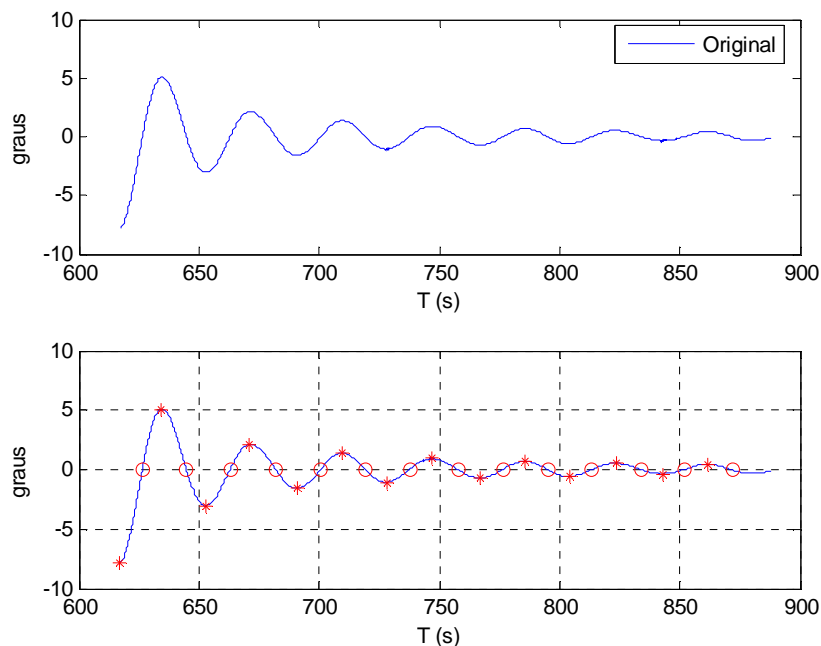
**Figura 82 Análise de amortecimento de *heave* 1 com *risers***

Tabela 26 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *heave* com *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})
Ensaio 1	2.330%	0.038	2.430%	0.034	0.160%	0.056
Ensaio 2	2.460%	0.035	2.540%	0.033	0.850%	0.049
Ensaio 3	2.520%	0.033	2.570%	0.032	1.730%	0.042
Média	2.437%	0.035	2.513%	0.033	0.913%	0.049

Os coeficientes de amortecimento de *heave* tiveram, na maioria dos casos, um aumento considerável, em relação aos decaimentos sem *risers*. Assim como nos de *sway*, os coeficientes lineares tiveram uma grande variação, já os quadráticos aumentaram em menor proporção.

A Figura 83 e a Figura 84 apresentam respectivamente as séries temporais e a análise de potência espectral do decaimento para o resultado experimental de *roll* com *risers*. A Tabela 27 mostra os resultados de período e frequência natural dos três ensaios realizados.

**Figura 83 Decaimento de *roll*: ensaio 1 com *risers***

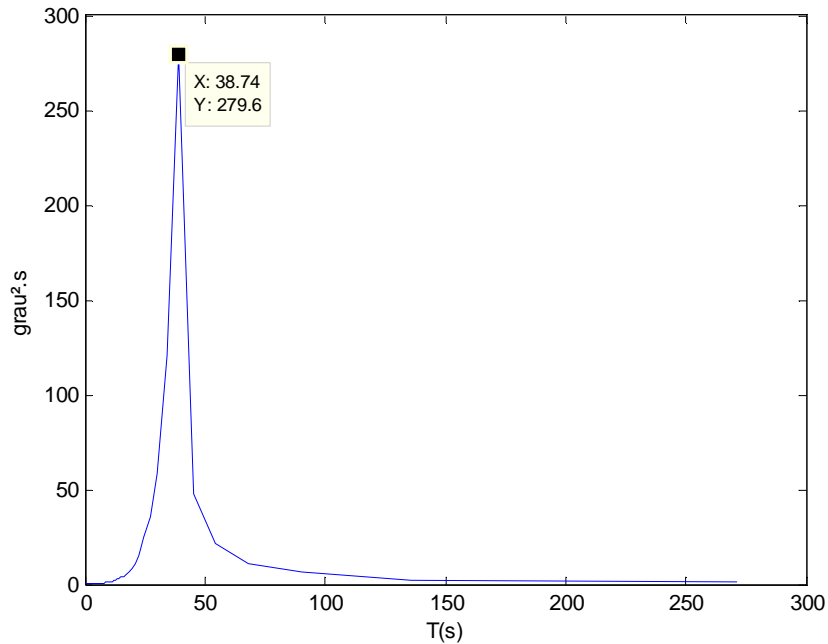


Figura 84 Espectro de potência do decaimento de *roll* 1 com *risers*

Tabela 27 Resultados de período e frequência natural dos ensaios de *roll* com *risers*

Ensaio de decaimento	Período Natural Tn (s)	Frequência Natural (rad/s)
Ensaio 1	37.737	0.167
Ensaio 2	37.795	0.166
Ensaio 3	37.751	0.166
Média	37.761	0.166

A diferença entre os valores de período natural de *roll*, obtidos na Figura 84 e na Tabela 27 foi de apenas 2.33%.

A Figura 85 apresenta o gráfico de ponderação de amortecimento, calculado a partir da série temporal de decaimento de *roll* (Figura 83). A Tabela 28 mostra os resultados dos coeficientes quadráticos e linear para os três ensaios de decaimento de *roll* realizados.

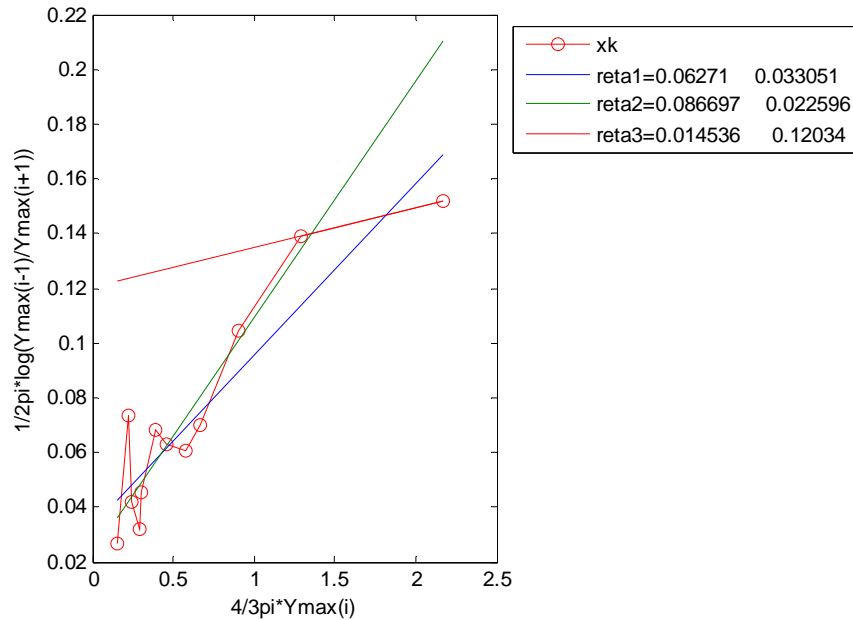


Figura 85 Análise de amortecimento de *roll* 1 com *risers*

Tabela 28 Coeficientes de amortecimento dos ensaios de *roll* com *risers*

Ensaio de decaimento	reta 1		reta 2		reta 3	
	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})	Linear (adm.)	Quadrático (m^{-1})
Ensaio 1	3.310%	0.063	2.260%	0.087	12.030%	0.015
Ensaio 2	3.420%	0.068	2.400%	0.093	11.090%	0.023
Ensaio 3	2.620%	0.074	1.580%	0.102	10.740%	0.019
Média	3.117%	0.068	2.080%	0.094	11.287%	0.019

Comparando os resultados de coeficientes de amortecimento de *roll* obtidos com os casos com e sem *risers*, nota-se uma grande diferença entre os dois ensaios. Como era de se esperar, no caso com *riser*, os coeficientes ficaram maiores, no entanto, estes decaimentos tiveram a maior variação entre os três graus de liberdade estudados. Pode-se destacar o cálculo do amortecimento quadrático, utilizando a reta 2, que aumentou de $0.011 m^{-1}$ para $0.094 m^{-1}$.

5.9.2. Resultados de RAO

Neste item serão apresentados os RAOs dos casos experimentais realizados com *risers* conectados ao modelo. Da mesma maneira que aquela apresentada para os casos sem *risers*, nos três graus de liberdade serão apresentados os gráficos de RAO obtidos a partir de ondas regulares e a partir de ondas transientes.

Neste caso, também serão comparados os resultados obtidos com o modelo numérico do WAMIT®. No entanto, de antemão é possível dizer que é esperada uma grande diferença entre esses resultados e os resultados experimentais, pois os primeiros não consideram o efeito das linhas atuando sobre o modelo.

Portanto, a Figura 86, a Figura 87 e a Figura 88 apresentam respectivamente os gráficos de RAO para os graus de liberdade de *sway*, *heave* e *roll*. As curvas em azul representam os resultados obtidos a partir das duas ondas transientes dos ensaios com *risers*: onda transiente curta (de aproximadamente 8 a 20 segundos) e onda transiente longa (de aproximadamente 15 a 28 segundos).

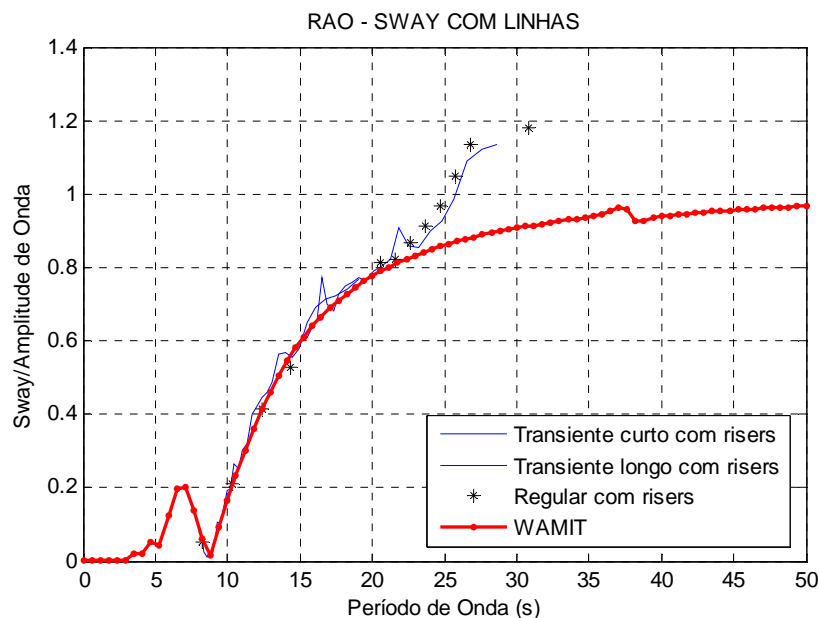


Figura 86 RAO de *sway* com *risers*

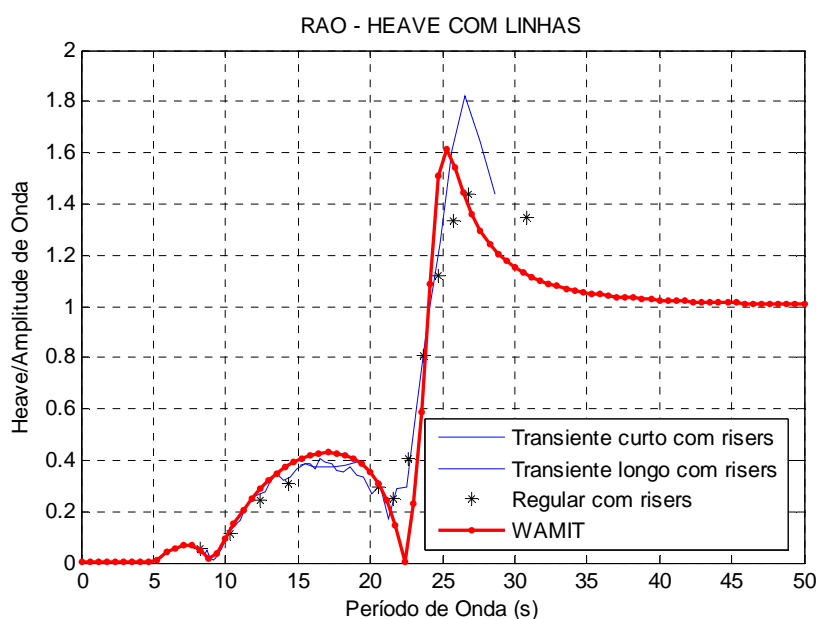


Figura 87 RAO de *heave* com *risers*

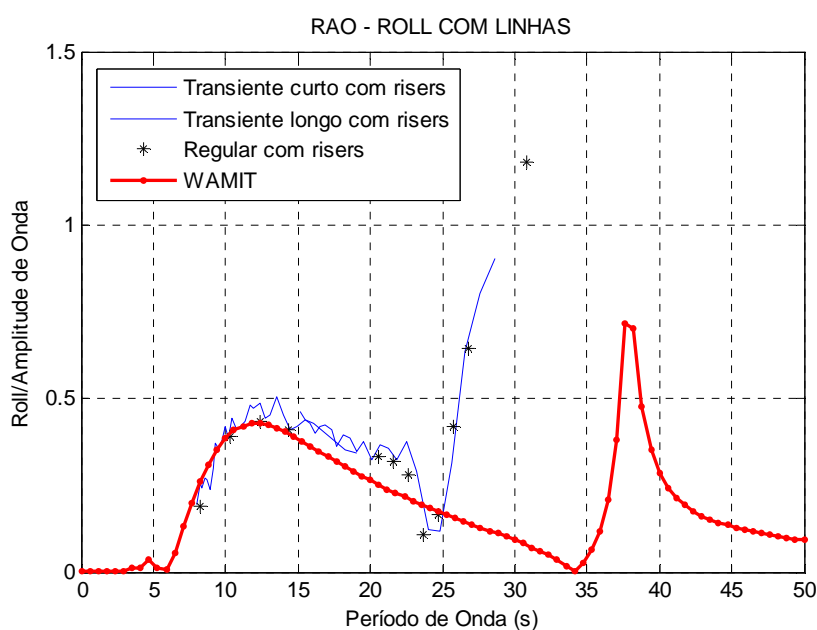


Figura 88 RAO de *roll* com *risers*

Conforme esperado, os resultados dos experimentos têm uma diferença razoável em relação aos obtidos com o WAMIT®. Essa diferença vem com a introdução do sistema de *risers* no modelo. Houve diferenças tanto nos níveis de amortecimento, quando nos períodos naturais, como foi observado neste item e no item anterior, o qual apresentou os resultados de decaimentos. Na seção 5.10 essas comparações serão retomadas e melhor discutidas.

A Figura 89 apresenta o resultado de resposta de tração no topo da linha instrumentada. Os pontos apresentados representam o desvio padrão da série temporal de tração, divididos pelo desvio padrão de altura de cada onda. Nessa curva é possível observar um alto nível de resposta em baixos períodos e também um aumento desta resposta no período de ressonância de *heave*, perto dos 25 segundos. A Figura 89 apresenta as séries temporais de tração dos ensaios 1, 6 e 10.

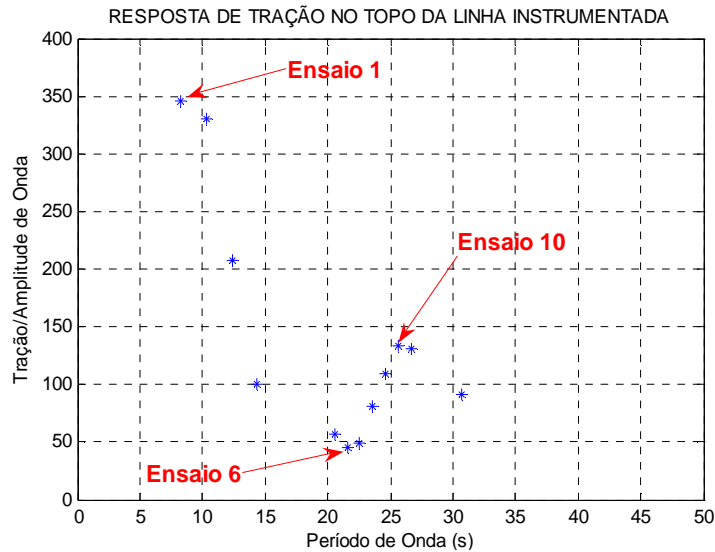


Figura 89 Resposta de tração no topo do riser

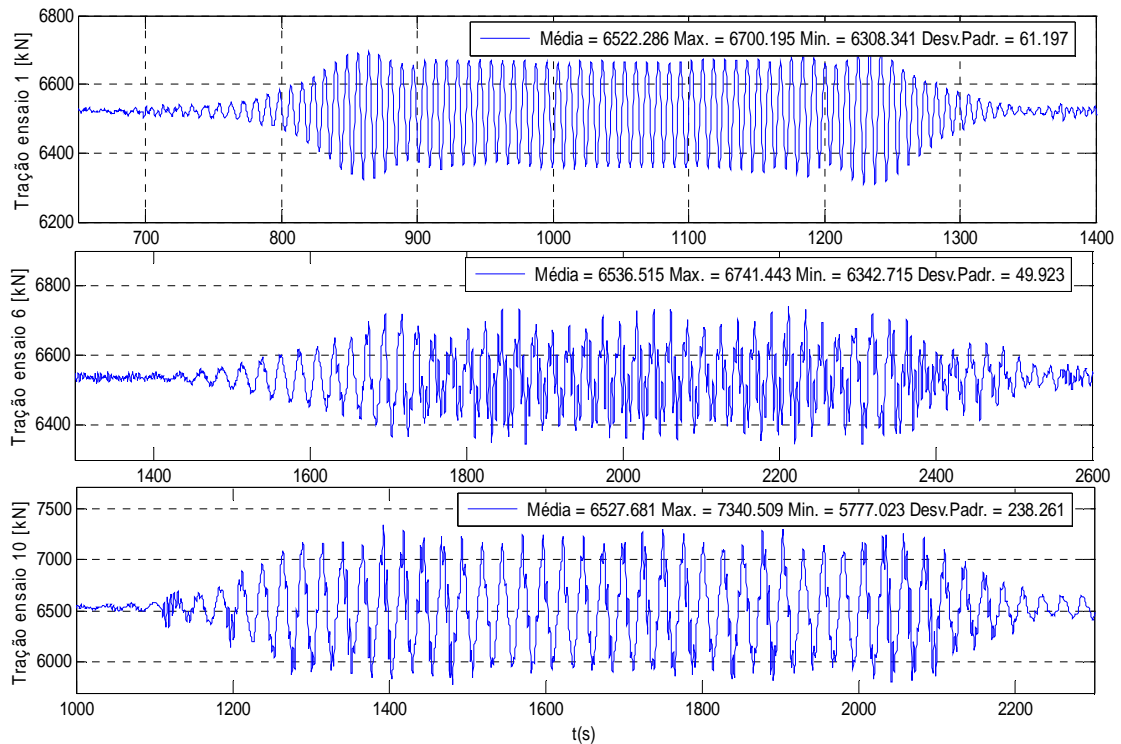


Figura 90 Série temporal de tração no topo do riser

5.9.3. Resultados em ondas regulares

Neste item serão apresentadas as ondas regulares utilizadas nos ensaios com a presença de *risers*, nas situações sem correnteza. A Tabela 29 apresenta as ondas utilizadas para os ensaios em ondas regulares, na escala real e na do modelo. Como já comentado, os valores são obtidos através das análises dos dados de calibração de onda fornecidos pelo IPT.

Tabela 29 Ondas regulares utilizadas para caso com *risers* e sem correnteza

Ensaio onda regular	Escala Real		Escala Modelo	
	Período de onda (s)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)	Altura de onda (cm)
Ensaio 1	8.216	0.978	0.802	0.931
Ensaio 2	10.283	1.660	1.004	1.581
Ensaio 3	12.342	2.589	1.204	2.466
Ensaio 4	14.358	3.632	1.401	3.459
Ensaio 5	20.558	5.435	2.006	5.176
Ensaio 6	21.596	5.924	2.108	5.642
Ensaio 7	22.614	6.899	2.207	6.570
Ensaio 8	23.673	7.497	2.310	7.140
Ensaio 9	24.696	9.195	2.410	8.757
Ensaio 10	25.751	9.880	2.513	9.410
Ensaio 11	26.744	9.903	2.610	9.431
Ensaio 12	30.777	10.160	3.004	9.676

Os valores apresentados na Figura 86, na Figura 87, na Figura 88 e na Figura 89 são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 Resposta dos casos com *risers* e sem correnteza

Ensaio onda regular	Período de onda (s)	RAO de sway (m/m)	RAO de heave (m/m)	RAO de roll (grau/m)	Resposta tração (kN/m)
Ensaio 1	8.216	0.052	0.052	0.191	345.641
Ensaio 2	10.283	0.212	0.111	0.389	330.026
Ensaio 3	12.342	0.414	0.246	0.432	207.830
Ensaio 4	14.358	0.530	0.309	0.409	100.593
Ensaio 5	20.558	0.813	0.293	0.333	57.428
Ensaio 6	21.596	0.825	0.248	0.320	45.662
Ensaio 7	22.614	0.866	0.409	0.280	49.078
Ensaio 8	23.673	0.913	0.810	0.107	81.400
Ensaio 9	24.696	0.970	1.121	0.166	109.073
Ensaio 10	25.751	1.047	1.334	0.419	133.457
Ensaio 11	26.744	1.133	1.437	0.644	131.338
Ensaio 12	30.777	1.182	1.347	1.180	91.955

5.9.4. Resultados em ondas regulares com correnteza

Neste item serão apresentados os RAOs, obtidos a partir de ondas regulares, com presença de correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo, no caso em que os *risers* estavam conectados ao modelo. Analogamente ao caso sem *riser*, será feita a comparação dos casos com e sem correnteza para efeito de averiguação da influência da correnteza nos movimentos do modelo.

A Tabela 31 apresenta as ondas utilizadas nestes ensaios. A Figura 91, a Figura 92 e a Figura 93 apresentam as comparações de RAO com e sem correnteza para *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente. Todos os períodos de onda apresentados são períodos de encontro entre o carro dinamométrico em movimento e a onda incidente, já que a serie temporal da onda foi obtida no *wave-probe* solidário ao carro dinamométrico.

Tabela 31 Ondas regulares utilizadas para caso com *risers* e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Ensaio onda regular	Escala Real U=2.05m/s		Escala Modelo U=0.20m/s	
	Período de onda (s)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)	Altura de onda (cm)
Ensaio 1	8.200	0.969	0.800	0.923
Ensaio 2	10.257	1.619	1.001	1.542
Ensaio 3	12.336	2.381	1.204	2.268
Ensaio 4	14.396	3.281	1.405	3.125
Ensaio 5	20.532	6.276	2.004	5.977
Ensaio 6	21.592	6.002	2.107	5.716
Ensaio 7	22.576	7.532	2.203	7.173
Ensaio 8	23.583	8.692	2.301	8.278
Ensaio 9	24.620	10.190	2.403	9.705
Ensaio 10	25.631	10.910	2.501	10.390
Ensaio 11	26.666	10.340	2.602	9.848
Ensaio 12	30.716	10.410	2.998	9.914

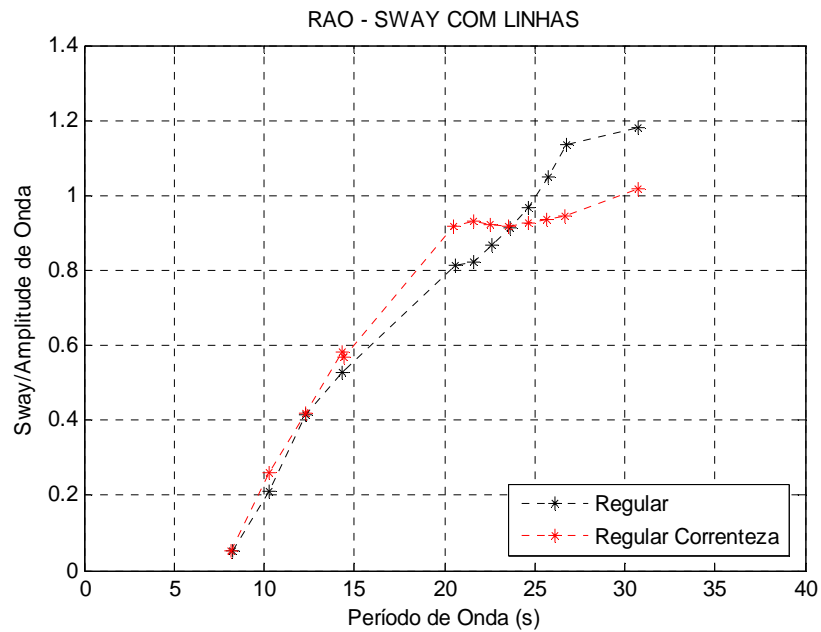


Figura 91 RAO de *sway* com e sem correnteza, casos com *risers* ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

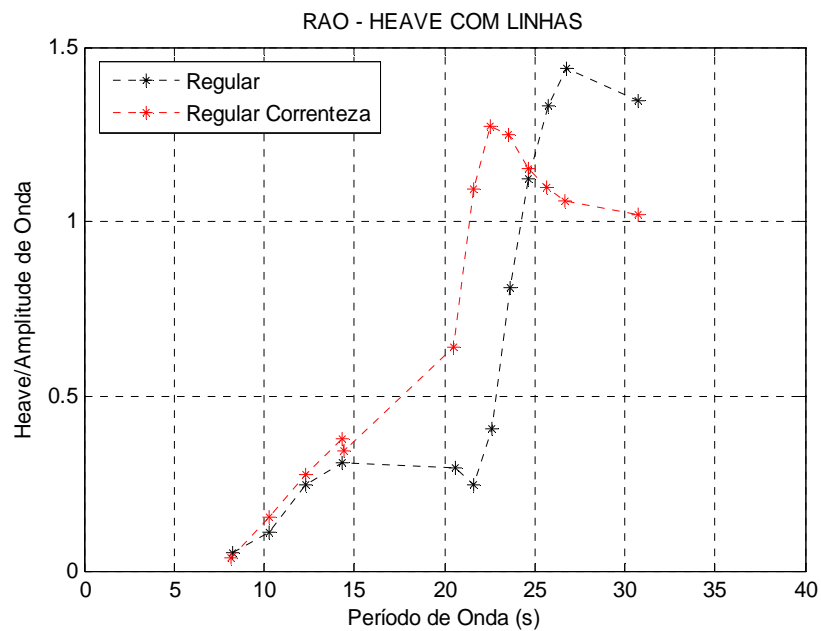


Figura 92 RAO de *heave* com e sem correnteza, casos com *risers* ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

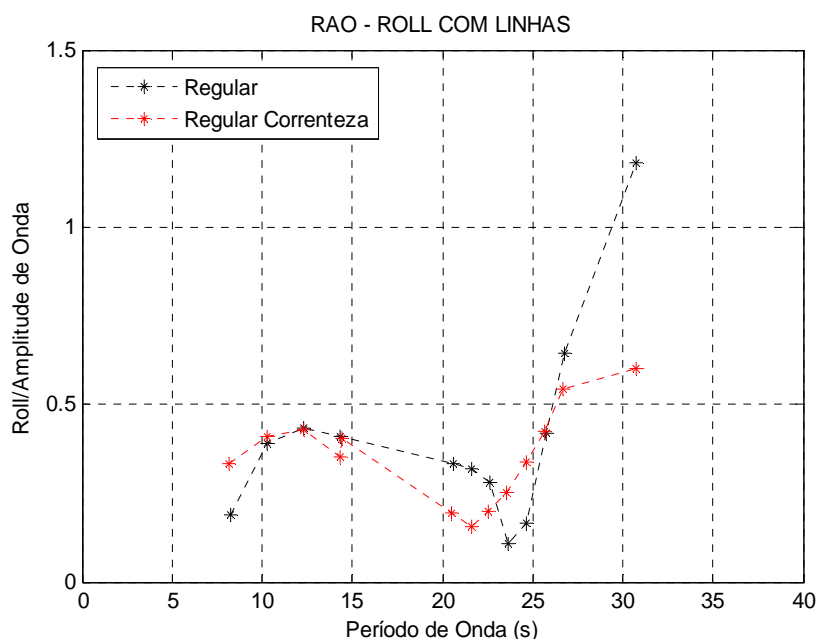


Figura 93 RAO de *roll* com e sem correnteza, casos com *risers* ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

De uma maneira geral, a comparação com e sem correnteza dos resultados de RAO com *risers* apresenta as mesmas conclusões dos casos sem *risers*. No RAO de *sway* parece haver um acoplamento com o movimento de *heave* em aproximadamente 22 segundos. No entanto, esse acoplamento é muito mais amortecido do que no caso sem *risers*. Já para os RAOs de *heave* e *roll*, há o mesmo deslocamento observado nos casos sem *risers*. Em *heave* o pico ressonante vai de 27 segundos no caso sem correnteza, para 23 segundos no caso com correnteza. Já para o RAO de *roll*, observa-se que o ponto de cancelamento vai de 24 segundos no caso sem correnteza, para 21.5 segundos no caso com correnteza. A discussão sobre os motivos destes deslocamentos nos RAOs de *heave* e *roll* é a mesma apresentada na seção 5.8.4.

A Figura 94 apresenta a comparação dos resultados de resposta de tração no topo da linha instrumentada para os casos com e sem correnteza. Os pontos apresentados representam os desvios padrões das séries temporais de tração divididos pelos desvios padrões de altura de cada onda.

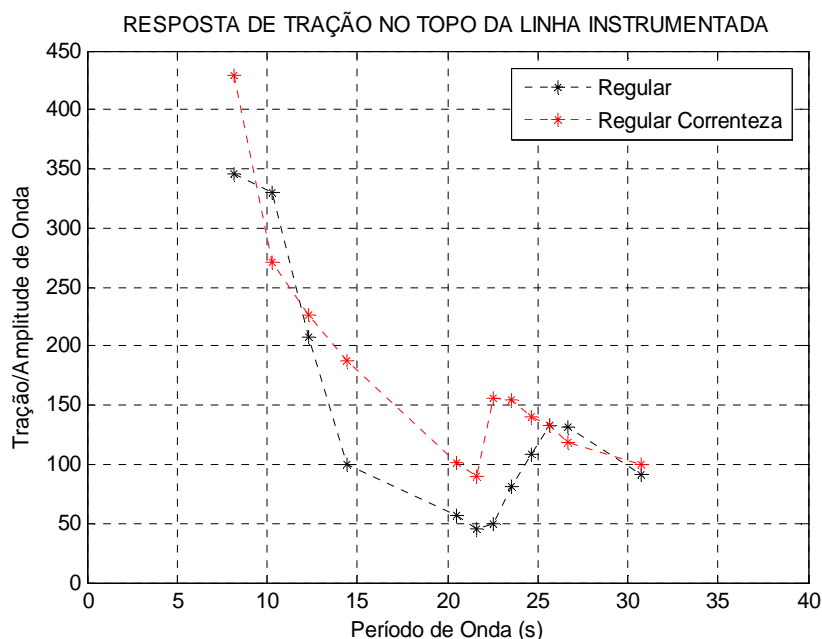


Figura 94 Resposta de tração no *riser* com e sem correnteza ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

Para os baixos períodos, a resposta de tração no topo se manteve com os mesmos aspectos nos casos com e sem correnteza. Já com relação ao segundo pico identificado no gráfico da Figura 94, é possível notar uma variação no período do ponto de máximo. Essa variação pode ser decorrente da variação do pico ressonante de *heave*, apresentado na Figura 92, já que nos dois casos (com e sem correnteza) esse pico de resposta de tração é coincidente com o valor máximo daquele movimento. Com isso, é possível concluir que a resposta de tração no *riser* é mais sensível ao movimento de *heave* do que aos demais graus de liberdade. Essa constatação também foi observada em outra análise experimental, feita a partir de ondas irregulares, que será apresentada no item 7.3.

Assim como no caso sem correnteza, a Tabela 22 apresenta os valores dos gráficos de RAO em forma de tabela. Os valores de período de onda são os períodos de encontro entre o carro dinamométrico, que gera a correnteza, e a onda incidente. O valor da correnteza para esse ensaio é de 2.05m/s na escala real.

Tabela 32 Resposta dos casos com *risers* e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Ensaio onda regular	Período de onda (s)	RAO de sway (m/m)	RAO de heave (m/m)	RAO de roll (grau/m)	Resposta tração (kN/m)
Ensaio 1	8.200	0.054	0.034	0.334	429.004
Ensaio 2	10.257	0.260	0.154	0.410	271.358
Ensaio 3	12.336	0.421	0.274	0.431	226.503
Ensaio 4	14.396	0.567	0.344	0.403	187.946
Ensaio 5	20.532	0.915	0.639	0.196	100.671
Ensaio 6	21.592	0.932	1.093	0.153	89.404
Ensaio 7	22.576	0.923	1.274	0.198	155.305
Ensaio 8	23.583	0.917	1.247	0.251	154.064
Ensaio 9	24.620	0.928	1.150	0.336	140.878
Ensaio 10	25.631	0.934	1.100	0.423	132.559
Ensaio 11	26.666	0.943	1.060	0.546	118.562
Ensaio 12	30.716	1.017	1.019	0.600	99.391

5.9.5. Resultados em ondas irregulares

Neste item serão apresentados os resultados de ondas irregulares (mares) executados nos ensaios com a presença de *risers*. A Figura 95 mostra as séries temporais de ondas irregular gerada no ensaio com *risers*, bem como a resposta do sistema nos três graus de liberdade analisados. Essa figura corresponde à onda irregular 1, já apresentada no item 5.7.1, referente à semente aleatória 1.

Os resultados para semente aleatória 2 seguem a mesma estrutura de análise e estão apresentados no ANEXO C. A Figura 96 apresenta o gráfico de espectro de potência do mar correspondente à onda deste caso.

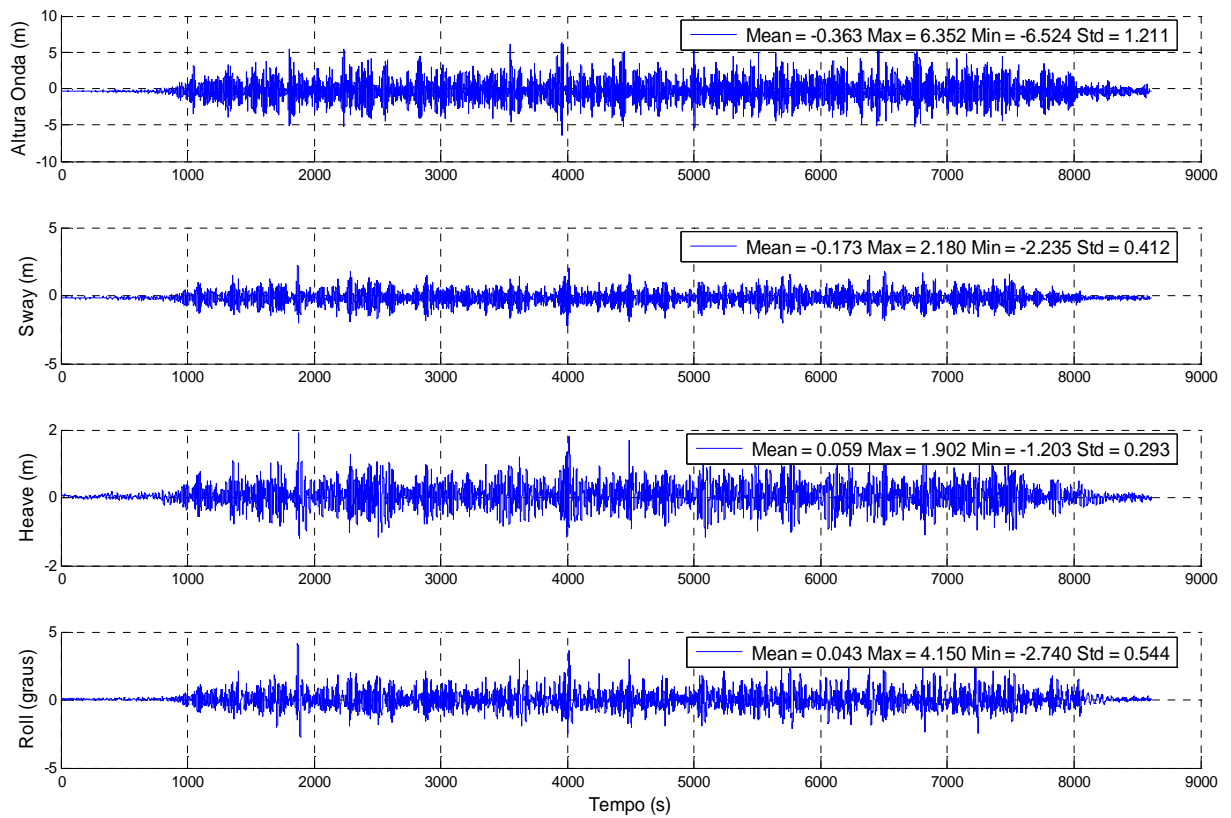


Figura 95 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1, caso com *risers*

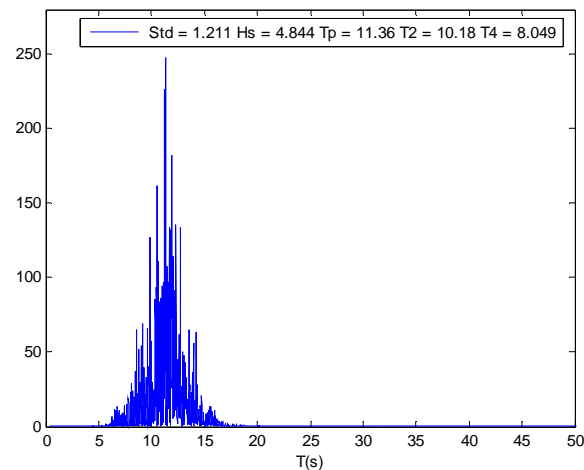


Figura 96 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1, caso com *risers*

A Figura 97 apresenta as séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, bem como as séries das respostas de *sway*, *heave* e *roll*. A Figura 98 mostra o espectro de potência desta onda.

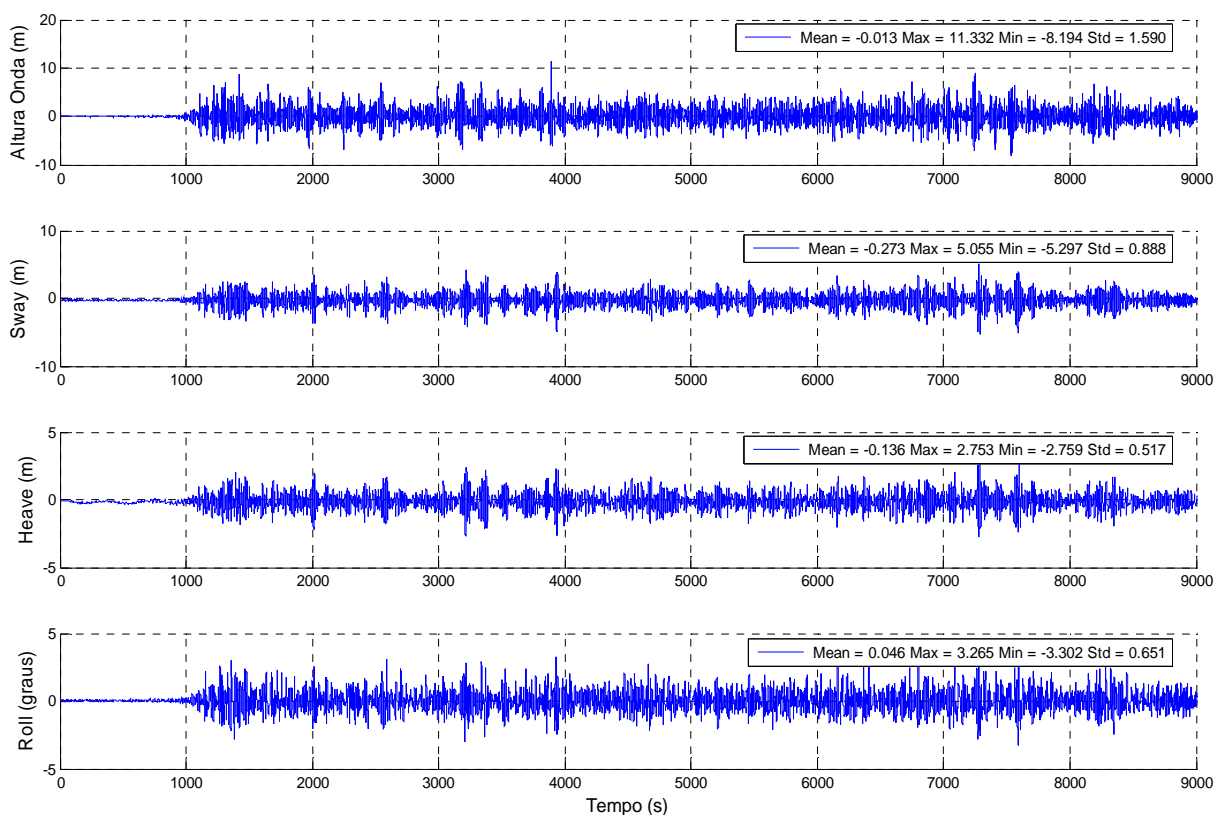


Figura 97 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, caso com *risers*

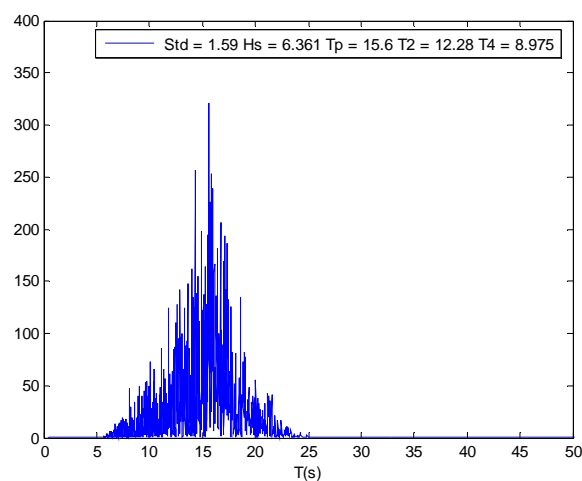


Figura 98 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1, caso com *risers*

Comparando os gráficos da Figura 96 e da Figura 98, observa-se a diferença do período predominante nas duas ondas. Na primeira a região com maior energia está perto dos 11 segundos e na segunda perto dos 15 segundos, assim como no caso sem *risers*. Com essa comparação comprova-se a boa caracterização dos mares utilizados nesta parte dos ensaios.

5.9.6. Resultados em ondas irregulares com correnteza

Assim como no item anterior, serão apresentadas as séries temporais de onda irregular, agora para os casos com correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo. Novamente, somente serão apresentados os casos da primeira semente aleatória, sendo os da outra semente apresentados no ANEXO C.

A Figura 99 apresenta os resultados para onda irregular 1, semente aleatória 1, além de série temporal da onda para o caso com correnteza. A Figura 100 apresenta o espectro de potência desta onda.

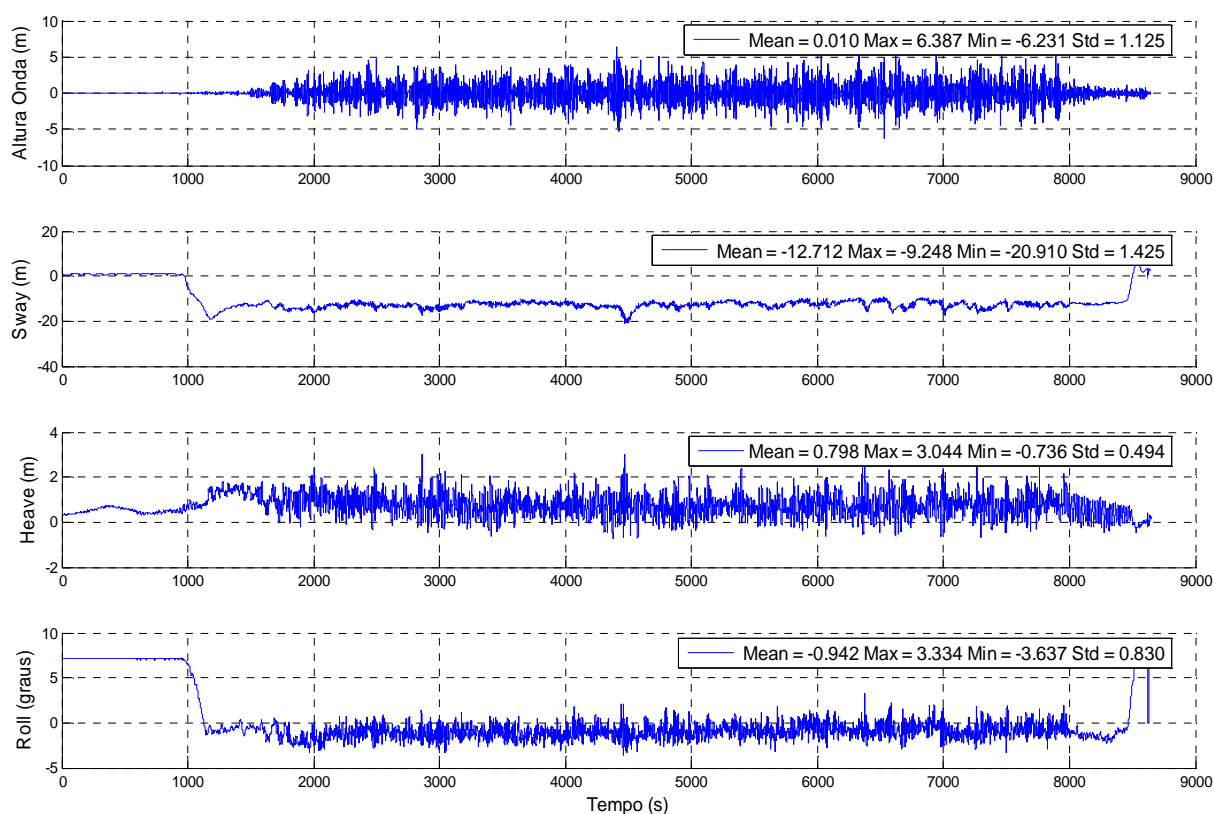


Figura 99 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 1, com correnteza e com *risers* ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

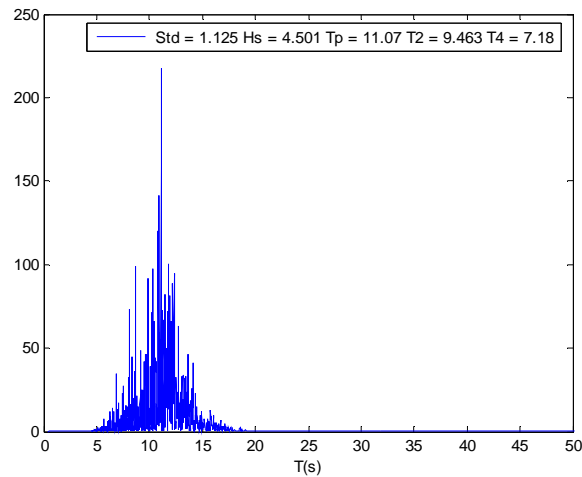


Figura 100 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 1, com correnteza e com risers ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

A Figura 101 e a Figura 102 apresentam os mesmos resultados, mas agora para onda irregular 2, semente aleatória 1 do caso com correnteza.

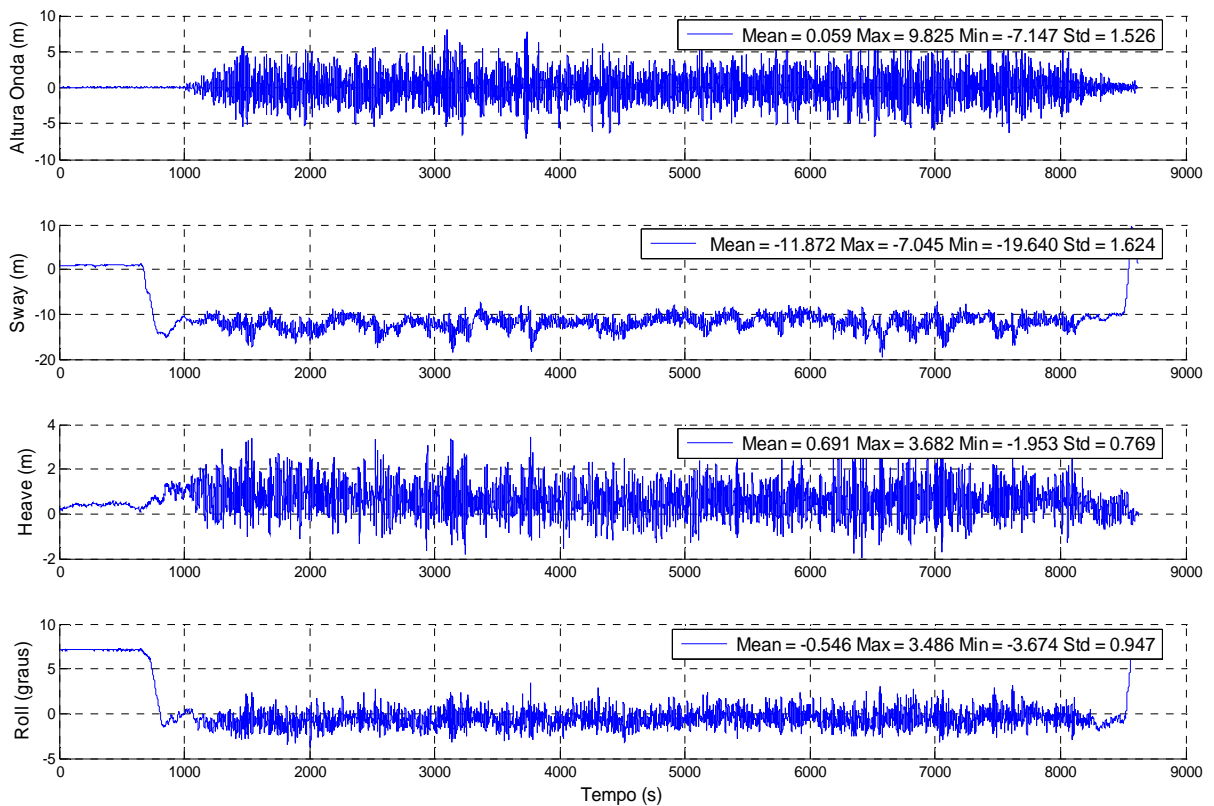


Figura 101 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 1, com correnteza e com risers ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

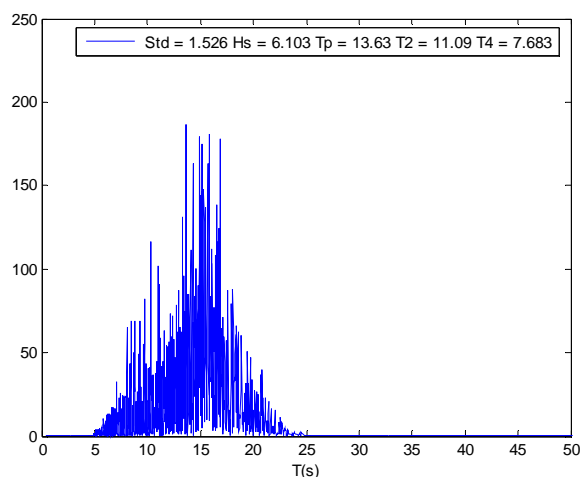


Figura 102 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 1, com correnteza e com *risers* ($U=2.05\text{m/s}$ na escala real)

Assim como no caso sem correnteza as ondas geradas tiveram as características dentro das faixas de períodos esperados. Na Figura 99 e na Figura 101 pode-se observar a deriva do modelo na série temporal de *sway*. Nos dois casos a deriva ficou um pouco maior que 10 metros na escala real. Além disso, nos gráfico de *roll*, vale destacar a inclinação inicial imposta ao modelo, com a finalidade de manter-lo sem inclinação quando submetido à correnteza. Essa inclinação inicial foi de aproximadamente 7 graus (no mesmo sentido apresentado na Figura 76), muito maior que os 2 graus do caso sem *risers*. Essa inclinação inicial maior deveu-se ao arrasto proporcionado pelos *risers* ao modelo.

5.10. CONCLUSÕES A RESPEITO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS: COMPARAÇÃO COM E SEM *RISERS*

Neste item serão discutidos aspectos sobre os efeitos que os *risers* conectados no modelo têm na dinâmica da plataforma. As principais influências constatadas foram a mudança do período natural e a alteração nos níveis de amortecimento.

Assim como nos itens anteriores, os resultados serão apresentados para os ensaios de decaimento, RAO com e sem correnteza e ondas irregulares, sendo que todos esses casos foram comparados com e sem a presença de *risers*.

5.10.1. Comparação de decaimentos com e sem *risers*

A Figura 103 apresenta a comparação dos decaimentos experimentais de *sway* com e sem *risers*. É possível observar que com a introdução dos *risers*, além do aumento do amortecimento, esses proporcionaram uma significativa alteração no período natural deste grau de liberdade. Conforme apresentado na Figura 104, que mostra o espectro de potência dos dois casos, o período natural de *sway* foi de 128.5 segundos no caso sem *risers*, para 89.12 segundos no caso com *riser*, representando uma diminuição de 30.65% no período natural.

Tendo em vista a formulação do período natural do modelo, apresentada pela equação 5.3, pode-se pensar em duas fontes para a alteração do período natural de *sway*: aumento da massa adicional, proporcionada pelos *risers* ou aumento da restauração horizontal, também por efeito das linhas. Como o período natural está diminuindo, e as duas variáveis em questão estão aumentando, pode-se concluir que a variável que é inversamente proporcional ao período natural está influenciando mais o modelo. Ou seja, o aumento da restauração foi maior que o aumento da massa adicional, o que fez com que o período de *sway* diminuísse.

Apesar desta faixa de períodos ressonantes de *sway* estar bem distante dos mares típicos que a plataforma pode enfrentar, mais adiante, no item 5.10.2, será discutida a comparação dos RAOs com e sem *risers*, na qual este efeito pode ter outras implicações para o comportamento em ondas do modelo.

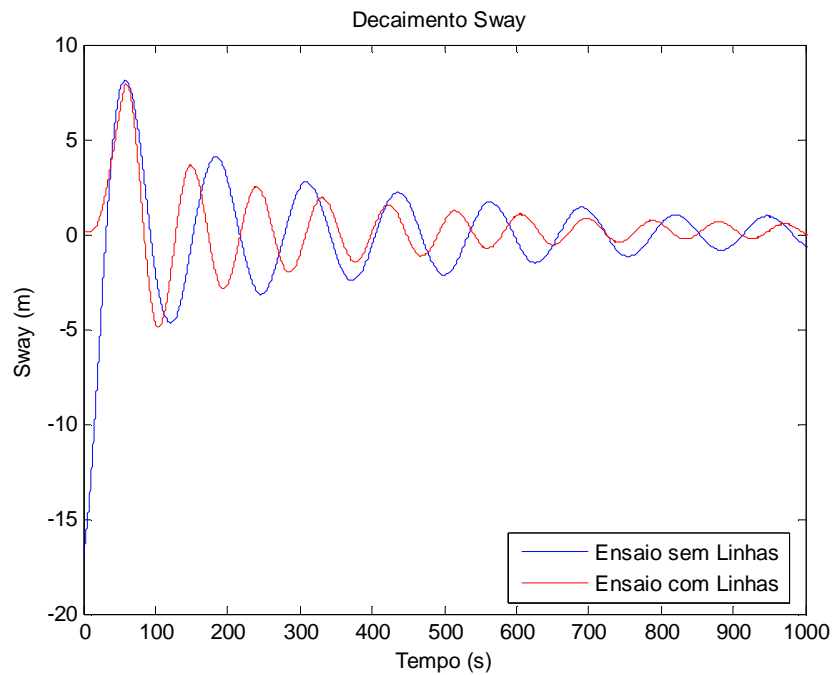


Figura 103 Comparação entre resultados experimentais com e sem *risers* do decaimento de sway

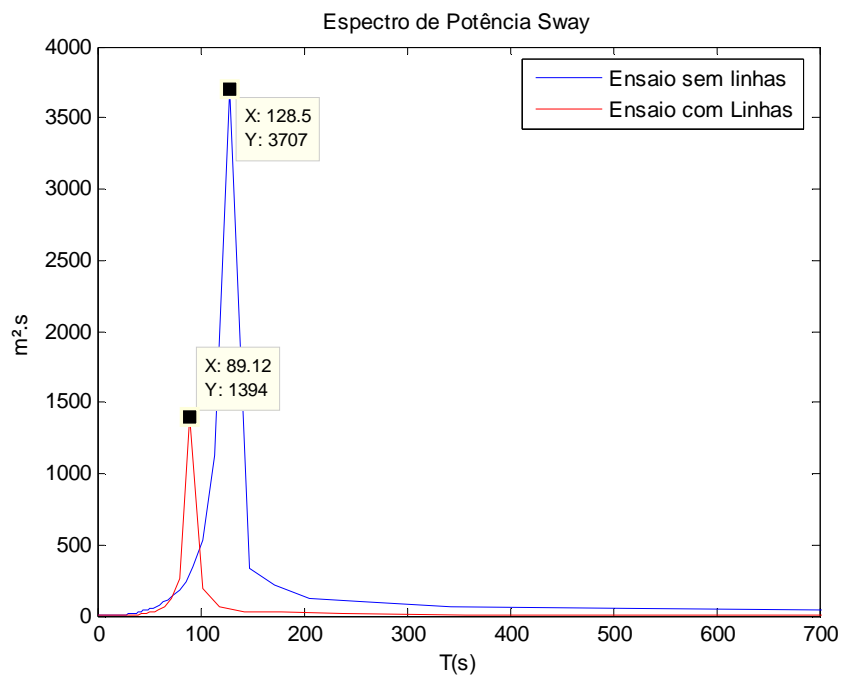


Figura 104 Espectro de potência dos decaimentos de sway com e sem *risers*

Como premissa para realização destes ensaios, optou-se por manter os períodos naturais dos graus de liberdade estudados nos casos com e sem *risers*, a fim de obter resultados que sejam viáveis de serem comparados. No caso dos movimentos de *sway*, no entanto, tal estratégia seria muito complicada, pois implicaria na modificação do conjunto de molas responsável pela amarração do modelo. Além disso, a mudança das molas também traria outras implicações aos demais graus de liberdade e seria muito difícil estimar a restauração devida aos *risers*, face ao seu caráter não linear.

Como o calado dos ensaios com e sem *risers* foi o mesmo, o período natural de *heave* não deveria ser alterado, já que a massa é constante e a restauração também⁹. No entanto, no decaimento de *heave*, apresentado na Figura 105, além do esperado aumento de amortecimento, devido ao efeito viscoso causado pelo fluido passando pelos *risers*, foi observada uma alteração do período natural. No ensaio sem linhas, o período natural era de 25.04 segundos e passou para 25.98 segundos, como apresenta a Figura 106. Essa alteração pode ter ocorrido devido ao aumento da massa adicional proporcionada pelos *risers*, quando a plataforma se movimenta neste grau de liberdade, ou devido ao aumento no amortecimento com a introdução das linhas.

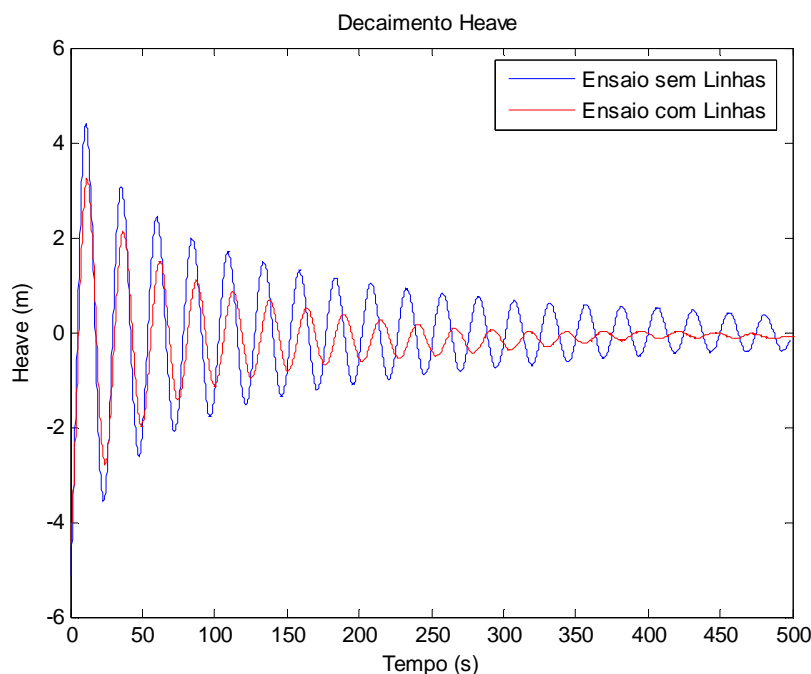


Figura 105 Comparação entre resultados experimentais com e sem *risers* do decaimento de *heave*

⁹ No caso de semi-submersíveis a configuração do casco com colunas de diâmetro fixo, mantém a restauração hidrostática constante, pois essa depende da área de linha d'água.

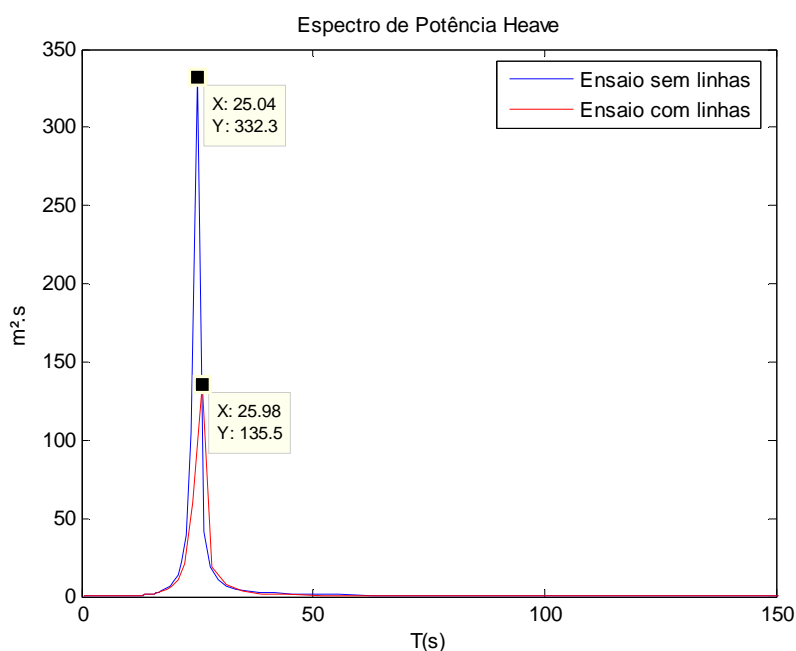


Figura 106 Espectro de potência dos decaimentos de *heave* com e sem *risers*

Já nos decaimentos de *roll*, houve a possibilidade de um maior controle da inércia e conseqüentemente do período natural. Neste ensaio foram introduzidos lastros, cuja configuração manteve o período natural de *roll* igual nos casos com e sem *risers* (Figura 107). No entanto, como observado em todos os outros casos, houve um significativo incremento no amortecimento do modelo.

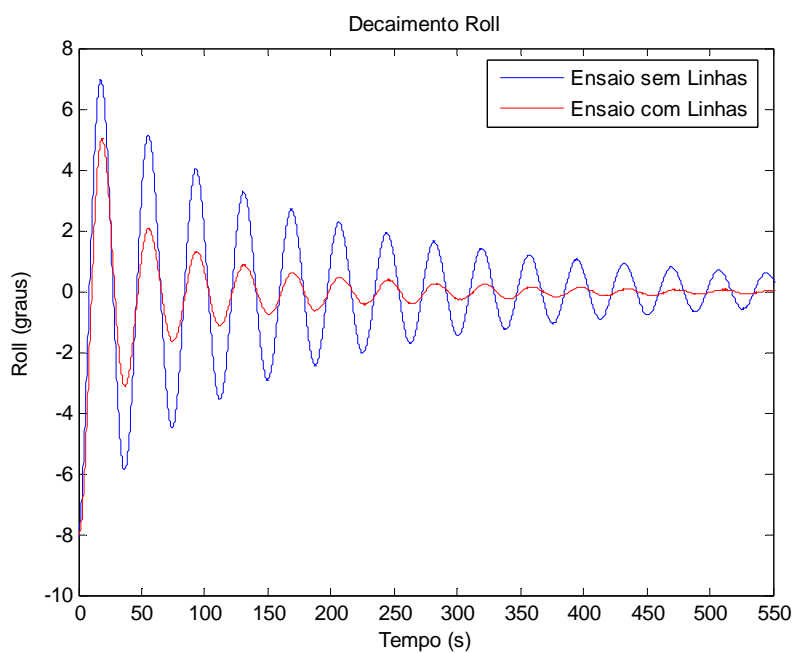


Figura 107 Comparação entre resultados experimentais com e sem *risers* do decaimento de *roll*

De fato, a Figura 108 apresenta a pequena diferença entre os períodos naturais dos dois ensaios.

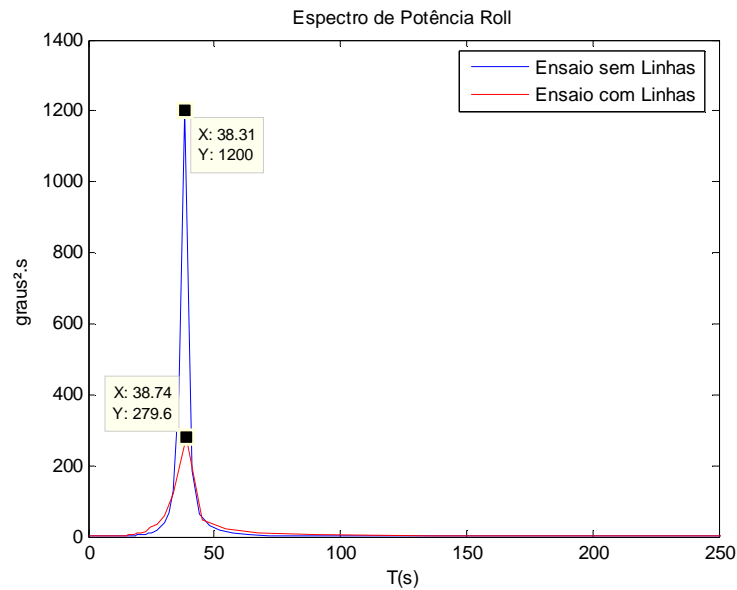


Figura 108 Espectro de potência dos decaimentos de *roll* com e sem *risers*

5.10.2. Comparação de RAO com e sem *risers*

Neste item serão apresentadas as comparações dos resultados de RAO obtidos nos ensaios para os casos com e sem *risers*. A Figura 109, a Figura 110 e a Figura 111 apresentam, respectivamente, os gráficos desta comparação para os RAO de *sway*, *heave* e *roll*.

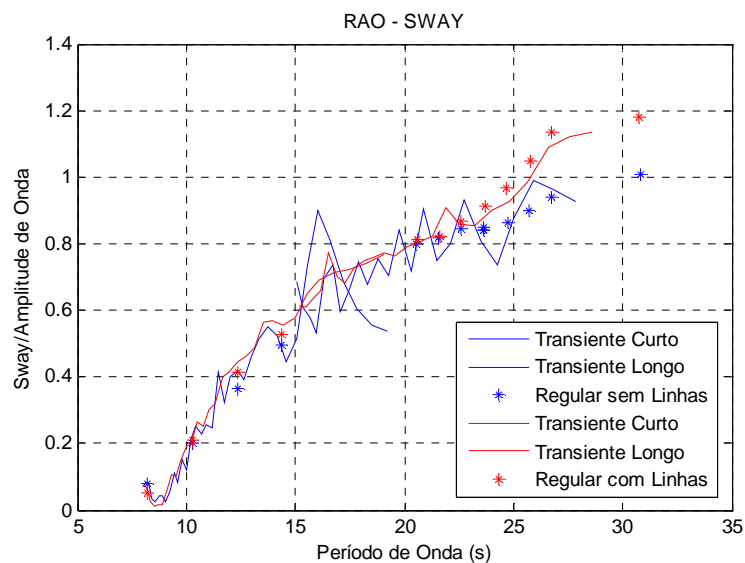


Figura 109 RAO de *sway*: comparação com e sem *risers*

No gráfico de RAO de *sway* é possível notar que, provavelmente, houve um acoplamento com o movimento de *roll* (Figura 111), já que no caso com *risers* os movimentos de *sway* e *roll* aumentam, na mesma faixa de períodos, em relação ao caso sem *risers*. Esse acoplamento parece existir no caso sem *risers* também, mas em uma escala muito menor. Com o movimento significativo de *roll*, perto de 25 segundos, no caso com *risers*, esse acoplamento ficou mais evidente.

Portanto, apesar da ressonância de *sway* estar em períodos bem altos, fora da excitação dos mares comumente observados (como comentado na seção 5.10.1), com a consideração dos *risers* na dinâmica da plataforma, é possível observar um aumento nos níveis de movimento em regiões de períodos muito menores.

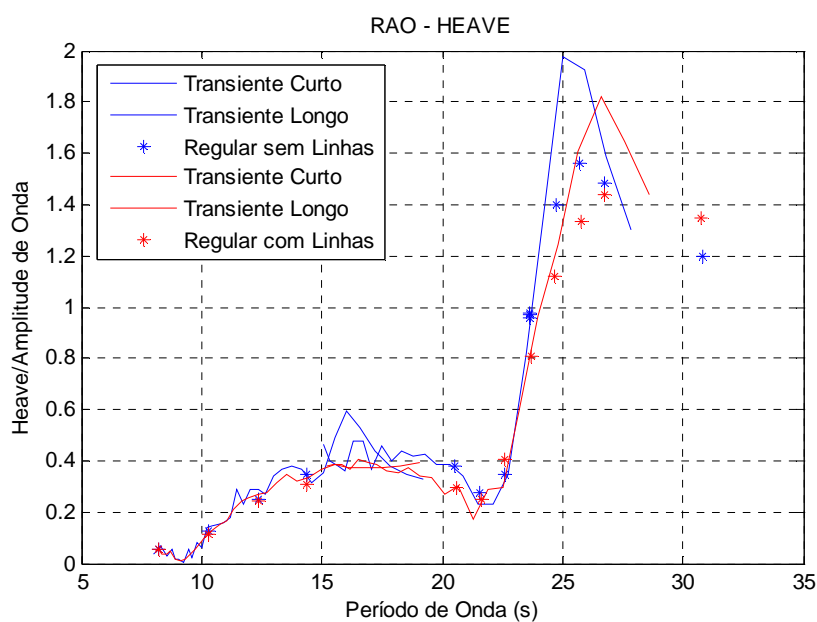


Figura 110 RAO de *heave*: comparação com e sem *risers*

Em geral, para todas as análises de RAO, nos períodos que vão até 23 segundos, os resultados com e sem *risers* tiveram resultados bem parecidos.

No caso do RAO de *heave* não houve exceção. No entanto, conforme já comentado nas comparações dos decaimentos de *heave* com e sem *risers* (Figura 105), é possível observar na Figura 110 uma pequena alteração do período natural, além de um aumento no amortecimento do pico de ressonância. Esse aumento do período natural pode ter ocorrido devido ao aumento da massa adicional ou aumento do amortecimento, ambos obtidos com a introdução dos *riser*.

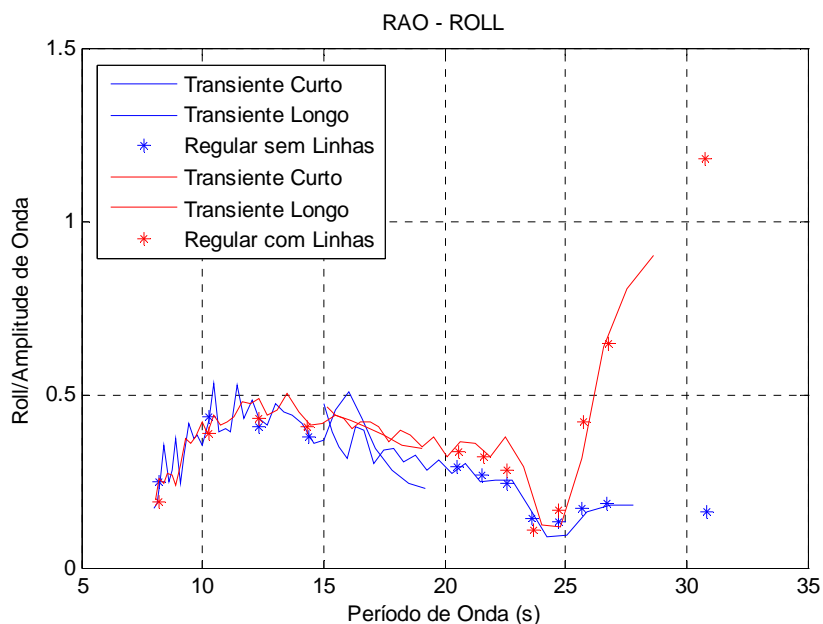


Figura 111 RAO de *roll*: comparação com e sem *risers*

Apesar dos períodos naturais de *roll* com e sem a presença de *risers* serem bastante parecidos, conforme apresentado na Figura 107, o RAO de *roll*, apresentado na Figura 111, indica uma grande diferença na ressonância dos dois casos. Na verdade, o período natural é o mesmo para os dois casos, no entanto, o caso com linhas evidencia uma ressonância antecipada quando comparado com o caso sem *risers*. Esse comportamento será mais bem observado nas comparações com o TPN, apresentadas no capítulo 6. No gráfico da Figura 111 não é possível visualizar a região do período natural, pois, como já foi comentado, há uma limitação do tanque em gerar ondas com períodos muito maiores que 30 segundos para a escala deste ensaio.

5.10.3. Comparação de RAO com e sem *risers* com correnteza

Neste item serão apresentadas as comparações dos resultados obtidos nos ensaios com correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo, sempre para os casos com e sem *risers*. A Figura 112, a Figura 113 e a Figura 114 apresentam, respectivamente, os gráficos desta comparação para os RAO de *sway*, *heave* e *roll*.

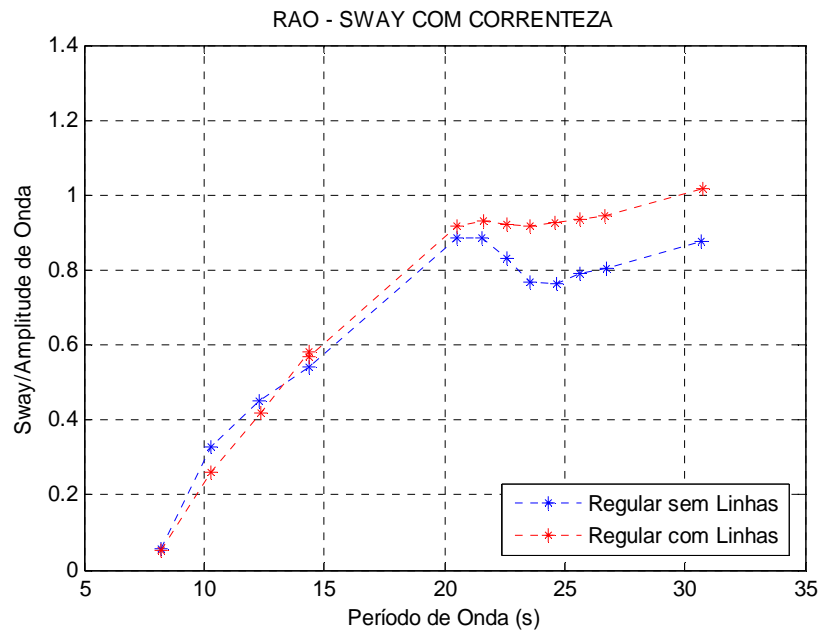


Figura 112 RAO de sway: comparação com e sem risers, em correnteza (U=2.05m/s na escala real)

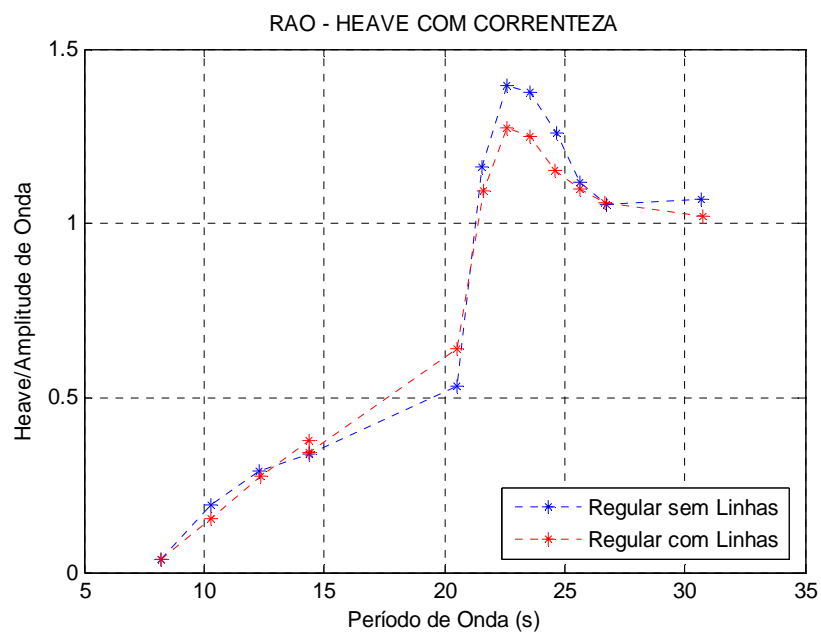


Figura 113 RAO de heave: comparação com e sem risers, em correnteza (U=2.05m/s na escala real)

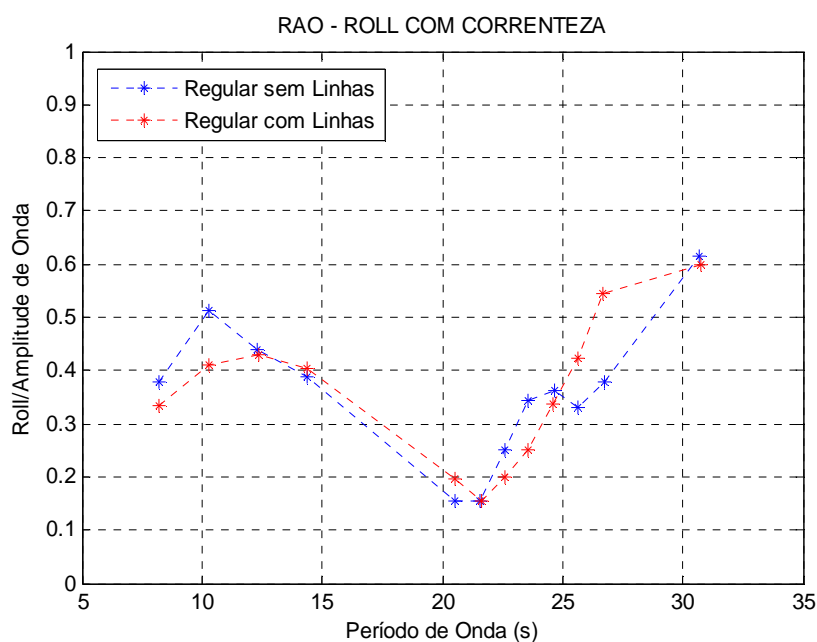


Figura 114 RAO de roll: comparação com e sem risers, em correnteza (U=2.05m/s na escala real)

5.10.4. Comparação de ondas irregulares com e sem risers

Neste item serão apresentadas as estatísticas obtidas com as séries temporais dos ensaios em ondas irregulares. A Tabela 33 apresenta os resultados para ondas irregulares 1 e a Tabela 34 para ondas irregulares 2.

Tabela 33 Estatísticas para ondas irregulares 1

Condição Ambiental	Movimento	sem risers				com risers			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 1 semente 1	Sway (m)	-0.051	0.490	2.788	-2.427	-0.173	0.412	2.180	-2.235
	Heave (m)	0.101	0.317	1.600	-1.757	0.059	0.293	1.902	-1.203
	Roll (graus)	-0.079	0.657	4.539	-3.728	0.043	0.544	4.150	-2.740
onda 1 semente 2	Sway (m)	-0.060	0.586	4.434	-2.279	-0.185	0.390	2.240	-2.223
	Heave (m)	0.071	0.297	1.796	-1.439	-0.057	0.269	1.630	-1.346
	Roll (graus)	-0.060	0.579	3.789	-2.527	0.067	0.501	4.236	-2.360
onda 1 semente 1 correnteza	Sway (m)	-30.297	1.849	-26.240	-40.233	-12.712	1.425	-9.248	-20.910
	Heave (m)	-0.235	0.534	1.815	-2.002	0.798	0.494	3.044	-0.736
	Roll (graus)	0.941	1.310	4.326	-2.711	-0.942	0.830	3.334	-3.637
onda 1 semente 2 correnteza	Sway (m)	-30.540	1.629	-26.412	-37.908	-10.785	1.600	-6.993	-17.073
	Heave (m)	-0.310	0.534	2.164	-1.961	0.754	0.519	3.132	-0.911
	Roll (graus)	-0.151	0.902	4.918	-3.138	-0.314	0.837	3.443	-2.947

Tabela 34 Estatísticas para ondas irregulares 2

Condição Ambiental	Movimento	sem risers				com risers			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 2 semente 1	Sway (m)	0.043	0.817	4.805	-4.435	-0.273	0.888	5.055	-5.297
	Heave (m)	0.063	0.606	3.549	-3.465	-0.136	0.517	2.753	-2.759
	Roll (graus)	-0.107	0.722	3.692	-3.353	0.046	0.651	3.265	-3.302
onda 2 semente 2	Sway (m)	-0.021	0.826	3.239	-3.415	-0.297	0.887	3.487	-4.243
	Heave (m)	0.043	0.605	2.477	-2.177	-0.129	0.515	2.163	-2.403
	Roll (graus)	-0.104	0.737	3.366	-2.872	0.002	0.664	3.173	-2.706
onda 2 semente 1 correnteza	Sway (m)	-31.527	2.152	-25.546	-40.867	-11.872	1.624	-7.045	-19.640
	Heave (m)	-0.357	0.837	2.558	-3.446	0.691	0.769	3.682	-1.953
	Roll (graus)	-0.148	0.998	5.723	-3.056	-0.546	0.947	3.486	-3.674
onda 2 semente 2 correnteza	Sway (m)	-31.760	1.979	-25.484	-39.498	-12.340	1.901	-7.826	-21.011
	Heave (m)	-0.523	0.859	2.501	-3.442	0.651	0.828	3.584	-2.124
	Roll (graus)	-0.177	1.031	4.304	-3.354	-0.576	0.945	4.424	-4.194

De uma maneira geral, os desvios padrões dos casos com *risers* ficaram menores que os dos casos sem *risers*, isso pode ocorrer devido ao amortecimento das linhas. No entanto, pode-se observar nos casos com correnteza, que as médias dos casos com *risers* estão bem abaixo do que os casos sem *risers*. Essa diferença deve-se ao fato de o arranjo de linhas de amarração estar com uma pré-tração muito grande no caso com *risers*, diminuindo assim a deriva do modelo. Portanto, apesar do caso com *risers* ter um arrasto bem maior, devido às linhas conectadas no modelo, este apresentou uma menor média do movimento de *sway*. Esse é um fato importante que deve ser repensado nos próximos ensaios, pois, caso contrário, pode não mostrar corretamente efeitos dos *risers* conectados no modelo, no movimento de *sway*.

6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DO TPN

Neste capítulo serão apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e os numéricos, esses obtidos a partir do código do TPN.

6.1. RESULTADOS SEM *RISERS*

Primeiramente serão apresentados os resultados de comparação numérico-experimental para os casos sem *risers* conectados ao modelo. O primeiro item (6.1.1) apresentará os dados de entrada do modelo numérico. Nos itens subseqüentes serão apresentados os resultados na seguinte ordem: decaimento, ondas regulares, ondas regulares com correnteza e ondas irregulares.

6.1.1. Dados de entrada

Serão apresentadas as matrizes de massa e inércia, restauração hidrostática, amortecimento linear e amortecimento quadrático da plataforma ITTC. Todos os dados são apresentados na escala real.

A matriz de massa e inércia utilizada nos ensaios sem *risers* está apresentada na Tabela 35. Os três primeiros termos são os deslocamentos da plataforma. Os três subseqüentes representam as inércias de rotação em torno dos eixos x, y e z, respectivamente associadas aos movimentos de *roll*, *pitch* e *yaw*. Na Tabela 36 são apresentados os centros de gravidade ensaiados para os casos com e sem correnteza. No caso com correnteza, inicialmente foi imposta ao modelo uma pequena inclinação para que quando com correnteza, este ficasse sem inclinação.

Tabela 35 Matriz de massa e inércia do caso sem *riser*

1	2	3	4	5	6
39354.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	39354.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	39354.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	44211000.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	42900000.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42900000.0

Unidade	
ton	ton.m
ton.m	ton.m ²

Tabela 36 Centro de gravidade do caso sem riser

	sem correnteza	com correnteza
x (m)	0.00	0.00
y (m)	0.00	0.24
z (m)	15.75	15.75

A matriz de restauração hidrostática, Tabela 37, representa as restaurações advindas das variações na força de empuxo. Portanto, só existem nos movimento de *heave*, *roll* e *pitch*, pois somente nesses graus de liberdade há um aumento ou diminuição de flutuação quando a plataforma se movimenta. Esta matriz foi calculada pelo aplicativo WAMIT®.

Tabela 37 Matriz de restauração hidrostática do caso sem riser

1	2	3	4	5	6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	5394.6	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	1896750.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	1831480.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Unidade	
ton/s ²	ton.m/s ²
ton.m/s ²	ton.m ² /s ²

A Tabela 38 e a Tabela 39 apresentam as matrizes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente. A teoria acerca dessas componentes foi discutida nos itens 3.1.10 e 5.8.1.

Tabela 38 Matriz de amortecimento linear do caso sem riser

1	2	3	4	5	6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	130.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	800.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	1150000.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	500000.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Unidade	
ton/s	ton.m/s
ton.m/s	ton.m ² /s

Tabela 39 Matriz de amortecimento quadrático do caso sem *riser*

1	2	3	4	5	6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	2000.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1200.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	200000.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Unidade	
ton/m	ton.m
ton	ton.m ²

6.1.2. Resultados de decaimentos

A seguir serão apresentados os resultados das séries temporais de decaimento, bem como os respectivos espectros de potência, referentes à comparação entre os resultados experimentais e os obtidos com as análises numéricas no TPN. Nesta primeira etapa serão apresentados os resultados sem a presença de *risers*.

A Figura 77 e a Figura 78 apresentam, respectivamente, as séries temporais e o espectros de potência, dos decaimentos obtidos no experimento de *sway* sem *risers* e no TPN.

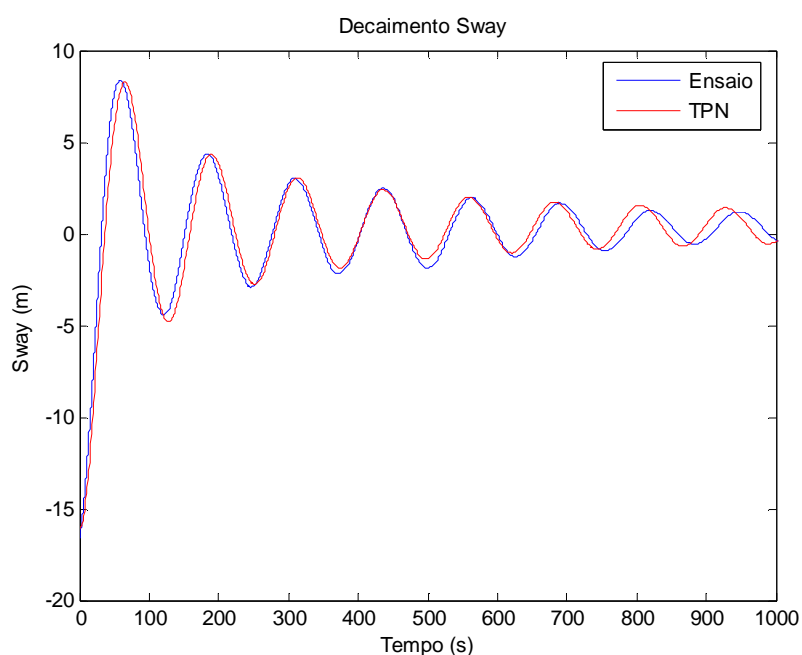


Figura 115 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *sway*

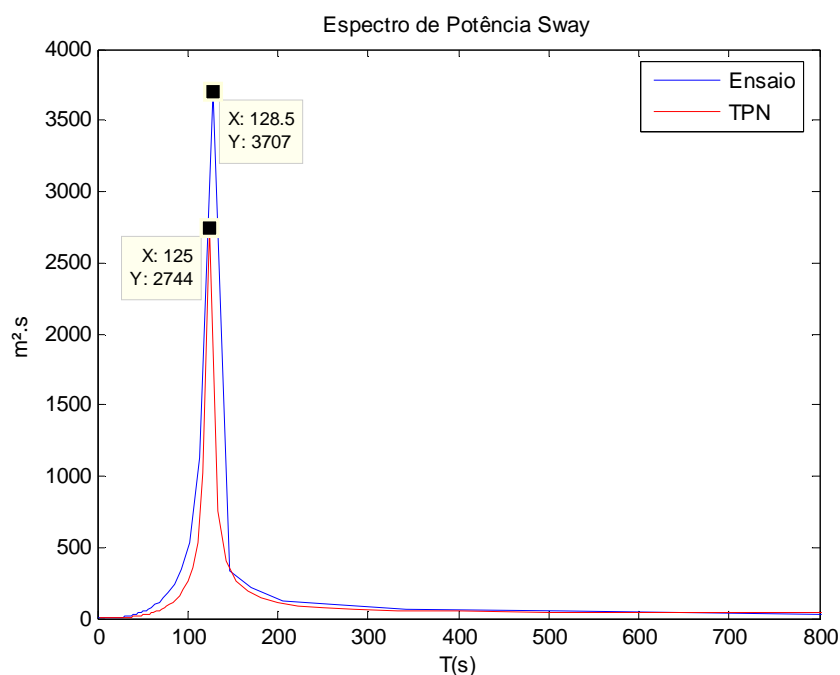


Figura 116 Espectro de potência dos decaimentos de sway: numérico e experimental

A partir das análises das figuras apresentadas pode-se concluir que o TPN reproduziu bem o decaimento de sway. Houve uma diferença entre os períodos naturais do experimento (128.5 segundos) e do TPN (125.0 segundos), que ficou em 2.7%. Existem algumas fontes de incerteza na obtenção dos dados do experimento, como posição dos pontos de amarração, posição de lastros no modelo, ou ainda, o próprio erro dos sistemas de aquisição de dados utilizados. Além disso, podem existir fenômenos que não são compreendidos pela teoria potencial, conforme comentado na seção 5.8.4. No entanto, acredita-se que erros nesta ordem de grandeza, obtidos no decaimento de sway, estão em uma boa faixa de aceitação. Maiores discussões sobre o assunto podem ser encontradas na referência [7].

A Figura 117 e a Figura 118 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos com o experimento e com o modelo numérico do TPN, para o decaimento de heave sem a presença de risers conectados ao modelo.

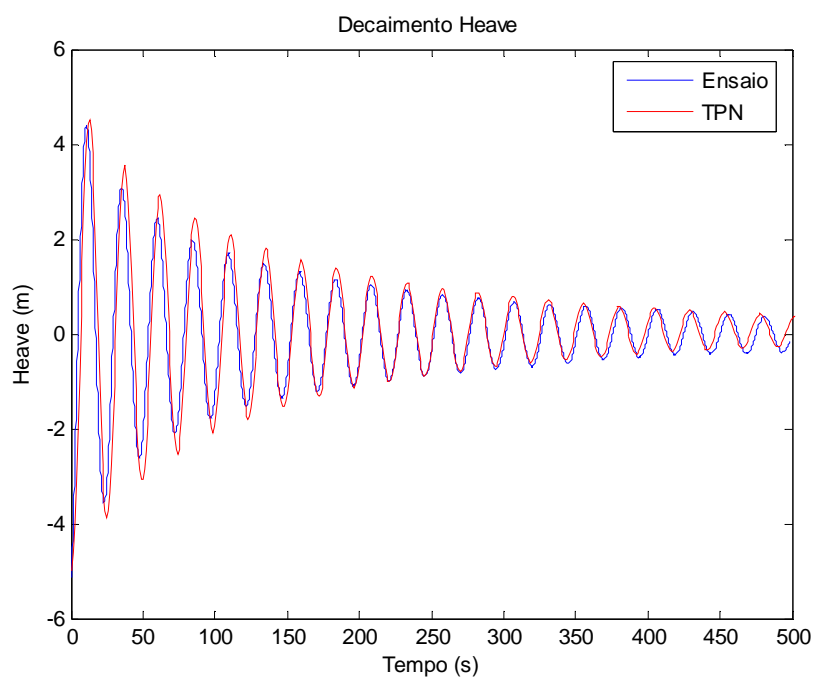


Figura 117 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *heave*

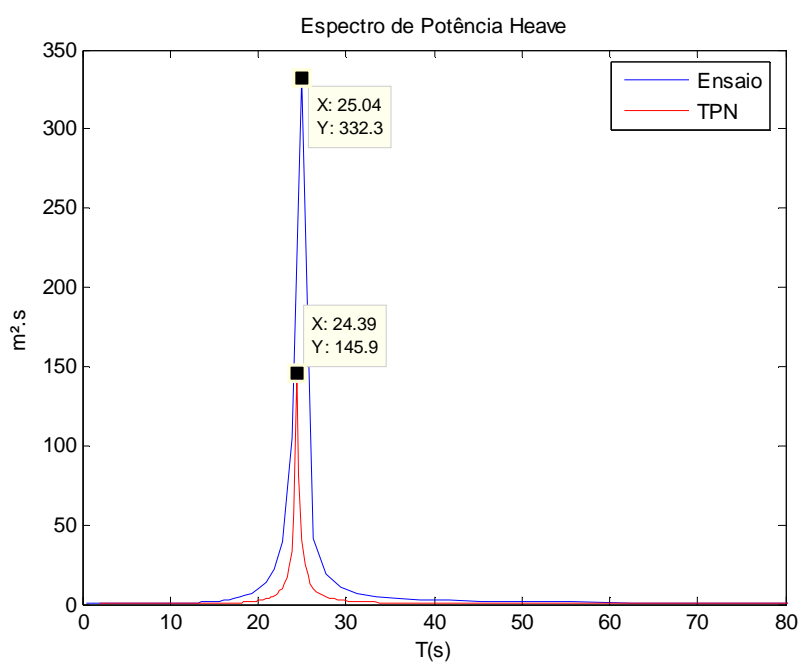


Figura 118 Espectro de potência dos decaimentos de *heave*: numérico e experimental

A diferença no período natural do decaimento de *heave* ficou bem próxima da obtida no decaimento de *sway*, com 2.6% de erro, sendo que o período para o experimento foi de 25.04 segundos e o do TPN 24.39 segundos.

A Figura 119 apresenta a série temporal de decaimento de *roll* e a Figura 120 o respectivo espectro de potência, para o caso sem *risers*.

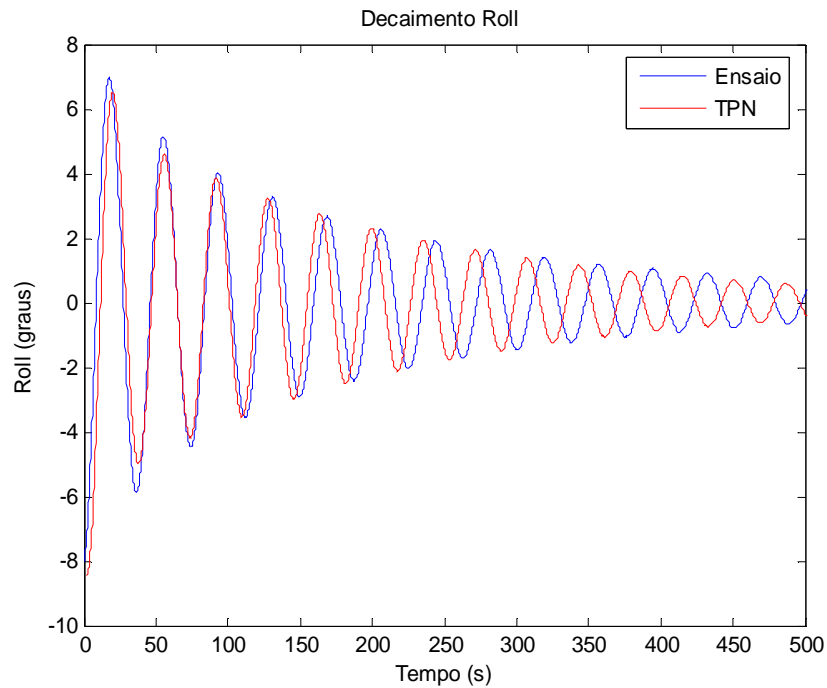


Figura 119 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *roll*

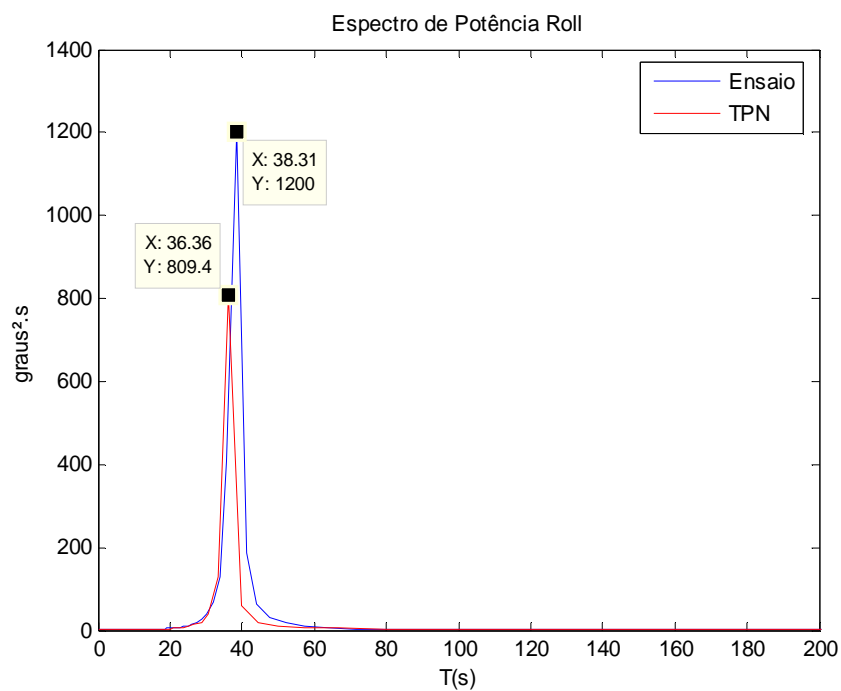


Figura 120 Espectro de potência dos decaimentos de *roll*: numérico e experimental

Neste caso, foi obtida a maior diferença entre as comparações numérico-experimentais de decaimento. No experimento, o período natural de *roll* foi 38.31 segundos e no TPN o resultado foi 36.36 segundos. O erro obtido foi de 5.09%.

Provavelmente, essa diferença tenha origem nos erros de medição da posição dos lastros utilizados no modelo reduzido no IPT. Isso pode causar duas conseqüências que influenciam principalmente o movimento de *roll*: alteração no CG ou alteração na inércia de *roll* do modelo. Essa duas hipóteses não acarretam em alterações nos períodos de *heave* e *sway*¹⁰, o que reflete a situação dos resultados obtidos.

6.1.3. Resultados em ondas regulares

Neste item serão apresentados os resultados de gráficos de RAO, obtidos a partir de ondas regulares. Serão comparados, portando, os movimentos nos três graus de liberdade, do movimento da plataforma para diversas ondas regulares nos diversos períodos.

A Figura 121, a Figura 122 e a Figura 123 apresentam a comparação desses resultados, nos casos numéricos e experimentais, para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente.

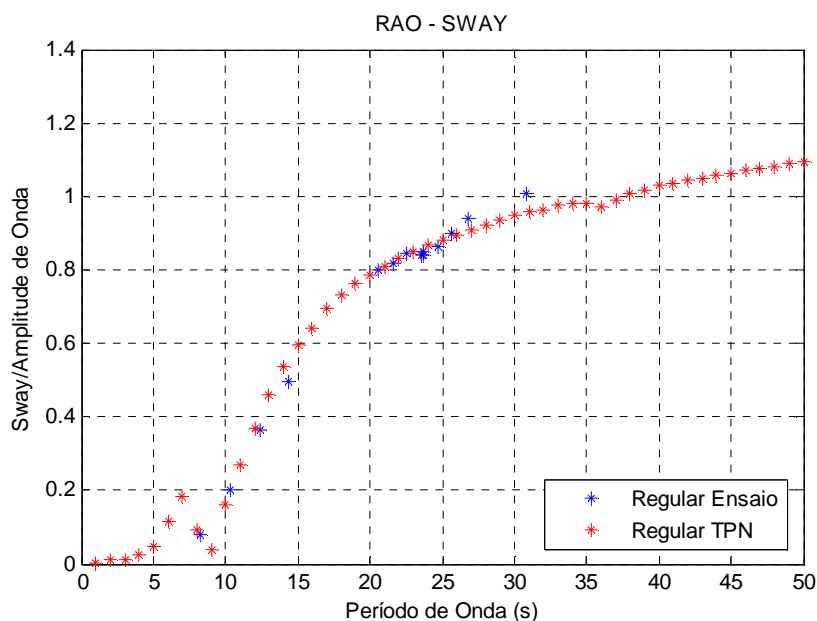


Figura 121 RAO de *sway*: numérico e experimental

¹⁰ As alterações citadas podem vir a modificar o movimento de *sway*, pois, como há um pequeno acoplamento com o movimento de *roll*, mudanças neste último, podem influenciar o primeiro. No entanto, como foi observado nos resultados, este fenômeno não se mostrou importante.

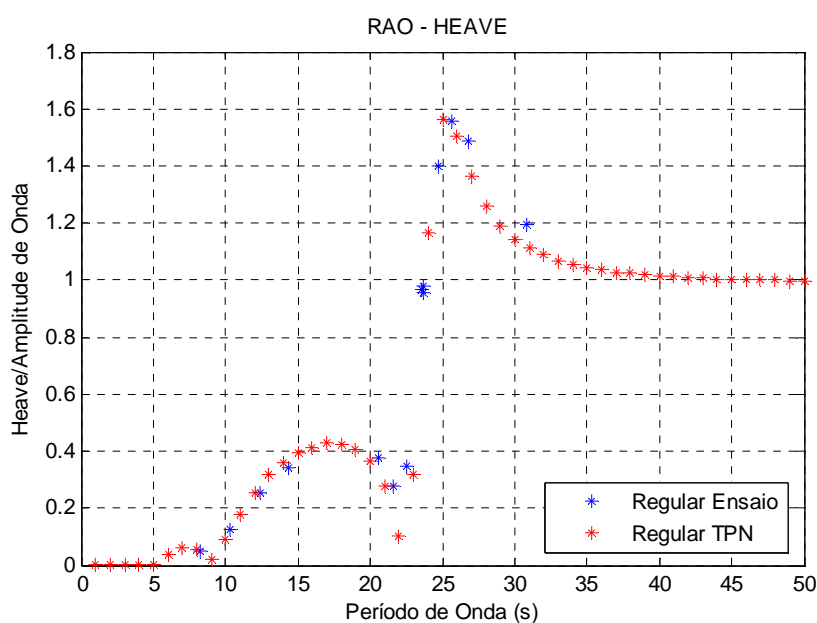


Figura 122 RAO de *heave*: numérico e experimental

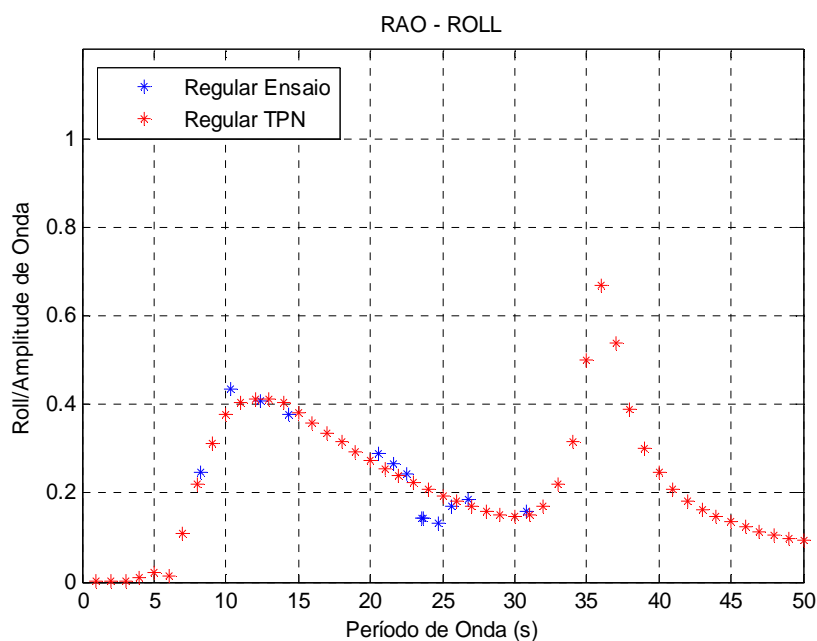


Figura 123 RAO de *roll*: numérico e experimental

De acordo com os gráficos apresentados, os resultados obtidos para comparação dos RAOs numéricos e experimentais apresentaram boa concordância, refletindo as análises feitas nos ensaios de decaimento. No entanto, na Figura 123, não foi possível observar o erro no período natural e no amortecimento de *roll* (verificado nos decaimentos), já que este está em uma faixa de períodos em que não foi possível gerar ondas, devido a limitações do tanque na escala utilizada.

Conforme comentado, os dados hidrodinâmicos da plataforma foram obtidos com análise em profundidade infinita. Retomando a discussão feita no item 5.8.2, sobre os resultados em profundidade finita, a Figura 124 apresenta os mesmos resultados do RAO de *sway* da Figura 121¹¹, acrescidos dos resultados obtidos com o TPN, agora com dados hidrodinâmicos do WAMIT® analisado em profundidade finita.

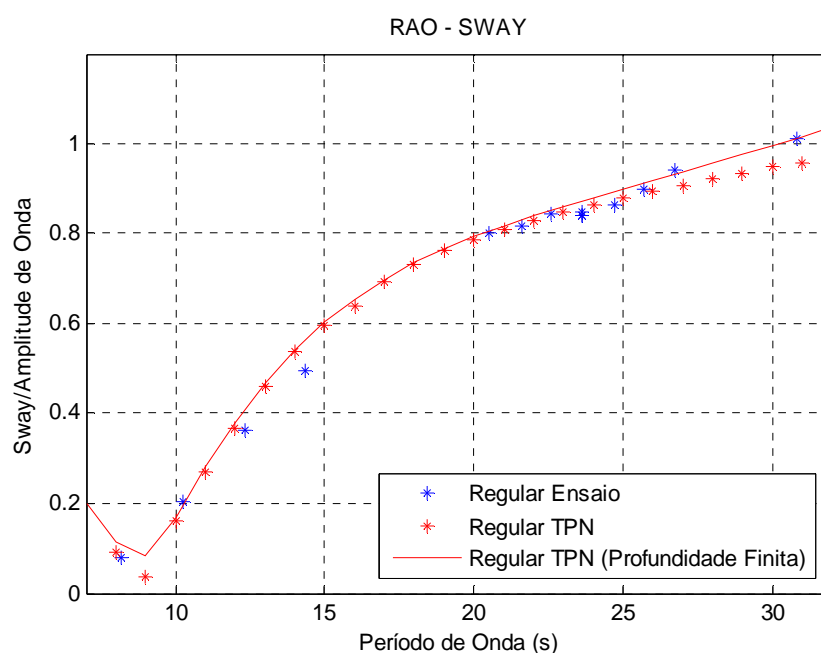


Figura 124 RAO de *sway*: experimental e numérico (com e sem dados hidrodinâmicos de profundidade finita)

Como é possível observar, para períodos maiores que 25 segundos o RAO obtido com dados hidrodinâmicos de análise em profundidade finita apresenta uma diferença em relação aos resultados apresentados com profundidade infinita da Figura 121. Nas análises com profundidade finita o resultado numérico coincide com o experimental. No entanto, para região até 30 segundos essa influência se mostrou pequena.

Outro ponto a ser abordado é a influência das linhas de ancoragem horizontais no comportamento da unidade. Na Figura 60 foi apresentado o resultado do WAMIT®¹² com profundidade finita. Mesmo nesse caso houve uma diferença em relação ao ensaio, que foi suprimida com a consideração das linhas de ancoragem no TPN.

¹¹ As escalas do eixo "x" (período de onda em segundos) e do eixo "y" (*Sway/Amplitude de onda*) foram alteradas para possibilitar uma melhor visualização da diferença dos resultados obtidos em profundidade finita e infinita.

¹² O WAMIT pode conter uma restauração linear nas suas análises.

6.1.4. Resultados em ondas regulares com correnteza

Neste item serão apresentados os resultados de resposta de movimento da plataforma em ondas regulares, para os casos numéricos e experimentais com correnteza de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo. A Figura 125, a Figura 126 e a Figura 127 mostram, respectivamente, esses resultados para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*.

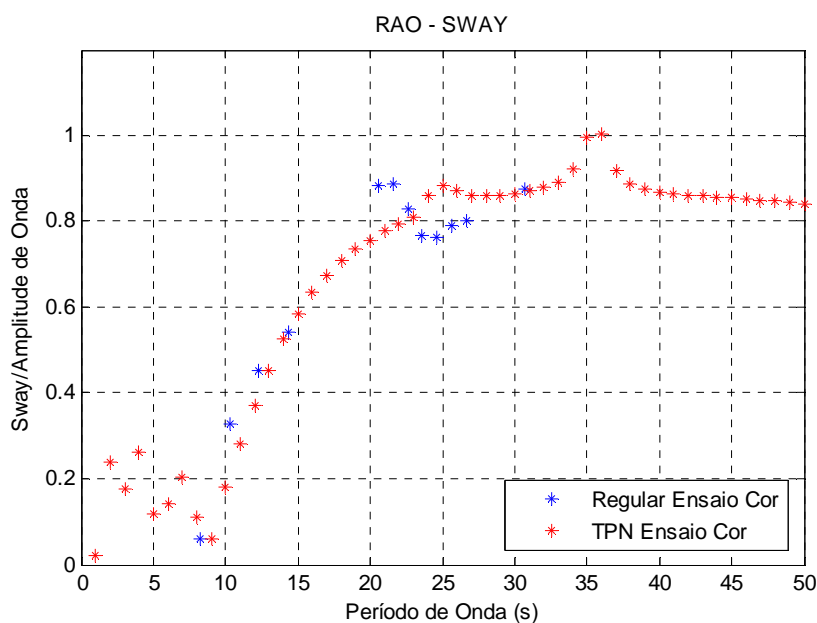


Figura 125 RAO de *sway*: numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

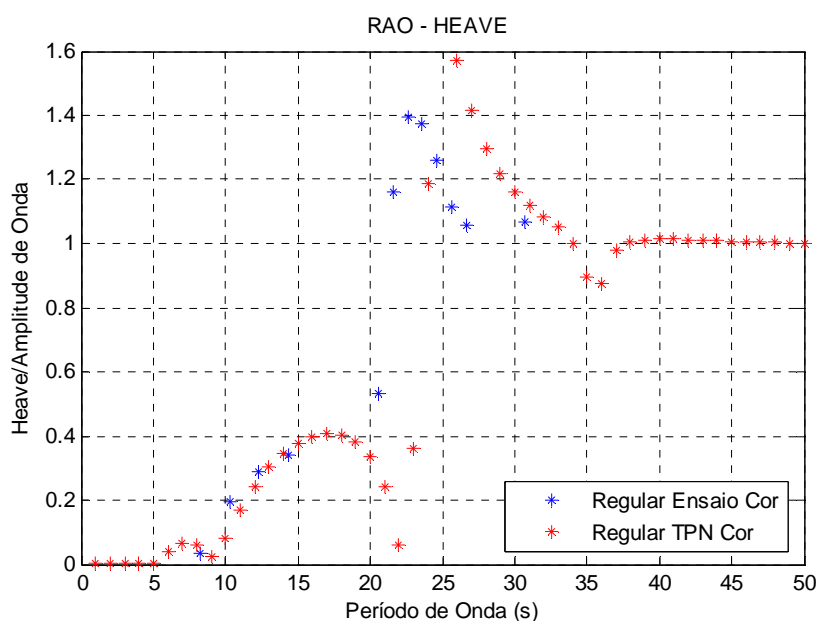


Figura 126 RAO de *heave*: numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

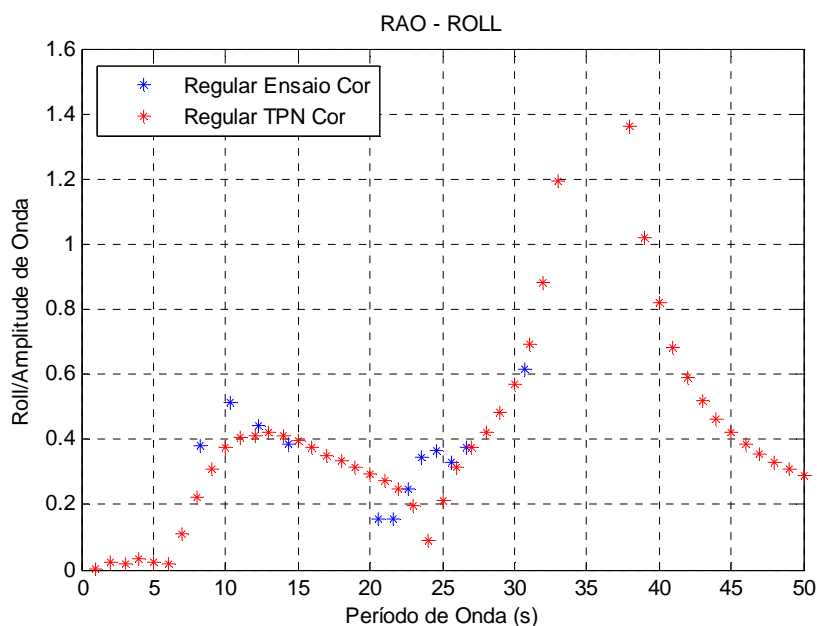


Figura 127 RAO de roll: numérico e experimental com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Na comparação experimental dos casos com e sem correnteza (seção 5.8.4), foi observado um deslocamento dos períodos naturais e pontos de cancelamento dos resultados com correnteza. Na comparação dos resultados experimentais com os numéricos, obtidos através do TPN, foi observado um comportamento semelhante. O TPN não reproduziu o deslocamento dos pontos apresentados nos RAOs dos ensaios realizados com correnteza. Esse comportamento pode ser nitidamente observado no RAO de *heave*, no qual o período natural obtido no TPN (26 segundos) difere do obtido no experimento (23 segundos).

A constatação dessas diferenças, juntamente com o fato do TPN utilizar a teoria potencial, apresenta mais indícios de que as causas levantadas na seção 5.8.4, atribuindo esse comportamento a efeitos viscosos, podem ser verdadeiras. Portanto, as diferenças apresentadas nos gráficos desta seção podem ser atribuídas a efeitos não potenciais que foram observados somente nos ensaios com correnteza.

6.1.5. Resultados em ondas irregulares

Neste item serão apresentados os espectros de potência e as estatísticas obtidas das séries temporais dos ensaios em ondas irregulares, comparadas com as obtidas com as análises numéricas no TPN.

A Figura 128, a Figura 129 e a Figura 130 apresentam respectivamente os espectros de potência dos movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, obtidos a partir de análises com a onda irregular 1, apresentada na Tabela 11.

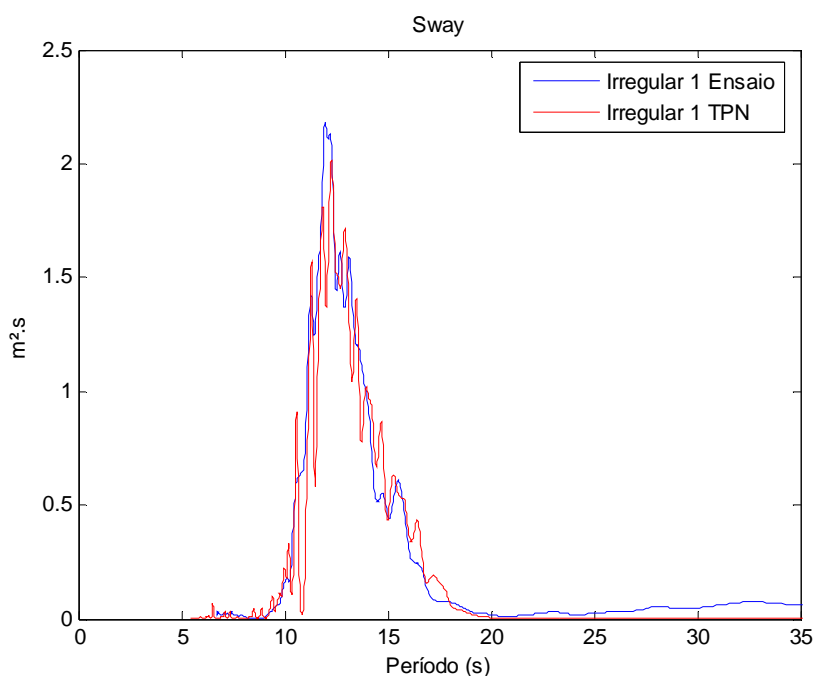


Figura 128 Espectro de potência do movimento de *sway* onda irregular 1

Nos movimentos de *heave* e de *roll* é possível observar um alto nível de movimento nas regiões perto do período natural de cada um dos graus de liberdade. Como no movimento de *sway* o período natural é alto, perto de 100 segundos essa influência não é percebida no resultado deste grau de liberdade.

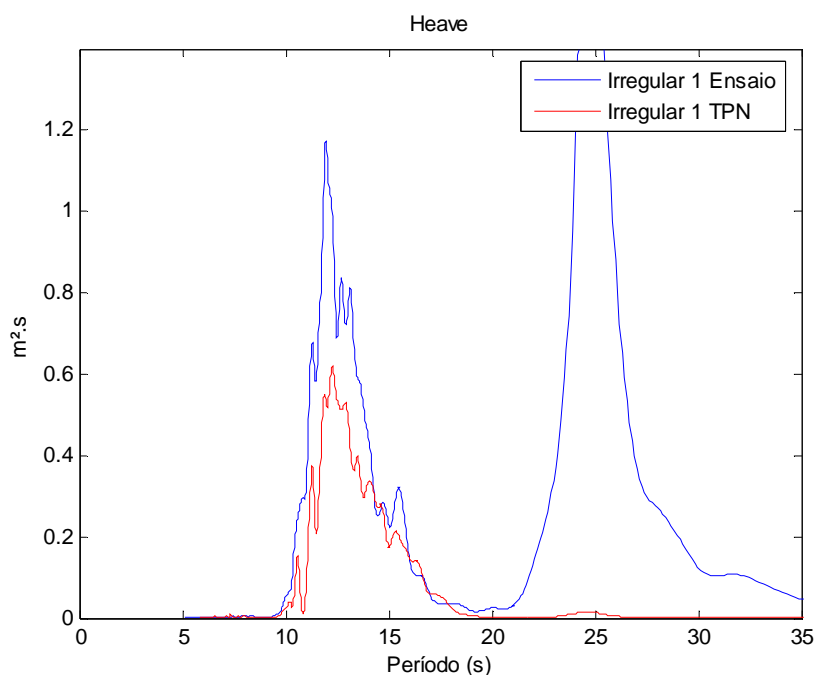


Figura 129 Espectro de potência do movimento de *heave* onda irregular 1

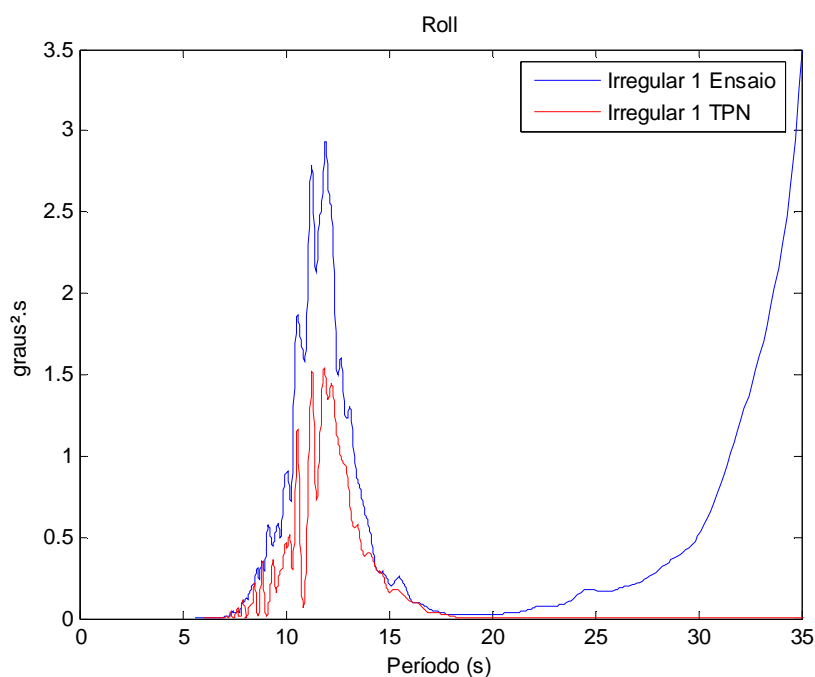


Figura 130 Espectro de potência do movimento de *roll* onda irregular 1

Como apresentado nas figuras, a comparação entre os comportamentos numéricos e os experimentais mostraram-se consistentes, na medida em que os movimentos na região do período de pico da onda foram reproduzidos com alguma diferença na amplitude dos picos de *heave* e *roll*.

Com base no estudo apresentado na referência [18] , a questão do movimento de *heave* e *roll* fora do período da onda será mais bem avaliada. O texto discute a questão da segunda ordem do movimento desses dois graus de liberdade em uma plataforma semi-submersível. Figura 131 e a Figura 132 apresentam os resultados de movimento de *heave* e de *roll*, respectivamente, bem como o espectro de potência (normalizado por fator adequado) da onda que excitou o modelo. É possível notar um movimento lento, com frequência fora da região em que a onda ainda tem alguma energia. Esse movimento lento é chamado de movimento de baixa frequência devido a forças de segunda ordem.

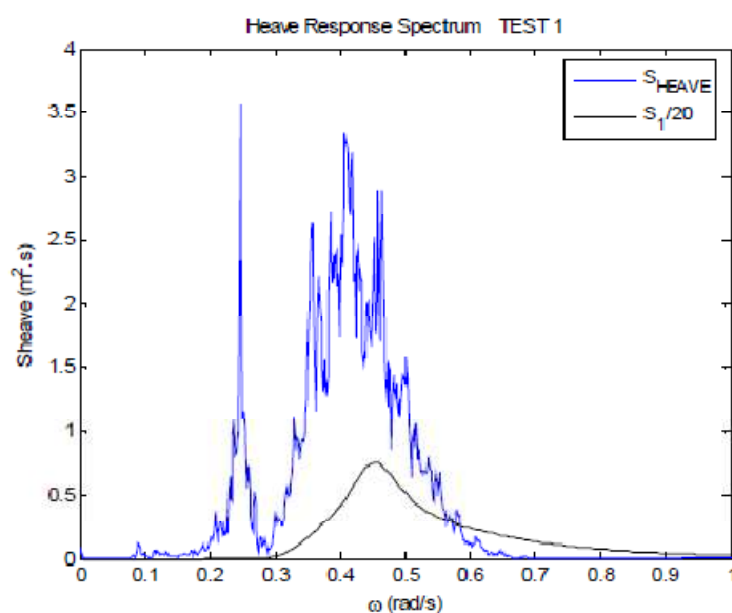


Figura 131 Espectro de potência do movimento de *heave* (referência [18])

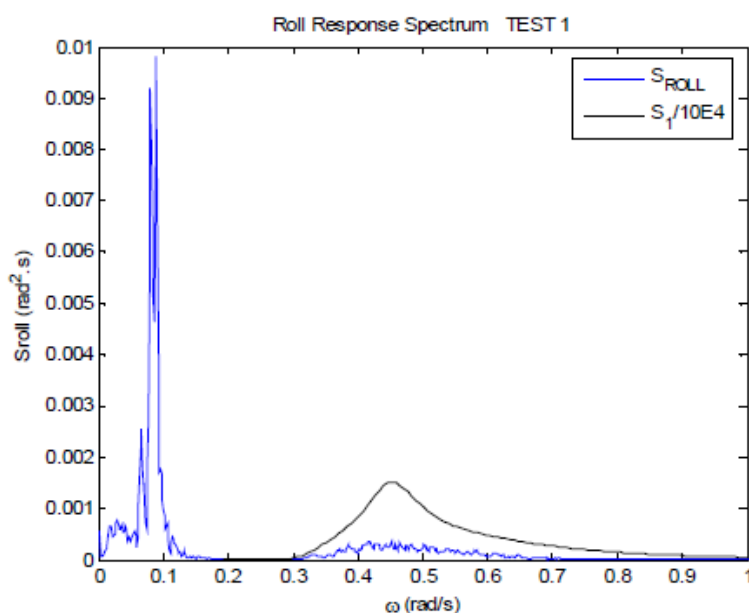


Figura 132 Espectro de potência do movimento de *roll* (referência [18])

Os gráficos da Figura 129 e da Figura 130 foram refeitos em função das frequências angulares, ao invés de períodos, para melhor comparação com os resultados da referência [18]. A Figura 133 e a Figura 134 apresentam, portanto, o resultado de movimento de *heave* e *roll*, respectivamente, bem como o espectro de potência da onda normalizado. O comportamento observado é bem parecido com o do apresentado na referência, sendo que há um movimento significativo fora da região de influência da onda. Portanto, é possível concluir que essas respostas são movimento de segunda ordem.

O código de resposta de movimento de segunda ordem foi recentemente incorporado ao TPN e se encontra em fase de testes. Por esse motivo, as análises aqui apresentadas não utilizaram esta função, sendo o foco dado para as análises de primeira ordem, ou seja, no período da onda incidente.

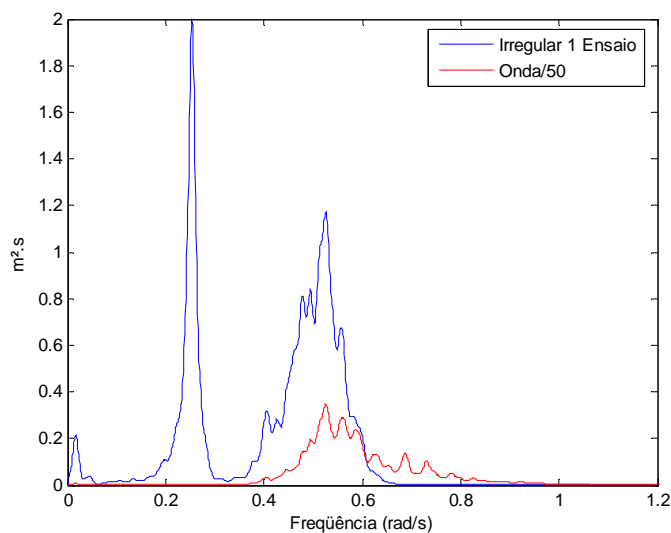


Figura 133 Espectro de potência do movimento de *heave* e da onda irregular 1 em rad/s

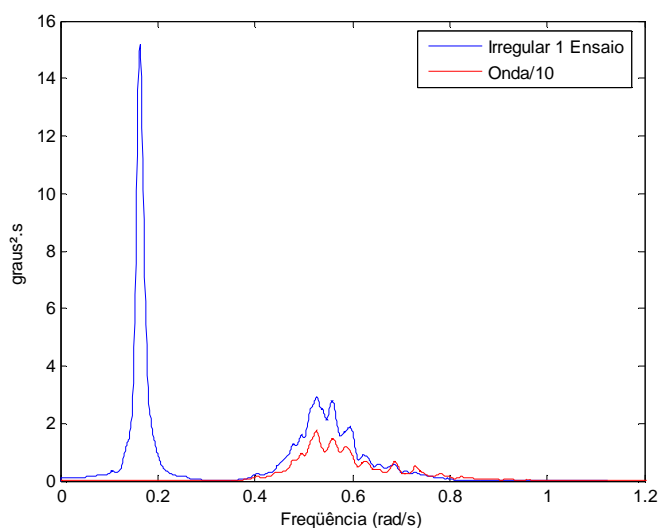


Figura 134 Espectro de potência do movimento de *roll* e da onda irregular 1 em rad/s

Além do TPN, as análises hidrodinâmicas com o WAMIT® também podem ser realizadas com cálculos dos movimentos de segunda ordem da plataforma

A Figura 135, a Figura 136 e a Figura 137 apresentam os espectros de potência dos movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente, para análises obtidas a partir de análises com a onda irregular 2, apresentada na Tabela 11.

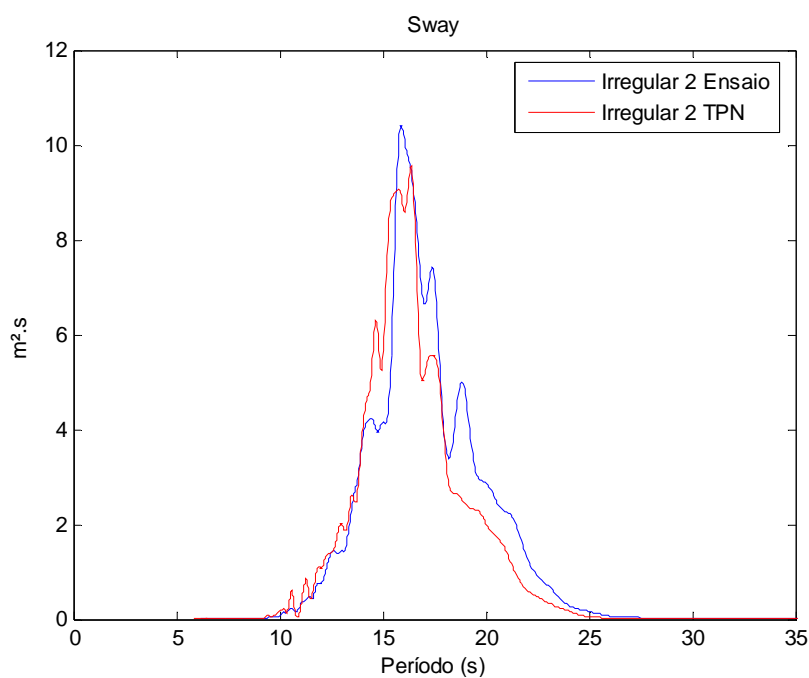


Figura 135 Espectro de potência do movimento de *sway* onda irregular 2

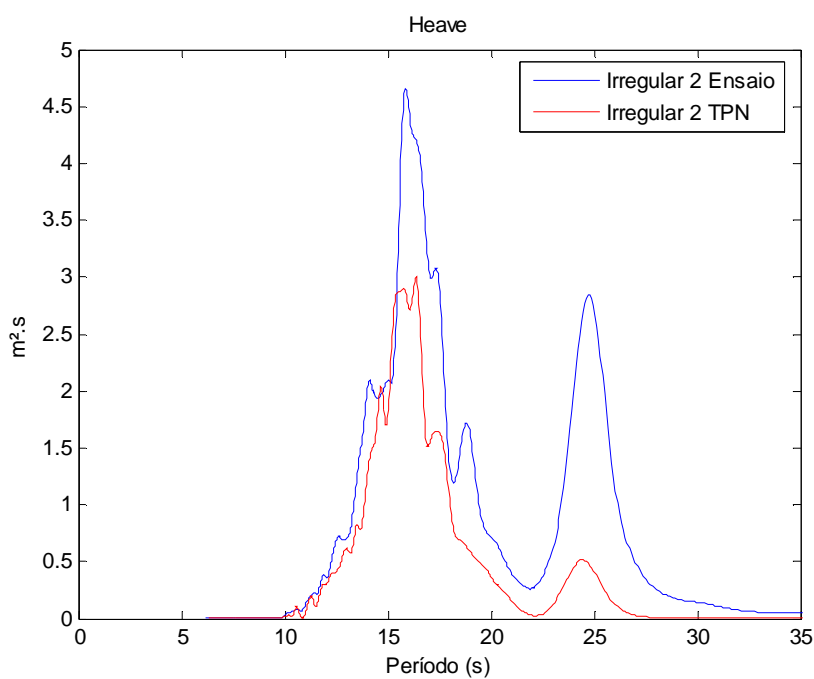


Figura 136 Espectro de potência do movimento de *heave* onda irregular 2

Da mesma maneira que no caso da onda irregular 1, os resultados experimentais apresentaram energia nas respectivas regiões do período natural, provavelmente associadas ao movimento de segunda ordem. No entanto, com a onda irregular 2, uma parcela de energia no período natural, para o resultado do movimento de *heave* foi observada através do espectro de potência do TPN, diferentemente da situação observada com a onda irregular 1. Isso pode ter ocorrido devido ao pico do espectro da onda irregular 2 estar mais próximo do período natural de *heave* e, com isso, proporcionar ainda mais energia nessa região. Apesar de pequena, face às excitações de primeira ordem, como se trata de uma região ressonante, pode ser observada uma resposta significativa.

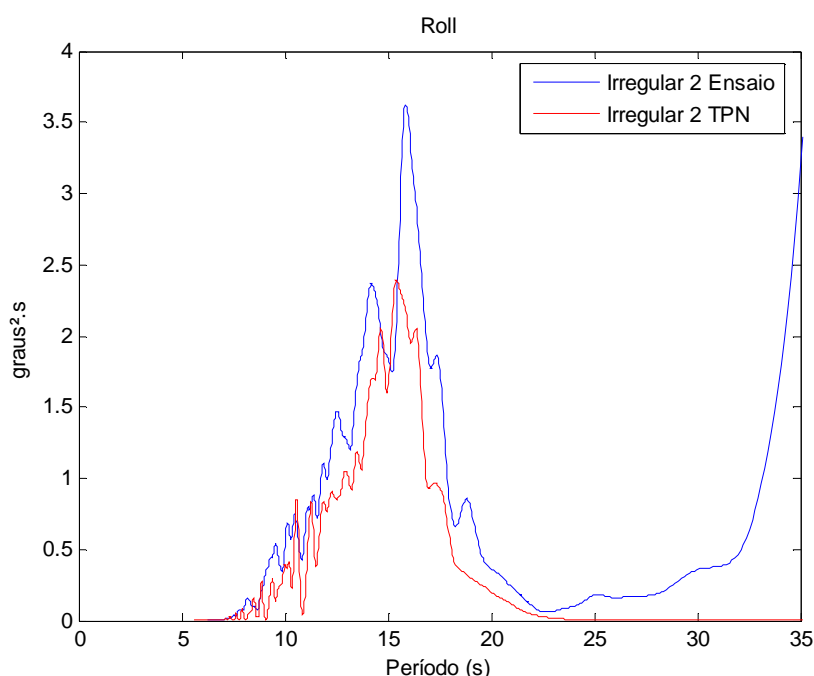


Figura 137 Espectro de potência do movimento de *roll* onda irregular 2

A seguir serão apresentados os resultados estatísticos das séries temporais obtidas nas análises com ondas irregulares.

A Tabela 40 apresenta os resultados para as ondas irregulares 1 e a Tabela 41 para as ondas irregulares 2. No caso do TPN foram feitas as análises somente para uma semente aleatória.

Tabela 40 Estatísticas para ondas irregulares 1: numérico e experimental

Condição Ambiental	Movimento	sem risers ensaio				sem risers TPN			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 1 semente 1	Sway (m)	-0.051	0.490	2.788	-2.427	-0.474	0.610	2.518	-2.013
	Heave (m)	0.101	0.317	1.600	-1.757	0.063	0.227	0.753	-0.818
	Roll (graus)	-0.079	0.657	4.539	-3.728	0.038	0.416	1.602	-1.483
onda 1 semente 1 correnteza	Sway (m)	-30.297	1.849	-26.240	-40.233	-33.193	0.490	-31.462	-35.254
	Heave (m)	-0.235	0.534	1.815	-2.002	0.055	0.216	0.774	-0.729
	Roll (graus)	0.941	1.310	4.326	-2.711	-0.088	0.419	1.398	-1.644

Tabela 41 Estatísticas para ondas irregulares 2: numérico e experimental

Condição Ambiental	Movimento	sem risers ensaio				sem risers TPN			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 2 semente 1	Sway (m)	0.043	0.817	4.805	-4.435	-0.463	1.337	4.990	-4.115
	Heave (m)	0.063	0.606	3.549	-3.465	0.043	0.703	2.388	-2.333
	Roll (graus)	-0.107	0.722	3.692	-3.353	0.037	0.728	2.663	-2.388
onda 2 semente 1 correnteza	Sway (m)	-31.527	2.152	-25.546	-40.867	-34.585	1.525	-30.779	-41.494
	Heave (m)	-0.357	0.837	2.558	-3.446	0.034	0.676	2.340	-2.279
	Roll (graus)	-0.148	0.998	5.723	-3.056	-0.007	0.761	2.952	-2.423

Nas estatísticas de *sway* sem correnteza, os resultados numéricos e experimentais de máximo e de mínimo ficaram bem próximos, tanto para onda irregular 1 quanto para a 2. No entanto, é possível notar uma diferença nos desvios padrões dos dois casos, sendo que no TPN esta estatística foi sempre superior em valores característicos.

Já para *heave* e *roll* os pontos de máximo e de mínimo numéricos foram menores que os resultados obtidos experimentalmente. Isso pode ter ocorrido por ruídos nos equipamentos de aquisição de dados, ou por ondas de reflexão incidindo sobre o modelo. Em termos dos desvios padrões, esses foram menores somente no ensaio com a onda irregular 1, já no caso da onda irregular 2, ficaram bem próximos.

Nos casos com correnteza, todos os desvios padrões e os pontos de máximo e de mínimo ficaram menores nos resultados numéricos. Analisando as séries temporais de onda desses casos é possível visualizar uma onda com período alto que pode causar esta diferença.

No caso sem correnteza, esta componente da excitação foi eliminada com aplicação de um filtro para períodos maiores que 50 segundos. No entanto, para os casos com correnteza esse procedimento não pode ser realizado, pois aplicando o filtro nas séries temporais de *sway*, por exemplo, esta perde a informação da deriva do modelo, como o caso que pôde ser visualizado na Figura 101.

A Figura 138 apresenta uma comparação de série temporal de *heave* com e sem a aplicação do filtro. Nela pode ser observada a redução do desvio padrão, bem como a redução da amplitude máxima do movimento.

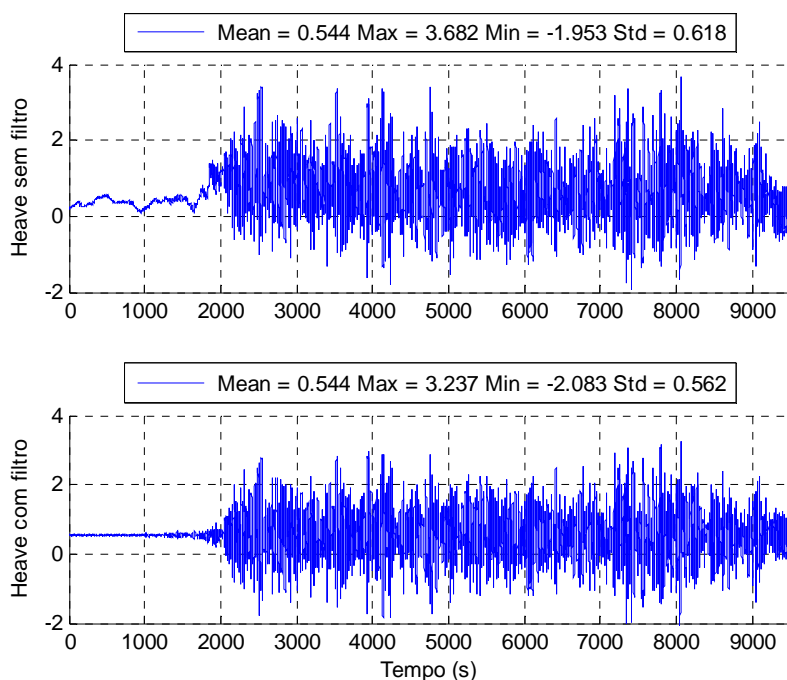


Figura 138 Exemplo de onda irregular com e sem a aplicação de filtro

6.2. RESULTADOS COM *RISERS*

Neste item serão apresentados os resultados das comparações com *risers*.

Assim como no caso sem *risers*, primeiramente serão introduzidos os dados de entrada das simulações e depois os resultados.

6.2.1. Dados de entrada

Serão apresentadas somente as matrizes de massa e inércia e a de restauração hidrostática. As matrizes de amortecimento externo são idênticas as do caso sem *risers* (Tabela 38 e Tabela 39), já que os coeficientes foram determinados somente para o casco. O maior amortecimento dos casos com *risers* observado nos decaimentos ocorreu exclusivamente devido ao arrasto das linhas.

A Tabela 42 apresenta a matriz de massa e inércia utilizada nos ensaios com *risers*. Pode-se observar que houve uma redução na massa do modelo, já que com a introdução das linhas, retirou-se lastro para manter o calado. Também por causa do arranjo assimétrico de *risers*, o centro de gravidade teve sua posição transversal deslocada. Assim como no caso sem *risers*, houve uma mudança no centro de gravidade, para que o modelo ficasse sem inclinação quando com correnteza.

Tabela 42 Matriz de massa e inércia do caso com *risers*

1	2	3	4	5	6
38050.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	38050.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	38050.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	50700000.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	49900000.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32900000.0

Unidade	
ton	ton.m
ton.m	ton.m ²

Tabela 43 Centro de gravidade do caso com *risers*

	sem correnteza	com correnteza
x (m)	0.00	0.00
y (m)	1.55	0.69
z (m)	16.65	16.65

A Tabela 44 apresenta a matriz de restauração hidrostática

Tabela 44 Matriz de restauração hidrostática do caso com *risers*

1	2	3	4	5	6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	5394.6	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	1896750.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	1831480.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Unidade	
ton/s ²	ton.m/s ²
ton.m/s ²	ton.m ² /s ²

6.2.2. Resultados de decaimentos

A seguir serão apresentados os resultados experimentais das séries temporais de decaimento, e os respectivos espectros de potência comparados com os obtidos a partir das análises numéricas com o TPN. Neste caso serão apresentados os resultados com *risers* conectados ao modelo.

A Figura 139 e a Figura 140 apresentam, respectivamente, a série temporal obtida no ensaio de decaimento de *sway* com *risers* e o espectro de potência desta série.

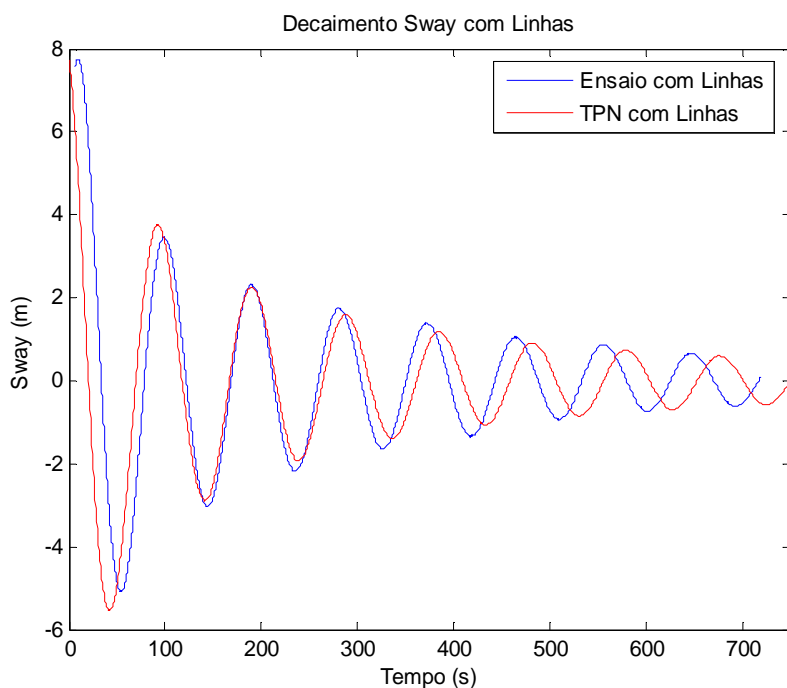


Figura 139 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *sway* com *risers*

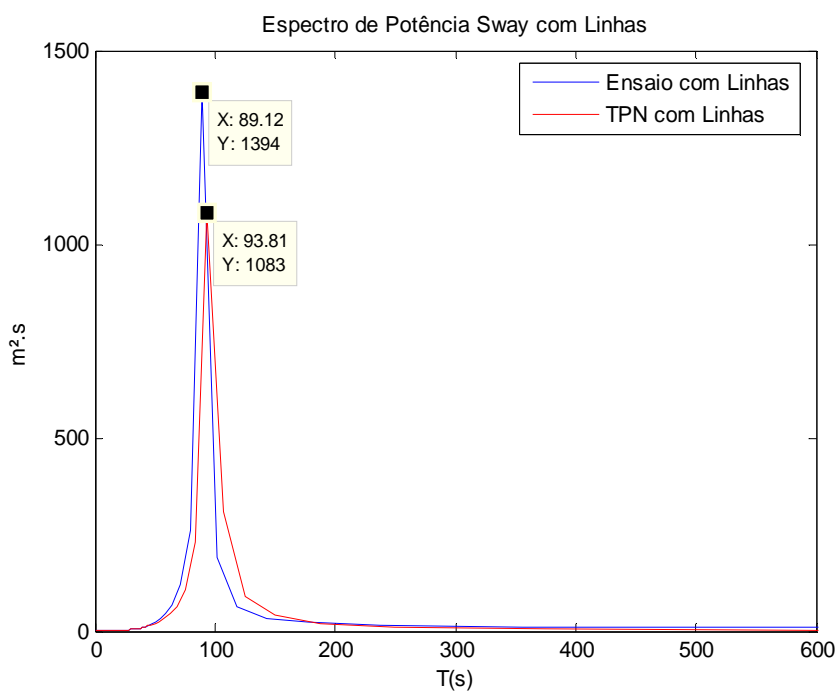


Figura 140 Espectro de potência dos decaimentos de *sway*: numérico e experimental com *risers*

Foram obtidos bons resultados para comparação do período natural de *sway*, sendo que a diferença entre o resultado numérico (93.81 segundos) e o experimental (89.12 segundos) ficou em 5%. Além disso, foi observado que os níveis de amortecimento nos dois casos ficaram bem próximos.

A Figura 143 e a Figura 144 apresentam, respectivamente, a série temporal do decaimento de *heave* com *risers*, e o espectro de potência desta série.

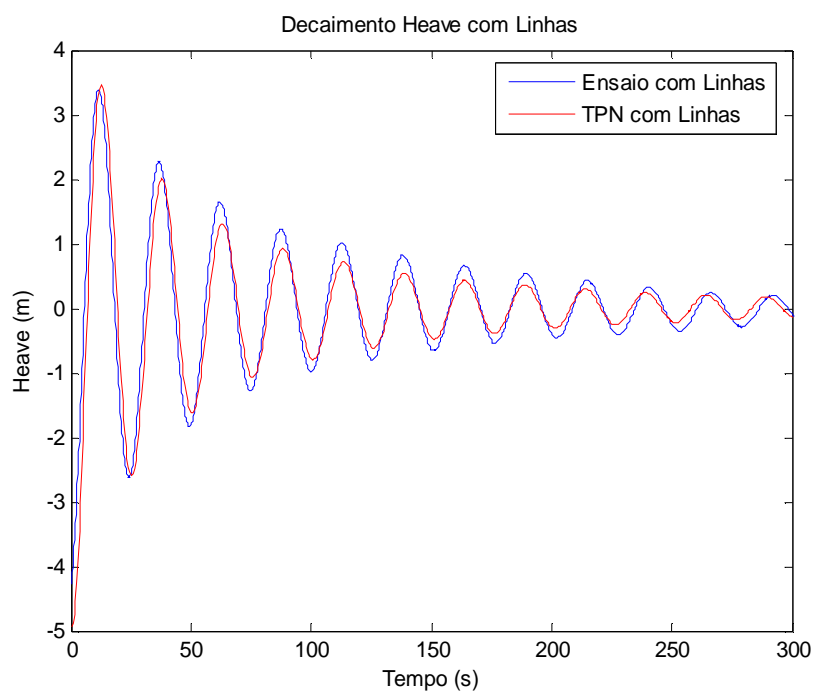


Figura 141 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *heave* com *risers*

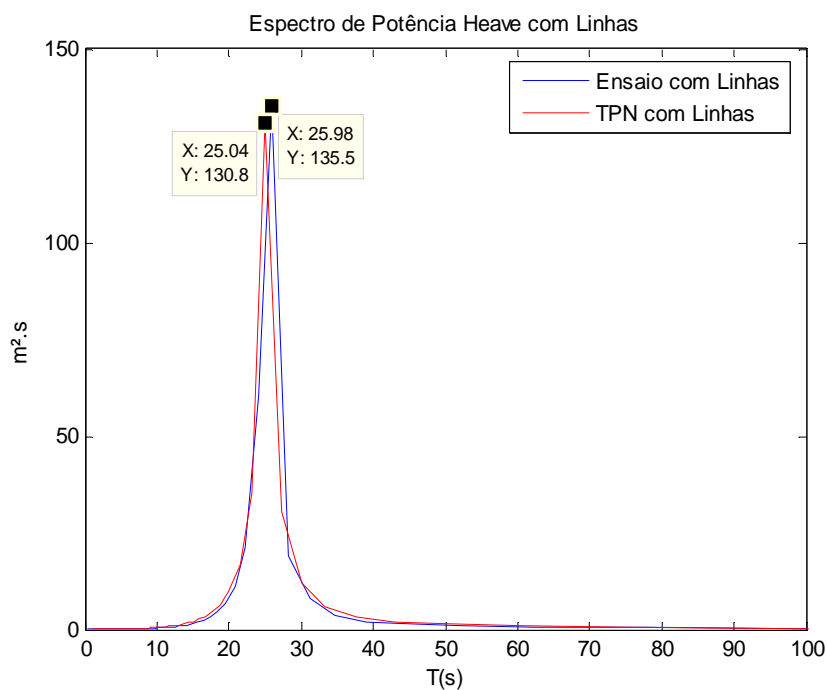


Figura 142 Espectro de potência dos decaimentos de *heave*: numérico e experimental com *risers*

Já para o decaimento de *heave* a diferença obtida foi de 3.62%, um pouco menor que a apresentada em *sway*. O período natural no experimento foi de 25.98 segundos, enquanto no TPN foi de 25.04 segundos. Também foi observado um amortecimento maior na simulação numérica.

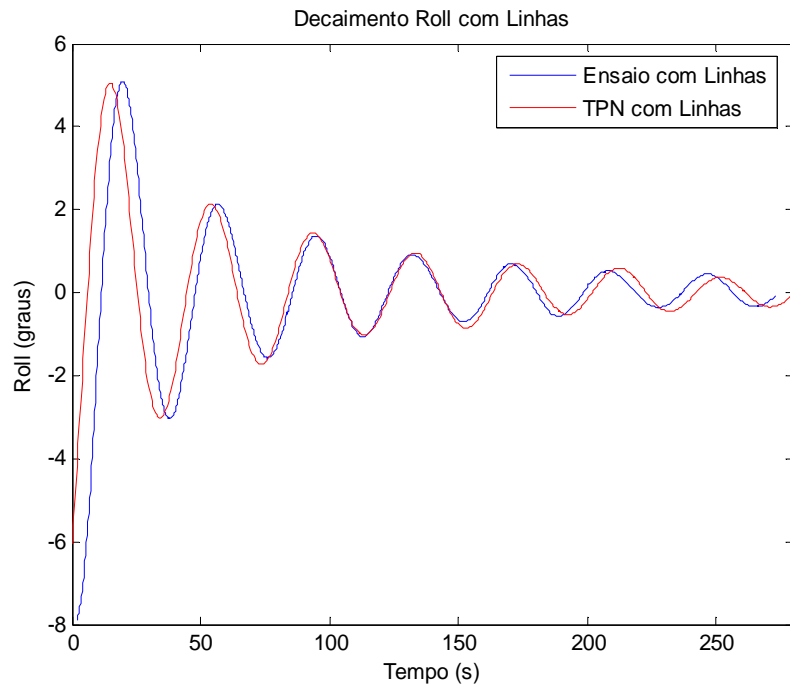


Figura 143 Comparação entre resultados numéricos e experimentais do decaimento de *roll* com *risers*

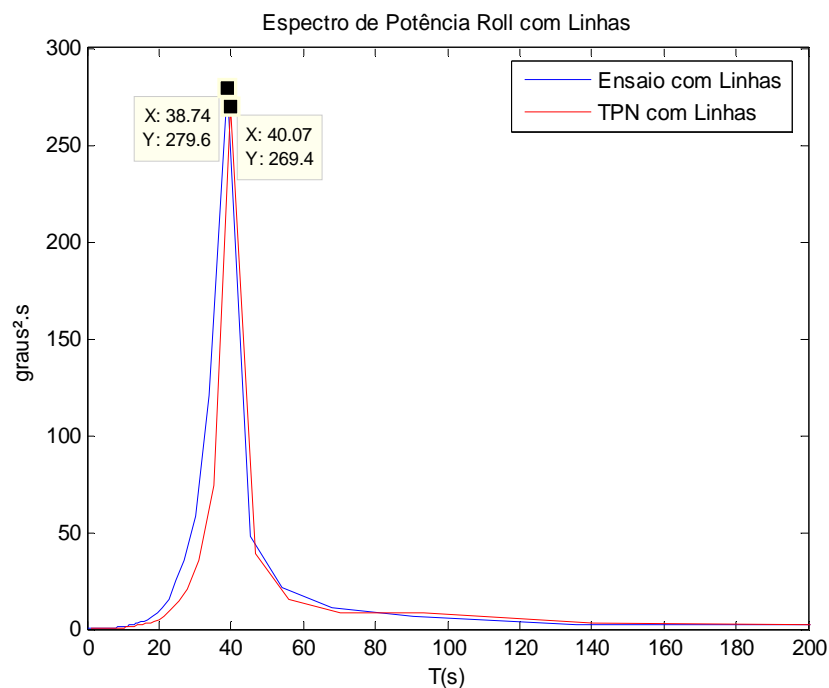


Figura 144 Espectro de potência dos decaimentos de *roll*: numérico e experimental com *risers*

Nos decaimentos de *roll* observou-se um bom resultado, com 3.32% de diferença no período natural (38.74 segundos obtido no experimento, e 40.07 no TPN), além de um amortecimento aparentemente bem calibrado.

Conforme já comentado, nas análises com *risers*, foram introduzidos no modelo numérico exatamente os mesmos amortecimentos determinados experimentalmente para o caso sem *risers*, sendo que os maiores amortecimentos observados nestes casos foram devido ao arrasto proporcionado pelos *risers*. Portanto, a calibração do amortecimento foi um processo que necessitou um compromisso entre os resultados da seção 6.1.1, referentes aos decaimentos sem *risers* e os resultados da presente seção, com *risers*. Na próxima seção serão feitos mais comentários sobre os amortecimentos introduzidos no modelo.

6.2.3. Resultados em ondas regulares

Neste item serão apresentados os resultados de gráficos de RAO obtidos a partir de ondas regulares com *risers*. A Figura 145, a Figura 146 e a Figura 147 apresentam a comparação desses resultados numéricos e experimentais, para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente.

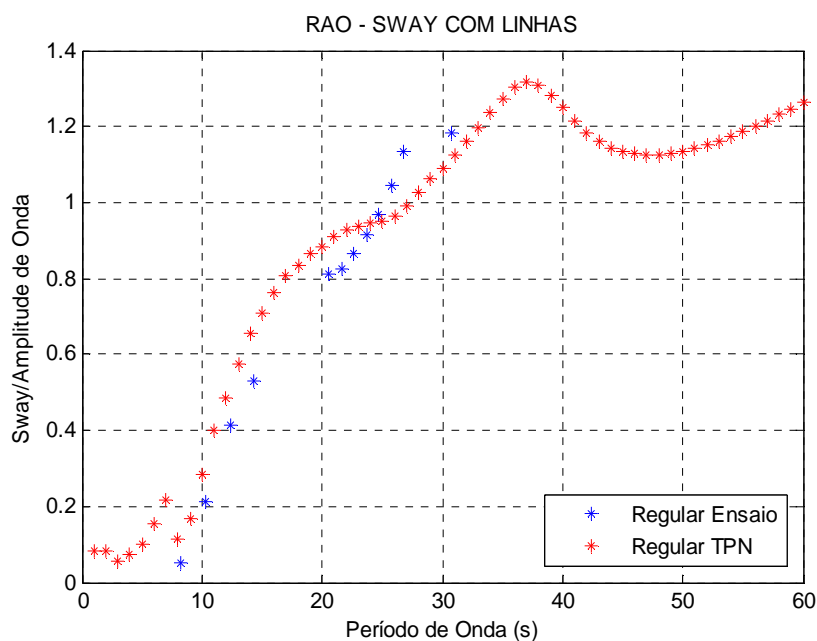


Figura 145 RAO de *sway*: numérico e experimental com *risers*

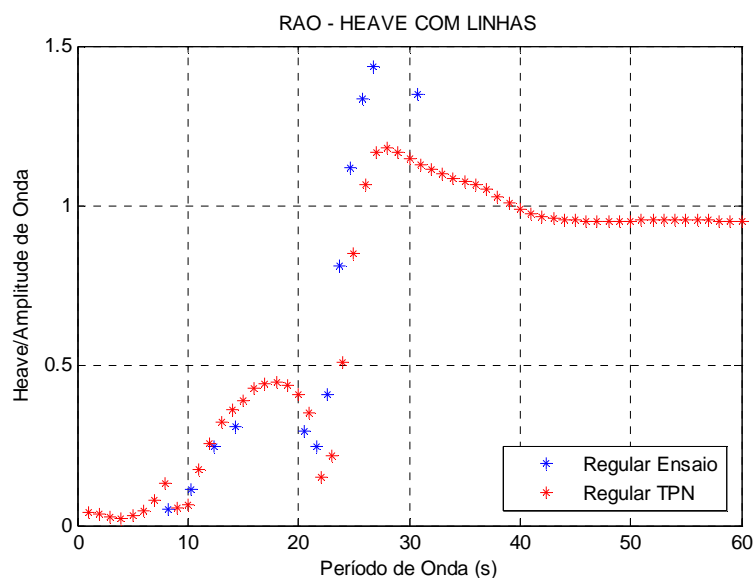


Figura 146 RAO de *heave*: numérico e experimental com *risers*

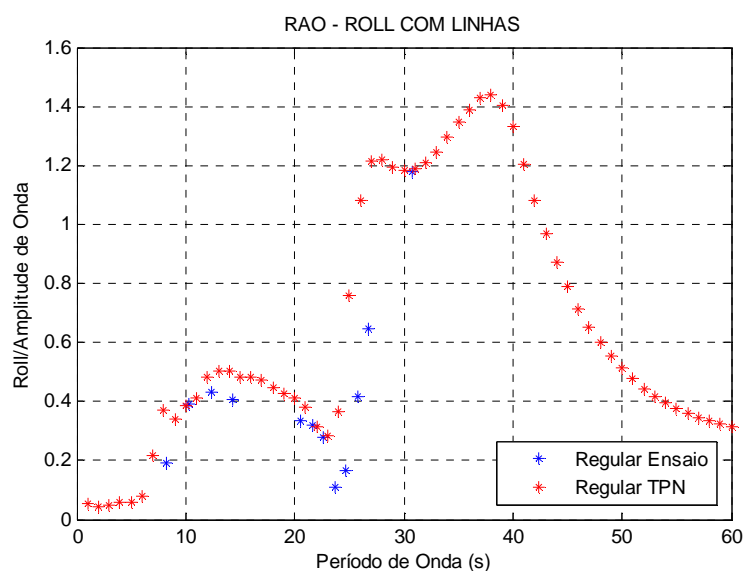


Figura 147 RAO de *roll*: numérico e experimental com *risers*

Em geral, os resultados apresentados nesta seção mostram que o TPN conseguiu reproduzir bem o comportamento dos resultados experimentais com *risers*, exceto com relação aos níveis de amortecimento observados nas comparações do RAO de *heave*. Como comentado, os coeficientes de amortecimento de *heave* introduzidos no modelo numérico foram calibrados com base nos resultados experimentais dos decaimentos sem *risers*. Portanto, não houve alterações nos coeficientes para as análises dos casos com *risers*. Com isso, variações na frequência e na amplitude do movimento de *heave*, entre os casos com e sem *risers*, podem ter acarretado em alguma modificação do coeficiente amortecimento deste grau de liberdade.

De fato, com a análise dos resultados apresentados nesta e na seção anterior, é possível observar que nos decaimentos numéricos de *heave* existem problemas quanto aos níveis de amortecimento. É possível notar que no caso sem *risers*, Figura 117, o decaimento numérico está pouco amortecido, enquanto no caso com *risers*, Figura 143, está muito amortecido. No entanto, para os dois casos foram utilizados os mesmos coeficientes de amortecimento do casco, sendo que a diferença entre os resultados foi estabelecida pela introdução das linhas.

Além disso, o estabelecimento de coeficientes de amortecimento através de ensaios de decaimento determina parâmetros somente para uma frequência de oscilação (frequência ressoante). No caso de *sway*, por exemplo, o coeficiente de amortecimento foi determinado para períodos de mais de 120 segundos, provavelmente diferente do observado para movimentos com período de 30 segundos. O estudo apresentado na referência [28] descreve uma metodologia para obtenção de coeficientes de amortecimento a partir de ondas irregulares. Com tal metodologia, talvez esses coeficientes pudessem ser obtidos em outros períodos de oscilação.

Outro ponto interessante, diz respeito à extrapolação dos resultados experimentais com o TPN. Os resultados numéricos apresentaram, por exemplo, o acoplamento de *sway* com *roll*, perto do período natural deste último. Somente com os resultados numéricos esse comportamento pode ser observado, pois no tanque existem limites de geração de onda para os períodos em que se deu o acoplamento.

A Figura 148 apresenta os resultados de resposta de tração no topo da linha instrumentada para os casos numéricos e experimentais. Os pontos apresentados representam o desvio padrão da série temporal de tração, divididos pelo desvio padrão de altura de cada onda.

Como observado na figura, o TPN conseguiu reproduzir o comportamento da grandeza estudada, mas de maneira semelhante aos casos anteriores, houve problemas quanto aos níveis de amortecimento adotados nos dois casos. Além disso, levando em consideração que perto de oito segundos o resultado numérico aumenta muito rápido e que o resultado do TPN está mais discretizado do que o do experimento, pode acontecer do ponto com maior tração (provavelmente uma região de ressonância) não ter sido ensaiado no experimento. A questão da ressonância perto de 10 segundos será retomada no capítulo 7.

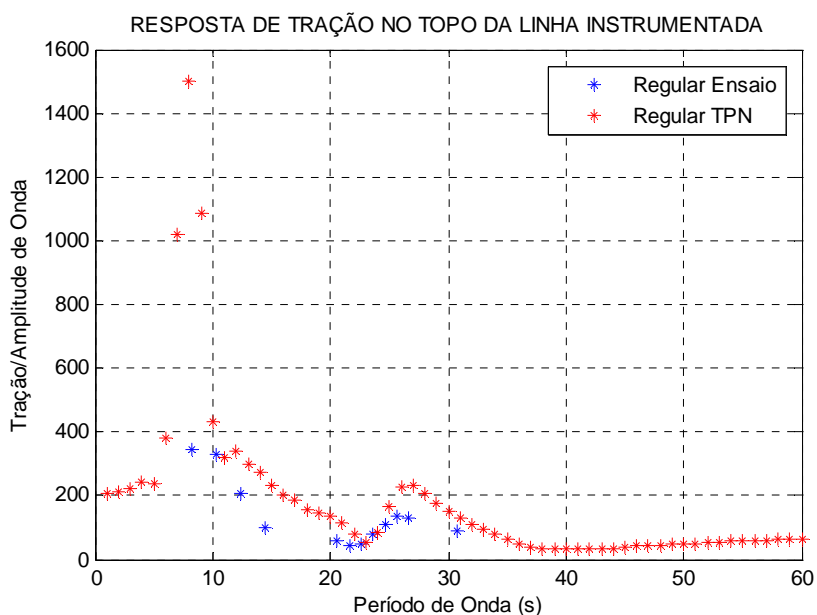


Figura 148 Resposta de tração no *riser* numérica e experimental

6.2.4. Resultados em ondas regulares com correnteza

Neste item serão apresentados os resultados numéricos e experimentais de resposta de movimento da plataforma em ondas regulares, para os casos com *risers* e correnteza incidente de 2.05 m/s na escala real ou 0.20 m/s na escala do modelo. A Figura 149, a Figura 150 e a Figura 151 mostram, respectivamente, esses resultados para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*.

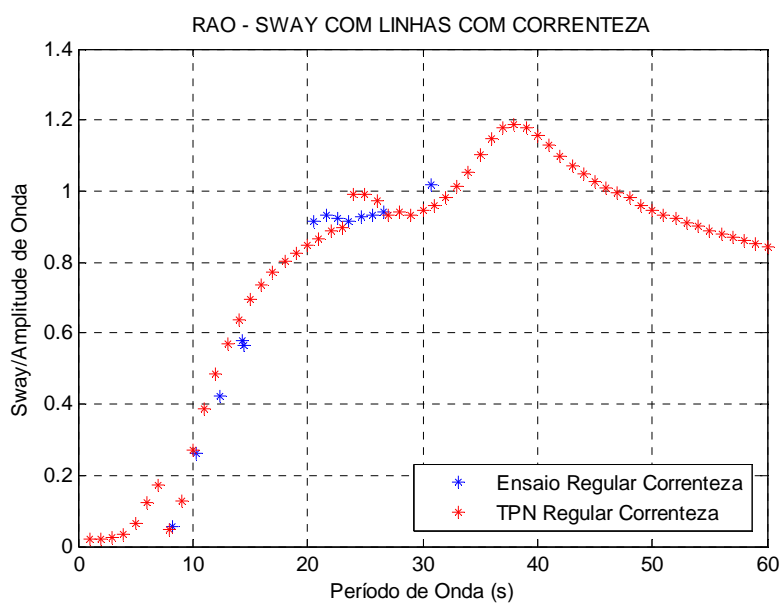


Figura 149 RAO de *sway*: numérico e experimental com correnteza e com *risers* (U=2.05m/s na escala real)

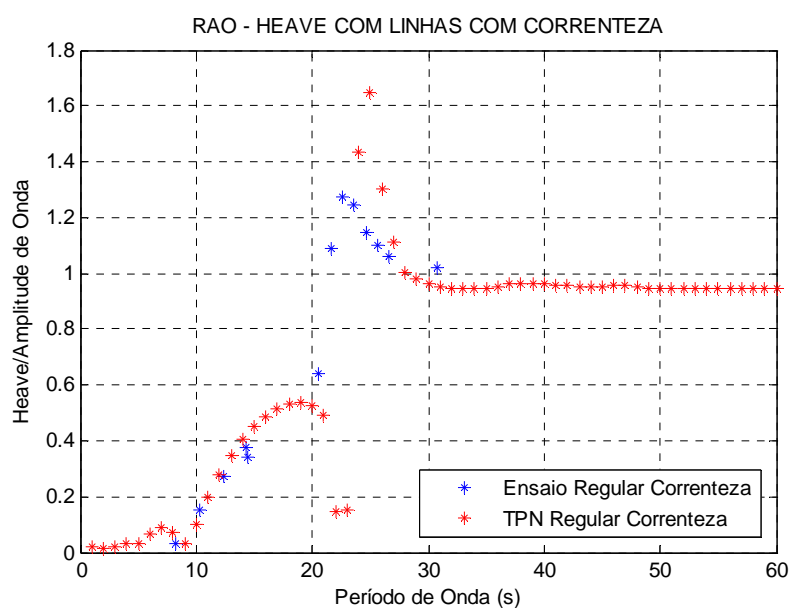


Figura 150 RAO de *heave*: numérico e experimental com correnteza e com *risers* (U=2.05m/s na escala real)

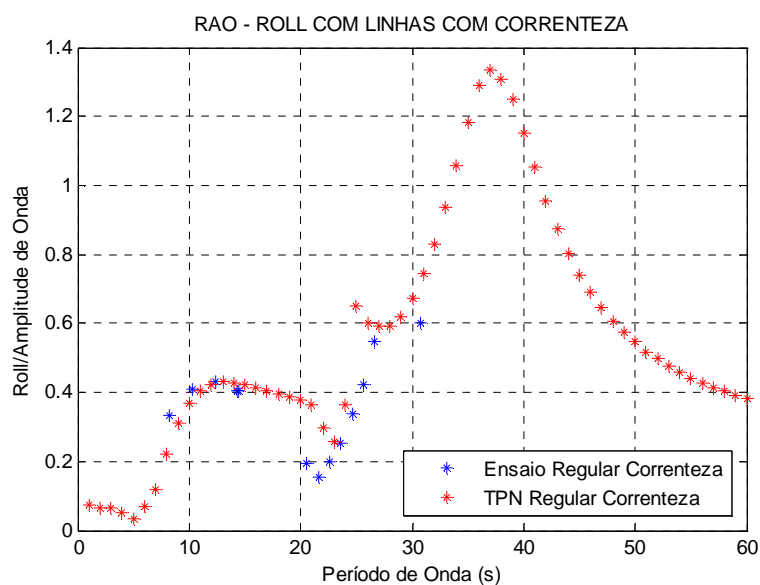


Figura 151 RAO de *roll*: numérico e experimental com correnteza e com *risers* (U=2.05m/s na escala real)

Nos casos apresentados, além de uma diferença de amortecimento no movimento de *heave*, observada em todos os casos estudados com *risers*, é possível identificar que o TPN não reproduziu o deslocamento dos picos ressonantes e dos pontos de cancelamento observados nos resultados experimentais. Conforme descrito no item 5.8.4 esse comportamento ocorreu em todos os casos ensaiados com correnteza, provavelmente decorrendo de efeitos viscosos atuando no modelo.

A Figura 152 apresenta os resultados de resposta de tração no topo da linha instrumentada para os casos numéricos e experimentais com correnteza. Os pontos apresentados representam o desvio padrão da série temporal de tração, divididos pelo desvio padrão de altura de cada onda.

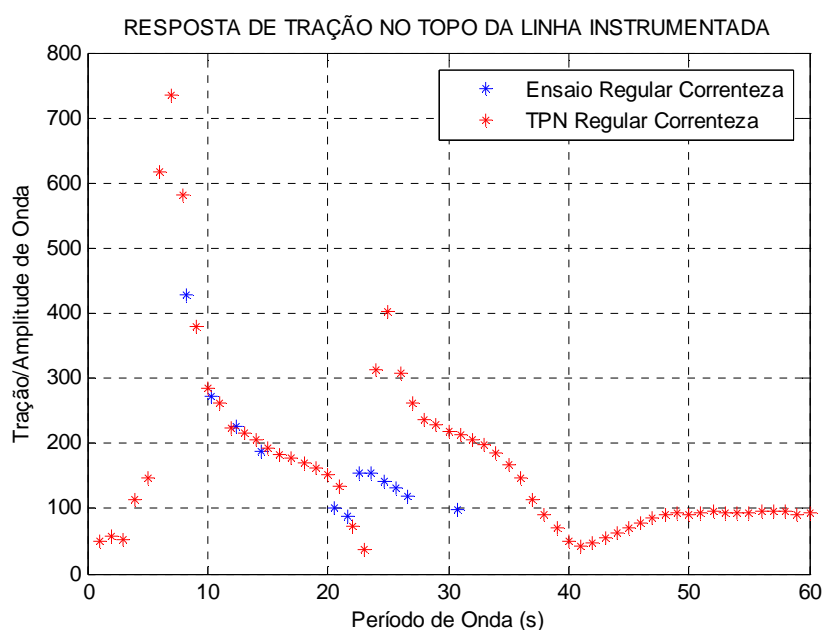


Figura 152 Resposta de tração no *riser* numérico e experimental e com correnteza (U=2.05m/s na escala real)

Como se observa na figura, o TPN conseguiu reproduzir razoavelmente bem o comportamento da resposta em tração, mas como nos casos anteriores, houve problemas quanto aos níveis de amortecimento. Além disso, com a introdução da correnteza, também foi observado uma não concordância dos pontos experimentais, que na faixa de 20 a 30 segundos ficaram em períodos menores,. Esse comportamento era esperado, na medida em que a tração no topo é dependente dos movimentos da plataforma. Ainda nessa faixa, é possível ver um pico exatamente no período natural de *heave*. A Figura 150 apresentou o RAO de *heave*, que tem um movimento significativamente maior que o experimental. Essa constatação pode ser uma das explicações das diferenças entre o resultado do TPN e o experimental.

Assim como no caso sem correnteza (Figura 148), a tração no topo do *riser* apresentou uma resposta significativa em 8 segundos. Entretanto, em nenhum dos graus de liberdade existem movimentos com amplitude considerável, tanto para o caso com correnteza, quanto sem correnteza. Inclusive é possível observar que para *sway* e *heave* esse período é um ponto de cancelamento de movimento. Portanto, talvez essa seja uma região de ressonância do *riser* instrumentado. A questão da ressonância perto de 10 segundos será retomada no capítulo 7.

6.2.5. Resultados em ondas irregulares

Neste item serão apresentados os espectros de potência e as estatísticas obtidas com as séries temporais experimentais e numéricas dos ensaios com *risers* em ondas irregulares.

A Figura 153, a Figura 154 e a Figura 155 apresentam respectivamente os espectros de potência dos movimentos de *sway*, *heave* e *roll* para as análises com a onda irregular 1, apresentada na Tabela 11. Os resultados apresentados são para os casos com *risers* acoplados ao modelo.

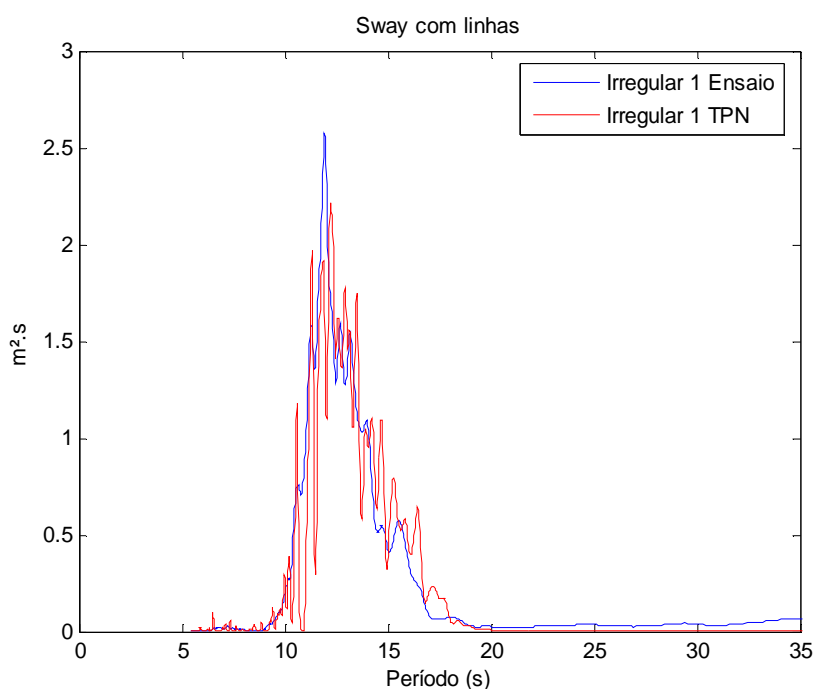


Figura 153 Espectro de potência do movimento de *sway* onda irregular 1 com *risers*

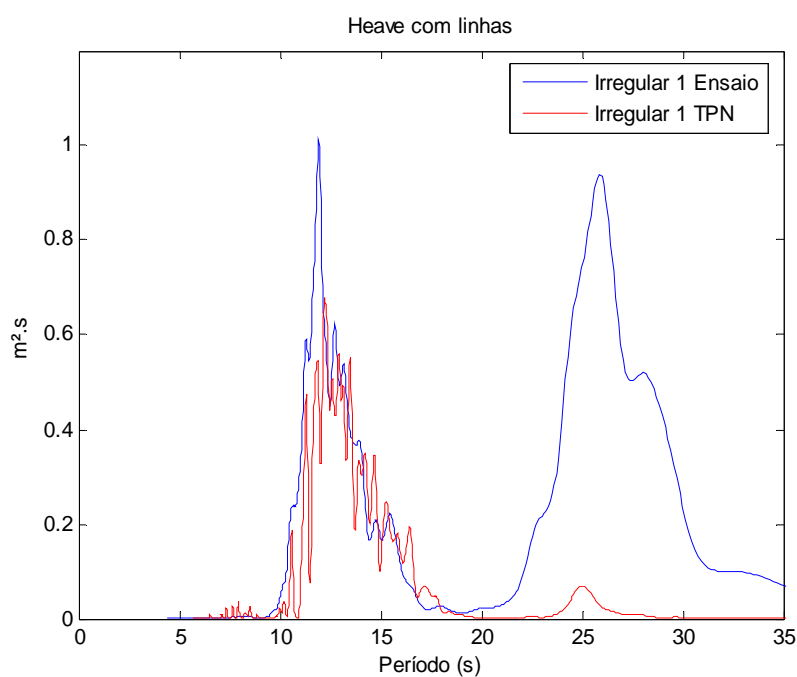


Figura 154 Espectro de potência do movimento de *heave* onda irregular 1 com *risers*

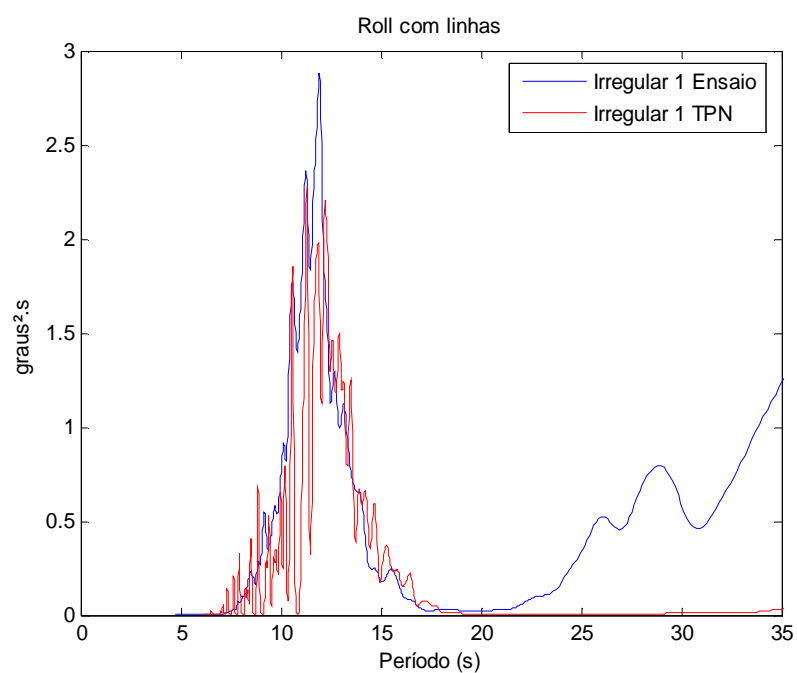


Figura 155 Espectro de potência do movimento de *roll* onda irregular 1 com *risers*

Os movimentos para onda irregular 1 tiveram boa concordância nos três graus de liberdade apresentados. No entanto, para resposta nos respectivos períodos naturais (movimento de segunda ordem), o TPN não reproduziu o movimento, assim como comentado no item 6.1.5.

Para a resposta de tração no topo do *riser* instrumentado, apresentado na Figura 156, há uma boa concordância perto do período da onda (11 segundos), mas para a resposta em 8 segundos o TPN mostrou resultados bem maiores, resultado semelhante aos dois itens anteriores deste capítulo.

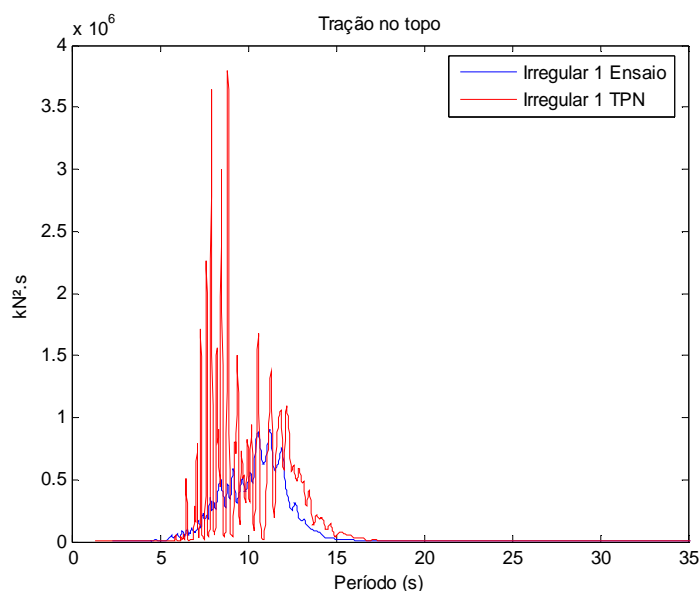


Figura 156 Espectro de potência de tração no topo do riser onda irregular 1

A Figura 157, a Figura 158 e a Figura 159 apresentam respectivamente os espectros de potência dos movimentos de *sway*, *heave* e *roll* para análises com a onda irregular 2, apresentada na Tabela 11. Os resultados apresentados são também para os casos com *risers* acoplados ao modelo.

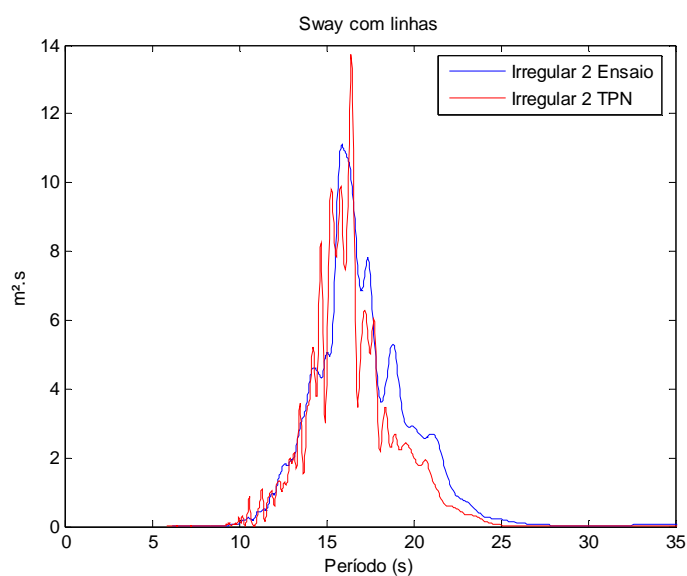


Figura 157 Espectro de potência do movimento de sway onda irregular 2 com risers

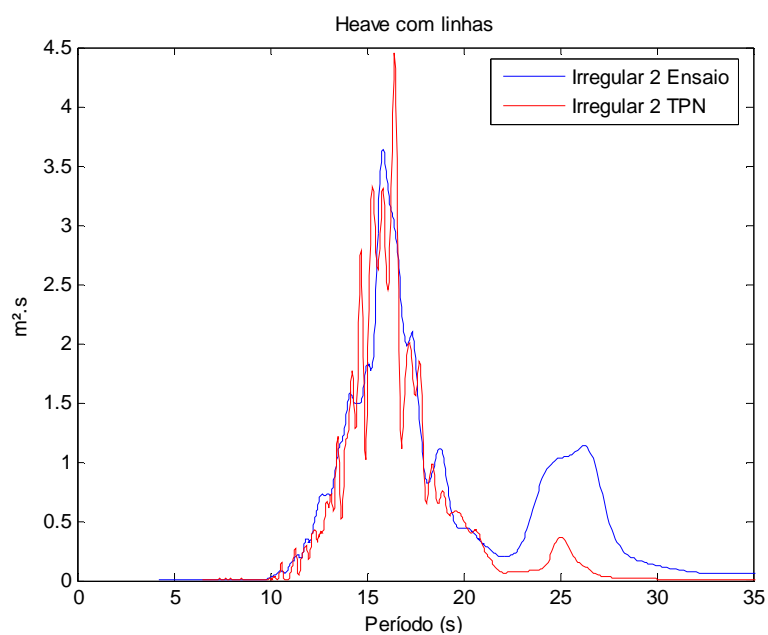


Figura 158 Espectro de potência do movimento de *heave* onda irregular 2 com *risers*

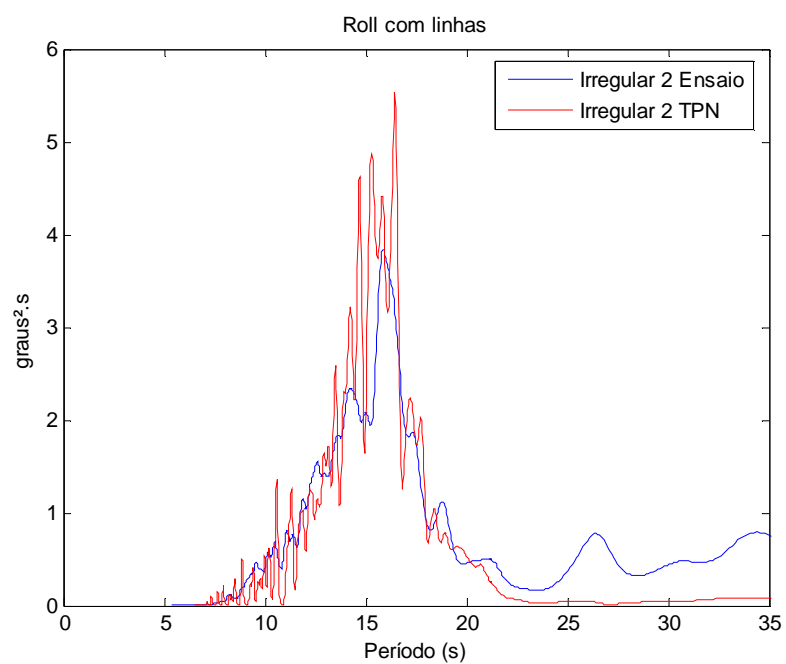


Figura 159 Espectro de potência do movimento de *roll* onda irregular 2 com *risers*

Mais uma vez os movimentos da plataforma foram bem reproduzidos pelo TPN. Nesse caso, as respostas do TPN ficaram um pouco maiores do que as do experimento. Somente no movimento de *heave* foi observada resposta em 25 segundos, devido à onda irregular 2 apresentar energia nessa região, ainda que pequena.

A resposta de tração no topo da linha instrumentada, apresentada Figura 160, mostra uma resposta no período da onda (15 segundos) maior do que no experimento. Essa diferença pode ter ocorrido em virtude do maior nível de movimento apresentado nos espectros de potência dos ensaios com a onda irregular 2. Novamente a linha apresentou resposta apreciável perto dos 8 segundos.

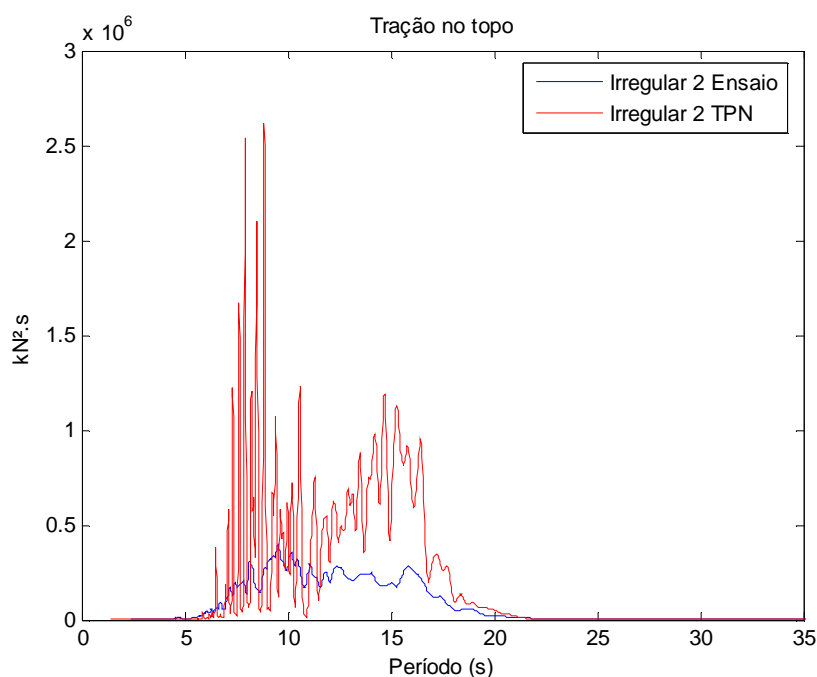


Figura 160 Espectro de potência de tração no topo do riser onda irregular 2

A Tabela 45 apresenta as estatísticas das séries temporais experimentais e numéricas dos ensaios realizados com a onda irregulares 1. Da mesma forma a Tabela 46 mostra esses resultados para a onda irregulares 2.

Tabela 45 Estatísticas para ondas irregulares 1: numérico e experimental com *risers*

Condição Ambiental	Movimento	sem risers ensaio				sem risers TPN			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 1 semente 1	Sway (m)	-0.173	0.412	2.180	-2.235	-0.435	0.564	2.274	-1.696
	Heave (m)	0.059	0.293	1.902	-1.203	-0.039	0.241	0.879	-0.736
	Roll (graus)	0.043	0.544	4.150	-2.740	0.026	0.543	2.339	-1.703
onda 1 semente 1 correnteza	Sway (m)	-12.712	1.425	-9.248	-20.910	-17.727	0.409	-16.400	-19.066
	Heave (m)	0.798	0.494	3.044	-0.736	0.755	0.224	1.557	0.066
	Roll (graus)	-0.942	0.830	3.334	-3.637	-0.072	0.417	1.060	-2.020

Tabela 46 Estatísticas para ondas irregulares 2: numérico e experimental com risers

Condição Ambiental	Movimento	sem risers ensaio				sem risers TPN			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
onda 2 semente 1	Sway (m)	-0.273	0.888	5.055	-5.297	-0.376	1.350	4.556	-4.132
	Heave (m)	-0.136	0.517	2.753	-2.759	-0.062	0.724	2.419	-2.778
	Roll (graus)	0.046	0.651	3.265	-3.302	0.032	1.005	3.758	-3.614
onda 2 semente 1 correnteza	Sway (m)	-11.872	1.624	-7.045	-19.640	-17.646	0.807	-15.138	-20.744
	Heave (m)	0.691	0.769	3.682	-1.953	0.763	0.485	2.394	-0.873
	Roll (graus)	-0.546	0.947	3.486	-3.674	-0.178	0.633	1.625	-2.496

Em *sway*, para os casos sem correnteza, foi observado um maior desvio padrão da série temporal nas análises feitas com o TPN. No entanto, os pontos de máximo e mínimo ficaram com uma menor amplitude. Esse comportamento foi semelhante ao discutido na análise de ondas irregulares sem *risers*.

Nas séries temporais de *heave* e *roll* devidas à onda irregular 1, o desvio padrão dos casos numéricos e experimentais ficaram praticamente iguais, porém com amplitudes de movimento menores no TPN. Já para onda irregular 2 esses movimentos tiveram desvio padrão maior no TPN e as amplitudes de movimento ficaram bem parecidas.

Nos casos com correnteza, é possível observar uma média de movimento de *sway* um pouco maior nas análises com o TPN. De fato, o coeficiente de arrasto do modelo foi majorado, a fim de recuperar a inclinação inicial imposta ao modelo nos casos com correnteza. No entanto, o aumento de coeficiente de correnteza não foi tão efetivo quando a alteração do centro de pressão apresentado na Tabela 5. Essa alteração foi necessária na medida em que, como observado por Maeda, referência [8], em ensaios com correnteza pode haver uma força de sustentação no *pontoon*, não reproduzida pela formulação de força de arrasto da plataforma, apresentado na seção 3.1.13. Devido a esta força de sustentação, foi necessária a alteração do centro de pressão (diminuição da sua altura), criando assim um momento maior no modelo para recuperar a inclinação inicial imposta no ensaio.

Para *heave* e *roll* com correnteza, tanto os desvios padrões, quanto os pontos de máximo e mínimo ficaram menores nas análises com o TPN. Esse comportamento pode ter ocorrido pela não aplicação de filtragem nas séries temporais, como comentado na seção 6.1.5.

7. ANÁLISE DO CRITÉRIO API

Neste item serão apresentados os resultados da análise feita com o foco na avaliação da tração do topo do *riser* instrumentado e a respectiva comparação com o código numérico do ANFLEX. Os movimentos das séries temporais experimentais do topo do *riser* foram impostos ao referido aplicativo e os resultados comparados entre si.

Esse procedimento foi adotado para as séries temporais experimentais obtidas com e sem a presença dos *risers*, sendo que para os casos sem *risers* a série temporal imposta foi aquela onde o mesmo deveria estar conectado. Com isso, foi possível avaliar a influência do conjunto de *risers* na dinâmica da unidade flutuante, levando em consideração os efeitos adicionais de inércia e amortecimento.

7.1. MODELAGEM DO RISER

O *riser* modelado no programa ANFLEX possui as mesmas propriedades, apresentadas no item 5.6, com características físico-mecânicas semelhantes às do *riser* instrumentado, Tabela 9. A Figura 161 apresenta uma imagem do pré-processador do ANFLEX, mostrando o modelo de linha utilizado no estudo.

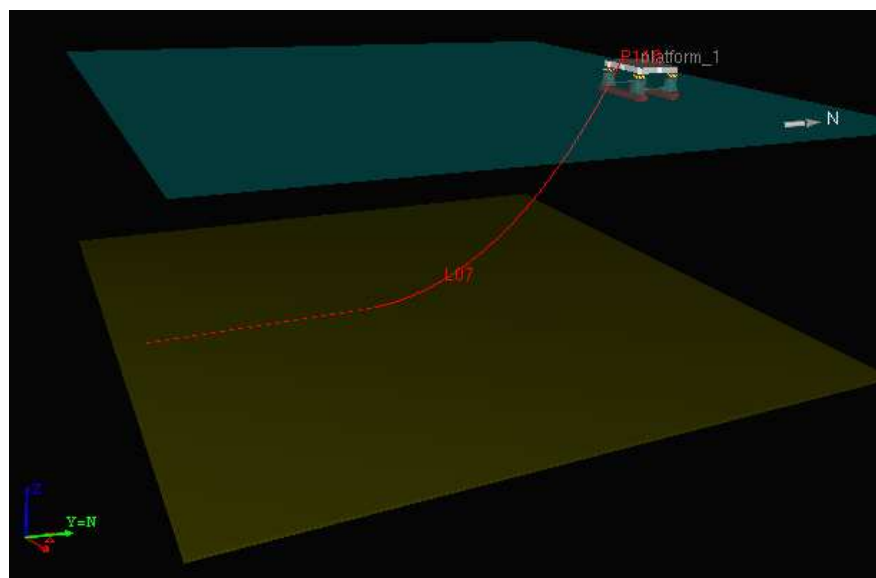


Figura 161 Linha modelada no ANFLEX

7.2. RESULTADOS

As próximas figuras apresentaram as comparações entre os resultados obtidos nos experimentos e os obtidos a partir das simulações com o ANFLEX.

A apresentação dos resultados está dividida em quatro grupos: onda irregular 1 com dinâmica imposta 1, onda irregular 1 com dinâmica imposta 2, onda irregular 2 com dinâmica imposta 1 e finalmente onda irregular 2 com dinâmica imposta 2. As ondas irregulares 1 e 2 foram apresentadas na Tabela 11 e a Figura 162 apresenta o espectro de potência dessas duas ondas, ajudando na avaliação da região de período onde a onda exerce alguma influência sobre o sistema. Essa avaliação será importante para comparação dos resultados de resposta da tração de topo da linha.

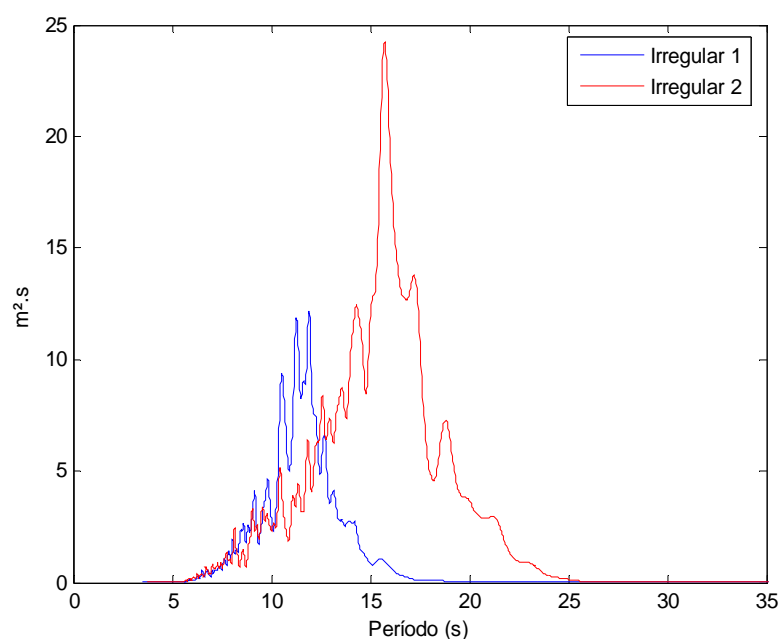


Figura 162 Espectro de potência das ondas irregulares

As dinâmicas impostas 1 e 2 representam os casos em que o movimento imposto no topo do *riser* referem-se, respectivamente, às situações da dinâmica com e sem *riser*. Ou seja, no caso “dinâmica imposta 1” as séries temporais obtidas nos experimentos com *risers* foram utilizadas para movimentar o topo do *riser* no modelo do programa ANFLEX. De maneira análoga, no caso “dinâmica imposta 2” a série temporal utilizada foi obtida nos ensaios sem *risers*.

7.2.1. Onda irregular 1 com dinâmica imposta 1

A Figura 163 compara os espectros de potência da tração de topo do *riser*, obtidas no experimento e nas análises com o ANFLEX. Esses espectros foram obtidos a partir das séries temporais de tração no topo do *riser*, no caso em que o experimento e a análise numérica foram executados com a onda irregular 1. A linha azul representa o espectro do resultado experimental de tração no topo do *riser* e a linha vermelha o espectro do resultado obtido a partir do ANFLEX com imposição da dinâmica 1 (movimentos obtidos no ensaio com *risers*). Além disso, a Figura 163 apresenta os momentos espectrais de ordem zero (M0) das duas curvas. Os valores são apresentados em kN², na escala real.

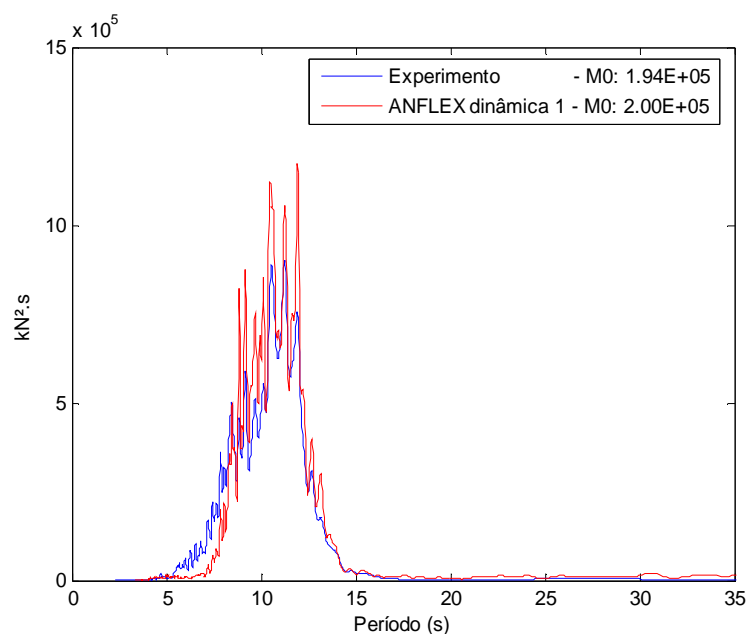


Figura 163 Espectro de potência com onda irregular 1 e dinâmica imposta 1

A Tabela 47 apresenta as estatísticas das séries temporais de tração no topo do *riser*, obtidas no experimento e no aplicativo ANFLEX. Os valores são apresentados em kN, na escala real.

Tabela 47 Estatísticas para onda irregular 1 com dinâmica imposta 1

Estatísticas (valores em kN, escala real)				
Caso	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Ensaio	6503.49	440.84	4423.70	8037.80
ANFLEX	6612.56	452.87	4951.85	7768.27

De acordo com os resultados apresentados na Figura 163 e Tabela 47 é possível concluir que os resultados experimentais e numéricos obtiveram boa concordância. Os momentos espectrais dos dois casos ficaram bem próximos, com uma diferença de 3.1%. Da mesma maneira, a diferença do desvio padrão da série temporal de tração ficou em 2.7%. Esse resultado era esperado, na medida em que o modelo numérico do ANFLEX tem a capacidade de reproduzir a situação observada no ensaio, exceto por perturbações e imprecisões inerentes aos experimentos.

7.2.2. Onda irregular 1 com dinâmica imposta 2

Ainda na análise com onda irregular 1, a Figura 164 apresenta o espectro de potência da tração de topo do *riser*, obtida agora com a dinâmica imposta 2 (ensaio sem *risers*).

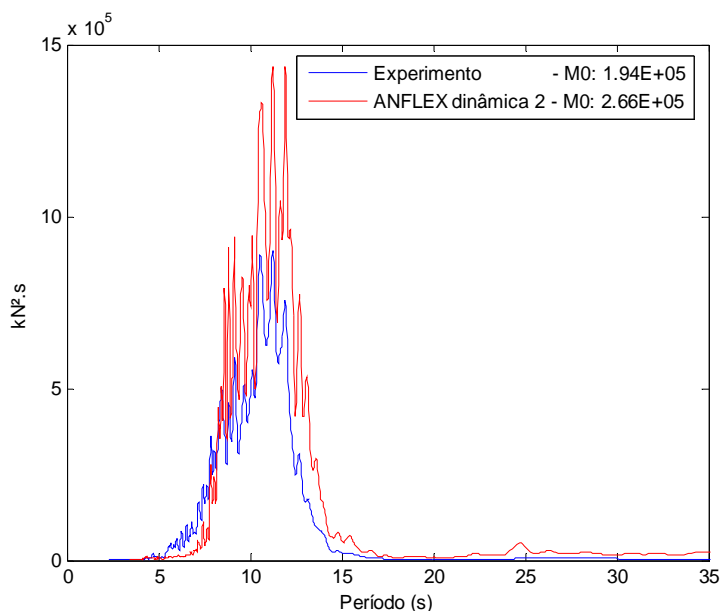


Figura 164 Espectro de potência com onda irregular 1 e dinâmica imposta 2

A Tabela 48 apresenta as estatísticas das séries temporais de tração no topo do *riser*, obtida no experimento e no aplicativo ANFLEX. Os valores são apresentados em kN, na escala real.

Tabela 48 Estatísticas para onda irregular 1 com dinâmica imposta 2

Estatísticas (valores em kN, escala real)				
Caso	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Ensaio	6503.49	440.84	4423.70	8037.80
ANFLEX	6573.94	520.52	4682.17	8016.52

Neste caso, o momento espectral e o desvio padrão aumentaram consideravelmente no resultados do ANFLEX.

7.2.3. Onda irregular 2 com dinâmica imposta 1

A Figura 165 e a Tabela 49 apresentam, respectivamente, o espectro de potência e a estatísticas das séries temporais obtidas nos resultados com a onda irregular 2 e dinâmica imposta 1 (ensaio com *risers*).

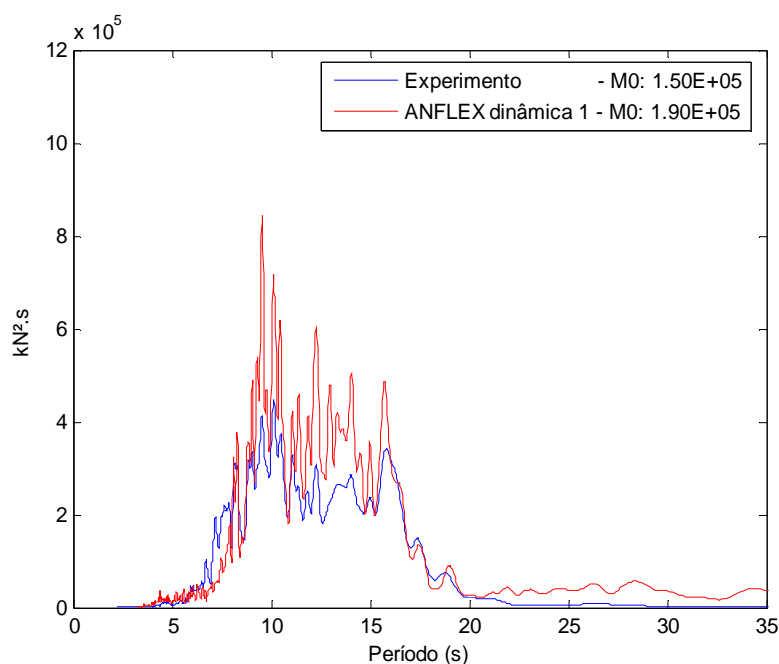


Figura 165 Espectro de potência com onda irregular 2 e dinâmica imposta 1

Tabela 49 Estatísticas para onda irregular 2 com dinâmica imposta 1

Estatísticas (valores em kN, escala real)				
Caso	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Ensaio	6520.41	387.74	4959.90	7653.80
ANFLEX	6618.25	444.45	5154.35	8057.76

Esses resultados apresentam uma diferença entre o experimental e o numérico, maior do que aquelas obtidas no caso com onda irregular 1 dinâmica imposta 1. No entanto, os casos são análogos e deveriam reproduzir o experimento.

7.2.4. Onda irregular 2 com dinâmica imposta 2

A Figura 166 e a Tabela 50 apresentam os resultados para onda irregular 2 e dinâmica imposta 2 (ensaio sem *risers*).

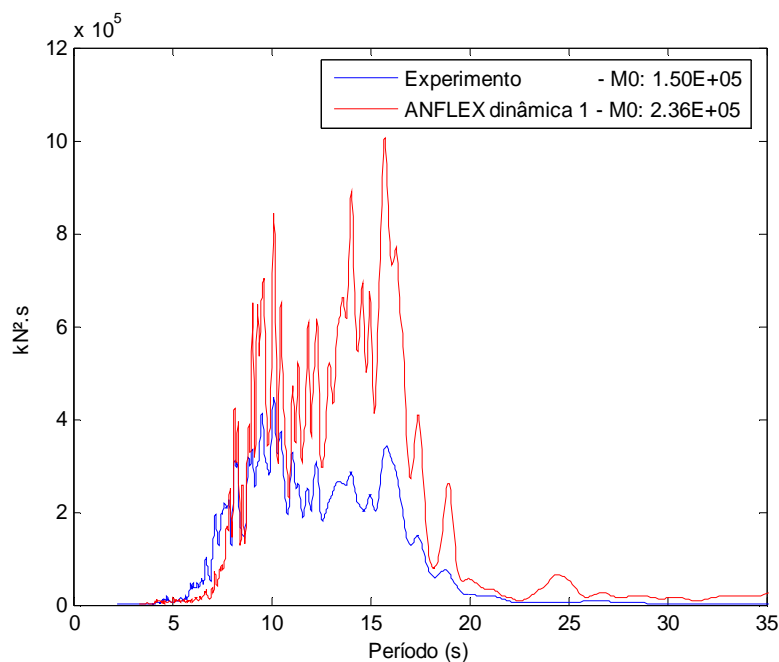


Figura 166 Espectro de potência com onda irregular 2 e dinâmica imposta 2

Tabela 50 Estatísticas para onda irregular 2 com dinâmica imposta 2

Estatísticas (valores em kN, escala real)				
Caso	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Ensaio	6520.41	387.74	4959.90	7653.80
ANFLEX	6605.29	490.60	5025.82	8171.83

Os resultados com a onda regular 2 tiveram comportamento semelhante aos apresentados para onda irregular 1. Sendo que, de maneira análoga, foi observado um aumento nos níveis de tração no *riser* (aumento no momento espectral e no desvio padrão) com a utilização da dinâmica imposta 2 (ensaios sem *riser*) no modelo numérico do ANFLEX.

7.3. ANÁLISES COMPLEMENTARES QUANTO AO COMPORTAMENTO E ÀS FREQUÊNCIAS NATURAIS DO *RISER*

Levando em consideração todos os resultados apresentados, tanto numéricos quanto experimentais, é possível concluir que o comportamento da tração no topo do *riser* teve uma influência considerável da dinâmica imposta.

Como comentado, as séries temporais obtidas com o modelo experimental com e sem *risers* foram impostas no topo do *riser* simulado numericamente no programa ANFLEX. Como esperado, o modelo com a série temporal imposta “com *risers*” teve uma dinâmica (global: unidade flutuante acoplada aos *risers*) com maior amortecimento, introduzido por efeitos viscosos. No caso com a série temporal (unidade flutuante desacoplada dos *risers*) imposta “sem *risers*”, por outro lado, menores valores de amortecimento foram impostos, resultando em um maior nível de tração no topo do *riser*.

Na onda irregular 1 foi possível verificar que as análises com o ANFLEX, no caso com a dinâmica imposta 1 (obtida a partir do ensaio com *riser*), apresentou momento espectral muito próximo ao obtido no espectro de potência da tração obtida experimentalmente. Além disso, a Tabela 47 mostra que o desvio padrão obtido nestas duas séries temporais foram muito parecidos.

Entretanto, o caso com a dinâmica imposta 2 (obtido a partir do ensaio sem *risers*), ainda com a onda irregular 1, mostrou algumas diferenças na resposta de tração no *riser* simulado no ANFLEX. Foi possível verificar o aumento nos valores do momento espectral e do desvio padrão, ver Figura 164 e Tabela 48. Neste caso, a dinâmica imposta não considera o efeito de amortecimento causado pelas linhas conectadas ao modelo e essa pode ser a principal razão para a diferença nestes parâmetros.

A Figura 165 apresenta os resultados obtidos com a onda irregular 2, com dinâmica imposta a partir do ensaio com *risers*. Novamente os resultados mostraram uma boa concordância entre experimento e numérico. No entanto, a Figura 166 mostrou o aumento dos níveis de tração nos resultados obtidos com o ANFLEX, considerando a dinâmica imposta a partir do modelo sem *risers*. Por esta razão, o espectro de tração numérico apresenta valores superiores aos obtidos no ensaio, provavelmente associados aos níveis mais baixos de amortecimento.

Outro ponto importante a ser discutido é o comportamento do espectro de potência obtido com a onda irregular 2, em baixos períodos (perto de 10 segundos). A Figura 165 e a Figura 166 apresentam uma grande densidade de energia espectral na região de 10 segundos. No entanto, o espectro de potência dos mares, apresentado na Figura 162 não apresenta valores significativos nesta região.

A primeira hipótese levantada foi sobre algum movimento da plataforma neste período. No entanto, as análises espectrais dos graus de liberdade de interesse (*sway*, *heave* e *roll*) não apresentaram movimentos significativos nesse período. A Figura 167, a Figura 168 e a Figura 169 apresentam os espectros de potência experimentais de *sway*, *heave* e *roll*, respectivamente.

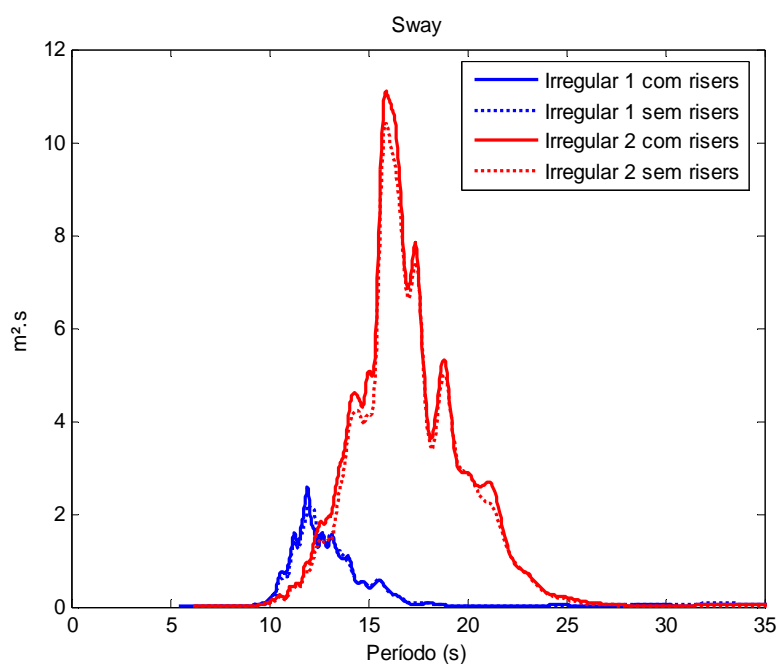


Figura 167 Espectro de potência experimental de *sway*

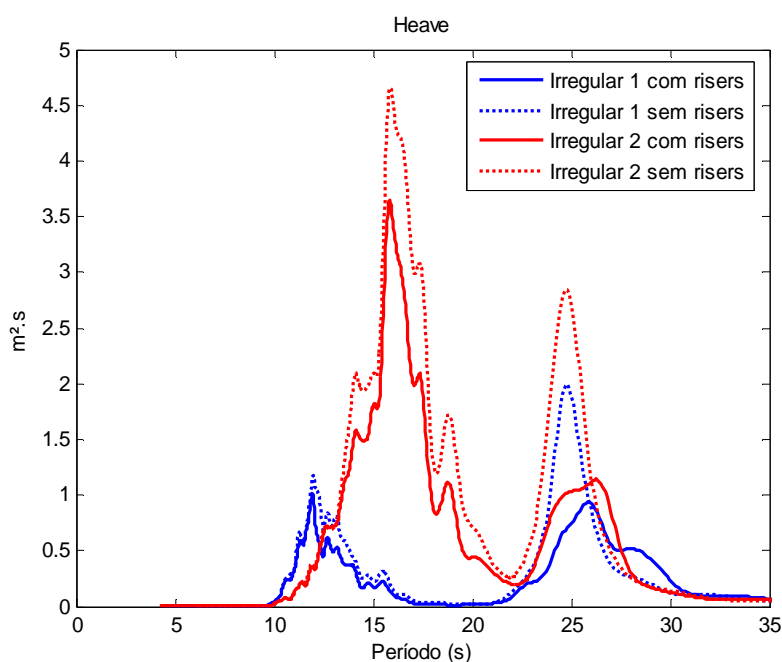


Figura 168 Espectro de potência experimental de *heave*

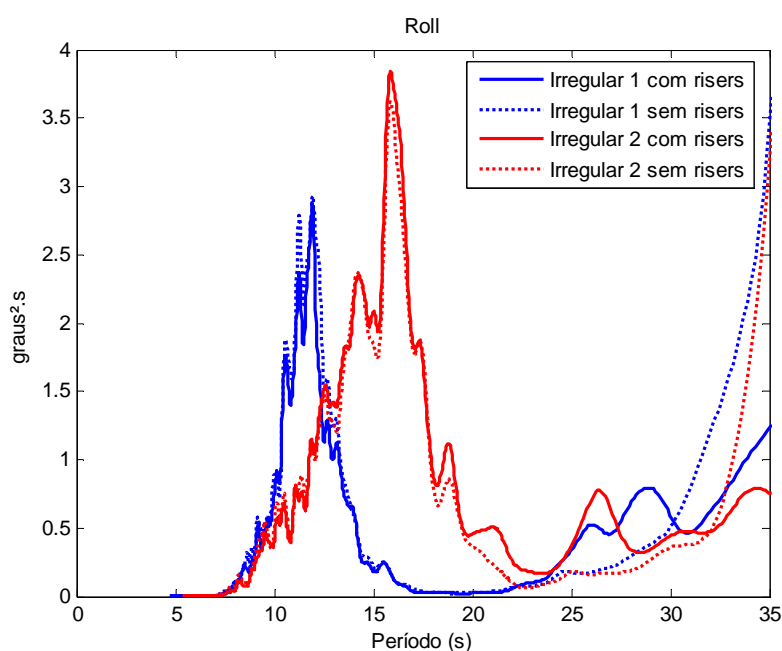


Figura 169 Espectro de potência experimental de *roll*

O espectro de *roll* é o único que apresenta alguma energia no período de 10 segundos, mas, considerando que a onda irregular 2 tem muito mais energia no período de 15 segundos e, levando em consideração que na Figura 165 e na Figura 166 a energia em 15 segundos está na mesma ordem de grandeza da de 10 segundos, é possível concluir que não é o movimento da plataforma que está excitando o *riser*.

Os espectros de potência experimentais de movimento também mostram que o *heave* é, provavelmente, responsável pelas diferenças de tração de topo dos casos com e sem *risers*, como observado na Figura 165 e na Figura 166. Isso porque nenhum outro grau de liberdade tem diferenças significativas entre os movimentos experimentais dos casos com e sem *risers*. Ou seja, para o caso específico deste estudo, o movimento de *heave* é o que sofre maior influência na sua dinâmica com a introdução dos *risers*, levando em consideração os períodos das ondas irregulares ensaiadas.

Descartada a hipótese de que o movimento da plataforma estivesse induzindo a excitação do *riser* em 10 segundos, a próxima idéia foi a excitação causada pela onda que atinge o próprio *riser*.

De fato, a Figura 170 apresenta uma análise do espectro de potência da tração no topo do *riser* obtida das séries temporais resultante do ANFLEX, mas executada somente com as ondas irregulares, ou seja, executada sem a imposição do movimento no topo do *riser*. Nos dois casos, há uma energia considerável perto de 10 segundos. Esse fato pode possivelmente explicar o comportamento dos espectros de tração no topo apresentados na Figura 165 e na Figura 166.

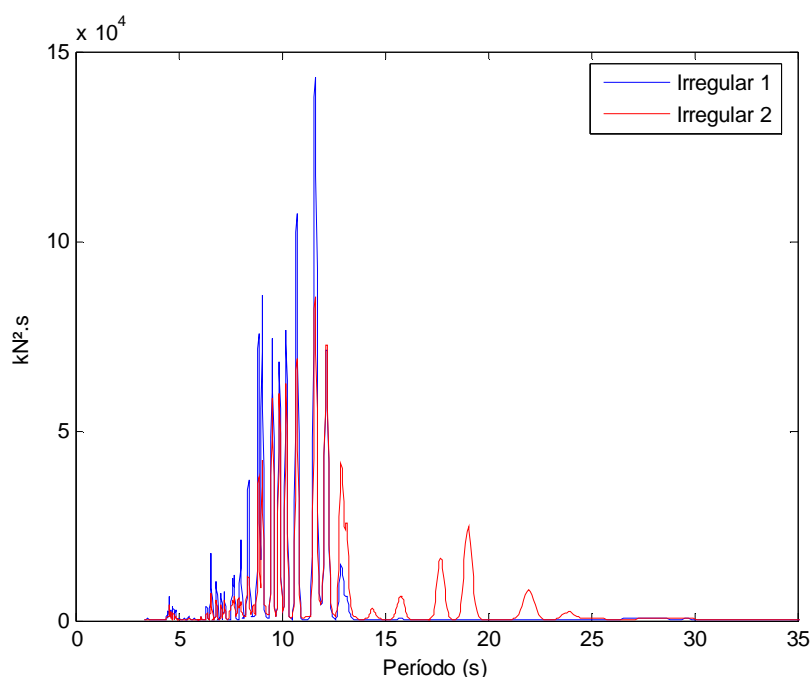


Figura 170 Espectro de potência da tração no topo do riser gerada com o ANFLEX somente com onda irregular

Ainda dentro do contexto de explicação do comportamento da resposta do *riser* instrumentado nos ensaios realizados, foi feita uma análise com objetivo de verificar os modos naturais de vibrar da linha, tendo como base a solução analítica proposta na referência [29]. A referência apresenta uma fórmula derivada da solução geral do método WKB (ver referência [30]), para o cálculo das frequências naturais transversais de um *riser* bi-dimensional em catenária, inextensível e sem efeito de correnteza.

A equação 7.1 apresenta a formulação utilizada para obtenção dos modos naturais de vibrar do *riser*. O ANEXO E mostra a rotina que utilizou essa formulação.

$$\Omega_n \cong \Lambda_n \sqrt{\frac{(1 - \cos \theta_L)}{\cos \theta_L}} \sqrt{\frac{(1 - a_R)}{(1 + a_R)}} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad 7.1$$

Onde:

$$\Lambda_n \cong \frac{n\pi}{\int_0^{\theta_L} \frac{d\theta}{(\cos \theta)^{2/3}}} \quad 7.2$$

θ_L é o ângulo de topo do *riser* com o plano horizontal.

a_R é o coeficiente de massa adicional: $a_R = m_{Ra} / m_R$, onde $m_{Ra} \cong \rho \pi D^2 / 4$, com ρ_a sendo a densidade da água e D o diâmetro externo do *riser*.

g representa a aceleração da gravidade e h a profundidade da lâmina d'água.

n é o número do modo de vibrar.

A Tabela 51 apresenta o resultado obtido para os 10 primeiros modos de vibrar do *riser* utilizado nos experimentos.

Tabela 51 Modos de vibrar do *riser*

Modos de Vibrar	Frequência Natural (rad/s)	Período Natural (s)
1º modo	0.299	21.04
2º modo	0.597	10.52
3º modo	0.896	7.01
4º modo	1.195	5.26
5º modo	1.493	4.21
6º modo	1.792	3.51
7º modo	2.091	3.01
8º modo	2.389	2.63
9º modo	2.688	2.34
10º modo	2.987	2.10

Como é possível observar, o segundo modo de vibrar do *riser* apresenta período natural em 10.52 segundos, valor muito próximo da região com maior energia do espectro de resposta de tração no topo, apresentado na Figura 170. Basta, então, verificar se o *riser* está realmente respondendo no seu segundo¹³ modo de vibrar.

Foi verificada a curva de envoltória das diversas análises executadas anteriormente com o ANFLEX, com o intuito de identificar em qual modo de vibrar o *riser* estaria respondendo. No entanto, o programa calcula somente os máximos e mínimos da envoltória, o que dificulta a identificação do seu comportamento, já que todas as análises foram executadas com onda irregular e, portanto não exibindo um comportamento claro do modo em que o *riser* está vibrando.

Com isso foram executadas análises no ANFLEX, nas quais foram impostos movimentos senoidais de 10.5 segundos de período, cujo resultado da envoltória transversal é apresentado na Figura 171.

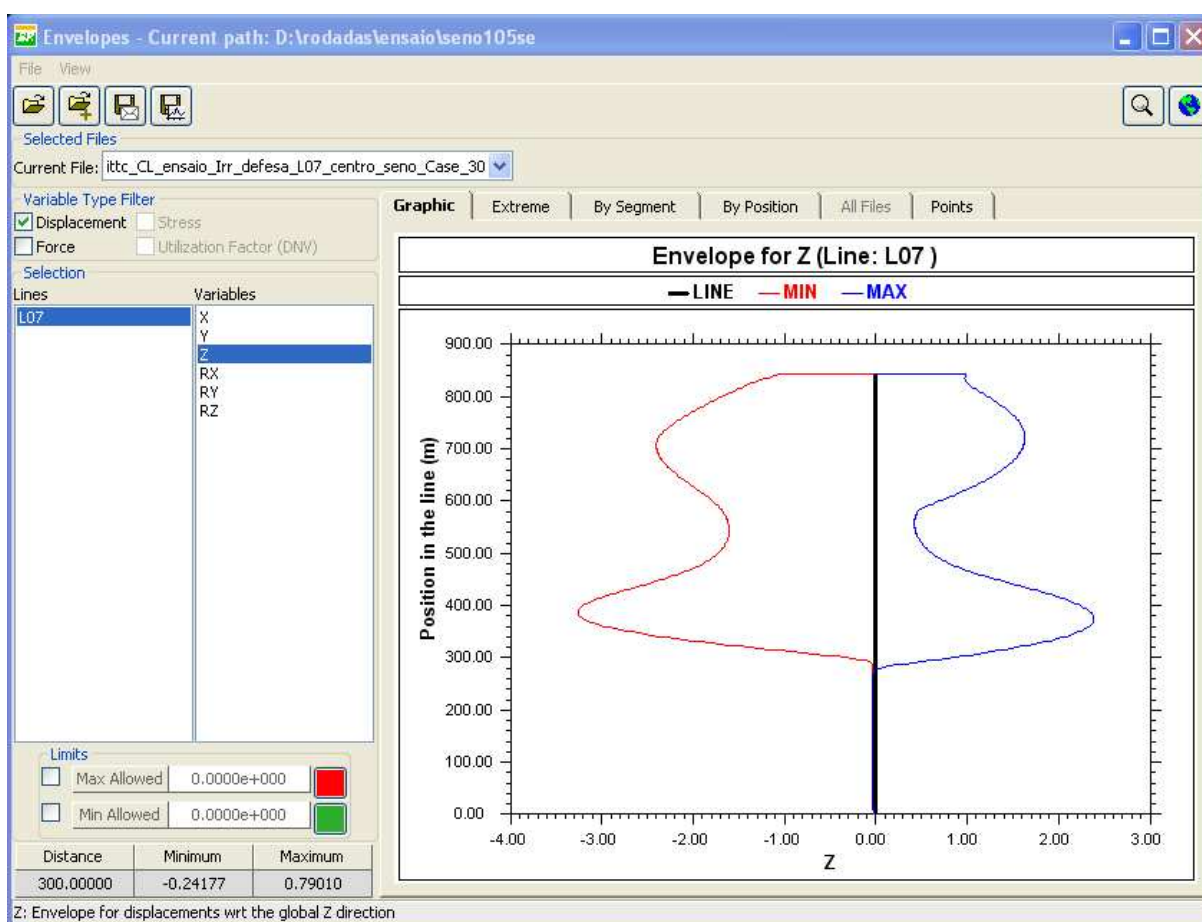


Figura 171 Resultado da envoltória obtida na análise com ANFLEX

¹³ Como não existe sentido físico no primeiro modo de vibrar de uma linha em catenária, é usual chamar o segundo modo de primeiro modo natural de vibrar.

Além disso, a Figura 172 apresenta a sobreposição do modelo numérico do *riser* em dois instantes de tempo distinto. Nesses instantes, o *riser* apresenta maior deslocamento transversal em relação à sua posição neutra.

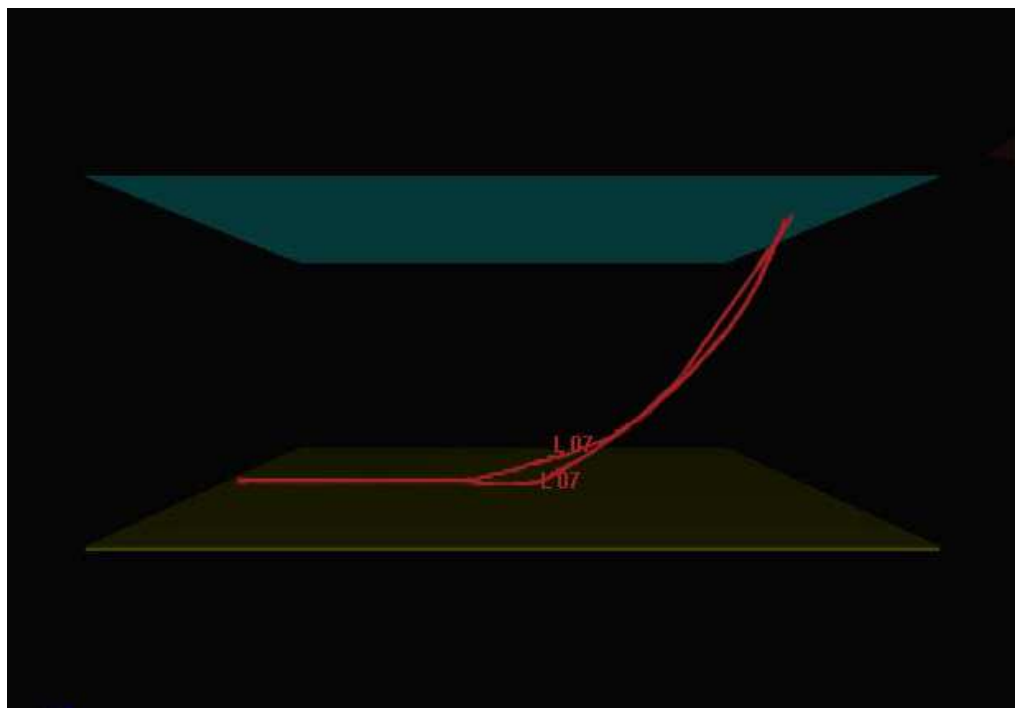


Figura 172 Sobreposição dos *riser* em dois *steps* da análise com ANFLEX

Com base nos resultados apresentados na Figura 171 e na Figura 172 é possível concluir que com a imposição do movimento circular com período de 10.5 segundos, o *riser* responde no seu segundo modo de vibrar. Desta forma, é possível levantar a hipótese de que os altos níveis de resposta de tração no topo do *riser* perto de 10 segundos, apresentados por exemplo, na Figura 165, na Figura 166 e na Figura 170 são devidos a este modo natural de vibrar.

Além das conclusões obtidas com as análises de tração no topo com o ANFLEX, durante todo o texto foram realizadas análise e comparações que podem estar dentro do contexto de discussão das implicações para o critério proposto pela API.

Tendo como base todas as comparações realizadas, fundamentadas nos experimentos em escala reduzida, é possível concluir que houve uma grande variação da dinâmica da plataforma nos dois casos considerados.

Os gráficos e as conclusões apresentados na seção 5.10, que confrontou somente casos experimentais com e sem *risers*, mostraram variações nos períodos naturais, bem como nos níveis de amortecimento apresentados pelo modelo.

Nos ensaios de decaimento, os resultados obtidos estavam dentro das expectativas, sendo que nos casos com *risers*, houve um incremento nos níveis de amortecimento devido à força de amortecimento proporcionada pelas linhas, e os períodos naturais sofreram alterações que puderam ser explicadas pelo acréscimo de massa adicional, no caso do movimento de *heave* ou pelo aumento de restauração, no de *sway*, ambos causados pela introdução dos *risers*.

No entanto, na comparação dos gráficos de RAO observou-se, tanto nos casos sem correnteza, quanto nos casos com correnteza, comportamentos que estavam fora do esperado, na medida em que se deduzia que todos os movimentos teriam reduções na suas amplitudes, com a introdução do conjunto de *risers*. De fato nos RAOs de *heave* observou-se uma redução do pico ressonante nos ensaios com linhas. No entanto, para os casos de *sway* e *roll*, houve um aumento dos níveis de movimento, como observado nos gráficos de comparação dos casos com e sem *riser*.

Essas implicações devem ser melhor estudadas em trabalhos futuros, a fim de se verificar a possibilidade desse comportamento ser verificado em outros sistemas, com diferentes arranjos de linhas de amarração e *risers*. No entanto, este trabalho leva a indícios sobre a necessidade da consideração destes elementos na determinação da dinâmica de plataformas de petróleo, na medida em que foram verificadas diferenças significativas nas dinâmicas dos dois casos.

Vale ressaltar que o caso estudado não reproduz nenhuma unidade que esteja em funcionamento em qualquer campo de petróleo. Desta forma, na medida do possível, seria interessante que em trabalhos futuros fosse possível o estudo em escala de um caso atual, para uma análise mais conclusiva dos aspectos abordados.

8. CONCLUSÕES

8.1. PROGRAMAS NUMÉRICOS

Conforme foi comentado no decorrer do texto, no campo da engenharia é de fundamental importância o estudo detalhado do projeto que se pretende executar. Dentro deste contexto, foram observados aspectos da realização de experimentos em escala reduzida com essa finalidade.

No entanto, é cada vez maior a utilização de ferramentas numéricas que complementam os ensaios em escala reduzida, dando mais confiabilidade e, às vezes, reduzindo custo e tempo nos estudos dos projetos.

No campo da engenharia naval e oceânica existem diversos tipos de aplicativos que são ferramentas importantes para o estudo de diversos fenômenos, como, por exemplo, da interação dos corpos com os fluidos, do comportamento destes quando são submetidos a condições ambientais e do comportamento estrutural dos corpos, quando são solicitados com os mais diversos carregamentos.

Neste texto foram explicitados os funcionamentos dos programas TPN e WAMIT®. Verificou-se que o WAMIT® tem uma habilidade muito grande em reproduzir com grande precisão o comportamento em ondas de um corpo flutuante. No entanto, quando linhas de amarração ou *risers* são introduzidos no sistema, diferenças significativas nos resultados são observadas.

Já com a utilização do TPN, é possível avaliar como os *risers* e linhas de amarração influenciam o comportamento de sistemas flutuantes. Portanto, nesta pesquisa foi realizada uma extensa bateria de ensaios para viabilizar a comparação destes resultados com os do TPN.

Desta forma, também foi observada a habilidade do TPN em reproduzir os movimentos da plataforma com e sem *risers*, sendo que na grande maioria dos casos o modelo numérico representou de maneira muito satisfatória os movimentos e níveis de tração das linhas obtidos nos experimentos. O próximo item discute mais especificamente os resultados obtidos no TPN.

8.2. RESULTADOS NO TPN

No capítulo 6 foram feitas todas as análises de comparação dos resultados obtidos nos experimentos com os resultados obtidos a partir do modelo numérico no TPN. Foram analisados ensaios de decaimento, de obtenção de RAOs, de ondas regulares com e sem correnteza e de mares, também com e sem correnteza.

Nos casos sem *risers*, foram obtidos ótimos resultados, nos quais o TPN conseguiu reproduzir de maneira geral todos os comportamentos obtidos experimentalmente. As exceções foram os casos com correnteza, que conforme comentado no item 5.8.4, parecem ter sido influenciados por efeitos viscosos não contemplados pela teoria potencial. Estes resultados também devem ser melhor estudados, ficando como sugestão de trabalhos futuros.

Para as comparações dos casos com *risers*, também foram obtidos resultados que representam de maneira satisfatória o comportamento observado nos ensaios. No entanto, foram verificadas diferenças nos níveis de amortecimento na região dos picos ressonantes dos gráficos de RAO. Ainda assim, os períodos desses picos foram bem reproduzidos.

A análise das curvas de decaimento e, conseqüentemente, dos coeficientes de amortecimentos obtidos, mostrou-se um assunto no qual existe certa dificuldade de interpretação e ainda reserva muitos aspectos a serem estudados. Alguns trabalhos apresentam resultados sobre o assunto, mas parece não haver consenso, principalmente sobre como utilizar os coeficientes experimentais no modelo numérico. Fica aqui outra sugestão para trabalhos futuros no assunto, que possam aprimorar os códigos numéricos, melhorando a aplicação deste tipo de método.

Finalmente, tendo em vista todos os aspectos abordados sobre as comparações numérico-experimentais e sobre as análises acopladas aqui desenvolvidas, juntamente com suas respectivas discussões, é possível concluir que os objetivos apresentados nessa dissertação foram atingidos, ainda que trabalhos futuros sejam recomendados para reforçar algumas conclusões aqui obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fucatu, C. H., “Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Navio Amarrados”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- [2] Silveira, E. S. S., “Análise Dinâmica de Linhas de Ancoragem com Adaptação no Tempo e Subciclagem”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Agosto de 2001.
- [3] API Recommended Practice 2RD; “Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)”; first edition, June 1998.
- [4] API Recommended Practice 2SK; “Recommended practice for design and analysis of station keeping systems for floating structures”; second edition, December 1996.
- [5] API Recommended Practice 2T; “Recommended practice for planning, designing and constructing tension leg platforms”; second edition, August 1997.
- [6] Pereira F.R., Fugarra, A.L.C., Simos, A.N., Rampazzo, F.P., Nishimoto K., 2006, “Influencia de risers na dinâmica de plataformas semi-submersíveis: um estudo experimental”, 21º Congresso nacional de transportes marítimos, construção naval e offshore; Sociedade brasileira de engenharia naval, Rio de Janeiro.
- [7] Malta, E. M., “Métodos e Processos para a análise experimental de sistemas oceânicos de produção de petróleo e gás”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

- [8] Maeda, H., Nishimoto, K., Eguchi, S., "A Study of Components of Wind and Current Loads on Semisubmersibles", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 156, pp. 226-235, Japan, 1984.
- [9] Chakrabarti, S. K., "Offshore Structure Modeling", Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 9, World Scientific, USA, 1994.
- [10] Faltinsen, O. M., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge Ocean Technology Series, 1990.
- [11] Takagi, M., Arai, A., Takezawa, S., Tanaka, K., Takarada, N., "A Comparison of Methods for Calculating the Motions of a Semi-Submersible", Ocean Engineer, Vol. 12, No 1, pp. 45-97, Great Britain, 1985.
- [12] Hooft, J. P., "A Mathematical Method of Determining Hydrodynamically induced forces on Semi-submersible", Sname, Vol 79, 1972
- [13] Report of the Ocean Engineering Committee, 17th International Towing Tank Conference - ITTC Proceedings, pp 554-563, Göteborg, 1984.
- [14] WAMIT®, User Manual, Versions 6.2, 6.2PC, 6.2S, 6.2S-PC. Wamit, Inc.
- [15] Fajarra, A.L.C., Simos, A.N., Yamamoto, N., 2003, "Dynamic Compression on Rigid and Flexible Risers. Part I – Experimental Results". Proc. Of the 22nd Offshore Mech. and Arctic Eng. Conference, Cancun.
- [16] Simos, A.N., Fajarra, A.L.C., Alves, K.H., 2003, "Dynamic Compression on Rigid and Flexible Risers. Part II – Comparison of Theoretical and Experimental Results". Proc. of the 22nd Offshore Mech. and Arctic Eng. Conference, Cancun.
- [17] Simos, A.N., Fajarra, A.L.C., "Dynamic Compression on Rigid and Flexible Risers: Experimental and Numerical Results", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 128, August 2006.

- [18] Simos, A.N., Sparano, J. V., Aranha, J. A. P., Matos, V. L. F., "2nd Order Hydrodynamic Effects on Resonant Heave, Pitch and Roll Motions of a Large-Volume Semi-Submersible Platform", Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2008 June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- [19] Carvalho, M. T. M., "Estratégia para o Desenvolvimento de Aplicações Configuráveis em Mecânica Computacional", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 1995.
- [20] Pesce, C. P., Martins, C. A., "Notas de Aula de Sistemas Hidromecânicos" Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [21] Simos, A.N., "Notas de Aula de Hidrodinâmica I" Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- [22] Chung, J., Lee, J. M., "A New Family of Explicit Time Integration Methods for Linear and Non-Linear Structural Dynamics", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 37, pp. 3961-3976, 1994.
- [23] Hulbert, G. M., Chung, J., "Explicit Time Integration Algorithms for Structural Dynamics with Optimal Numerical Dissipation", Computer Methods Applied Mechanics Engineering, vol. 137, pp. 175-188, 1996.
- [24] Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S.A., "The force exerted by surface waves on piles", Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers, vol. 189, 149-154, USA, 1950.
- [25] Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", The Massachusetts Institute of Technology Press, 1977.

- [26] Aranha, J.A.P. "A Formula for 'Wave Damping' in the Drift of a Floating Body", *Journal of Fluid Mechanics*, vol 275, pp 147-155, 1994.
- [27] Lewis, E., V., "Principles of Naval Architecture, Volume II – Resistance, Propulsion and Vibration" Second Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, USA, 1988.
- [28] Yang, J. S., Marks, C. H., Jiang, J., Chen, D., Elahi, A., Tsai, W. "Determination of Fluid Damping Using Random Excitation" Department of Mechanical Engineering, University of Maryland.
- [29] Pesce, C. P., Fajarra, A. L. C., Simos, A. N., Tannuri, E. A., "Analytical and Closed Form Solutions for Deep Water Riser-Like Eigenvalue Problem", *Proceedings of the 1999 Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*; Brest; 30 May 1999 through 4 June 1999.
- [30] Bender, C.M, Orszag, S.A., "Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers", McGraw-Hill Book Co., International Series in Pure and Applied Mathematics, pp 593, 1978.
- [31] Martins, C. A., "POLIFLEX. User's manual", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.
- [32] Kaster, F., Barros, M., Rossi, R., Masetti, I., Falkenberg, E., Karlsen, S., Waclawek, I., "DICAS - a new mooring concept for FPSO's", *Proceedings of the 1997 29th Annual Offshore Technology Conference, OTC'97. Part 4 (of 4)*; Houston, TX, USA; 5 May 1997 through 8 May 1997.
- [33] Correa, F. N., Senra, S. F., Jacob, B. P., Masetti, I. Q., Mourelle, M. M., "Towards the integration of analysis and design of mooring systems and risers, Part II: Studies on a DICAS system", *Proceedings of the 21st International*

Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE); Oslo; 23 June 2002 through 28 June 2002.

- [34] Rampazzo, F. P., Masetti, I. Q., Nishimoto, K., "The Mooring System Design of MONOBR platform for Harsh Environmental Conditions (GoM)". In: 20th Ocean Engineering Symposium – OES, Tokyo, 2008.
- [35] Rampazzo, F. P., Malta, E. B., Watai, R. A., Cruz, R. E., Nishimoto, K., "Design of an Innovative FPSO-TLWP Coupled System Based on the Numerical Offshore Tank (TPN) Methodology", International Marine Design Conference (IMDC), Trondheim - Norway. 2009. v. 2. p. 1113-1122.
- [36] Cummins, W. E., "The Impulse Response Function and Ship Motions", International Symposium on Ship Theory, Nº 8, Hamburg, Germany, 1962.
- [37] Ogilvie, T. "Recent Progress Towards the Understanding and Prediction of Ship Motions", Proceedings 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1964.
- [38] DYNASIM, "Manual Teórico", Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Agosto de 2000.
- [39] Carneiro, M. L., de Mello, P. C., Tannuri, E. A., Simos, A. N., "Experimental Validation of an Absorbing Wavemaker Controller". Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
- [40] Potter, M. C., Wiggert, D. C., "Mecânica dos Fluidos", tradução da 3ª edição norte-americana, Thomson, 2004.
- [41] Chakrabarti, S. K., "Hydrodynamics of Offshore Structures", Computational Mechanics Publications, WIT Press, Southampton, Boston, USA, 1987.
- [42] Sítio de enciclopédia matemática Wolfram-MathWorld, disponível em <<http://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>>. Acesso em agosto 2009.

- [43] Sítio de informações sobre o aplicativo WAMIT, disponível em <<http://www.wamit.com>>. Acesso em janeiro de 2010.
- [44] Sítio da International Towing Tank Conference – ITTC, disponível em <<http://itc.sname.org/>>. Acesso em janeiro de 2010.
- [45] Sítio de informações sobre o aplicativo ORCAFLEX, disponível em <<http://www.orcina.com/index.php>>. Acesso em fevereiro de 2010.

ANEXO A PUBLICAÇÕES SOBRE ANÁLISE COM A PLATAFORMA ITTC-SR192

Tabela 52 Lista dos programas utilizados para comparação de resultados numéricos
(referência [11])

Symbol	Program name	Organization
A	REVMA	Alsthom-Atlantique/Ateliers et chantiers de Bretagne (France)
B	CANARI	Bureau Veritas (France)
C1	MARINA	Centre Technique Industriel de la Construction Metallique (France)
C2	RESEDA	
D	AQUADYN	Ecole Nationale Supérieure de Mécanique (France)
E1	AQUADYN	Franlab Informatique (France)
E2	TRITON	
F	MULTRI 83 VCFEM	CFEM & Principia R. D. (France)
G1	SEMISUB	Netherlands Ship Model Basin (The Netherlands)
G2	DIFFRAC	
H	UCLRIG	Department of Mechanical Engineering, University College London (U.K.)
I	UMI WAVE	National Maritime Institute Ltd. (U.K.)
J	-----	Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University (Japan)
K	-----	Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University (Japan)
L1	OCS	Akishima Laboratory Technical Research Development Headquarters, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (Japan)
L2	OCS	
M	MAPOS	Hiratsuka Research Laboratory, Sumitomo Heavy Industries, Ltd. (Japan)
N	-----	Tsu Research Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K. (Japan)
O	HULMOI	Nagasaki Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (Japan)
P	HISOS	Design Department, Offshore Headquarters, Hitachi Zosen Corporation (Japan)
Q	-----	Kawasaki Heavy Industries, Ltd. (Japan)
R	MARINS	Research Institute (Yokohama), Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. (Japan)
S	MOSES	Marine Design & Research Institute of China (China)
T	KSRI	Krylov Shipbuilding Research Institute (U.S.S.R.)
U1	SEMISYS	Ocean Engineering Division (LMI)
U2	SING-A	Technical University Aachen, FRG (West Germany)
V	WUCDSFV	Swedish Maritime Research Center, SSPA (Sweden)
W	SDFINI	China Ship Scientific Research Center (China)
X	PLAT	Technical University of Szczecin (Poland)
Y1	ABS/SPLASHD	American Bureau of Shipping (U.S.A.)
Y2	ABS/SEMISUBNERSIBLE	
Z	WAMOF	Norwegian Hydrodynamic Laboratories (Norway)
ZA	PLATFORM PROGRAM	David Taylor Naval Ship Research and Development Center (U.S.A.)
ZB	XXPIAT	Registro Italiano Navale (Italy)

Tabela 53 Dimensões principais dos modelos utilizados nos ensaios (referência [11])

Designation		Unit	Actual	Model (Scale ratio 1/64)		
				YNU	SHI	IHI
Length overall		m	115	1.797		
Breadth moulded		m	75	1.172		
Upper deck elevation		m	43	0.672		
Lower hulls (2)	Length	m	115	1.797		
	Beam	m	15	0.234		
	Height	m	9.75	0.125		
Columns (8)	Large columns Diameter	m	10	0.156		
	Small Columns Diameter	m	8	0.125		
Draft (Survival cond.)		m	20	0.313		
Displacement		Ton kg	35,000	131.8	131.1	131.7
Center of gravity	Vert., VCG above the base line	m	17.5	0.273	0.273	0.274
	Longi., LCG at the midship	m	0	0	0	0
	Trans., TCG at the center line	m	0	0	0	0
Metacentric height	Longi., LGM	m	2.37	0.037	0.037	0.036
	Trans., TGM	m	2.87	0.045	0.045	0.044
Radius of gyration	Roll, Kxx	m	—	0.518	0.508	0.504
	Pitch, KYY	m	—	0.556	0.553	0.554
	Yaw, KZZ	m	—	0.665	0.642	0.654
Natural period	Heave	S	—	3.0	2.98	2.99
	Roll	S	—	6.54	6.84	6.18
	Pitch	S	—	7.25	7.80	7.18
	Yaw	S	—	—	9.42	6.61
Water depth at the time of the model experiments		m	—	3.5	2.5	3.0

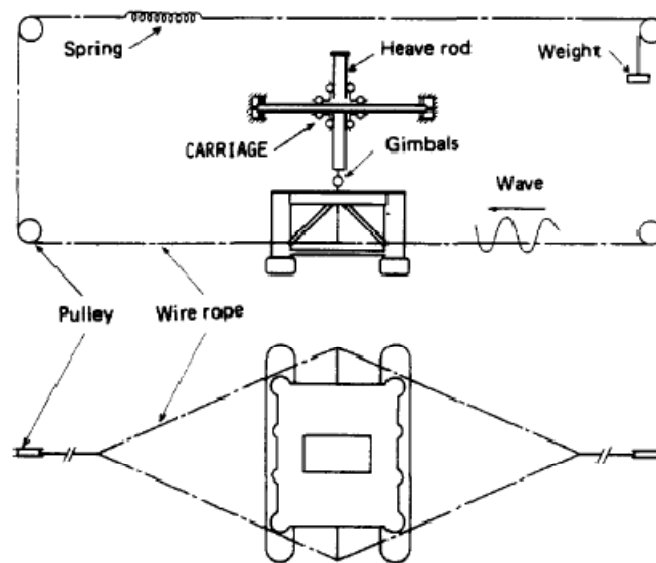


Figura 173 Esquema do ensaio SHI (referência [11])

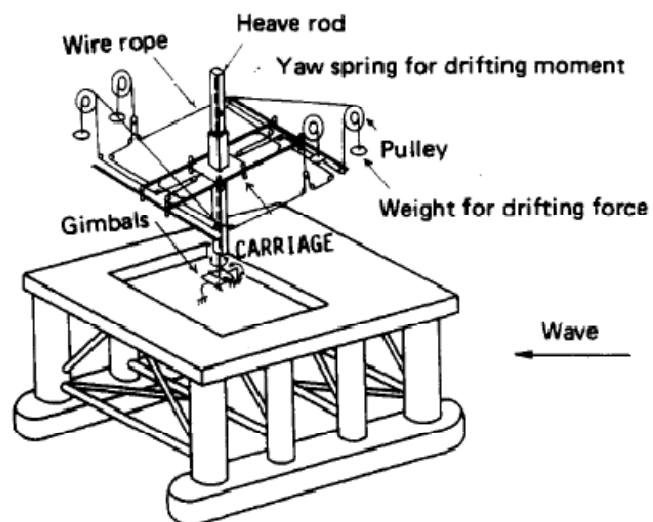


Figura 174 Esquema do ensaio IHI (referência [11])

Remote Measurement by Position Sensor Device (YNU)

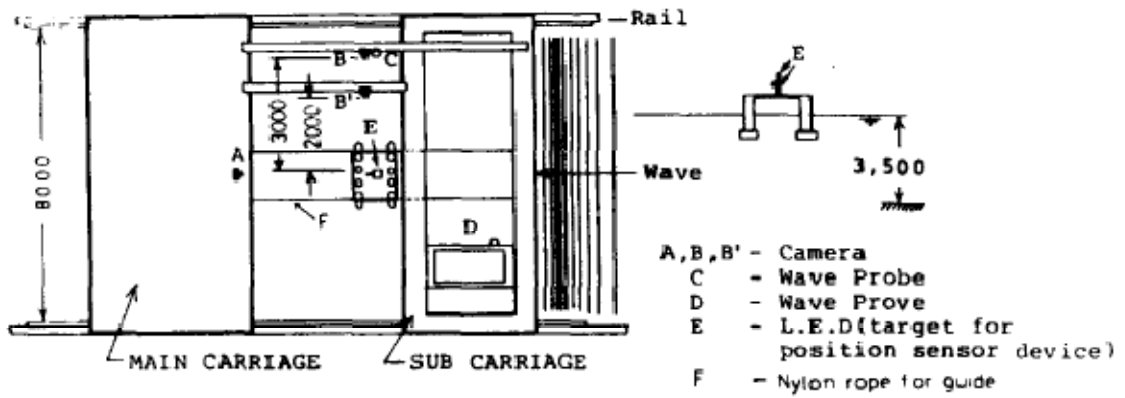


Figura 175 Esquema do ensaio YNU (referência [11])

ANEXO B RESULTADOS DE ONDAS IRREGULARES

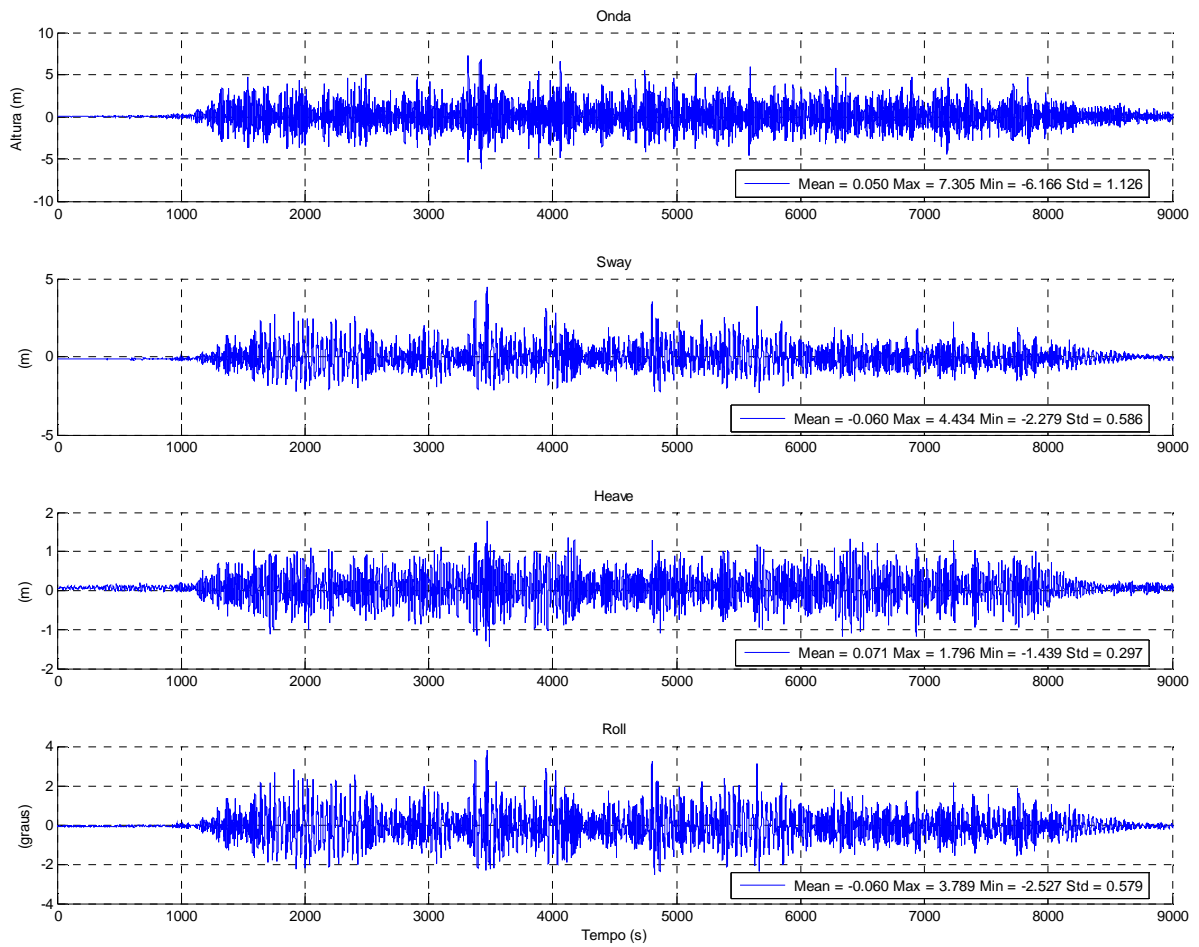


Figura 176 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2

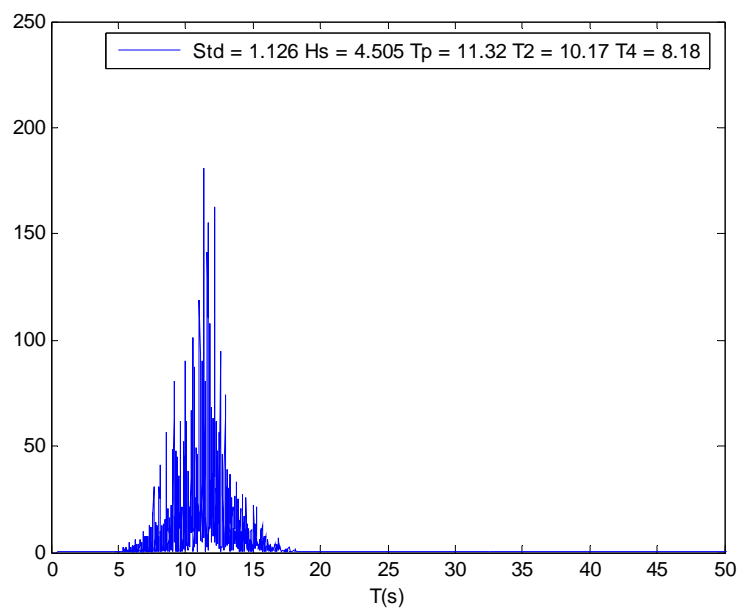


Figura 177 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2

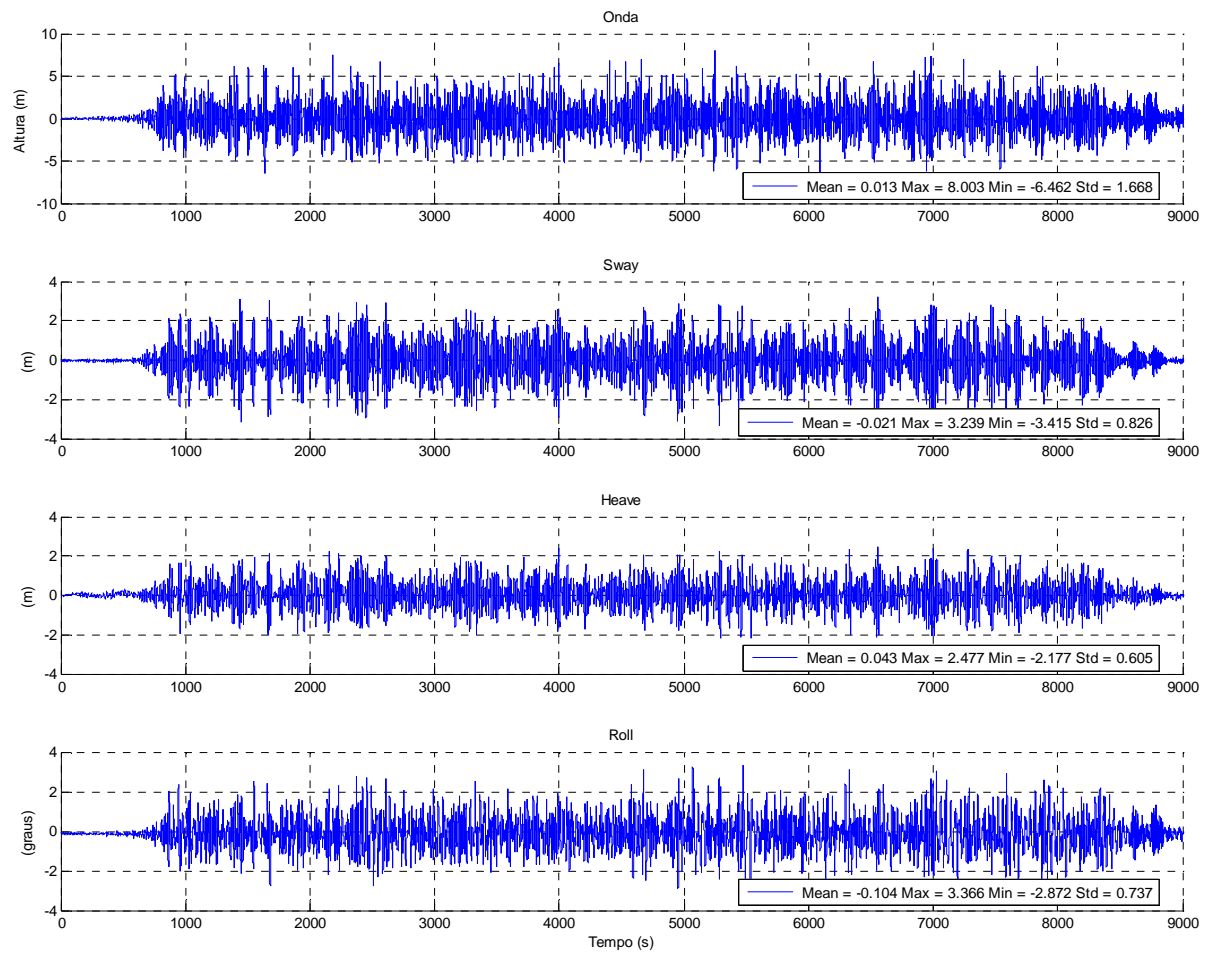


Figura 178 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2

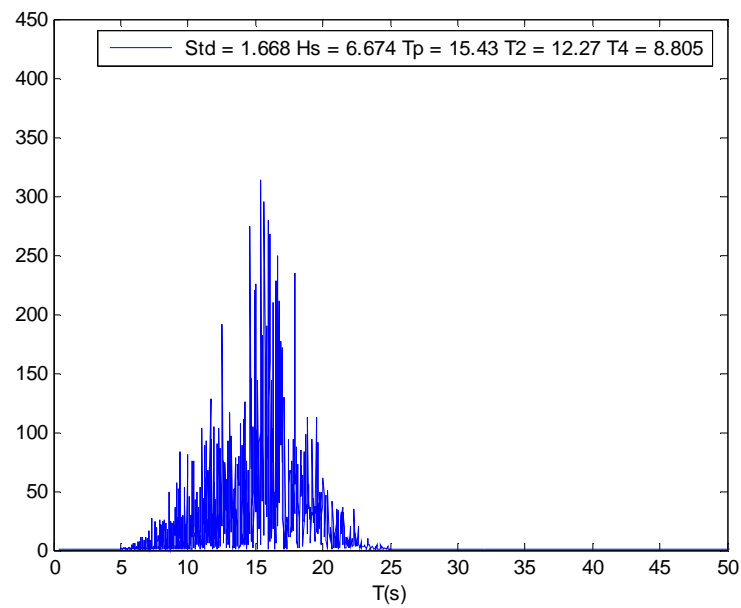


Figura 179 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2

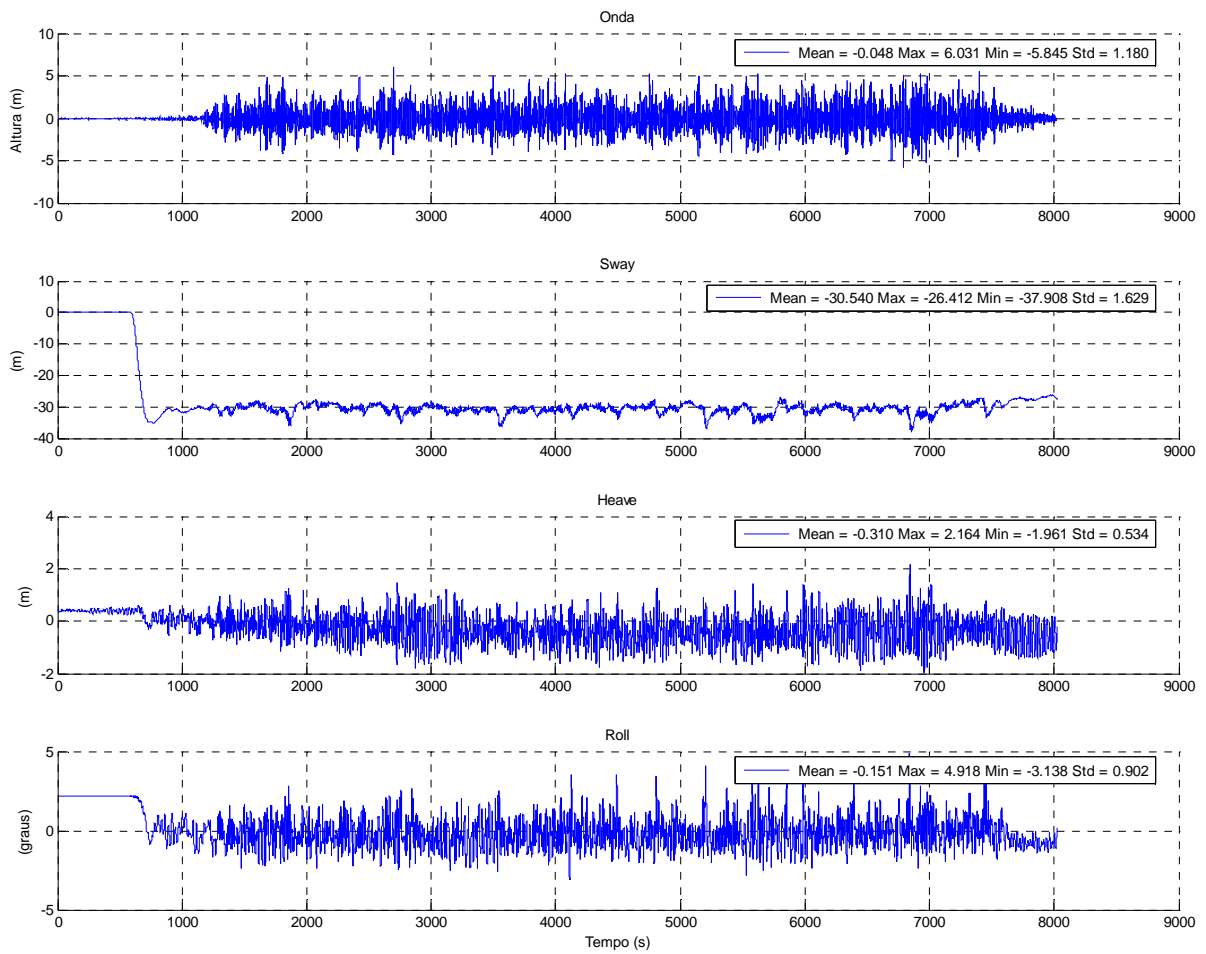


Figura 180 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2 com correnteza

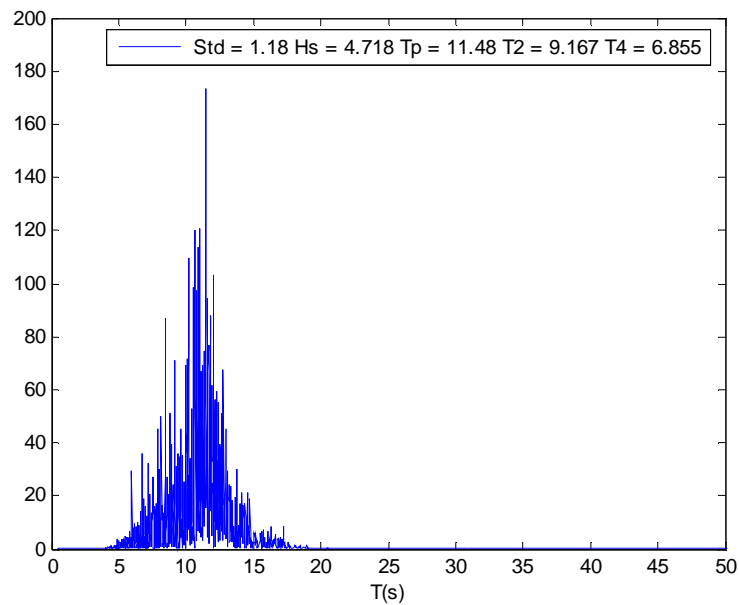


Figura 181 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2 com correnteza

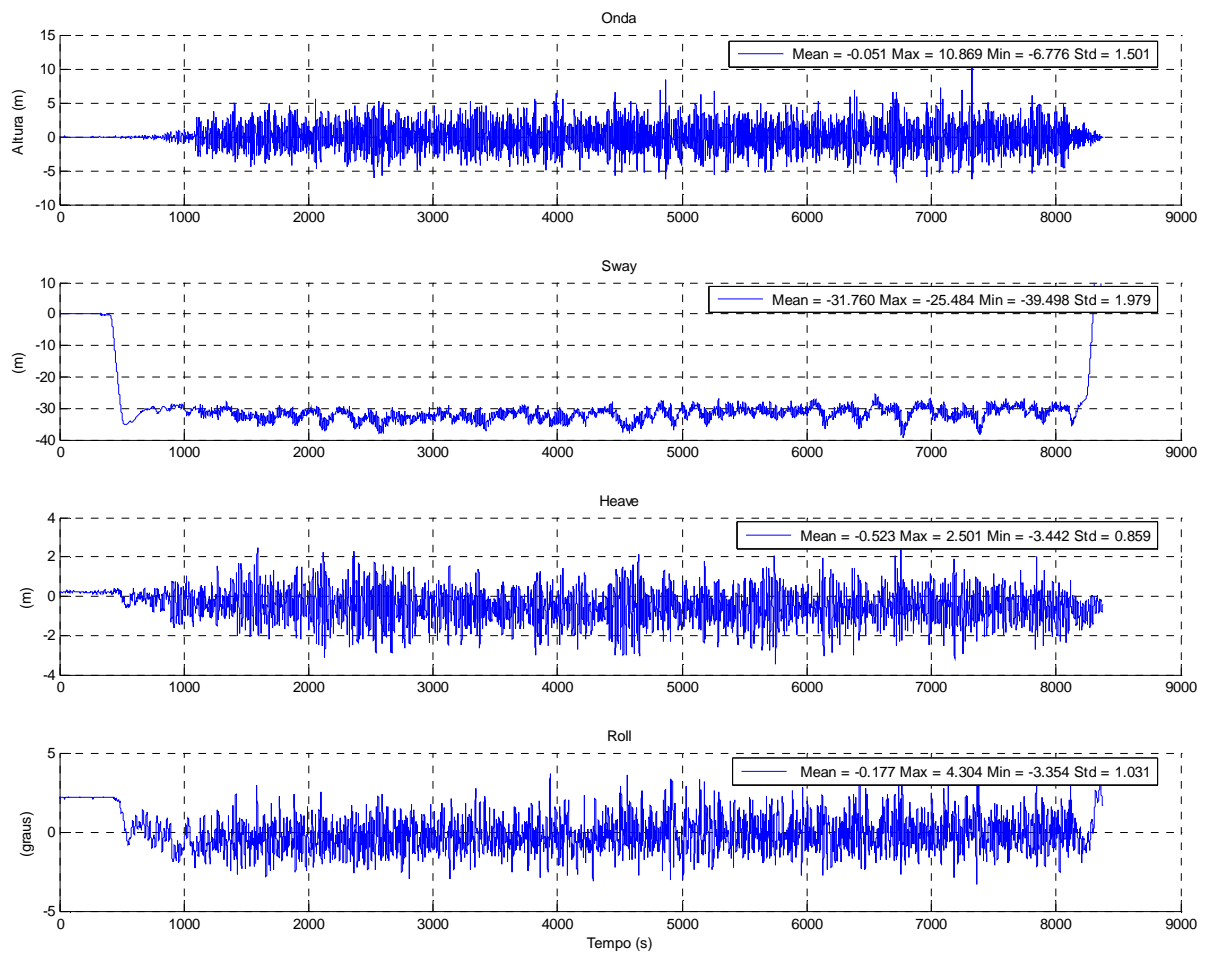


Figura 182 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2 com correnteza

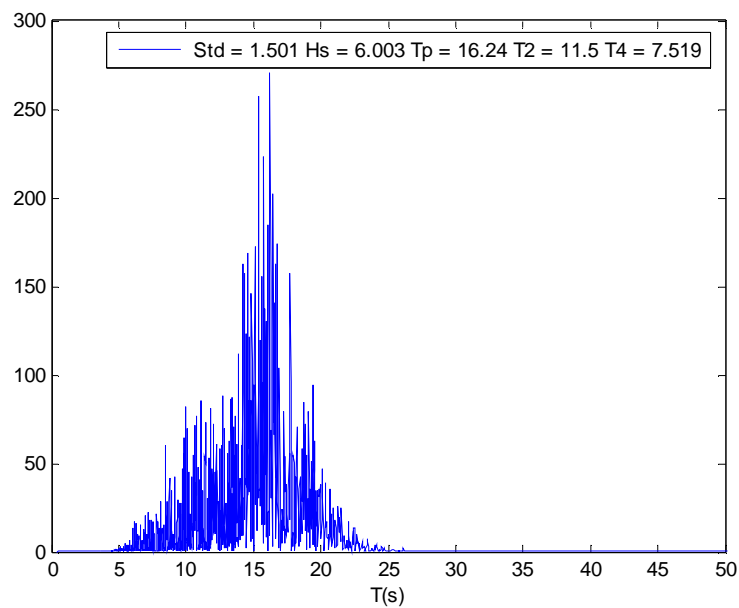


Figura 183 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2 com correnteza

ANEXO C RESULTADOS DE ONDAS IRREGULARES COM RISERS

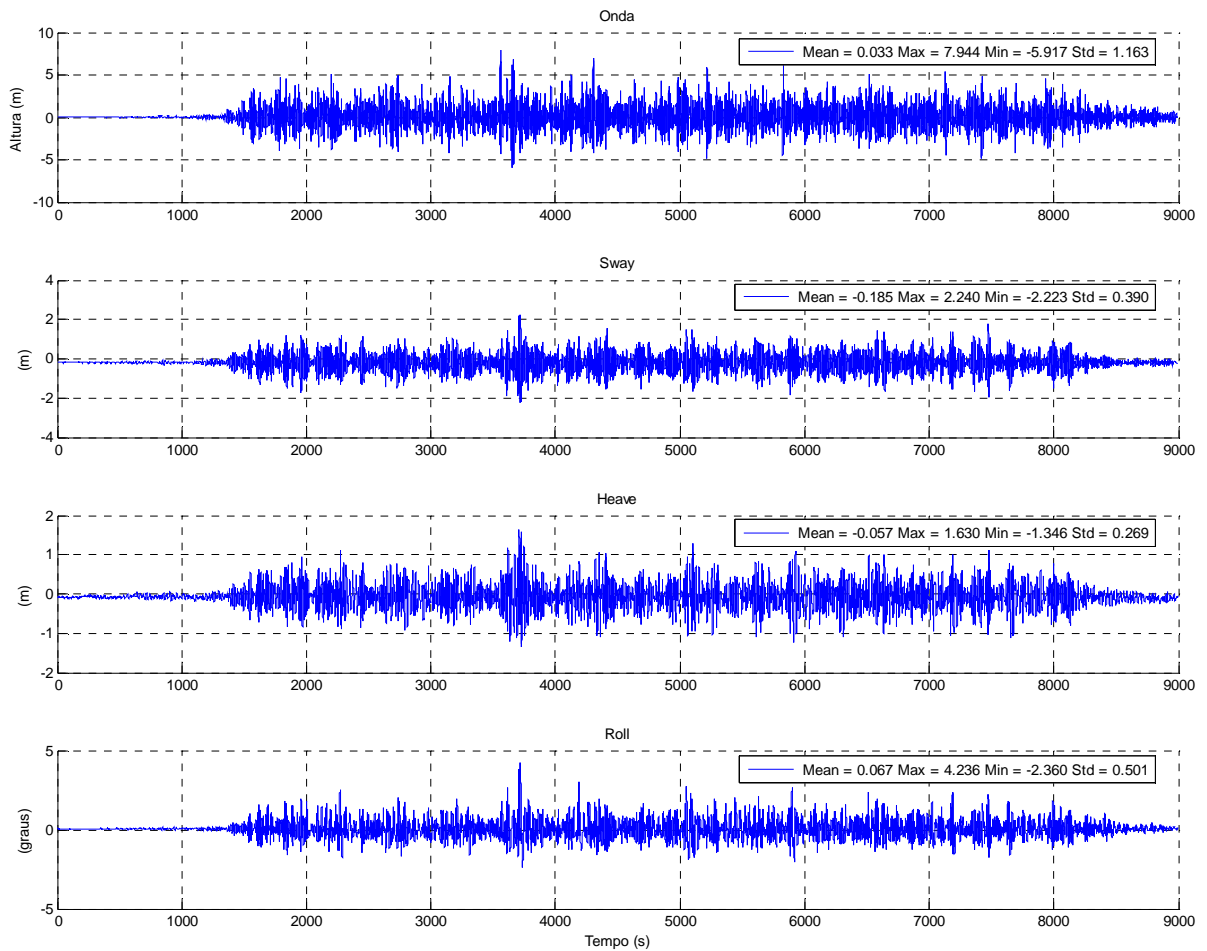


Figura 184 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2, caso com *risers*

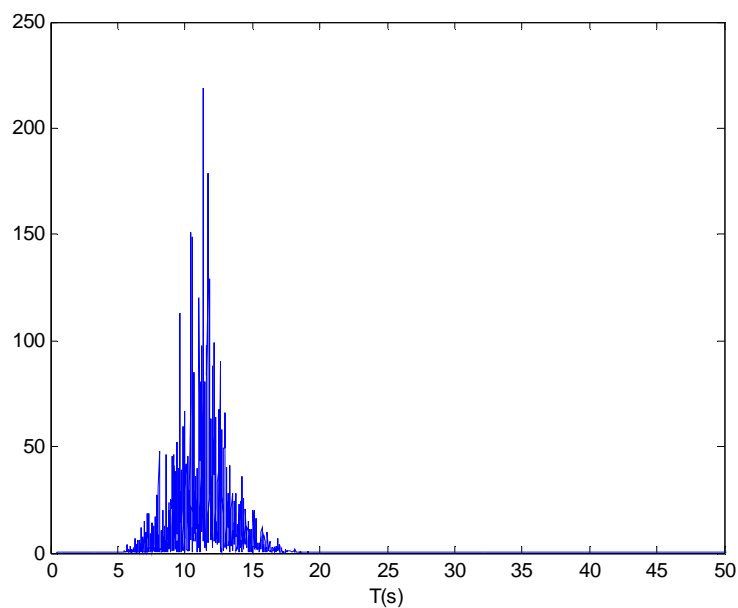


Figura 185 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2, caso com *risers*

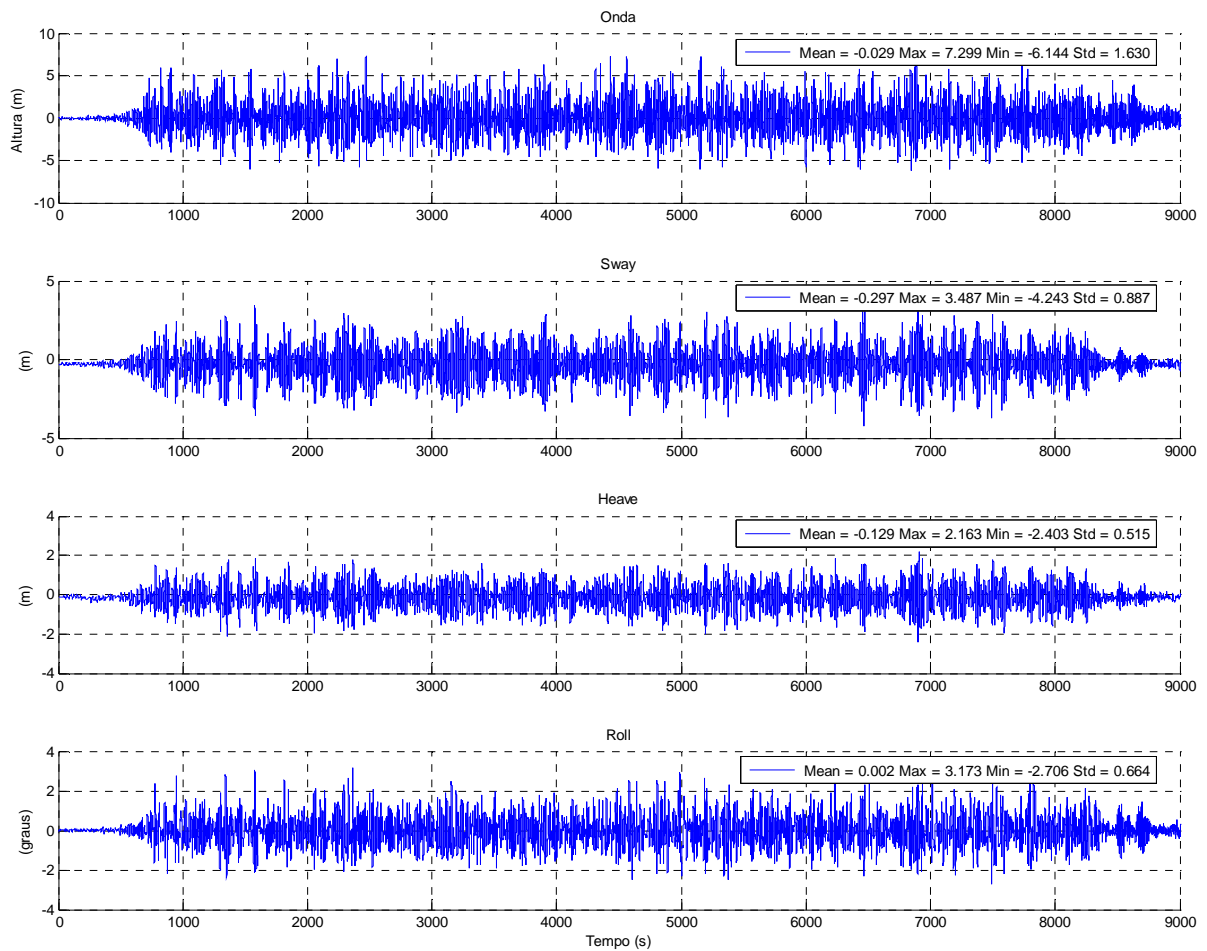


Figura 186 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2, caso com *risers*

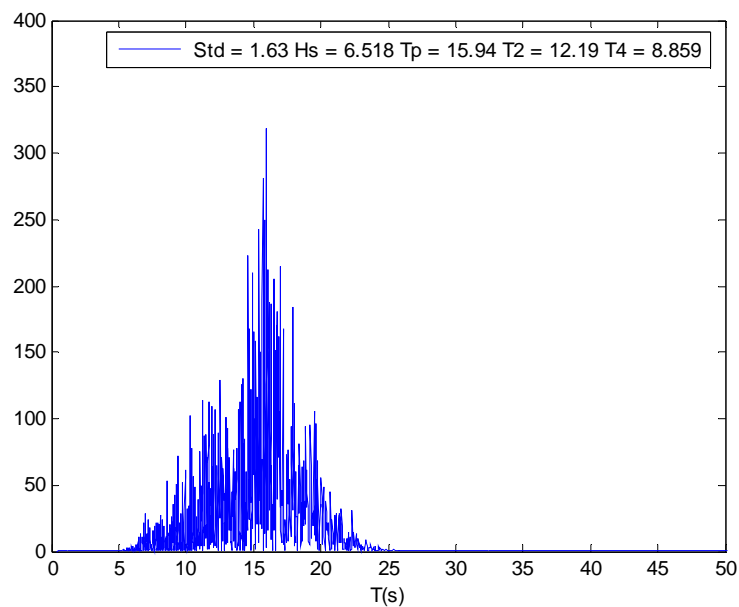


Figura 187 Espectro de potência da onda do mar 2 semente aleatória 2, caso com *risers*

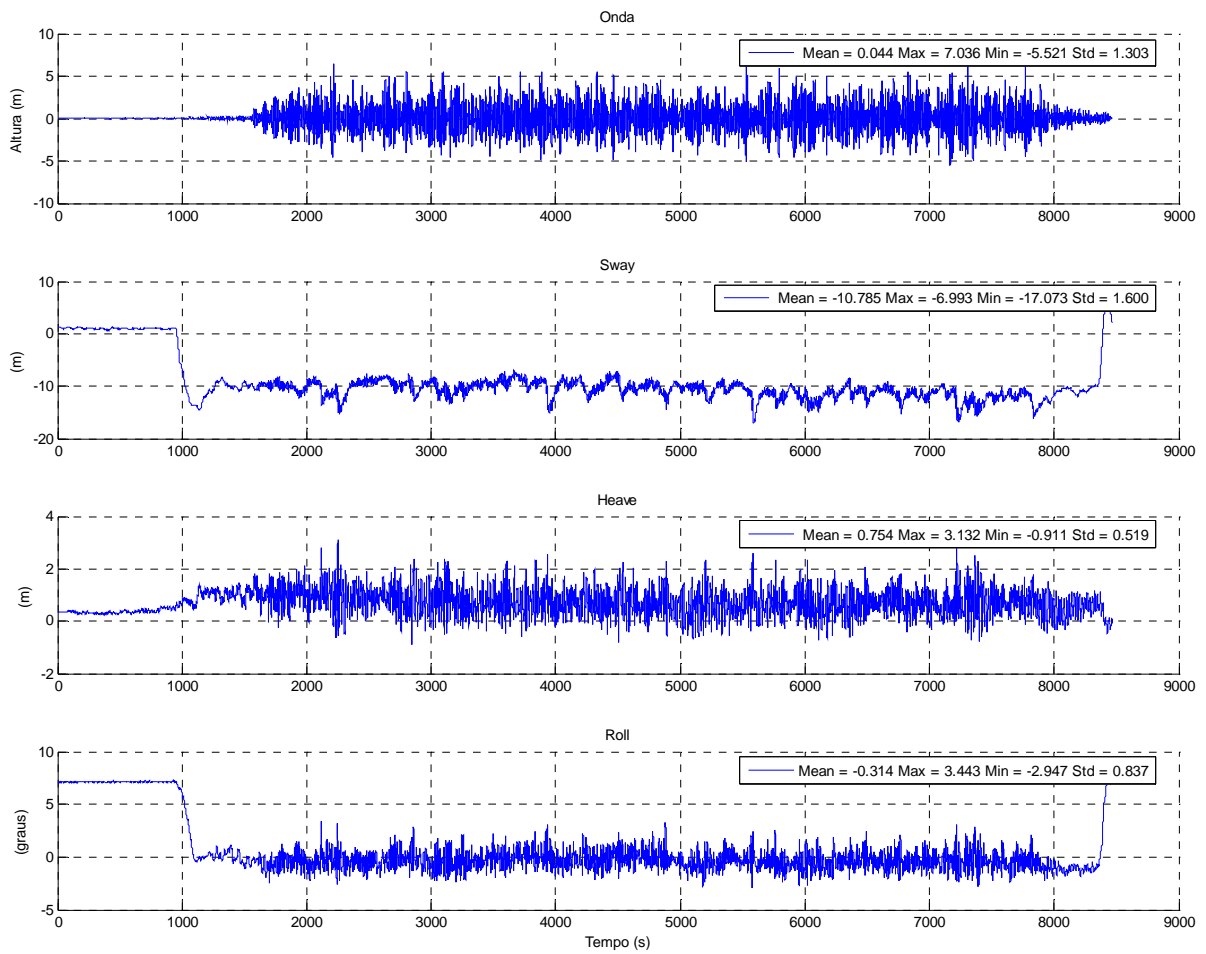


Figura 188 Séries temporais da onda irregular 1, semente aleatória 2, com correnteza e com risers

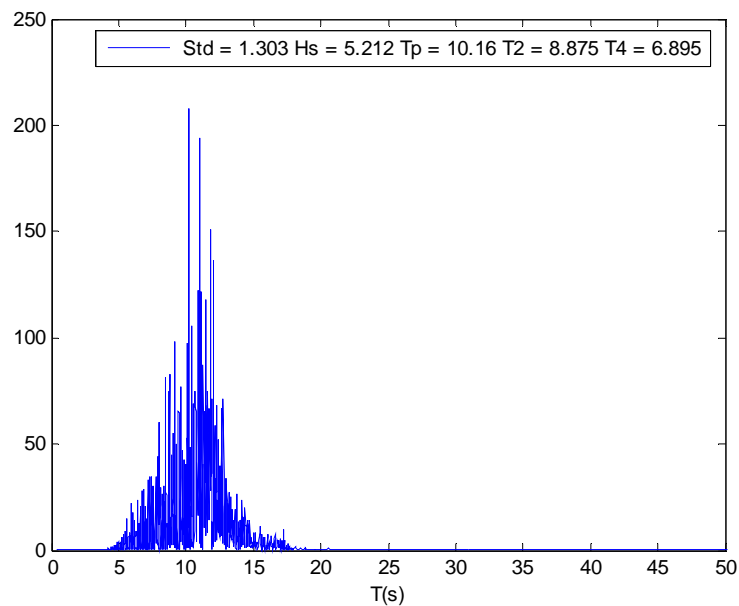


Figura 189 Espectro de potência da onda do mar 1, semente aleatória 2, com correnteza e com risers

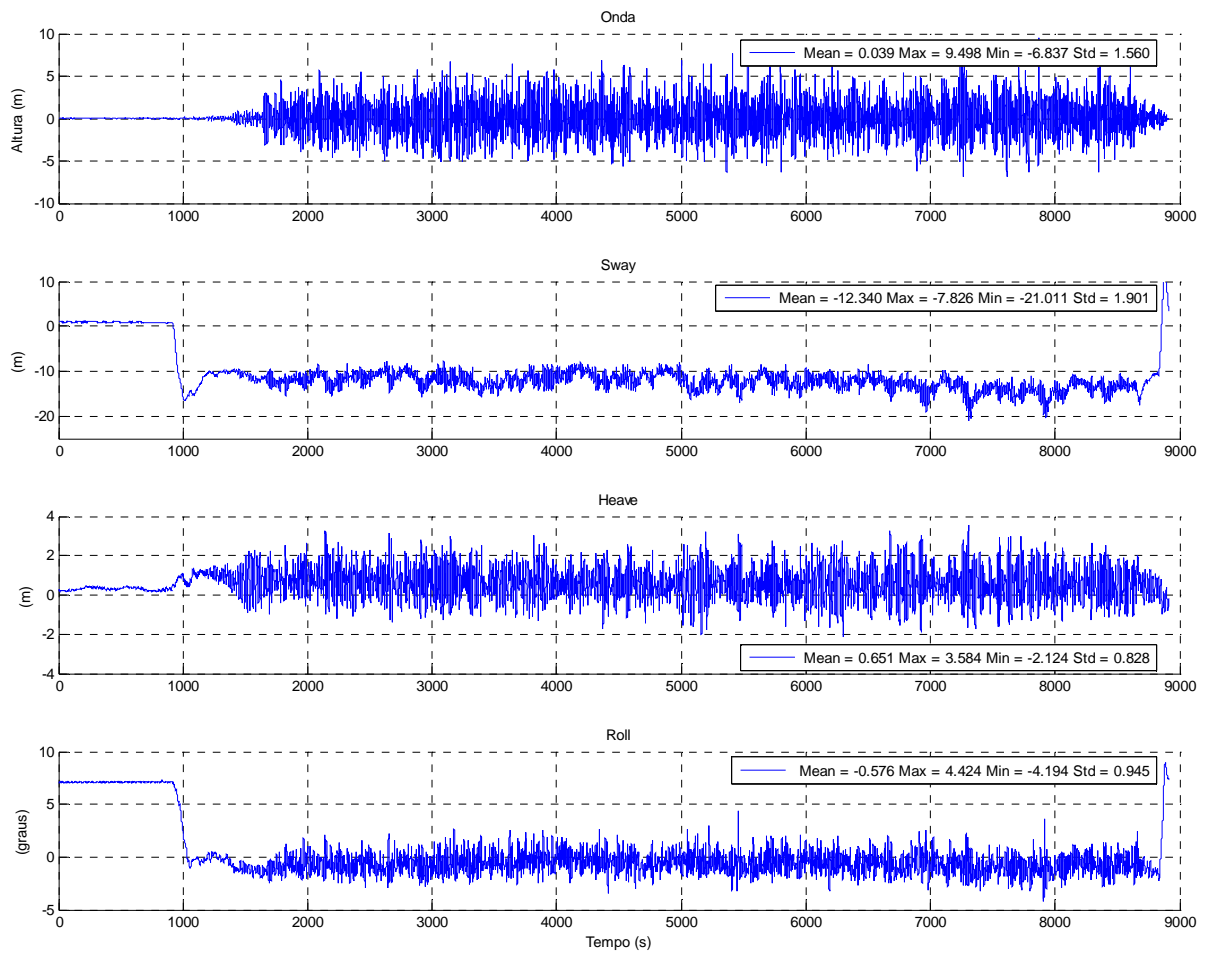


Figura 190 Séries temporais da onda irregular 2, semente aleatória 2, com correnteza e com *risers*

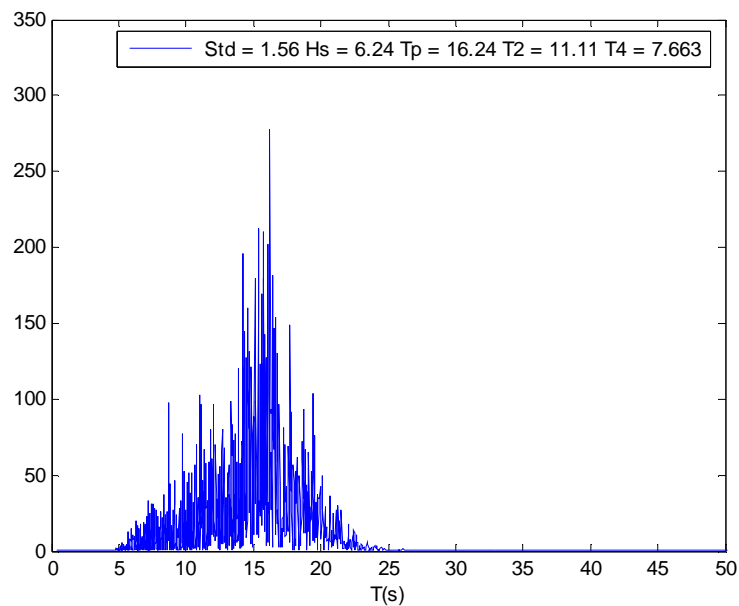


Figura 191 Espectro de potência da onda do mar 2, semente aleatória 2, com correnteza e com *risers*

ANEXO D DADOS HIDRODINÂMICOS

Neste anexo serão apresentados os dados hidrodinâmicos obtidos com o WAMIT®. Para os movimentos de *sway*, *heave* e *roll*, será apresentado um primeiro gráfico com massa adicional, amortecimento potencial e força de excitação de onda e outro gráfico com o RAO e sua fase.

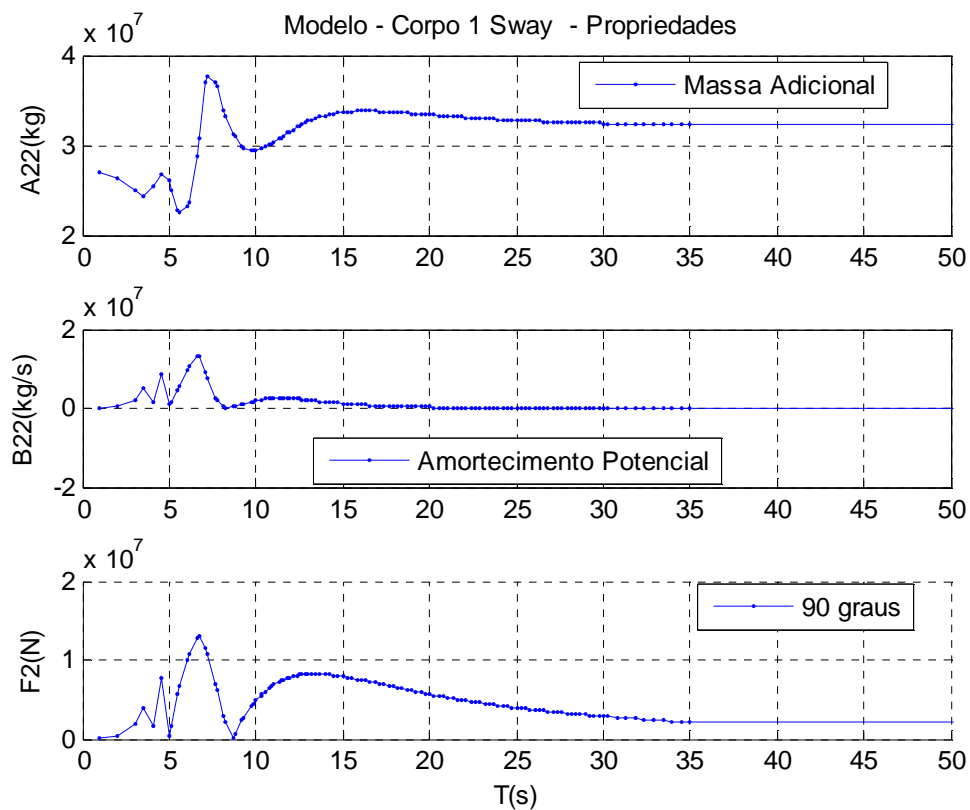


Figura 192 Massa adicional, amortecimento potencial e força de excitação de onda de *sway*

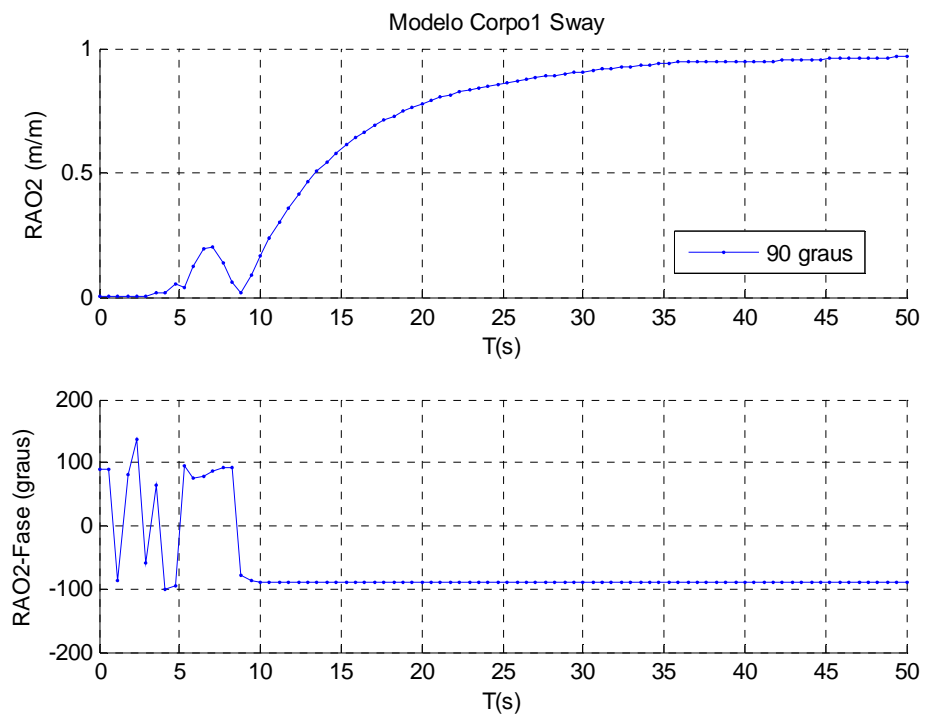


Figura 193 RAO de *sway* e fase

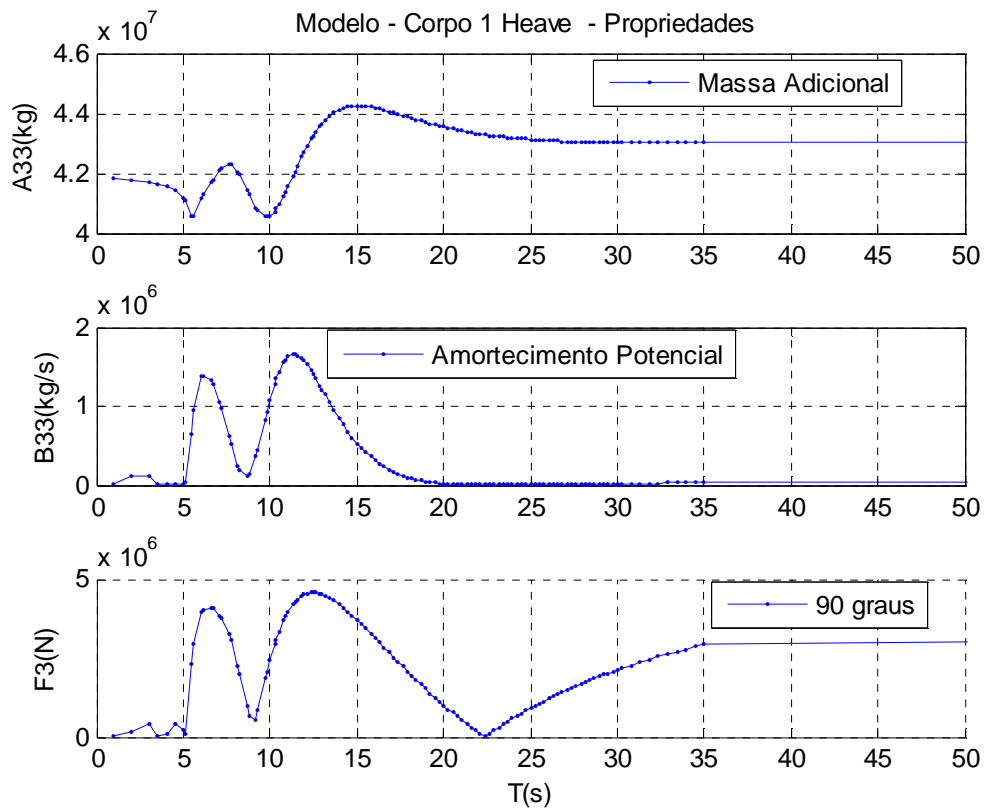


Figura 194 Massa adicional, amortecimento potencial e força de excitação de onda de *heave*

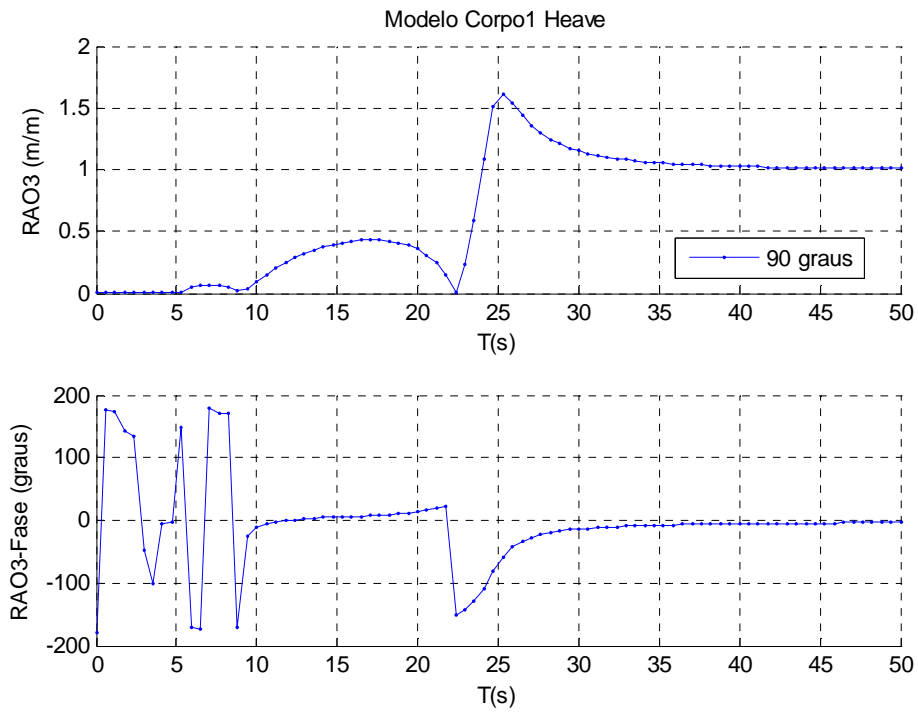


Figura 195 RAO de *heave* e fase

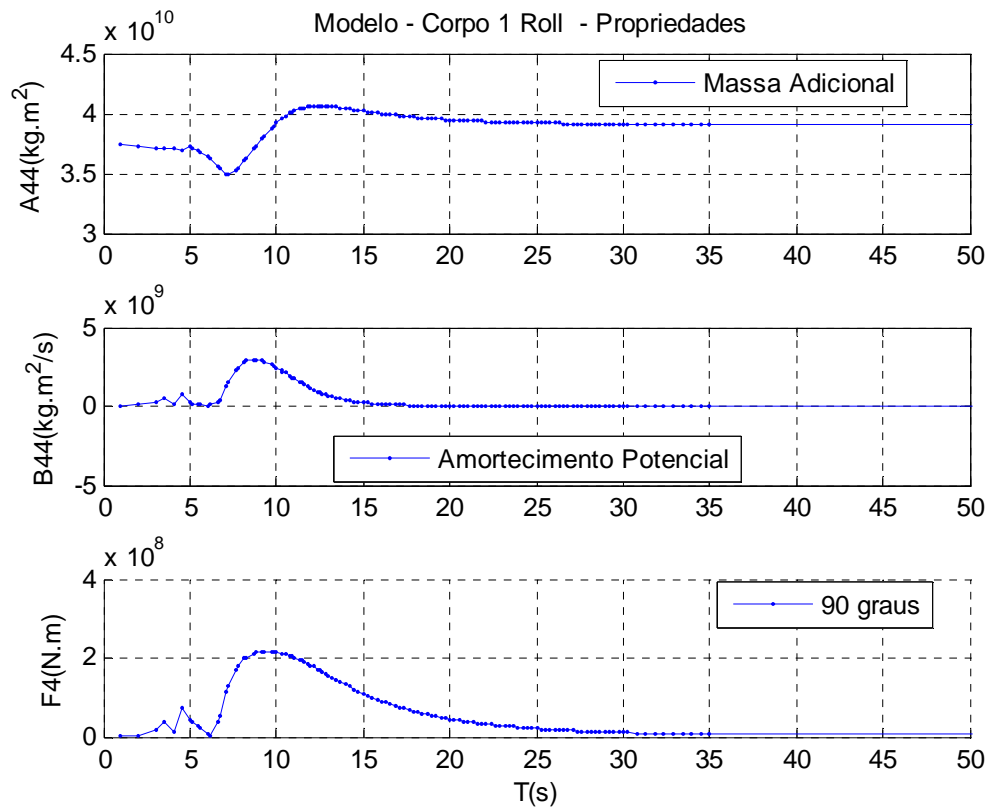


Figura 196 Massa adicional, amortecimento potencial e momento de excitação de onda de *roll*

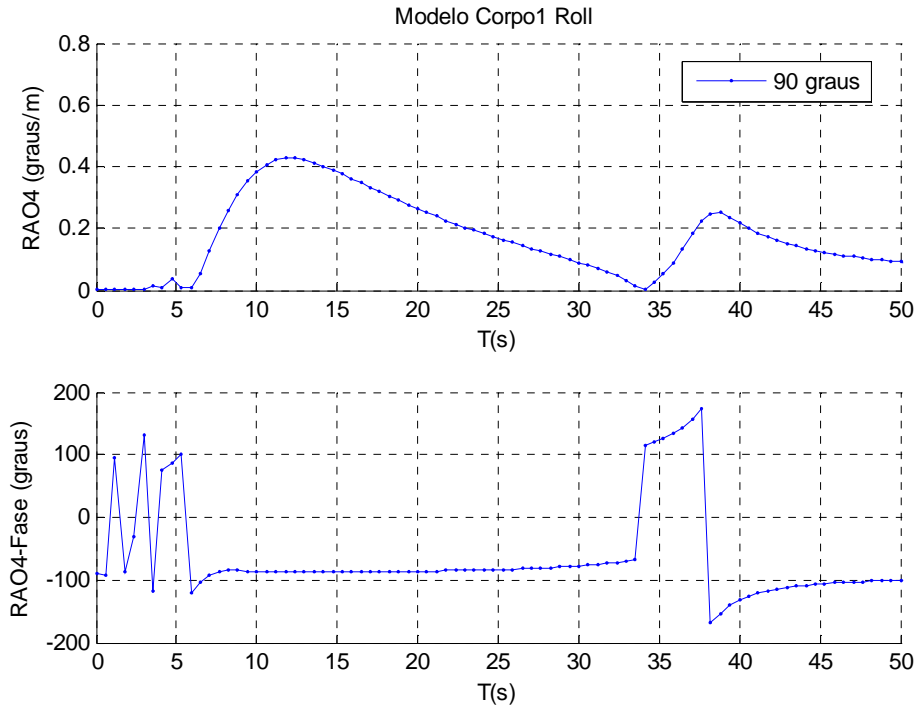


Figura 197 RAO de *roll* e fase

ANEXO E ROTINA PARA ANÁLISE DOS MODOS NATURAIS DE VIBRAR

```

clear all
close all
clc

% n = numero do modo de vibrar
n=2;

% Dados da catenaria em escala real
w = 10150; % peso submerso (N/m)
h = 21.105+315; % lâmina d'água (m)

teta_l = 27.754; % angulo de topo calculado pelo anflex (graus)
teta_l = 90-teta_l;
teta_l = teta_l*pi/180;

d = 1.47; % diametro da linha (m)
m_add = 1025*pi*d^2/4; % massa adicional da linha (N/m)
ca = m_add/w; % coeficiente de massa adicional da linha
g = 9.81;

% WKB
alfa_n = n*pi/quad(@intfun, 0, teta_l);
omega_n = alfa_n*sqrt((1-cos(teta_l))/cos(teta_l))*sqrt((1-ca)/(1+ca))*sqrt(g/h);

function y = intfun(x)
y = 1 ./ (cos(x) .^ (3 / 2));

```