

AVALIAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO COM TRUNCAGEM DAS LINHAS PARA
A SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE PLATAFORMAS OCEÂNICAS

Rodrigo Augusto Barreira

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

Aprovada por:

Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança, D. Sc.

Prof. Carlos Antonio Levi da Conceição, Ph.D.

Prof. Sergio Hamilton Sphaier, Dr. Ing.

Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.

Dr. Marcos Donato Auler da Silva Ferreira, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

BARREIRA, RODRIGO AUGUSTO

Avaliação do Método Híbrido com
Truncagem das Linhas para a
Simulação da Dinâmica de Plataformas
Oceânicas [Rio de Janeiro] 2008

VII, 100 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Método Híbrido de Extrapolação
2. Truncamento de Linhas
3. Dinâmica de Plataformas Oceânicas
4. Ensaio com modelos reduzidos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais maravilhosos
que me incentivaram, incansáveis,
desde o início de minha caminhada
pela vida.

AGRADECIMENTOS

A minha querida família, por toda dedicação e incentivo na minha vida tanto acadêmica quanto pessoal, em especial ao meu pai que me fez compreender, desde o início dos meus estudos, o valor de uma boa educação.

Aos meus amigos, pela compreensão dos momentos difíceis e motivação para a superação dos mesmos.

Aos meus orientadores Paulo de Tarso e Levi, pelas orientações acadêmicas e pessoais desde a graduação até o atual estágio.

A PETROBRAS, destacando ao consultor Ronaldo Rossi pela oportunidade e confiança de acompanhar os ensaios realizados no Marintek e LabOceano, possibilitando a realização dos estudos da tese.

Ao consultor do Cenpes Marcos Donato pela ajuda na modelagem e entendimento dos fenômenos de 2ª ordem no programa WAMIT.

Aos gerentes do Método Científico do Cenpes, Álvaro Maia e Levy, que permitiram me dedicar a realização da tese.

Aos amigos do LabOceano e Petrobras que contribuíram para o meu aprimoramento ético e profissional.

A todos que colaboraram de alguma forma no desenvolvimento desta tese, entre eles os amigos Joel Sena Sales Jr., Vinicius Matos, Masetti, Fernando Torres.

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

AVALIAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO COM TRUNCAGEM DAS LINHAS PARA A SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE PLATAFORMAS OCEÂNICAS

Rodrigo Augusto Barreira

Fevereiro/2008

Orientadores: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Carlos Antonio Levi da Conceição

Programa: Engenharia Oceânica

O trabalho apresenta a avaliação de um método híbrido para extrapolação numérica da dinâmica dos movimentos de estruturas ancoradas em regiões de lâminas d'água muito profundas e discute a estratégia para realização de um adequado truncamento das linhas assim como a metodologia de calibração do modelo numérico utilizado na extrapolação para o modelo completo (full) das linhas. A validação do método proposto baseou-se em resultados de ensaios realizados no LabOceano (Brasil) e Marintek (Noruega). A calibração do modelo numérico utilizou resultados experimentais com ancoragens truncada e horizontal. A simulação numérica do modelo completo utilizou coeficientes definidos a partir dos resultados experimentais obtidos para os modelos truncado e horizontal, e foram comparados com os resultados experimentais do modelo completo dos ensaios realizados no LabOceano.

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

EVALUATION OF THE HYBRID METHOD WITH LINE TRUNCATED TO
SIMULATE THE DYNAMICS OF OCEAN PLATFORMS.

Rodrigo Augusto Barreira

February/2008

Advisor: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Carlos Antonio Levi da Conceição

Department: Ocean Engineering

The work presents an evaluation of the hybrid method for numerical extrapolation of the dynamic motion of ocean platforms in very deep water and it argues the strategy for accomplishment of an adequate line truncation as well as the methodology of calibration of the numerical model used for the extrapolation to the full model of lines. The validation of the method was based on results of model tests carried out at LabOceano (Brazil) and Marintek (Norway). The two set of results are compared. The experimental results from truncated system and horizontal system were used for the calibration of the numerical model. The numerical results of the complete model, using coefficients from the truncated and horizontal model are compared with the experimental results from the complete model test carried out in the LabOceano.

Índice

I. INTRODUÇÃO	1
I.1. Cenário.....	1
I.2. Histórico e Motivação	1
I.3. Objetivo	8
I.4. Estrutura de Tese	9
II. MÉTODO HÍBRIDO PASSIVO	11
II.1. Estratégia de Truncamento	12
II.2. Metodologia de Calibração do Modelo Numérico Truncado	14
II.3. Obtenção dos Coeficientes de Força de 2ª Ordem	18
III. MODELO EXPERIMENTAL.....	21
III.1. Introdução	21
III.2. Modelo	22
III.3. Sistema de Ancoragem e Risers	24
III.3.1. Sistema de Ancoragem Completo	24
III.3.2. Sistema de Ancoragem Truncado.....	28
III.3.3. Sistema de Ancoragem Horizontal	33
III.4. Condições Ambientais	35
III.5. Comparações Experimentais LabOceano x Marintek	35
III.5.1. Ensaio de Offset.....	38
III.5.2. Decaimento.....	38
III.5.3. Ensaio em Ondas	40
IV. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO TRUNCADO COM O ENSAIO ..	51
IV.1. Ensaio de Offset	53
IV.2. Decaimentos.....	54
IV.3. Ondas Irregulares	57
V. COMPARAÇÕES NUMÉRICO-EXPERIMENTAIS DO SISTEMA COMPLETO	70
VI. CONCLUSÕES	82
VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE I: Formulações Matemáticas do Programa Dynasim.....	89

I. INTRODUÇÃO

1.1. Cenário

Apesar da tecnologia offshore vir experimentando crescente desenvolvimento desde início do século passado, quando as primeiras plataformas foram instaladas em pequenas lâminas d'água, devido ao alto custo de produção de um poço offshore, nem sempre sua exploração e produção pode ser viabilizada pelos preços de mercado do petróleo.

Atualmente, com o crescente aumento da demanda mundial por petróleo, gás e seus derivados, os preços internacionais desses produtos atingiram níveis nunca vistos na história, cujos valores em Dezembro/2007, alcançaram recorde próximo dos 100 US\$/barril. A esse preço, projetos de produção offshore antes inviáveis economicamente tornam-se cada vez mais atraentes para as empresas produtoras.

Empresas de petróleo do mundo inteiro têm concentrado esforços e atividades em descobertas e desenvolvimento de campos de petróleo e gás offshore, localizados em regiões de lâminas d'água cada vez mais profundas, incluindo profundidades superiores a 1.500 m. Tais campos estão localizados em várias partes do mundo, como amplas áreas do Golfo do México, Oeste da África, Brasil e Mar do Norte. No caso brasileiro, um exemplo mais recente dessas ocorrências foi concretizado com a descoberta, pela Petrobras, do campo gigante de Tupi, localizado em lâmina d'água de 3.000 m, na Bacia de Santos, litoral do Rio de Janeiro.

1.2. Histórico e Motivação

A exploração dos recursos naturais offshore, ressaltando que não se resume necessariamente ao petróleo, está caminhando de forma rápida e contínua para regiões de águas cada vez mais profundas. Novos campos de óleo e gás estão sendo descobertos com frequência, em águas profundas e ultra-profundas, e muitas estruturas, incluindo FPSO's, Floating Tower e TLP's já se encontram instaladas e operando na exploração destes campos em águas profundas em várias partes do mundo. A nova fronteira em expansão em águas ultra-profundas incentivou, e

incentiva, o desenvolvimento de novas concepções de estruturas melhor adaptadas às instalações offshore, como por exemplo: SPAR's, Semi-Submersíveis, Monocolunas e FPSO's. Estas novas estruturas apresentam aspectos inovadores fazendo com que o seu projeto e instalação, de forma eficiente e econômica, coloquem complexos desafios para a comunidade técnica offshore.

Ensaio experimentais com modelos reduzidos em tanque de provas têm sido utilizados como uma efetiva ferramenta para a investigação, verificação e validação do comportamento dos novos conceitos de estruturas de produção de óleo e gás offshore (ITTC, 1999). Esta alternativa, considerada a mais confiável maneira para reprodução realista das situações de operação ou sobrevivência das estruturas offshore, permite a inclusão dos efeitos de acoplamento não lineares entre os movimentos do flutuante e linhas de ancoragem e risers. Em particular, isto pode ser bastante importante no caso dos sistemas com configurações mais complexas, onde vários efeitos de acoplamentos dinâmicos e estáticos ocorrem.

As principais razões para a realização de ensaios experimentais com modelos reduzidos das estruturas offshore serão listadas a seguir:

1. Investigação de problemas e situações mal descritos por modelos teóricos;
2. Verificação confiável das premissas adotadas no desenvolvimento dos projetos das estruturas offshore nas condições de operação e sobrevivência;
3. Determinação/calibração dos coeficientes empíricos utilizados nas equações analíticas dos modelos teóricos;
4. Quantificação dos efeitos associados aos termos não lineares através de modelos analíticos simples a partir da correlação das discrepâncias dos resultados do comportamento observado entre dois modelos de escalas distintas;
5. Identificação de efeitos não conhecidos ou mesmo não antecipados.

CHAKRABARTI, S. K.[2, 3] e DYER, R. C et al. [4] apresentam maiores detalhes sobre a importância prática para a realização de ensaios com modelos reduzidos.

Nos ensaios hidrodinâmicos, as estruturas flutuantes podem ser convenientemente modeladas adotando-se a escala de Froude, na qual a relação entre as forças gravitacionais e inerciais é a mesma no modelo e no protótipo. O comportamento do flutuante escalado pelo número de Froude produz uma boa correlação entre o comportamento dinâmico do modelo e protótipo, desde que os efeitos gravitacionais e inerciais sejam dominantes.

Ensaio com modelos reduzidos devem ser realizados, preferencialmente, em facilidades experimentais que possam acomodar a modelação do sistema completo das linhas de ancoragem e risers das estruturas offshore. Entretanto, para testes em águas profundas e ultra-profundas, como no caso dos atuais projetos em desenvolvimento para o litoral brasileiro, a modelação física do sistema completo das linhas de ancoragem e risers, considerando-se os limites razoáveis para a escala do modelo entre 1:70 e 1:110, não é possível em função da ausência de facilidades experimentais com dimensões adequadas, principalmente, no que se refere a largura e a profundidade. Por exemplo, no caso do campo de Tupi, recentemente descoberto pela Petrobras em região de lâmina d'água de 3.000 m, para realização do ensaio em escala de 1:100, seria necessário um tanque oceânico com 30 m de profundidade.

Para superar as atuais limitações dos tanques oceânicos para a realização de ensaios em condições de águas ultra-profundas, vários procedimentos estão sendo desenvolvidos e testados. Dentre as possíveis estratégias para realização de ensaios de águas profundas e ultra-profundas estão sendo consideradas as seguintes:

1. Ensaio com modelo em escala super-reduzida do sistema completo de ancoragem e risers em tanques oceânicos atualmente existentes (Ultra Small Scale);
2. Testes em lagos, "fjords" ou no mar, em escala tradicional;
3. Teste no campo (Full Scale);

4. Simulação Numérica;
5. Construção de um novo tanque de prova com dimensões suficientes para a realização de ensaios em escala tradicional do sistema completo de ancoragem e risers;
6. Ensaio em laboratório existente utilizando modelo em escala tradicional em uma profundidade reduzida com síntese numérica do sistema completo de ancoragem e risers (Método Híbrido).

A estratégia a ser escolhida depende de vários fatores: tipo de estrutura, parâmetros mais importantes a serem estudados, condições ambientais, entre outros.

A alternativa de ensaio com modelos super-reduzidos (Ultra Small Scale) foi investigada por MOXNES, S. et al. [5], através do ensaio experimental de um FPSO na escala 1:170. Comparações deste ensaio foram feitas com resultados obtidos na escala 1:55. Estudo similar foi feito com uma semi-submersível por STANSBERG, C.T. et al. [6], comparando resultados de testes nas escalas de 1:55, 1:100 e 1:150. Estes estudos mostraram que ensaios com modelos super-reduzidos, em escalas até 1:170, de fato são possíveis, exceto para movimentos e forças atuantes em linhas de ancoragem de FPSO's e Semi-Submersíveis em condições severas como as do Mar do Norte. Cuidados específicos devem ser tomados durante o planejamento, preparação e execução deste tipo de ensaio, para que se tenha um nível de confiabilidade dos resultados dentro de um padrão aceitável comparado com um ensaio em escala convencional.

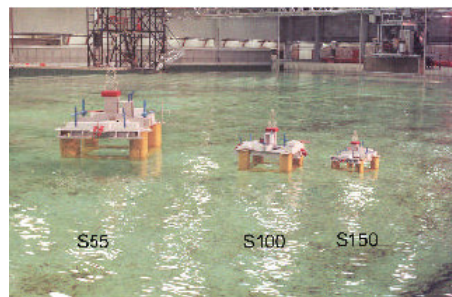


Figura I.1 – Modelo semi-submersível escala super-reduzida.

Teste em “fjords”, lagos ou no mar, em escala tradicional, é uma alternativa interessante, e atualmente pode ser a única alternativa, para a qual não se teria preocupação com a escala do modelo ou simplificações do sistema modelado (ver HUSE, E. et al. [7] e GRANT, R. G. et al. [8]). O principal problema destes testes é o baixo controle das condições ambientais. A utilização de facilidades tecnológicas offshore, como doca flutuante, gerador de ondas, atuadores, etc pode melhorar este nível de controle. Esta alternativa é muito atrativa para realização de projetos de pesquisas e determinação de “benchmark” para detalhes específicos a serem considerados na formulação de modelos numéricos.



Figura 1.2 – Teste da barçaça em “fjords”.

Testes no campo, em escala real, assim como testes em “fjords” em escala tradicional, apresentam o mesmo problema em relação ao controle das condições ambientais. No caso do teste no campo, porém, o custo e risco envolvidos na operação são aspectos desfavoráveis, já que se trata do sistema em escala real. Um exemplo recente de teste no campo, em escala real, foi realizado pela Petrobras no lançamento pendular de um “manifold dummy”, como relatado em FERREIRA, A.C.P. et al. [9], onde a sua trajetória foi monitorada por sensores. O custo de toda operação do lançamento do “manifold”, incluído mobilização e aluguel de barcos de apoio, ficou em torno dos 10 milhões de dólares.



Figura 1.3 – Lançamento pendular “manifold dummy” em escala real.

Outra alternativa de modelação que está ampliando rapidamente suas possibilidades baseia-se na modelação computacional, que consiste essencialmente na análise teórica de problemas utilizando técnicas computacionais. Modelos numéricos, especialmente volumes finitos e elementos finitos, estão crescendo em robustez e sofisticação. Computadores serão cada vez mais utilizados como ferramenta de engenharia na medida em que continuam aumentando sua velocidade e capacidade de memória, e diminuindo os seus custos. O desenvolvimento de tanques numéricos de onda vem sendo discutido desde a série de Conferências de Weinblum, em 1990. Em algumas situações, modelos computacionais já estão até mesmo substituindo modelos experimentais, como por exemplo, em certas análises de aviões e mísseis. Entretanto, ainda é muito cedo para se afirmar que modelos numéricos poderão ser capazes de simular completamente uma estrutura offshore complexa, operando em um estado de mar real. Como mencionado anteriormente, ensaios com modelos reduzidos constituem a ferramenta de engenharia mais precisa e correspondem ao estado da arte para avaliação confiável de sistemas offshore complexos. Por mais sofisticados e robustos que sejam os atuais códigos computacionais, muitas incertezas físicas ainda prevalecerão nos modelos numéricos. Modelos experimentais e numéricos funcionam de forma complementar guiando o desenvolvimento eficiente dos projetos de novas estruturas offshore.

A construção de um tanque mais largo e profundo, para realização de ensaios com modelos reduzidos em escala convencional, pode ser tecnicamente justificável em alguns casos, porém esta opção envolve custos significativos. Pode ser que em algum momento esta opção se torne atrativa, do ponto de vista econômico.

Das várias soluções para verificação experimental em águas profundas apresentadas, o método híbrido é uma alternativa que vem sendo investigada com bastante interesse. O método híbrido poder ser classificado em dois grupos básicos: método híbrido ativo (“on-line”) e o método híbrido passivo (“off-line”).

Ensaio com modelos utilizando o método híbrido ativo são controlados em tempo real por atuadores que simulam, através de modelos numéricos, o comportamento da parte truncada, ou seja, a parte não representada das linhas de amarração e risers. O modelo numérico deve ser capaz de produzir resultados do posicionamento de todas as linhas e risers na escala do modelo, em tempo real, tendo como parâmetro de entrada o movimento do flutuante. Em seguida, o controlador deve mandar um sinal para que o atuador realize o movimento calculado. Atualmente, a capacidade computacional disponível ainda não é suficiente para realizar esta tarefa de maneira satisfatória. A exeqüibilidade deste sistema foi estudada, utilizando um modelo 1:80 de FPSO, em águas rasas, por WATTS, S. [10, 11] e por BUCHNER, B. et al. [12].

O método híbrido passivo consiste, basicamente, da combinação entre resultados de ensaios experimentais com truncamento em profundidade inferior com a simulação numérica do sistema completo das linhas e risers. A extrapolação numérica dos resultados do modelo completo pode ser, às vezes, bem complicada dependendo do modelo truncado utilizado no ensaio para obtenção dos coeficientes de extrapolação. Alguns exemplos de aplicação desta metodologia são descritos em DERCKSEN, A. et al. [13], KIM, M. H. et al. [14], CHEN, X. et al. [15], STANSBERG, C.T. et al. [16] e BAARHOLM, R. et al. [17] indicando boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

A Tabela I.1 apresenta resumo esquemático dos pontos positivos e negativos das diferentes alternativas consideradas acima para verificação de sistemas offshore instalados em águas profundas e ultra-profundas.

Tabela I.1 – Comparações das alternativas de metodologias para verificação de sistemas offshore em águas profundas e ultra-profundas.

Alternativas	Instrumentação	Condições Ambientais	Confiabilidade dos Resultados	Custo	Risco	Modelação Completa do Sistema	Extrapolação Numérica
Ultra Small Scale	-	-	-	+	+	+	+
Teste de campo em escala convencional	+	--	+	±	±	++	+
Teste de Campo em escala real	+	--	+	--	--	+	+
Simulação Numérica	+	+	--	+	+	++	+
Tanque Oceânico maior	+	+	+	--	+	++	+
Método Híbrido Truncado Passivo	+	+	+	+	+	-	±

Duplo Negativo (- -)= muito desfavorável ; Negativo (-)= desfavorável ;
 Positivo/Negativo (±)= intermediário ; Positivo (+)= favorável ;
 Duplo Positivo (++)= muito favorável

A Tabela acima permite uma avaliação comparativa entre as várias alternativas descritas. O método híbrido truncado passivo é a alternativa mais atrativa, levando-se em conta a relação custo-benefício das características priorizadas nesta análise. Essas considerações sustentam a proposta de avaliar as potencialidades do método híbrido truncado passivo.

1.3. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho consiste, portanto, da avaliação da eficácia do método híbrido truncado passivo para extrapolação da dinâmica dos movimentos de estruturas oceânicas, através de simulações numéricas.

No presente trabalho são utilizados dois sistemas distintos de amarração truncada para a extrapolação da dinâmica do sistema flutuante na real profundidade (Sistema de Ancoragem e Risers Completo, item III.3.1).

Um dos sistemas de amarração truncada utilizada para a obtenção dos coeficientes de extrapolação é o sistema de ancoragem truncada descrito no item III.3.2. Já o outro sistema de amarração truncada é o sistema de ancoragem horizontal descrito no item III.3.3.

O segundo objetivo do trabalho é a comparação dos resultados experimentais obtidos em dois laboratórios diferentes, Marintek e LabOceano, a fim de constatar a compatibilidade entre os procedimentos de execução de ensaios adotados pelos dois laboratórios.

1.4. Estrutura de Tese

O Capítulo inicial descreve o cenário atual da indústria offshore mundial, mostrando a viabilidade econômica dos investimentos necessários para o desenvolvimento dos campos de petróleo e gás em águas cada vez mais profundas. Além disso, o Capítulo inclui um breve histórico e destaca a motivação da tese explicitando seus objetivos.

Em seguida, o Capítulo II apresenta a filosofia e linhas gerais do método híbrido passivo. O Capítulo aborda o procedimento adotado para a realização da calibração do modelo numérico e a sua extrapolação para a profundidade plena.

O Capítulo III descreve os ensaios experimentais realizados nos laboratórios Marintek e LabOceano. Esses resultados foram comparados para demonstrar a consistência dos procedimentos experimentais adotados pelos dois laboratórios. A partir desses resultados foram estabelecidos os critérios de calibração da simulação numérica utilizada no trabalho.

A calibração do modelo numérico tanto a partir dos resultados dos ensaios com ancoragem truncada quanto com a ancoragem horizontal compõem o conteúdo do Capítulo IV.

Na seqüência, o Capítulo V apresenta comparações dos resultados das simulações numéricas do sistema de ancoragem completo, utilizando os coeficientes obtidos das calibrações das simulações numéricas dos modelos truncados e horizontais, com os respectivos resultados experimentais do sistema de ancoragem completo obtidos no LabOceano.

As conclusões e proposta de trabalhos futuros estão sintetizadas no Capítulo VI, enquanto que no Capítulo VII são fornecidas as referências que sustentaram o desenvolvimento do trabalho.

Por último, no Apêndice I são apresentados os detalhes do modelo matemático que sustentam os algoritmos do código de simulação numérica DYNASIM utilizado nesta tese.

II. MÉTODO HÍBRIDO PASSIVO

A necessidade de se superar os desafios impostos pelas limitações das dimensões das facilidades experimentais dos tanques oceânicos existentes conduz à consideração de alternativas que por sua vez também incorporam restrições:

1. ensaios com modelos super-reduzidos implicam em incertezas nos resultados, devido, principalmente, ao efeito de escala e às restrições decorrentes da instrumentação;
2. testes no campo são de difícil controle das condições ambientais, altos custos e muitos riscos;
3. modelos numéricos ainda incorporam muitas incertezas;
4. a construção de um novo tanque com dimensões adequadas requer significativos investimentos;
5. a atual capacidade computacional ainda não é suficiente para realizar, durante os ensaios em escala, a retro-alimentação dos atuadores em tempo real como seria necessário para a adequada aplicação do método híbrido ativo.

A metodologia híbrida que combina resultados de ensaios experimentais com simulação numérica “off-line” vem sendo objeto de extensivas investigações como descritas em ORMBERG, H. et al. [20], STANSBERG, C.T. et al. [21, 22], WAALS e VAN DIJK [23], FYLLING, I.J. et al. [24] e também já foi tema da International Towing Tank Conference ITTC [25]. Os princípios gerais da metodologia híbrida estão mostrados na Figura II.1 e podem ser sintetizados como:

1. Definição do projeto do sistema truncado de acordo com as recomendações indicadas no item II.1 adiante;

2. Seleção e execução do programa de testes, cobrindo as condições de interesse;
3. Reconstrução numérica do modelo truncado;
4. Calibração do modelo numérico truncado para obtenção dos coeficientes de extrapolação;
5. Extrapolação numérica para o sistema completo de linhas e risers usando os coeficientes de calibração do modelo truncado.

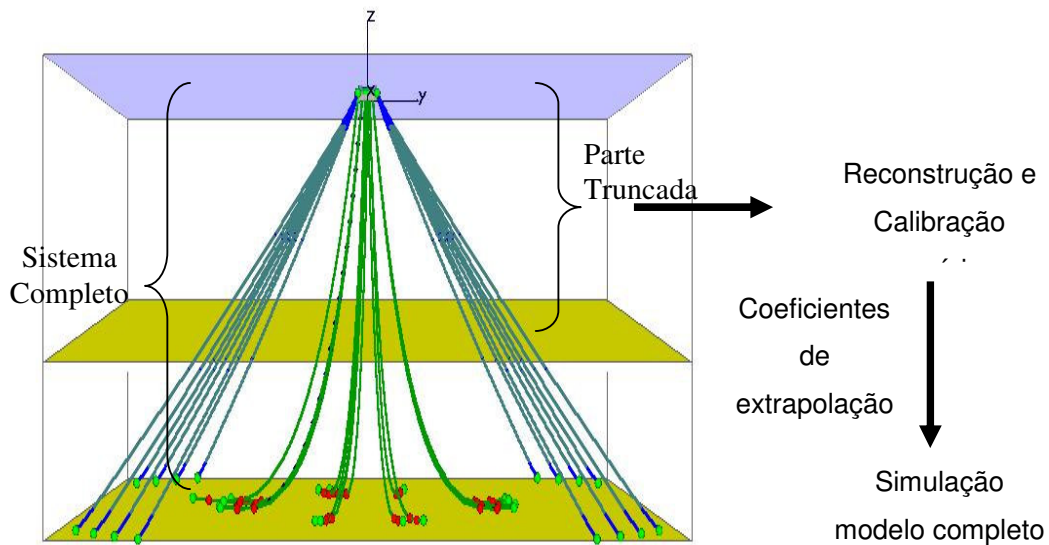


Figura II.1 – Método Híbrido com Truncamento

II.1. Estratégia de Truncamento

Toda a estratégia por trás do projeto de truncamento do sistema de ancoragem e risers de uma plataforma visa reproduzir, o mais próximo possível, a dinâmica das trações das linhas e risers e dos movimentos do flutuante na real profundidade do sistema, incluindo os movimentos de baixa frequência e os movimentos na faixa de frequência da onda.

Na prática, para a reprodução apenas da dinâmica do movimento do flutuante incluindo as linhas de ancoragem e risers na profundidade real (Sistema Completo), um bom sistema truncado pode ser conseguido através do projeto do truncamento das linhas de ancoragem e risers que reproduza os vetores de força quase-estática resultante semelhante aos vetores de força quase-estática do sistema completo na profundidade real. Com isso, é garantida a igualdade dos períodos naturais da plataforma do sistema completo e o truncado.

Já a representação adequada da dinâmica das linhas de ancoragem e risers do sistema completo, através do sistema de ancoragem truncado, não é uma tarefa fácil e, por isso, torna-se necessário a sua verificação, incluído as linhas de ancoragem e risers na profundidade real, por meio de simulação numérica complementar.

Para que o sistema truncado possa representar de forma mais correta possível as respostas do sistema completo, algumas recomendações devem ser seguidas (ver FYLLING, I.J. et al. [24]):

1. O modelo do casco deve manter a semelhança geométrica (calado, banda e trim) nas condições truncado e completa;
2. A rigidez horizontal do sistema truncado deve ser próxima à rigidez do sistema completo para que o comportamento dos movimentos do plano horizontal (“surge”, “sway” e “yaw”) da estrutura em baixa frequência dos dois sistemas seja similar;
3. A diferença da rigidez vertical do sistema de ancoragem e risers do sistema truncado deve ser pequena comparada com a rigidez do sistema de ancoragem e risers do sistema completo, principalmente, para sistemas experimentando contribuições significativas das componentes de baixa frequência nos movimentos verticais (“heave”, “roll” e “pitch”). Desta forma, é necessária a adequada modelação física das propriedades de rigidez das linhas de ancoragem e risers do ensaio do sistema truncado;

4. Sendo a rigidez hidrostática da plataforma muito maior do que a rigidez vertical das linhas de ancoragem e risers do sistema flutuante, a sua modelação não é tão importante visto que a contribuição da rigidez hidrostática nos movimentos verticais será dominante;
5. O momento de “pitch”, ou seja, momento em torno do eixo local y da plataforma, causado pela ação das linhas de ancoragem devido ao movimento de surge, deve ser bem representado para sistemas que apresentam este acoplamento significativo, como no caso de semi-submersível.

II.2. Metodologia de Calibração do Modelo Numérico Truncado

A metodologia de calibração do modelo numérico truncado a partir dos resultados dos testes experimentais inclui as seguintes etapas:

Etapa 1 – Reconstrução Numérica

Considerando já projetado e instalado o sistema de ancoragem e risers do modelo truncado no tanque oceânico, o primeiro passo e mais importante é a fiel modelação numérica do mesmo sistema em um programa no domínio do tempo com análise acoplada. No caso da presente tese é utilizado o programa comercial da Petrobras DYNASIM.

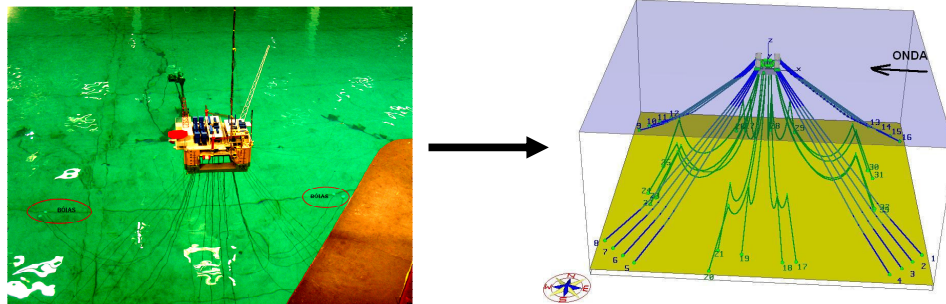


Figura II.2 – Reconstrução numérica do modelo truncado com sistema de ancoragem truncada.

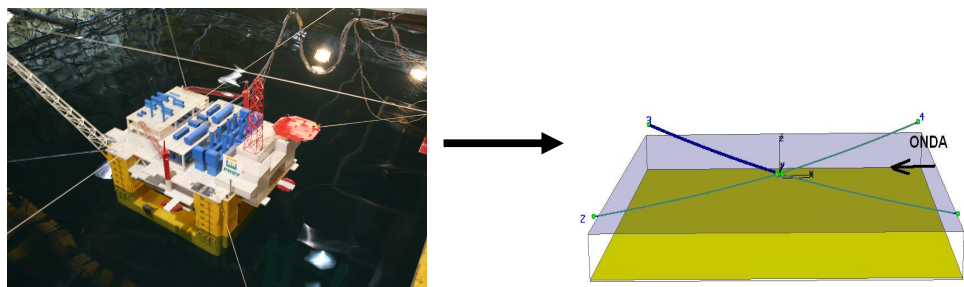


Figura II.3 – Reconstrução numérica do modelo truncado com sistema de ancoragem horizontal.

Etapas 2 – Pré-Análise (Ajuste Rigidez e Período Natural)

Modelado numericamente o modelo truncado, o próximo passo é a realização da pré-análise do sistema através do ajuste fino da rigidez e período natural dos principais movimentos de interesse do modelo numérico com base nos resultados experimentais obtidos dos ensaios de offset e decaimentos. O parâmetro de ajuste, nesta fase de calibração do modelo numérico, é a rigidez das linhas de ancoragem modelada.

Etapas 3 – Análise de 1ª Ordem no Domínio da Freqüência na faixa de onda (WAMIT 1ª Ordem)

Em seguida, calibram-se os movimentos no domínio da freqüência, na faixa de período da onda. Na prática, é feita uma comparação visual das energias espectrais

dos movimentos de interesse obtidos numericamente pelo cruzamento dos RAOs com o espectro de mar medido nos testes experimentais com as respectivas energias espectrais dos movimentos obtidos nos ensaios. Neste trabalho, esta calibração é feita com o auxílio do código comercial WAMIT [26, 27]. O ajuste é realizado através da calibração do coeficiente relativo ao amortecimento linear do casco da plataforma.

Etapa 4 – Análise de 2ª Ordem no Domínio da Freqüência na faixa de período natural da Estrutura (WAMIT 2ª Ordem)

Uma vez ajustados os espectros de energia dos movimentos na faixa de período de onda, os resultados gerados pelo código WAMIT de 2ª ordem, baseado na teoria potencial de 2ª ordem, fornecem os coeficientes hidrodinâmicos de 2ª ordem (QTFs – Quadratic Transfer Functions) para o cálculo das forças de 2ª ordem, restritos à faixa de excitação dos períodos naturais dos movimentos de interesse da plataforma. O cálculo das forças de 2ª ordem seguiu a formulação apresentada em MOLIN, B. [28]. No item II.3 deste Capítulo é melhor explicado o processo prático para o cálculo da força de 2ª ordem.

Etapa 5 – Simulação Numérica (Análise Acoplada no Domínio do Tempo)

O passo seguinte é a realização da simulação numérica da matriz de teste estabelecida com o programa de análise acoplada no domínio do tempo. No caso da tese é utilizado o programa DYNASIM. A série temporal de onda do ensaio e os coeficientes de 2ª ordem fornecidos pelo código WAMIT 2ª ordem são utilizados como dados de entrada do programa DYNASIM;

Etapa 6 – Comparação Numérico-Experimental

Em seguida, é feita a comparação entre o resultado numérico e experimental do teste estabelecido, focalizando parâmetros estatísticos de interesse e os espectros de energia dos movimentos.

O processo de ajuste dos resultados numéricos com os resultados experimentais do ensaio com a modelação truncada requer um processamento iterativo. O coeficiente de amortecimento linear do casco da plataforma é o parâmetro utilizado

para o ajuste dos resultados numéricos. Este procedimento iterativo está esquematizado no penúltimo retângulo do fluxograma da Figura II.4.

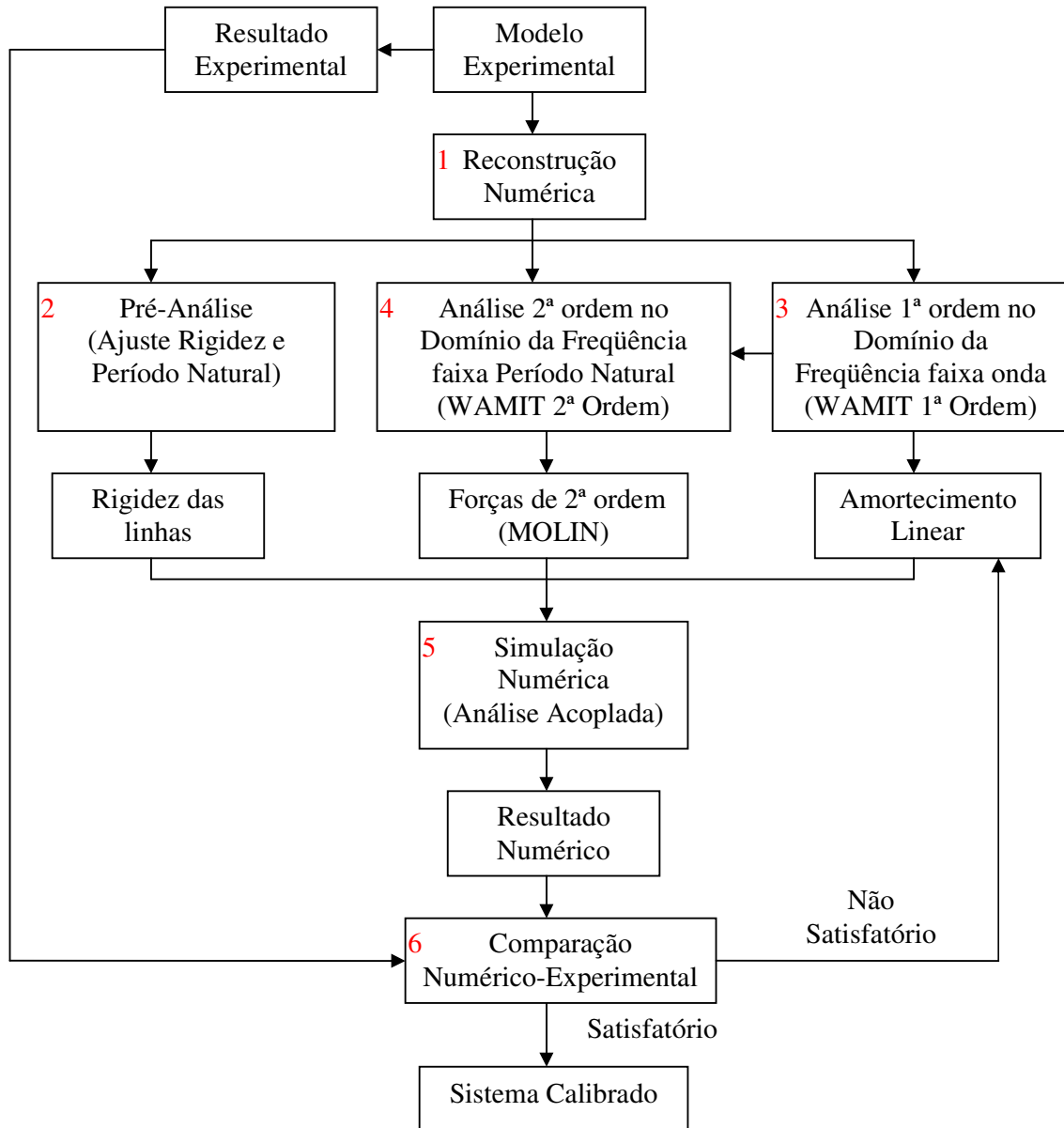


Figura II.4 - Procedimento de Calibração do Modelo Numérico para o Sistema Truncado.

II.3. Obtenção dos Coeficientes de Força de 2ª Ordem

O propósito desta seção é apresentar de forma sucinta a metodologia prática de obtenção dos coeficientes de força de 2ª ordem (QTFs – Quadratic Transfer Functions) para os movimentos no plano horizontal e vertical utilizada no presente trabalho. Uma discussão mais aprofundada sobre o assunto pode ser encontrada em [29].

Para o cálculo da chamada deriva-lenta (“slow-drift”) do sistema no plano horizontal, cujo período natural está na faixa de 120 segundos, a diferença de frequência angular μ para atingir o período natural é muito menor que 1, ou seja, $\mu \ll 1$, podendo ser considerado ruído branco ($\mu = 0$). Logo:

$$x_{dmi}(\chi, \omega + \mu) = x_{dmi}(\chi, \omega) \quad (\text{II.1})$$

Onde x_{dmi} correspondem as QTFs.

Desta forma, a fórmula para o cálculo do espectro de deriva lenta para o plano horizontal (surge, sway e yaw) adotada no trabalho foi:

$$Sx_{dmi}(\chi, \mu) = 8 \int_0^{\infty} S^2(\omega) x_{dmi}^2(\chi, \omega) d\omega \quad ; \text{ onde } i=1, 2 \text{ e } 6; \quad (\text{II.2})$$

A aproximação acima é chamada “aproximação de Newman”.

As QTFs podem ser calculadas por intermédio do módulo de 2ª ordem do código computacional WAMIT.

Para os movimentos verticais, contudo, os períodos naturais de oscilação se situam na faixa entre 20 e 40 segundos. Assim as frequências naturais destes movimentos são aproximadamente 3 a 6 vezes maiores do que as frequências naturais do plano horizontal. Isso, em princípio, inviabiliza o emprego da aproximação

de Newman. No presente trabalho, para o cálculo das forças de 2ª ordem no plano vertical, foi utilizada a QTF completa.

As QTFs foram calculadas para as diferenças de freqüências em torno dos períodos naturais dos movimentos do plano vertical, com base na faixa de energia das ondas do mar com efetiva contribuição para os movimentos de 2ª ordem.

Na prática, discretiza-se a faixa de período de onda em n ômega ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$), e realizam-se todas as possíveis combinações de diferença de freqüência, ou seja, $(\omega_1 - \omega_2)$; $(\omega_1 - \omega_3)$; $(\omega_1 - \omega_4)$; ...; $(\omega_1 - \omega_n)$; $(\omega_2 - \omega_3)$; $(\omega_2 - \omega_4)$; $(\omega_2 - \omega_5)$; ...; $(\omega_2 - \omega_n)$; ...; $(\omega_{n-1} - \omega_n)$. Em seguida, selecionam-se as diferenças de freqüência próximas ao período natural dos movimentos do plano vertical $(\omega_{n-1} - \omega_n) \cong \omega_{natural(heave, roll, pitch)}$. Existem várias combinações de ω que fornecem o mesmo delta ômega igual a μ . Com estes deltas ômega μ é feita análise de 2ª ordem, utilizando o WAMIT 2ª Ordem, Wave Analysis Program desenvolvido por pesquisadores vinculados ao Massachusetts Institute of Technology – MIT, para obtenção das QTFs: x_{dm3} ; x_{dm4} e x_{dm5} que são utilizadas no cálculo dos espectros de força de 2ª ordem, segundo formulação abaixo.

$$Sx_i(\chi, \mu) = 8 \int_0^\infty S(\omega) S(\omega + \mu) [x_{dmi}(\chi, \omega + \mu)]^2 d\omega \quad i = 3, 4 \text{ e } 5 \quad (II.3)$$

Como se pode notar na integral acima, para cada μ existem vários ω na faixa de período de onda selecionada.

A Figura II.5 apresenta o modelo numérico utilizado nas análises de 2ª ordem pelo WAMIT com as seguintes características:

- Painéis do modelo = 2561;
- Painéis da superfície livre = 9376

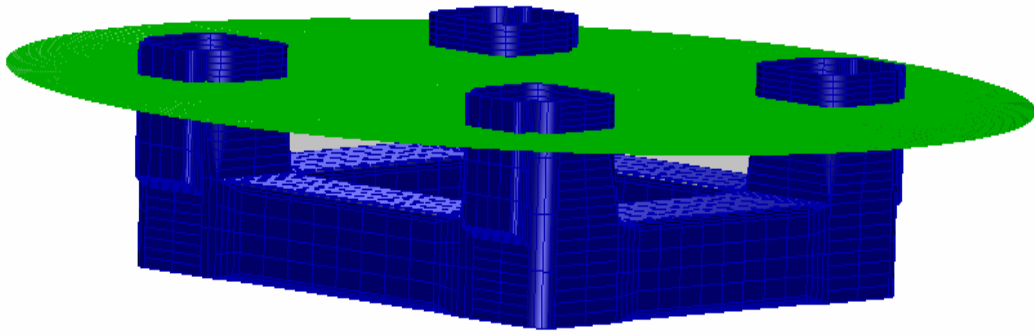


Figura II.5 – Malha do modelo para o cálculo das forças de 2ª ordem utilizando o programa WAMIT.

III. MODELO EXPERIMENTAL

III.1. Introdução

Para o estudo da metodologia híbrida foram realizados ensaios experimentais com modelo de uma plataforma semi-submersível projetada para atuar no campo de Marlim Sul, Bacia de Campos - Rio de Janeiro - Brasil, em uma lâmina d'água de 1250 m com um sistema de ancoragem tipo Spread Mooring (Plataforma P-51 operada pela Petrobras).

Ensaio foram realizados nos laboratórios do Marintek, na Noruega, e no LabOceano, Brasil, em duas condições: linhas truncadas (Sistema de Ancoragem Truncada e Sistema de Ancoragem Horizontal) e linhas completas (Sistema de Ancoragem Completa).

A escala do modelo utilizada nos ensaios em ambos laboratórios foi de 1:100. No Marintek, foram realizados ensaios com sistema de ancoragem com linhas truncadas a uma profundidade de 5 m, e também com sistema de ancoragem horizontal. Devido à profundidade recorde do tanque oceânico do LabOceano, além dos mesmos ensaios realizados no Marintek, foram realizados ensaios com o sistema de ancoragem completa em uma profundidade de 12,5 m, correspondendo aos 1250 m da escala real.

O modelo da plataforma foi ensaiado em uma única condição de carregamento, correspondente ao calado operacional de 27,5 m e aproamento de 0° . O modelo foi lastreado com pesos de chumbo para obter o correto deslocamento e centro de gravidade (CG). O momento de inércia foi ajustado pela correta posição dos lastros, realizando-se testes de decaimentos na água nos 6 graus de liberdade. O ajuste final da altura metacêntrica foi realizado pelo teste de inclinação estática com o modelo na água.

Foram realizados ensaios de offset estático, decaimentos em seis graus de liberdade e ensaios em ondas irregulares com sistema truncado com ancoragem

horizontal e com ancoragem truncada a 5 m e sistema completo com as linhas de ancoragem e risers a 12,5 m.

Em todos os ensaios, em ambos os laboratórios, os seis graus de liberdade do modelo foram monitorados através de um sistema ótico. Foram instaladas células de carga nas linhas de ancoragem e em cinco risers para medição da tração axial atuante.

As elevações de ondas foram medidas através de ondógrafos posicionados convenientemente no tanque.

III.2. Modelo

Nesta seção, além da descrição dos ensaios, serão apresentadas as comparações dos resultados dos laboratórios Marintek e LabOceano.

Em todos os ensaios foi utilizado o mesmo modelo escala 1:100 da plataforma semi-submersível P-51 da Petrobras. As características principais dessa plataforma estão descritas na Tabela III.1 abaixo e fotos ilustrativas estão mostradas na Figura III.1.

Tabela III.1 – Características principais da plataforma P-51.

Deslocamento	t	79856.00
Calado Operacional	m	27.50
Altura do Pontoon	m	12.00
Largura do Pontoon	m	17.50
Largura entre Pontoon (externo)	m	85.00
Altura do Deck Inferior	m	44.50
Altura do Spider Deck	m	38.50/40.00
Largura da Coluna	m	17.50
Distância entre coluna (centro a centro)	m	67.50 / 67.50
KB	m	9.895
KG	m	24.90
GMI	m	6.65
GMt	m	5.01
Raio de Giração em x (Rxx)	m	35.27
Raio de Giração em y (Ryy)	m	37.07
Raio de Giração em z (Rzz)	m	38.80



Figura III.1 – Fotografias ilustrativas do modelo P-51.

III.3. Sistema de Ancoragem e Risers

As características de cada uma das condições de ancoragem ensaiadas são descritas em seguida, conforme o sistema de referência da Figura III.2, cuja origem encontra-se definida no centro da quilha da plataforma.

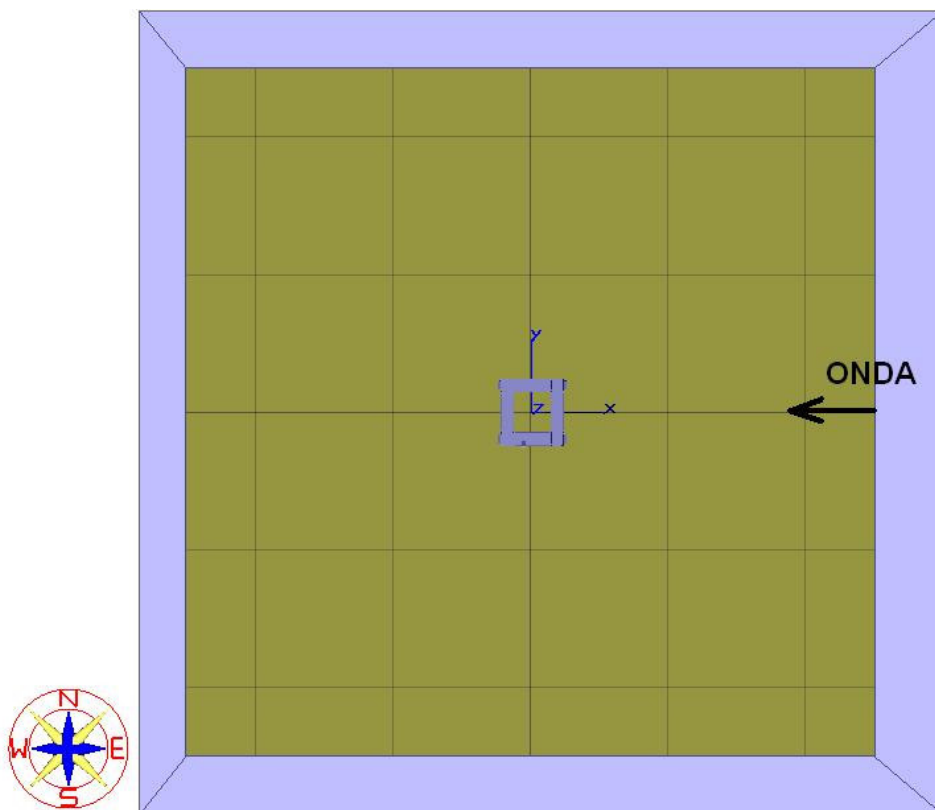


Figura III.2 – Sistema de Coordenadas da P-51.

III.3.1. Sistema de Ancoragem Completo

O sistema de ancoragem completo, na escala real, consiste de 16 linhas de ancoragem compostas de 3 segmentos, na configuração “taut-leg”. As linhas são conectadas, na posição 21,40 m em relação a linha de base, em cada uma das 4 colunas da plataforma em grupos de 4.

Todas as linhas de ancoragem são idênticas, compostas por amarra, na extremidade inferior com comprimento de 100 m; poliéster, na região intermediária

com comprimento de 1700 m; e amarra, na região do topo com um comprimento de 150 m. O raio de ancoragem do sistema é de 1574 m.

As linhas de ancoragem foram modeladas para os testes no tanque oceânico em 7 segmentos com as características apresentadas na Tabela III.2. As posições das âncoras e “fairleads” estão apresentadas na Tabela III.3.

Tabela III.2 – Características das linhas de ancoragem do modelo com sistema completo na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos de linha (S1 –âncora)							Total
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
Tipo		Amarra	Poliéster	Amarra	Poliéster	Amarra	Poliéster	Amarra	
Localização		Fundo	Meio 1	Conexão 1	Meio 2	Conexão 2	Topo	Topo	
Comprimento	m	100	600	5	600	5	500	150	1960
Diâmetro	m	0.089	0.191	0.089	0.191	0.089	0.191	0.089	
Peso submerso	KN/m	1.366	0.06	1.366	0.06	1.366	0.06	1.366	
Cd / Cl	-	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	1.2 / 0.05	
EA (quase-estático)	KN	16927875	8044200	16927875	8044200	16927875	8044200	16927875	
Rigidez Axial (EA / L)	KN/m	6040	253.33	120800	253.33	120800	304	4027	86.10

Tabela III.3 – Posição das linhas de ancoragem do modelo com sistema completo na escala do protótipo.

Linhas	Símbolo	Direção (grau)	RA (m)	Fairlead (*)			Posição das âncoras (**)		
				X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Linha 1	L1	35	1574	39.6	-44.45	21.40	1291.35	-920.93	-1250.0
Linha 2	L2	40	1574	36	-44.45	21.40	1206.59	-1026.69	-1250.0
Linha 3	L3	45	1574	32.2	-44.45	21.40	1112.73	-1124.98	-1250.0
Linha 4	L4	50	1574	28.5	-44.45	21.40	1010.74	-1215.04	-1250.0
Linha 5	L5	130	1574	-28.5	-44.45	21.40	-1010.74	-1215.04	-1250.0
Linha 6	L6	135	1574	-32.2	-44.45	21.40	-1112.73	-1124.98	-1250.0
Linha 7	L7	140	1574	-36	-44.45	21.40	-1206.59	-1026.69	-1250.0
Linha 8	L8	145	1574	-39.6	-44.45	21.40	-1291.35	-920.93	-1250.0
Linha 9	L9	215	1574	-39.6	44.45	21.40	-1291.35	920.93	-1250.0
Linha 10	L10	220	1574	-36	44.45	21.40	-1206.59	1026.69	-1250.0
Linha 11	L11	225	1574	-32.2	44.45	21.40	-1112.73	1124.98	-1250.0
Linha 12	L12	230	1574	-28.5	44.45	21.40	-1010.74	1215.04	-1250.0
Linha 13	L13	310	1574	28.5	44.45	21.40	1010.74	1215.04	-1250.0
Linha 14	L14	315	1574	32.2	44.45	21.40	1112.73	1124.98	-1250.0
Linha 15	L15	320	1574	36	44.45	21.40	1206.59	1026.69	-1250.0
Linha 16	L16	325	1574	39.6	44.45	21.40	1291.35	920.93	-1250.0

(*) – Referencial local no centro da plataforma no plano de base.

(**) – Referencial global no centro da plataforma no plano da superfície livre.

O sistema de risers do protótipo é composto de 87 risers flexíveis distribuídos na configuração “J” e 2 risers rígidos (SCRs). Os risers foram agrupados e modelados usando tubos de silicone e cintas de lastros para fornecer o mesmo peso submerso e tração vertical no topo do sistema de risers do protótipo. O sistema de risers do modelo é composto por 17 risers. As características dos risers são apresentadas na Tabela III.4 e seu posicionamento na Tabela III.5.

Tabela III.4 - Características dos risers do modelo com sistema completo na escala do protótipo.

Riser nº	Comprimento	Diâmetro	Peso Submerso	Cd / Cl	EA (quase estático)	Rigidez Axial
	(m)	(m)	(KN / m)		(KN)	(KN / m)
1 e 2	1584.6	1.0	2.65	1.0 / 0.05	4166537.257	2629.377
3, 5, 6, 8, 10, 11, 12 e 13	1584.6	0.9	2.2		3374895.178	2129.795
4	1685.4	0.9	4.86		3374895.178	2002.406
7, 9, 14, 15, 16 e 17	1584.6	0.8	1.96		2666583.844	1682.801

Tabela III.5 – Posição dos risers do modelo com sistema completo na escala do protótipo.

Risers	Símbolo	Direção (grau)	Fairlead (*)			Posição das âncoras (**)		
			X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Riser 1	R1	69.5	13.7	-22.15	2.5	162.11	-680.68	-1250.0
Riser 2	R2	69.5	4.6	-22.15	2.5	98.55	-690.62	-1250.0
Riser 3	R3	77.3	-3.3	-22.15	2.5	-108.65	-687.32	-1250.0
Riser 4	R4	77.3	-11.7	-45	19.5	-273.07	-849.41	-1250.0
Riser 5	R5	77.3	-16.2	-22.15	2.5	-229.89	-660.81	-1250.0
Riser 6	R6	77.3	-22.15	-10.9	2.5	-652.96	-246.75	-1250.0
Riser 7	R7	79	-22.15	-3.1	2.5	-668.54	-192.12	-1250.0
Riser 8	R8	79	-22.15	3.4	2.5	-680.65	-137.77	-1250.0
Riser 9	R9	82	-22.15	11.2	2.5	-672.66	185.5	-1250.0
Riser 10	R10	82	-10.4	22.15	2.5	-212.91	664.44	-1250.0
Riser 11	R11	82	-2.6	22.15	2.5	-157.53	677.55	-1250.0
Riser 12	R12	82	5.2	22.15	2.5	5.2	695.61	-1250.0
Riser 13	R13	86.7	10.55	22.15	2.5	162.05	678.35	-1250.0
Riser 14	R14	86.7	22.15	8.4	2.5	652.96	244.25	-1250.0
Riser 15	R15	99	22.15	0.6	2.5	677.82	154.39	-1250.0
Riser 16	R16	99	22.15	-4.6	2.5	665.14	-204.87	-1250.0
Riser 17	R17	99	22.15	-8.5	2.5	658.92	-227.76	-1250.0

(*) – Referencial local no centro da plataforma no plano de base.

(**) – Referencial global no centro da plataforma no plano da superfície livre.

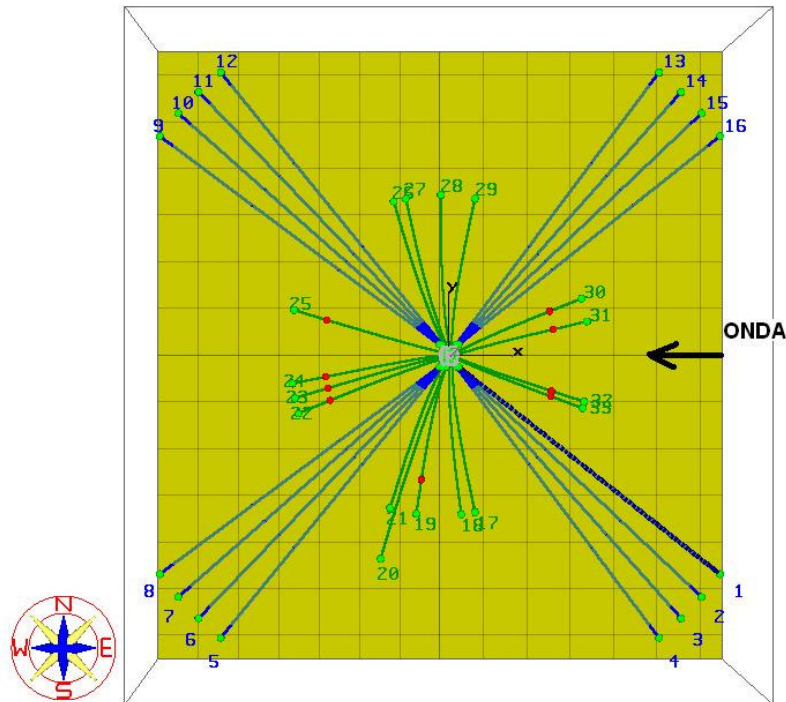


Figura III.3 – P-51 sistema completo de ancoragem e risers.

III.3.2. Sistema de Ancoragem Truncado

As características do sistema de ancoragem truncada e as posições dos “fairleads” e âncoras estão apresentadas nas Tabelas III.6 e III.7 respectivamente.

Tabela III.6 – Características das linhas de ancoragem do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos de linha (S1 –âncora)							Total
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
Tipo		Poliéster	Mola	Amarra	Mola	Amarra	Poliéster	Amarra	
Localização		Fundo	Meio	Conexão	Meio 2	Conexão2	Topo	Topo	
Comprimento	m	156.73	19.31	5	19.31	5	410	150	765.35
Diâmetro	m	0.17	1.128	0.1	1.128	0.1	0.17	0.1	
Peso submerso	KN/m	0.0523	4.066	1.548	4.066	1.548	0.0523	1.548	
Cd / Cl	-	2.0 / 0.0	1.5 / 0.0	1.2 / 0.0	1.5 / 0.0	1.2 / 0.0	1.0 / 0.0	1.2 / 0.0	
EA (quase estático)	KN	7848970.8	2917.04	11144800	2917.04	11144799.9	7848970.8	11144800	
Rigidez Axial	KN/m	6040	253.33	120800	253.33	120800	304	4027	

Tabela III.7 – Posição das linhas de ancoragem do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Linhas	Símbolo	Direção (grau)	RA (m)	Fairlead (*)			Posição das âncoras (**)		
				X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Linha 1	L1	35	1574	39.60	-44.45	21.40	531.64	-388.98	-500.00
Linha 2	L2	40	1574	36.00	-44.45	21.40	496.14	-430.55	-500.00
Linha 3	L3	45	1574	32.20	-44.45	21.40	456.94	-469.19	-500.00
Linha 4	L4	50	1574	28.50	-44.45	21.40	414.60	-504.59	-500.00
Linha 5	L5	130	1574	-28.50	-44.45	21.40	-414.60	-504.59	-500.00
Linha 6	L6	135	1574	-32.20	-44.45	21.40	-456.94	-469.19	-500.00
Linha 7	L7	140	1574	-36.00	-44.45	21.40	-496.14	-430.55	-500.00
Linha 8	L8	145	1574	-39.60	-44.45	21.40	-531.64	-388.98	-500.00
Linha 9	L9	215	1574	-39.60	44.45	21.40	-531.64	388.98	-500.00
Linha 10	L10	220	1574	-36.00	44.45	21.40	-496.14	430.55	-500.00
Linha 11	L11	225	1574	-32.20	44.45	21.40	-456.94	469.19	-500.00
Linha 12	L12	230	1574	-28.50	44.45	21.40	-414.60	504.59	-500.00
Linha 13	L13	310	1574	28.50	44.45	21.40	414.60	504.59	-500.00
Linha 14	L14	315	1574	32.20	44.45	21.40	456.94	469.19	-500.00
Linha 15	L15	320	1574	36.00	44.45	21.40	496.14	430.55	-500.00
Linha 16	L16	325	1574	39.60	44.45	21.40	531.64	388.98	-500.00

(*) – Referencial local no centro da plataforma no plano de base.

(**) – Referencial global no centro da plataforma no plano da superfície livre.

No sistema truncado, cada riser entre o segmento 1 e 2 tem uma bóia de sub-superfície conectada por meio de tendão ao fundo. As posições dos “fairleads” e âncoras e as características dos risers e das bóias de sub-superfície são apresentadas nas Tabelas III.8 a III.13.

Tabela III.8 – Posição dos risers do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Risers	Símbolo	Direção	Fairlead (*)			Posição das âncoras (**)		
			X	Y	Z	X	Y	Z
		(grau)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Riser 1	R1	69.5	13.70	22.15	2.50	112.46	460.38	-500.00
Riser 2	R2	69.5	4.60	22.15	2.50	67.12	467.00	-500.00
Riser 3	R3	77.3	-3.30	22.15	2.50	-68.28	432.42	-500.00
Riser 4	R4	77.3	-11.70	45.00	19.50	-169.36	530.22	-500.00
Riser 5	R5	77.3	-16.20	22.15	2.50	-148.00	416.07	-500.00
Riser 6	R6	77.3	-22.15	10.90	2.50	-411.22	156.37	-500.00
Riser 7	R7	79	-22.15	3.10	2.50	-395.10	112.16	-500.00
Riser 8	R8	79	-22.15	-3.40	2.50	-428.31	83.67	-500.00
Riser 9	R9	82	-22.15	-11.20	2.50	-397.48	-111.77	-500.00
Riser 10	R10	82	-10.40	-22.15	2.50	-135.31	-418.30	-500.00
Riser 11	R11	82	-2.60	-22.15	2.50	-98.16	-426.40	-500.00
Riser 12	R12	82	5.20	-22.15	2.50	5.20	-437.54	-500.00
Riser 13	R13	86.7	10.55	-22.15	2.50	103.99	-426.88	-500.00
Riser 14	R14	86.7	22.15	-8.40	2.50	386.10	-144.48	-500.00
Riser 15	R15	99	22.15	-0.60	2.50	400.45	-89.33	-500.00
Riser 16	R16	99	22.15	4.60	2.50	393.14	120.15	-500.00
Riser 17	R17	99	22.15	8.50	2.50	389.55	135.00	-500.00

(*) – Referencial local no centro da plataforma no plano de base.

(**) – Referencial global no centro da plataforma no plano da superfície livre.

Tabela III.9 – Características dos risers R1 e R2 do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos		Total
		S1	S2	
Tipo		Cabo de Aço	Mola	
Localização		Fundo	Topo	
Comprimento	m	225.00	650.00	975.00
Diâmetro	m	0.10	1.00	
Peso submerso.	KN/m	0.00	5.30	
Cd / Cl	-	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	
EA (quase estático)	KN	380918.11	4170464.25	
Rigidez Axial	KN/m	1692.97	6416.09	

Tabela III.10 - Características dos risers R3, R5, R6, R8, R10, R11, R12 e R13 do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos		Total
		S1	S2	
Tipo		Cabo de Aço	Silicone	
Localização		Fundo	Topo	
Comprimento	m	225.00	650.00	975.00
Diâmetro	m	0.10	0.90	
Peso submerso.	KN/m	0.00	4.40	
Cd / Cl	-	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	
EA (quase estático)	KN	380918.11	3378076.04	
Rigidez Axial	KN/m	1692.97	5197.04	

Tabela III.11 – Características do riser R4 do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos		Total
		S1	S2	
Tipo		Cabo de Aço	Silicone	
Localização		Fundo	Topo	
Comprimento	m	225.00	650.00	975.00
Diâmetro	m	0.10	0.90	
Peso submerso.	KN/m	0.00	9.72	
Cd / Cl	-	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	
EA (quase estático)	KN	380918.11	3378076.04	
Rigidez Axial	KN/m	1692.97	5197.04	

Tabela III.12 - Características dos risers R7, R9, R14, R15, R16 e R17 do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos		Total
		S1	S2	
Tipo		Cabo de Aço	Silicone	
Localização		Fundo	Topo	
Comprimento	m	225.00	650.00	975.00
Diâmetro	m	0.10	0.80	
Peso submerso.	KN/m	0.00	3.92	
Cd / Cl	-	1.2 / 0.2	1.0 / 0.05	
EA (quase estático)	KN	380918.11	2669097.12	
Rigidez Axial	KN/m	1692.97	4106.30	

Tabela III.13 - Características das bóias de sub-superfície do modelo com sistema truncado na escala do protótipo.

Bóia	Unid.	Empuxo
Bóia 1	KN	-56.63
Bóia 2	KN	-1040.00
Bóia 3	KN	-2000.00

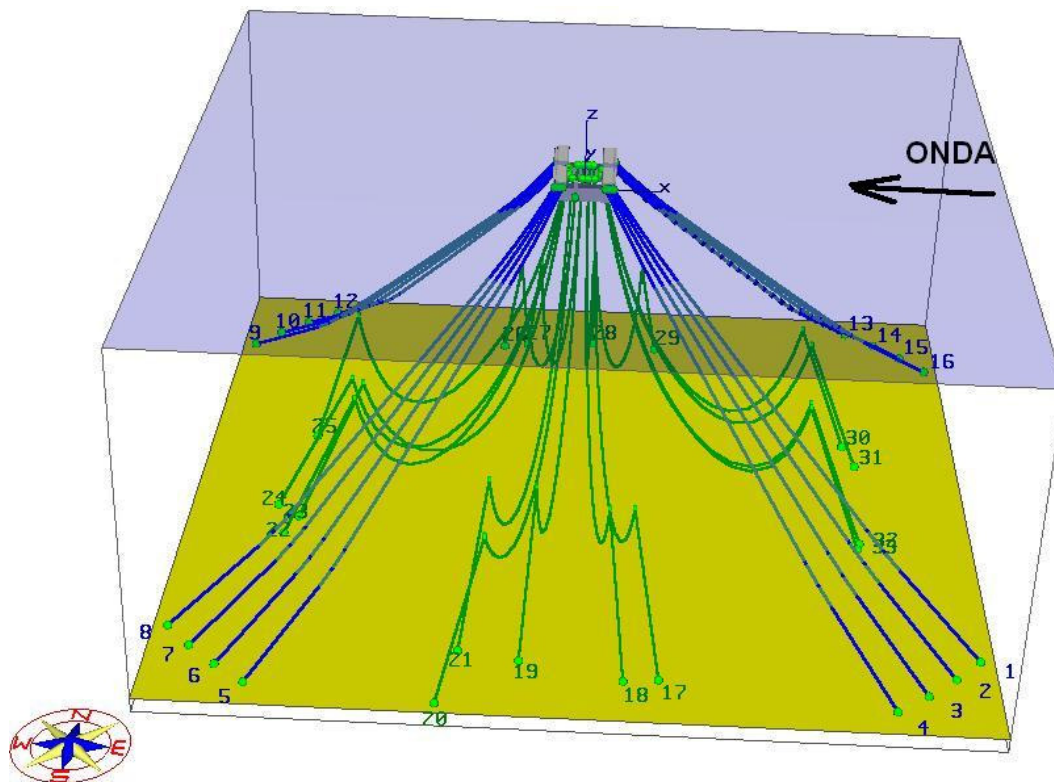


Figura III.4 – Sistema de ancoragem e risers truncado.

III.3.3. Sistema de Ancoragem Horizontal

O sistema de ancoragem horizontal foi modelado com o objetivo de manter as mesmas restaurações do plano horizontal e vertical do sistema truncado e completo. O sistema é composto de 4 linhas a cada 45° relativo ao eixo da plataforma. As linhas foram conectadas aos “fairleads” da plataforma em uma de suas extremidades e a molas lineares em sua outra extremidade sem haver o contato com a água. As características do sistema são apresentadas nas Tabelas III.14 e III.15.

Tabela III.14 – Características das linhas de ancoragem do modelo com sistema horizontal na escala do protótipo.

Parâmetro	Unid.	Segmentos		Total
		S1	S2	
Tipo		Mola	Cabo de Aço	
Localização		Fundo	Topo	
Comprimento	m	35.00	3310.00	3345.0
Diâmetro	m	0.10	0.04	
Peso submerso.	KN/m	18.79	0.0994	
Cd / Cl	-	2.0 / 0.0	1.5 / 0.0	
EA (quase estático)	KN	6098.75	23461280000	
Rigidez Axial	KN/m	174.25	7088000.00	

Tabela III.15 – Posição da linhas de ancoragem do modelo com sistema horizontal na escala do protótipo.

Linhas	Símbolo	Direção (grau)	Fairlead			Posição das âncoras		
			X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Linha 1	L1	45	42.90	-42.90	54.20	2426.20	-2426.20	170.00
Linha 2	L2	135	-42.90	-42.90	54.20	-2426.20	-2426.20	170.00
Linha 3	L3	225	-42.90	42.90	54.20	-2435.90	2435.90	170.00
Linha 4	L4	315	42.90	42.90	54.20	2435.90	2435.90	170.00

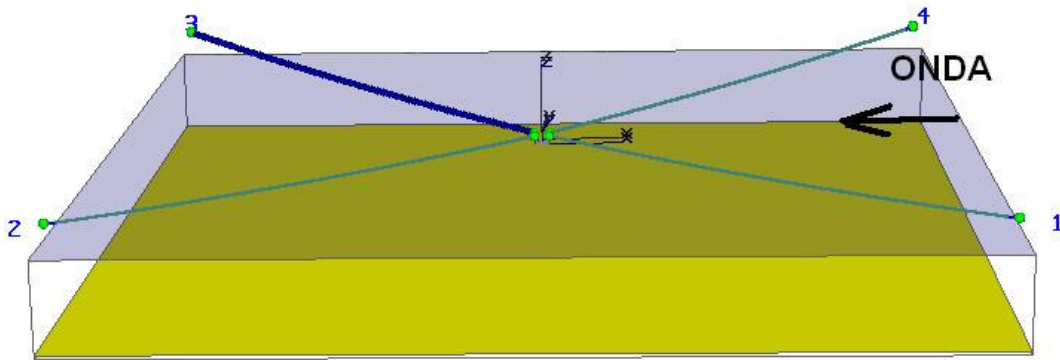


Figura III.5 – Sistema de ancoragem horizontal

III.4. Condições Ambientais

Os ensaios foram realizados apenas com ondas sem vento e correnteza. O modelo foi ensaiado nos seguintes mares:

Tabela III.16 – Ondas irregulares

Onda	Tipo	Hs (m)	Tp (s)
Irregular 1	Jonswap	3,26	17,50
Irregular 2	Jonswap	6,30	10,00
Irregular 3	Jonswap	7,80	15,35

Todas as ondas foram calibradas com critério de aceitação de 5% para altura significativa (H_s) e para o período de pico (T_p).

III.5. Comparações Experimentais LabOceano x Marintek

Foram realizadas comparações, tanto para os resultados obtidos nos ensaios com ancoragem horizontal quanto nos ensaios com ancoragem truncada para os testes de “offset”, decaimentos de “surge”, “heave” e “pitch” e ensaios para as ondas irregulares descritas na Tabela III.16.

Nos ensaios de “offset” foram comparadas as curvas de restauração na direção – x segundo o sistema de referência da Figura III.2. Os resultados mostraram boa concordância, como pode ser visto na Figura III.6. Apenas a restauração do sistema truncado realizado no LabOceano mostrou-se menos rígida, devido a mudanças de alguns segmentos de amarra das linhas de ancoragem do sistema que estavam sendo corroídas pela água do tanque oceânico do LabOceano. Esta diferença, no entanto, não comprometeu as demais análises realizadas.

Os ensaios de decaimentos foram realizados dinamicamente, ou seja, o modelo era excitado manualmente de forma oscilatória e após algumas oscilações o modelo era solto para o decaimento. Nos ensaios de decaimentos foram comparados os períodos naturais e os coeficientes de amortecimentos lineares e quadráticos. Com relação aos amortecimentos existe uma grande dificuldade em se estabelecer um critério preciso para a sua definição visto que os coeficientes são muito sensíveis a pequenas variações de comportamento do sinal de decaimento. Apesar desta ressalva, os resultados mostraram-se bem consistentes entre os laboratórios, como indicam as comparações apresentadas nas Figuras III.7 a III.9. Algumas diferenças nos decaimentos do sistema de ancoragem truncada foram observadas. Estas diferenças podem ser explicadas pela mudança de alguns segmentos de amarra das linhas de ancoragem do sistema de ancoragem truncada ensaiado no LabOceano, como já mencionado anteriormente.

Nos ensaios em ondas, foram realizadas comparações das análises das séries temporais sincronizadas entre os laboratórios, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, dos movimentos de elevação de onda, “surge”, “heave”, “pitch” e trações das linhas ancoragem (L1, L2,..., L16) e dos risers R1, R4, R6, R13 e R14. A unidade de medida das elevações de onda, “surge” e “heave” é metro, enquanto que para “pitch” e trações das linhas e risers é respectivamente grau ($^{\circ}$) e KN. Nas Figuras III.10 até III.30 são comparadas as densidades de energia espectral dos movimentos da plataforma e seus valores de máximo, mínimo, desvio padrão, altura máxima (H_{max}), altura significativa (H_s) e período de pico (T_p), em segundo, tanto do ensaio com ancoragem horizontal como truncada. Com relação às linhas de ancoragem e risers são apresentadas apenas as comparações estatísticas, H_s e T_p . Nas Figuras III.10 a III.30, na parte superior das figuras são apresentadas as comparações dos resultados de elevações de ondas e dos movimentos de “surge”, “heave” e “pitch” do modelo na escala do protótipo, enquanto que na parte inferior são apresentados os resultados

referentes às linhas de ancoragem e risers. No lado esquerdo são os resultados referentes ao sistema de ancoragem horizontal e no lado direito ao sistema de ancoragem truncada. Os gráficos apresentam as cores azul e vermelho referentes aos resultados do laboratório do Marintek e LabOceano respectivamente.

Os testes em ondas foram realizados com uma taxa de amostragem de 80 Hz com tempo de aquisição equivalente a 3 horas na escala real.

Durante todos os ensaios, em ambos os laboratórios, as linhas de ancoragem horizontais foram mantidas fora da água, não interferindo no amortecimento dos movimentos.

As comparações dos resultados espectrais e estatísticos de ambos os laboratórios para as elevações de ondas, movimentos do modelo e trações das linhas de ancoragem e risers foram muito bons levando em consideração as diferenças entre as dimensões dos tanques utilizados para o ensaio. Pequenas diferenças de energia nos períodos naturais dos movimentos foram constatadas, sendo necessária uma maior investigação. Poderiam ser estas diferenças atribuídas aos diferentes níveis de reflexão dos tanques, porém tanto o espectro de 1ª ordem quanto de 2ª ordem das ondas de ensaio estão bem compatíveis entre os laboratórios.

III.5.1. Ensaio de Offset

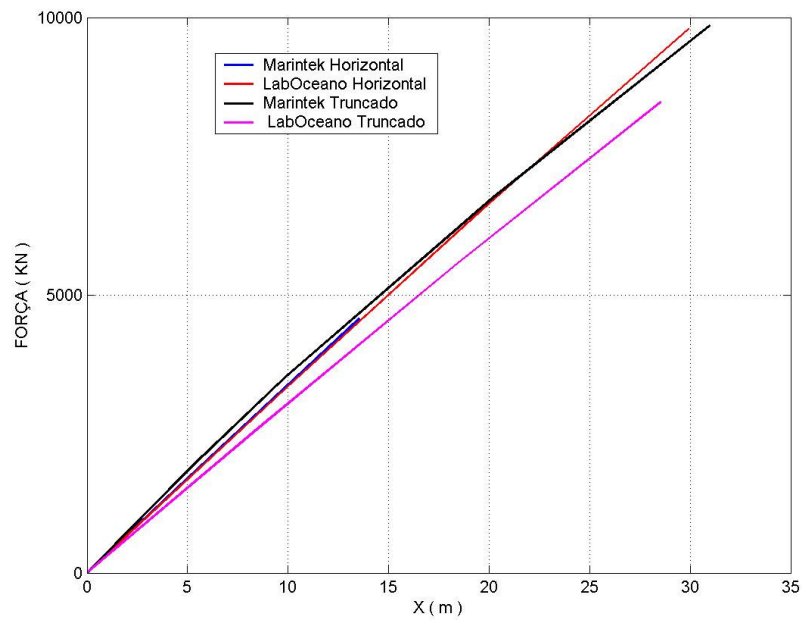


Figura III.6 – Curva de Restauração no plano horizontal

III.5.2. Decaimento

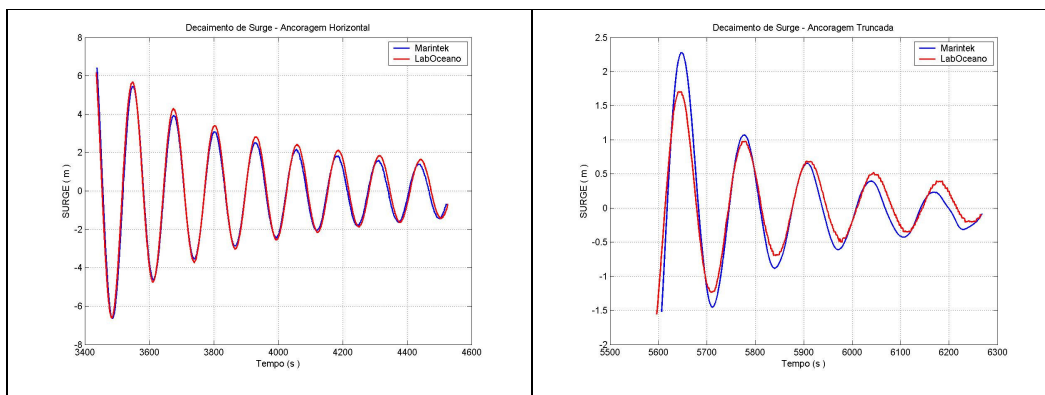


Figura III.7 – Decaimento de Surge: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

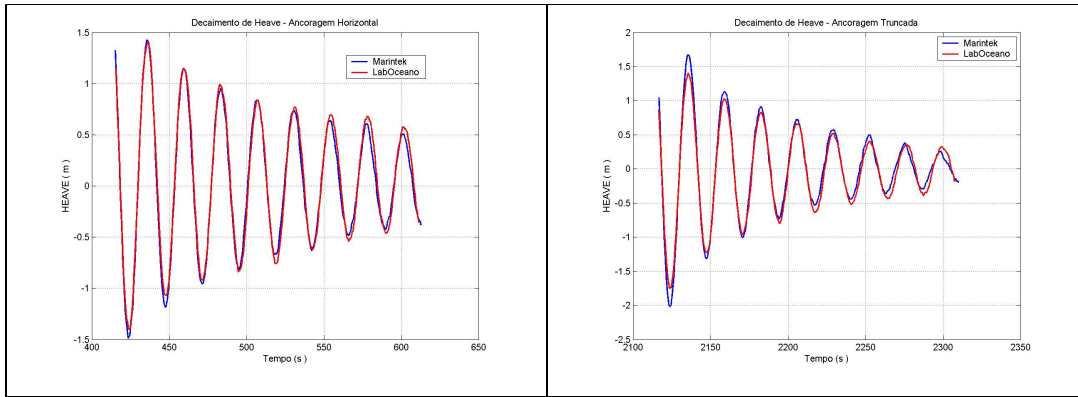


Figura III.8 – Decaimento de Heave: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

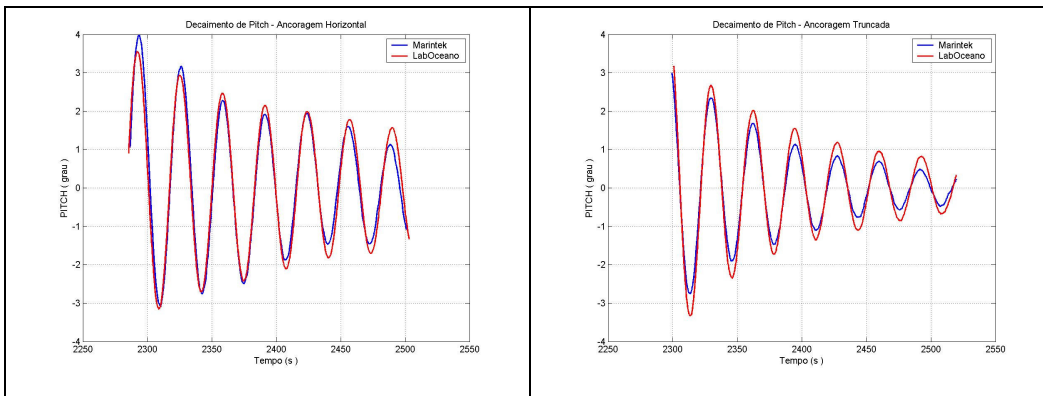


Figura III.9 – Decaimento de Pitch: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

Tabela III.17 – Tabela de decaimento com ancoragem horizontal

Movimento	Horizontal					
	Tn		P1		P2	
	Marintek	LabOceano	Marintek	LabOceano	Marintek	LabOceano
Surge	126.79	127.04	0.00046	0.00044	0.02220	0.01945
Heave	23.78	23.66	0.00354	0.00319	0.05633	0.04642
Pitch	32.71	32.93	0.00134	0.00136	1.52810	0.96555

Tabela III.18 – Tabela de decaimento com ancoragem truncada.

Movimento	Truncado					
	Tn		P1		P2	
	Marintek	LabOceano	Marintek	LabOceano	Marintek	LabOceano
Surge	128.69	128.50	0.00364	0.00359	0.10581	0.08906
Heave	23.43	23.29	0.01057	0.01009	0.06290	0.05253
Pitch	32.50	32.61	0.01508	0.01004	1.18660	1.28370

III.5.3. Ensaio em Ondas

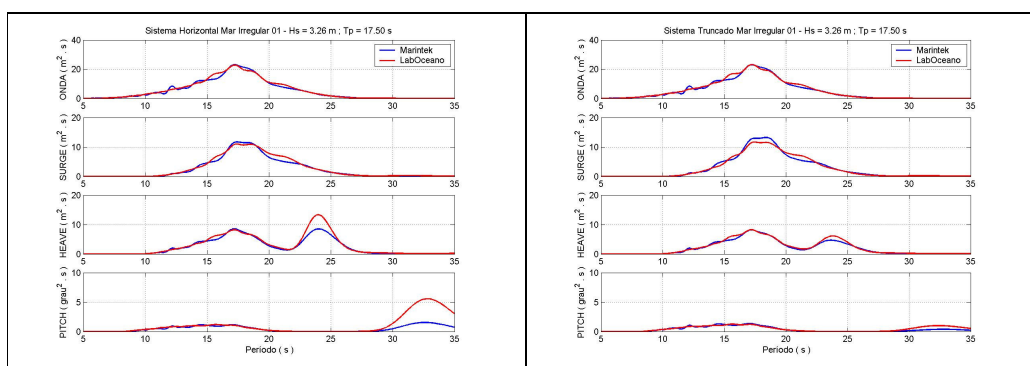


Figura III.10 – Espectros Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

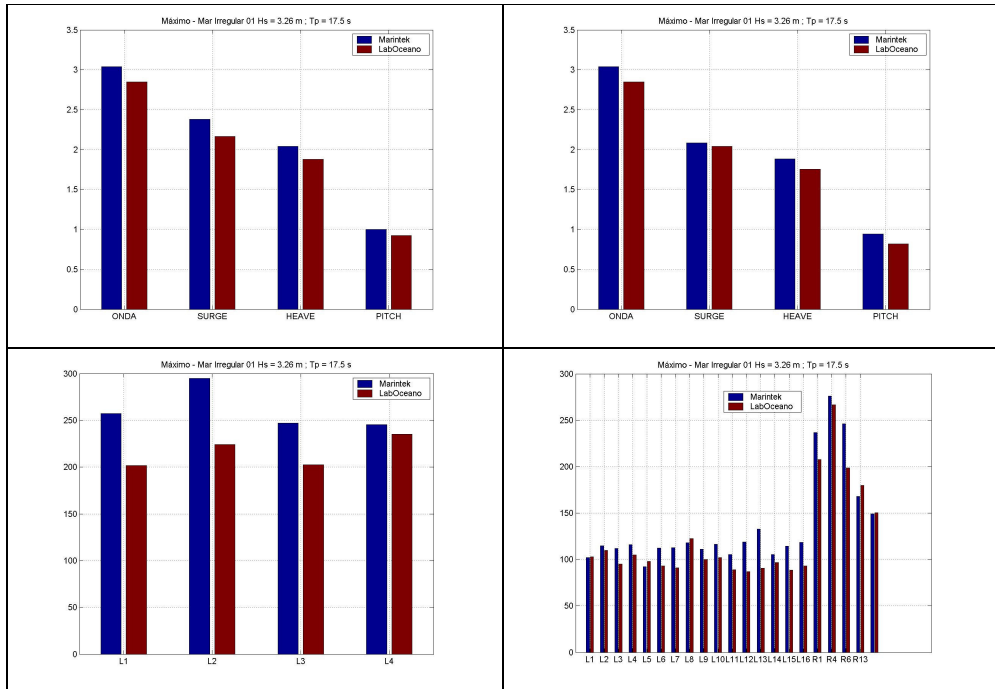


Figura III.11 – Máximo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – $H_s = 3.26$ m $T_p = 17.50$ s.

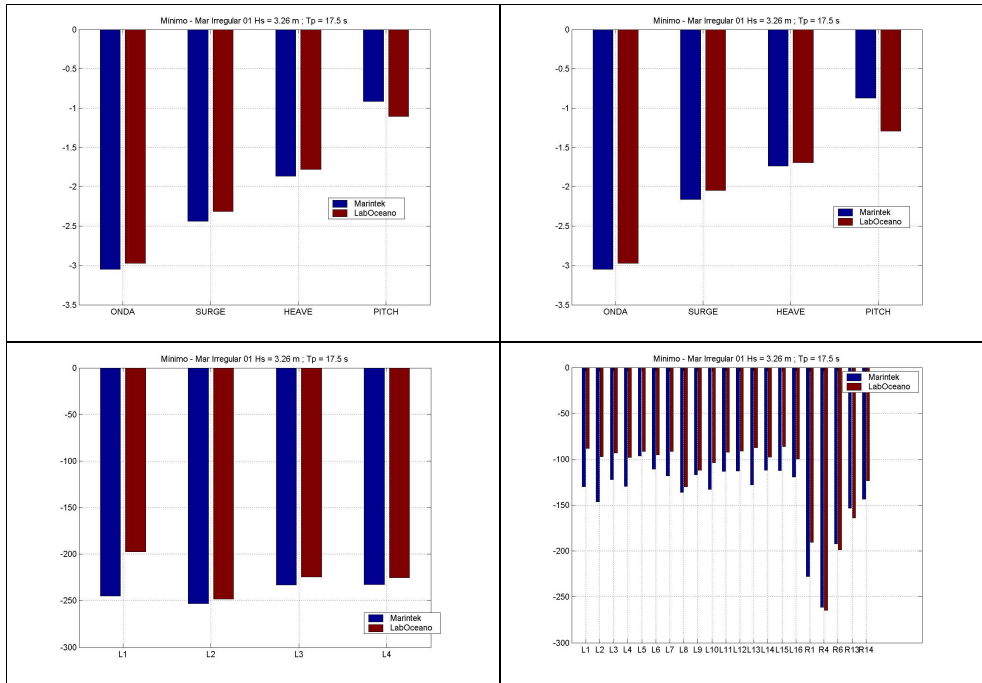


Figura III.12 – Mínimo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – $H_s = 3.26$ m $T_p = 17.50$ s.

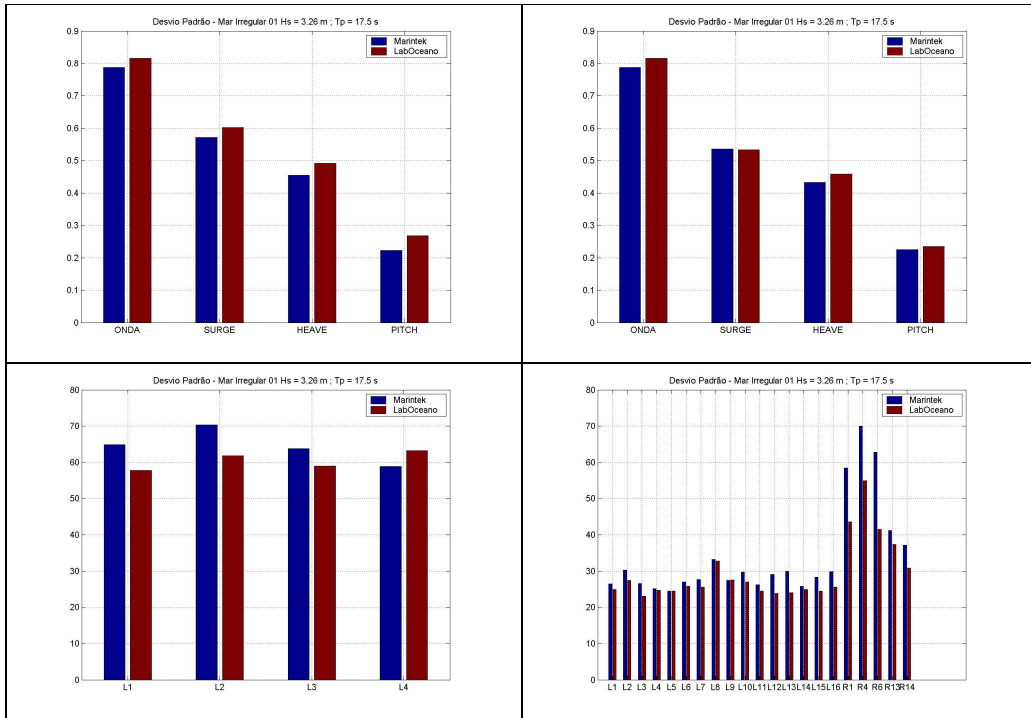


Figura III.13 – Desvio Padrão Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

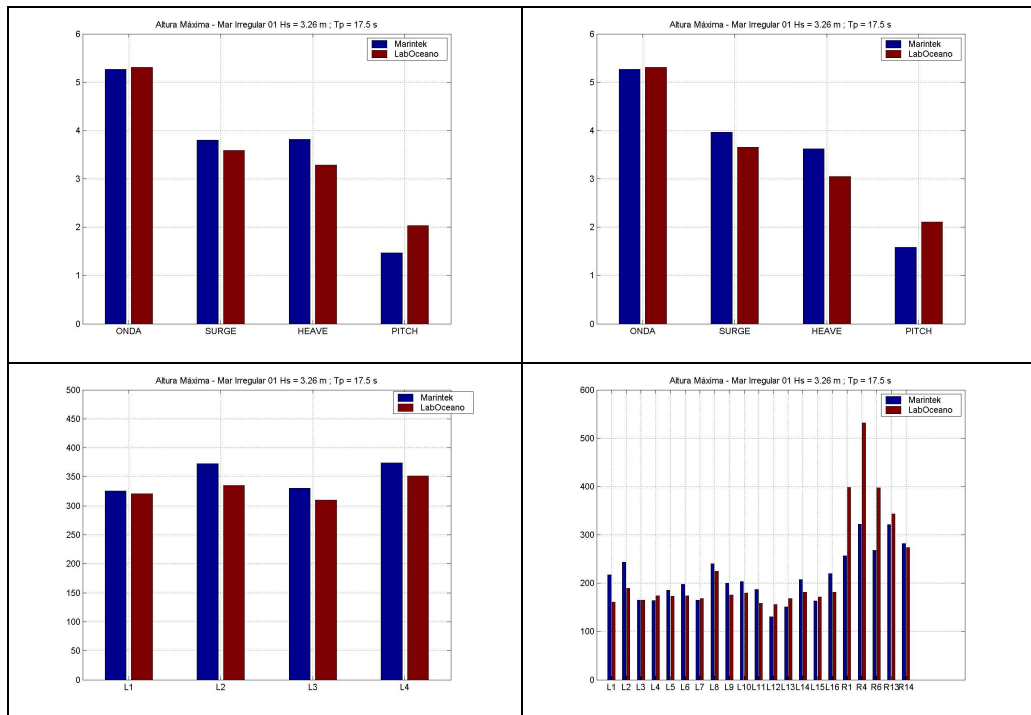


Figura III.14 – Altura Máxima Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

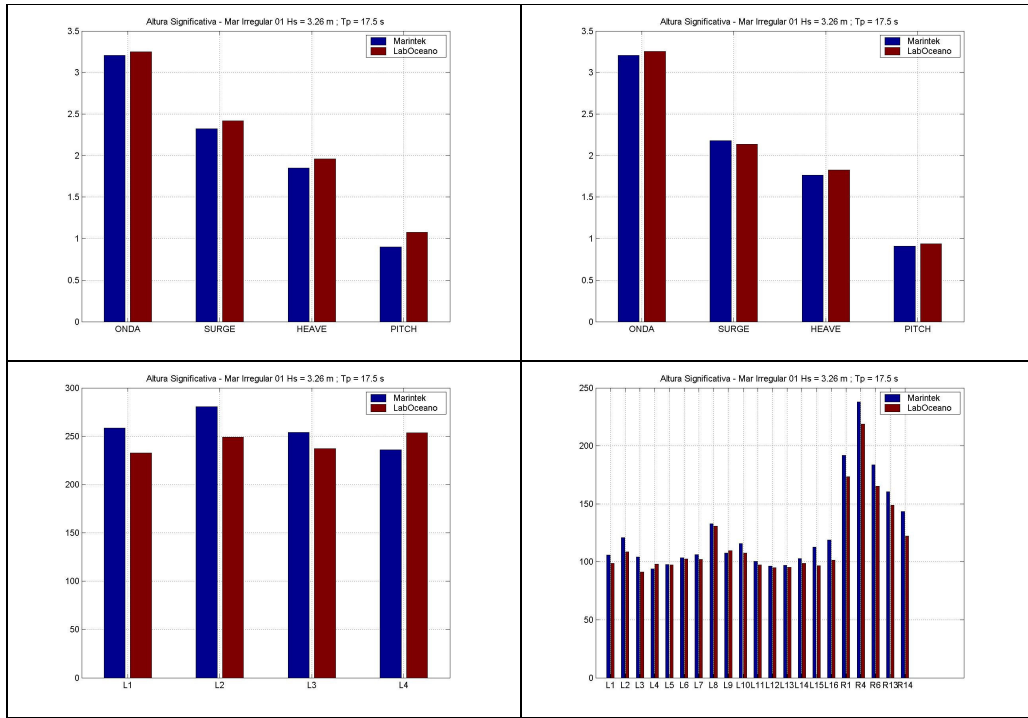


Figura III.15 – Altura Significativa Marintek (azul), LabOceano(vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

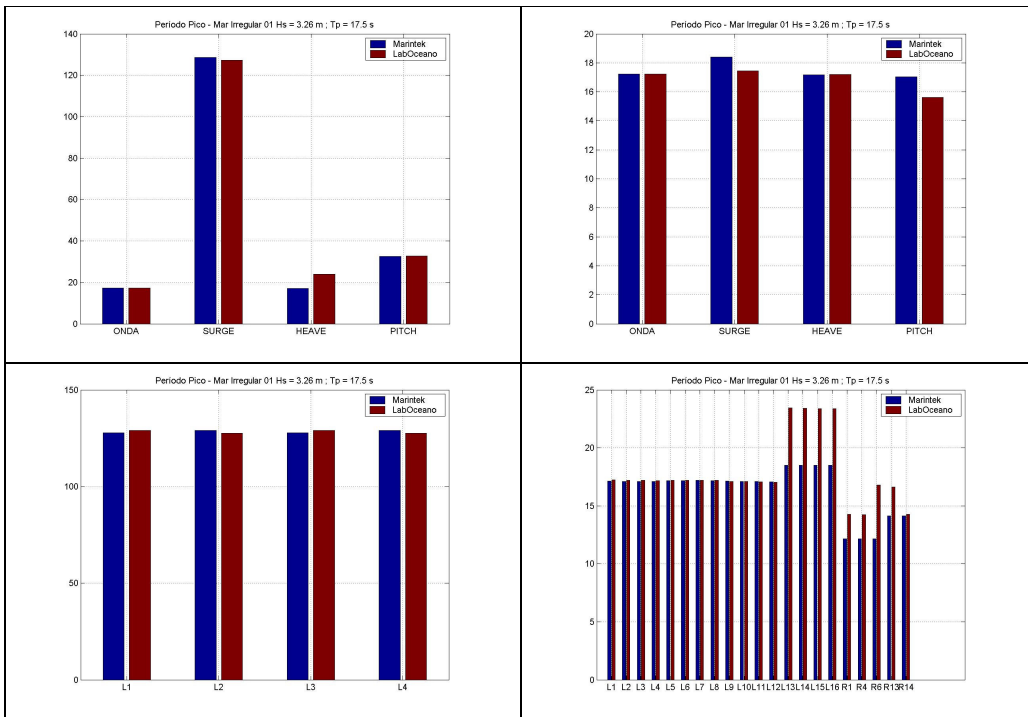


Figura III.16 – Período de Pico Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

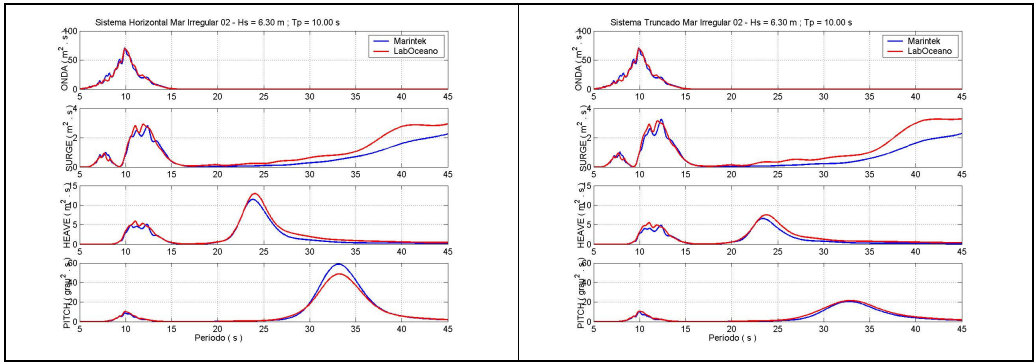


Figura III.17 – Espectros Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

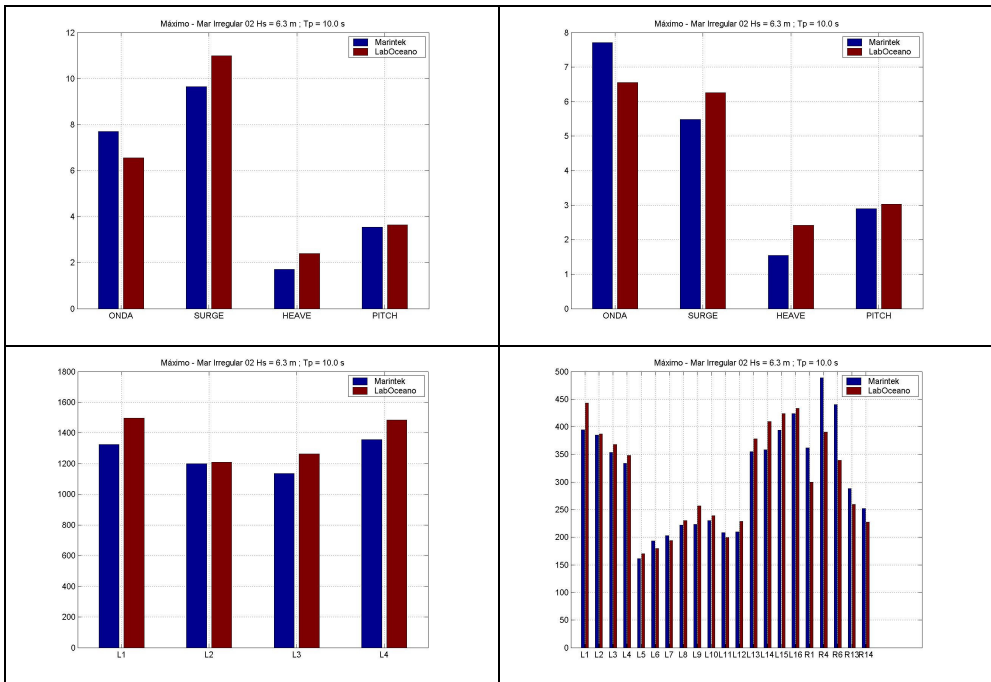


Figura III.18 - Máximo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

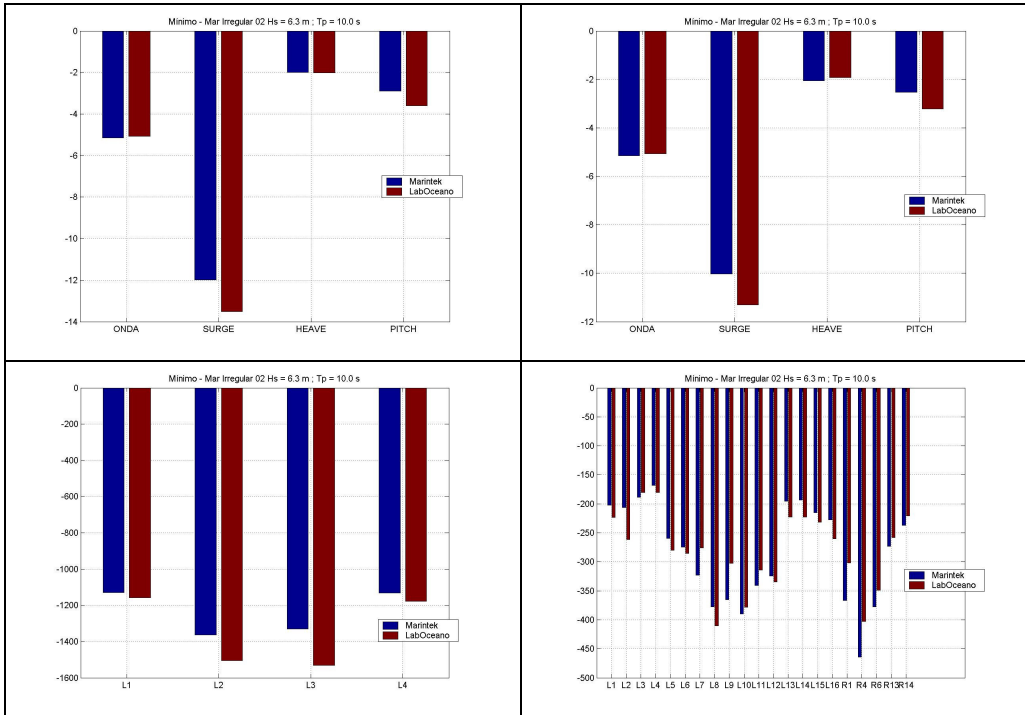


Figura III.19 - Mínimo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

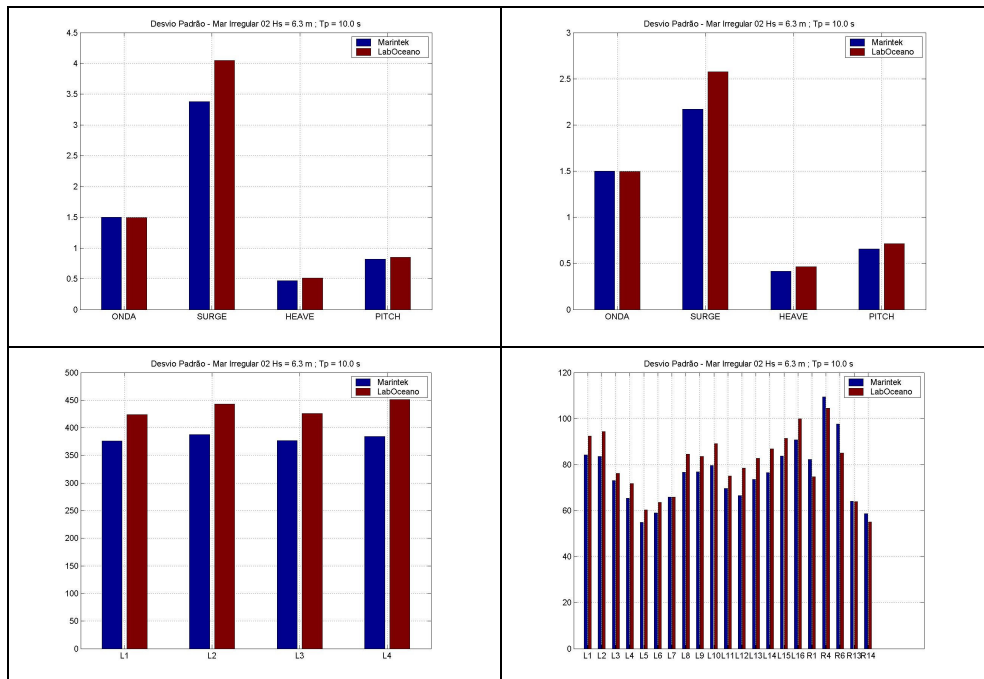


Figura III.20 – Desvio Padrão Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

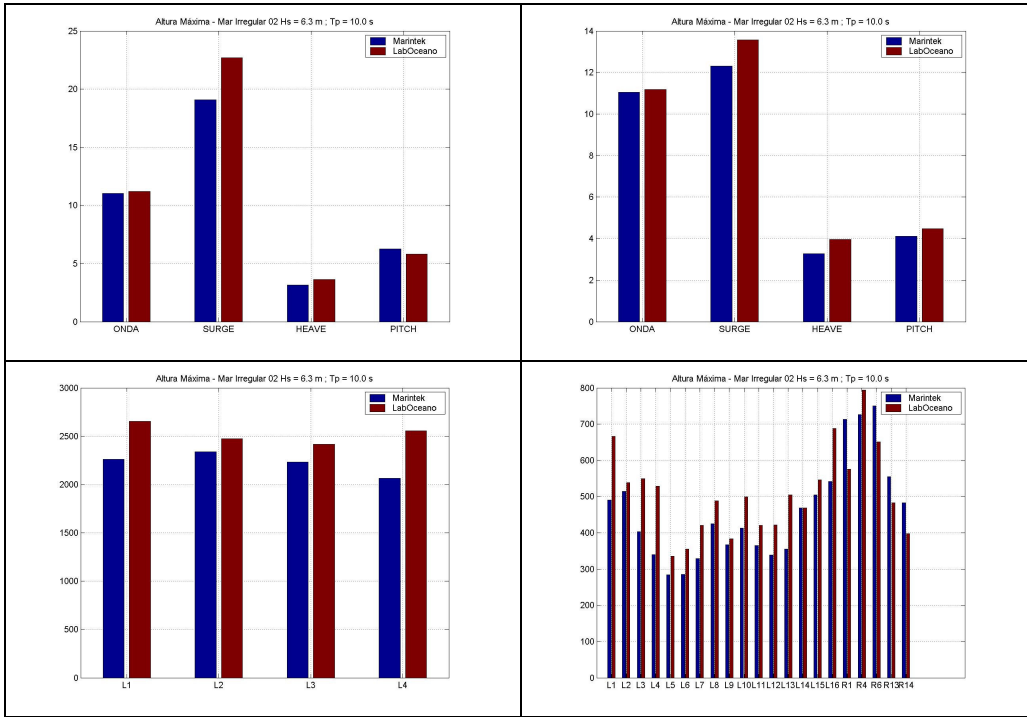


Figura III.21 - Altura Máxima Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

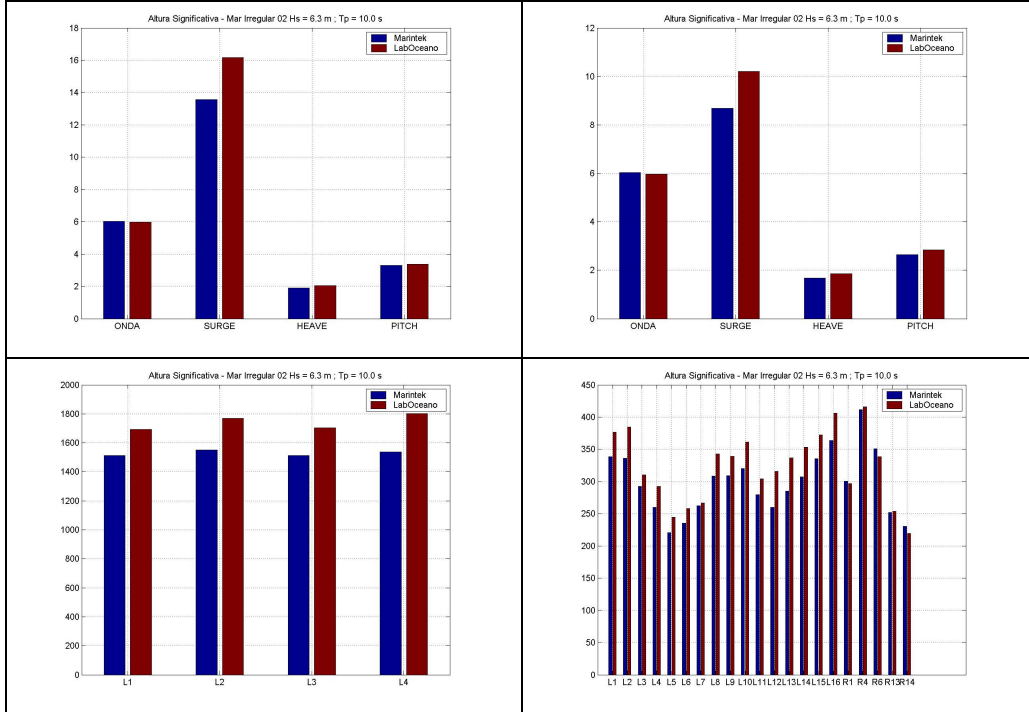


Figura III.22 - Altura Significativa Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

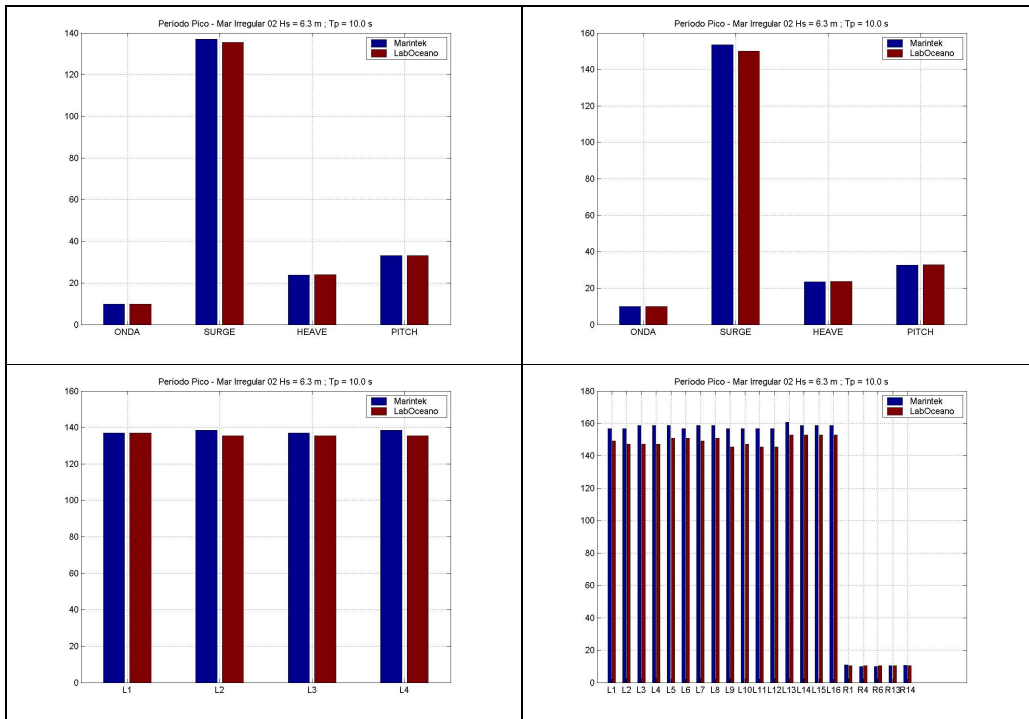


Figura III.23 – Período de Pico Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

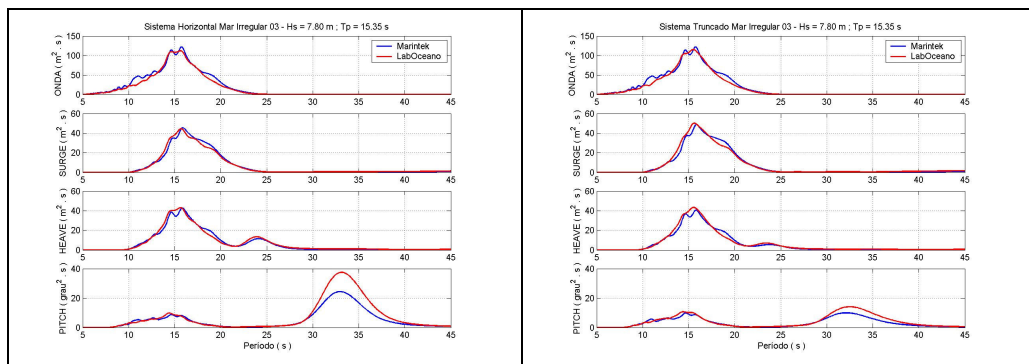


Figura III.24 - Espectros Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

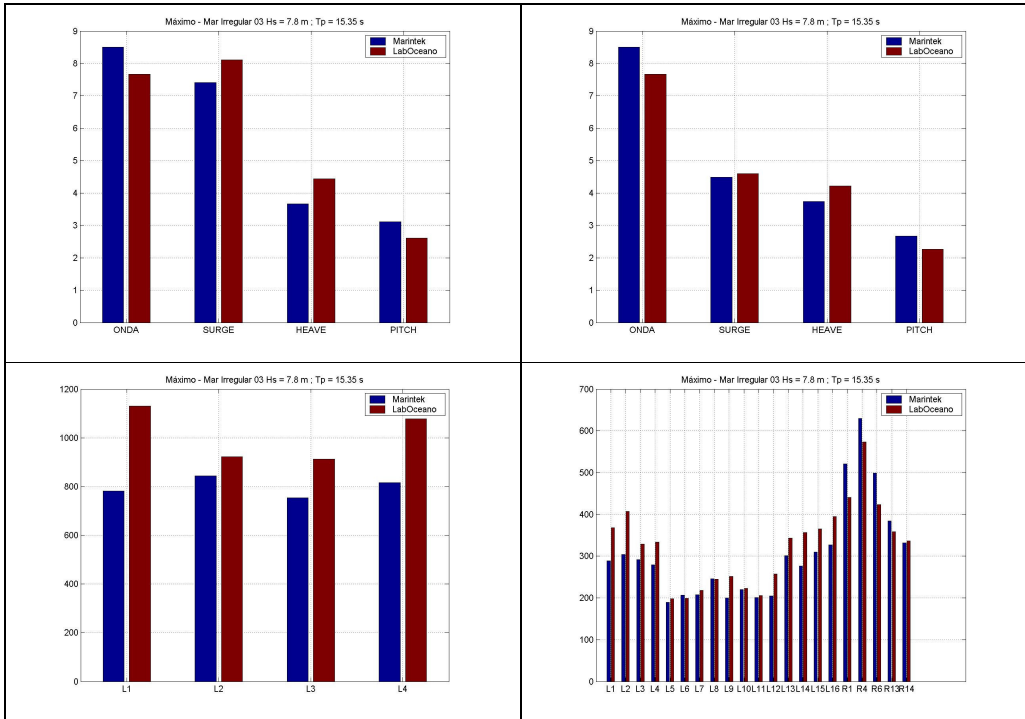


Figura III.25 - Máximo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

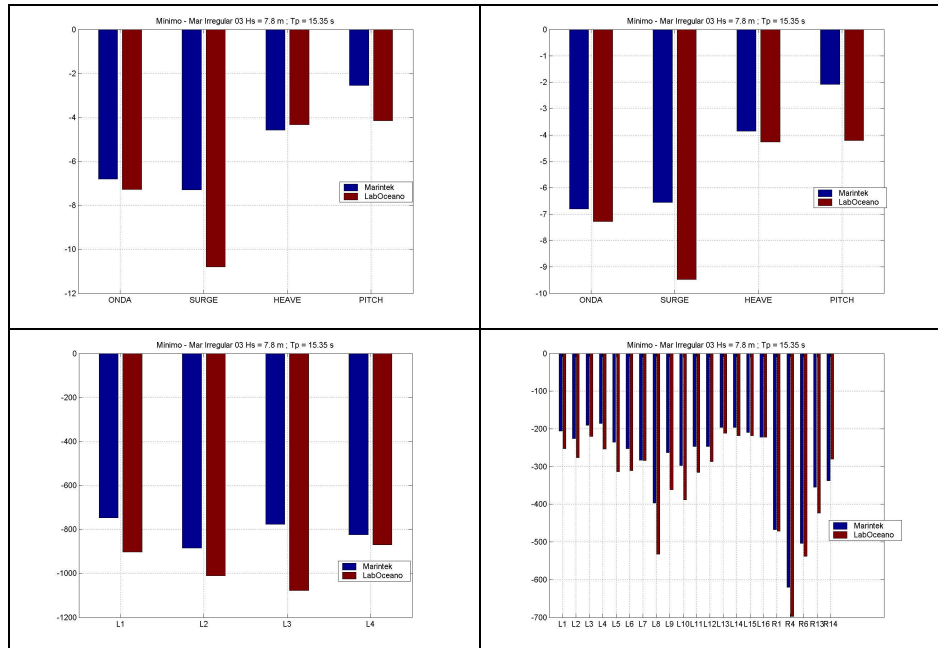


Figura III.26 - Mínimo Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

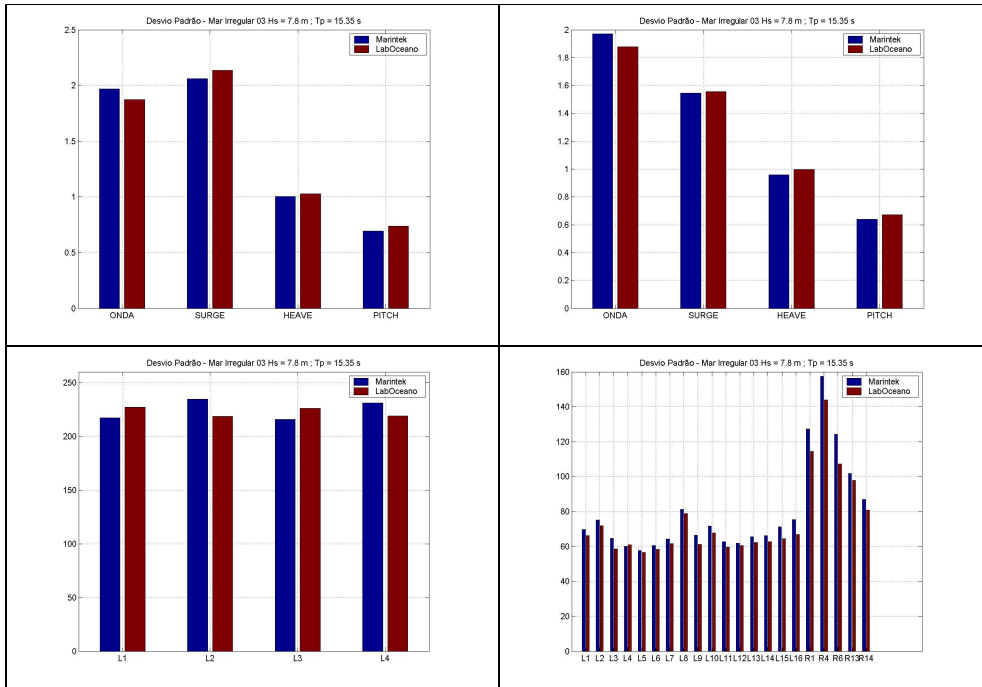


Figura III.27 – Desvio Padrão Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

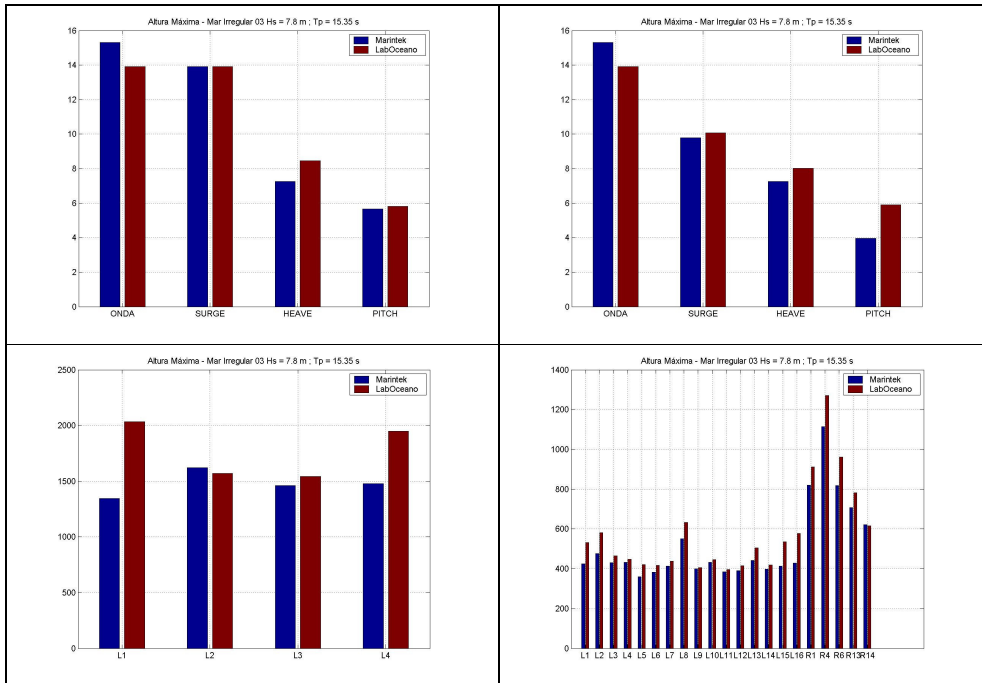


Figura III.28 – Altura Máxima Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

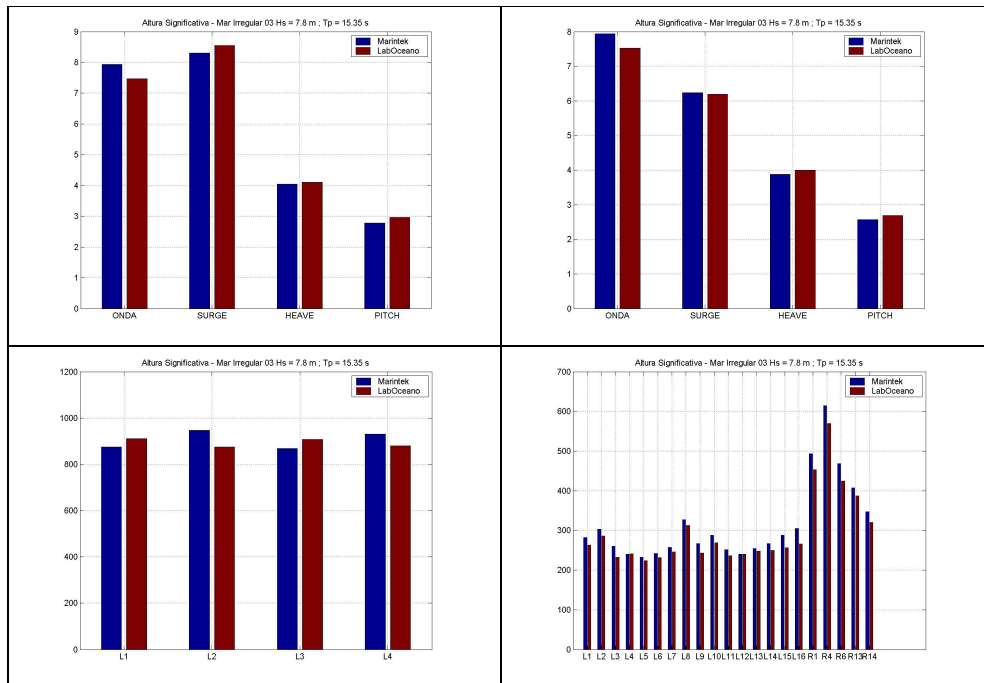


Figura III.29 – Altura Significativa Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

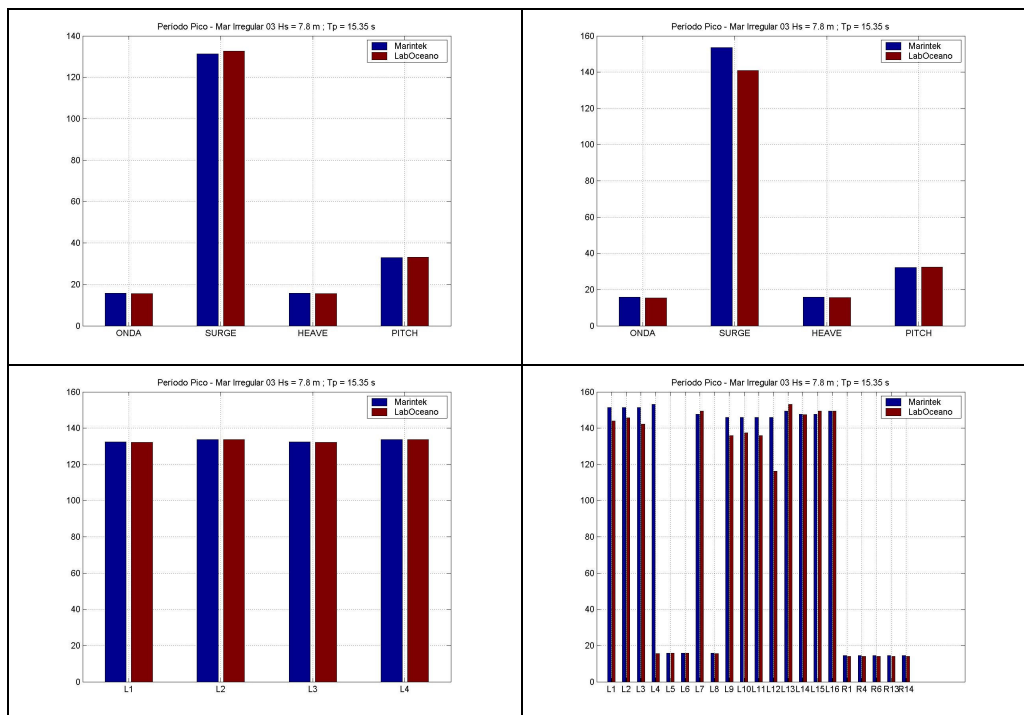


Figura III.30 – Período de Pico Marintek (azul), LabOceano (vermelho): Ancoragem Horizontal (esquerda) e Truncada (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

IV. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO TRUNCADO COM O ENSAIO

Considerando que os resultados entre os laboratórios, Marintek e LabOceano, foram equivalentes, a calibração dos modelos numéricos do sistema horizontal e truncado com os respectivos ensaios foi realizada com base nos testes realizados no LabOceano.

Os coeficientes C_d e C_l das linhas e risers utilizados na calibração foram obtidos do relatório de ensaio do Marintek [40] e encontram-se nas Tabelas do item III.

O tempo de simulação para os ensaios em onda, para todos os modelos numéricos, foi de 3 horas com o passo de tempo de 0.5 s.

As séries temporais de ondas utilizadas nas simulações foram as mesmas séries registradas pelos ondógrafos dos ensaios sem a presença do modelo.

Para extração dos coeficientes de extrapolação do modelo completo de linhas de ancoragem e risers foi utilizado o método de calibração apresentado no item II.2.

Inicialmente realizou-se a calibração da rigidez das linhas (modificando no DYNASIM os coeficientes de rigidez das linhas) para que a curva de restauração no plano horizontal na direção $-x$ do modelo numérico horizontal e truncado fossem semelhantes às respectivas curvas do ensaio. Como pode ser constatado na Figura IV.1 foi obtida excelente aderência entre os resultados numérico e experimental.

Em seguida, realizou-se a simulação dos ensaios de decaimento de “surge”, “heave” e “pitch”. Alguns ajustes na rigidez das linhas foram realizados para sintonizar de forma mais precisa os períodos naturais da estrutura com os obtidos a partir dos ensaios de decaimento. Para o ensaio com ancoragem truncada primeiramente foi realizado um ajuste apenas das linhas de ancoragem sem os risers truncados, separando os seus efeitos. Nas Figuras IV.2 a IV.4 são apresentados resultados destes decaimentos com boa concordância entre o numérico e o experimental. Na seqüência são apresentados os resultados dos decaimentos para o sistema com

ancoragem horizontal e truncada com risers (Figura IV.5 a IV.7). Nas Tabelas IV.1 e IV.2 são apresentadas as comparações dos períodos naturais, amortecimento linear e quadrático para a ancoragem horizontal e truncada respectivamente. Como pode ser constatado na Tabela IV.2, o valor do coeficiente quadrático P2 da simulação numérica do decaimento de “pitch” utilizado é muito menor do que o obtido no ensaio experimental. Mesmo assim, a série temporal da simulação do decaimento de “pitch” teve boa aderência com a série temporal de decaimento do ensaio. A influência do coeficiente quadrático P2 é mais significativa nas regiões de menores amplitudes portanto no fim da série temporal de decaimento. Já a influência do coeficiente linear P1 é mais importante na faixa de grandes amplitudes. Sendo a faixa de decaimento analisada uma faixa inicial, as amplitudes do movimento ainda são elevadas, com isso, o coeficiente linear P1 é o que tem mais influência.

Seguindo o procedimento de calibração, o próximo passo foi o ajuste do amortecimento linear para garantir mais a frente o correto cálculo das forças de 2ª ordem que são dependentes dos movimentos de 1ª ordem. A matriz de amortecimento linear do casco foi ajustada para que os movimentos de 1ª ordem na faixa de ondas fossem semelhantes aos do ensaio (Figuras IV.8, IV.16 e IV.24). A unidade dos coeficientes de amortecimento linear de “surge” e “heave” é ton/s e para “pitch” é ton.m²/s. Os resultados experimentais das respostas lineares dos movimentos analisados, tanto para o sistema com ancoragem horizontal quanto para o truncado foram iguais. Logo, a matriz de amortecimento utilizada no modelo numérico foi a mesma para ambos os casos, em consequência a determinação das QTFs também. Isto ocorreu tanto para o mar 01 (Hs= 3.26 m Tp= 17.5 s) quanto para o mar 02 (Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s). Uma possível explicação para este tipo de comportamento é o fato de que o nível de amortecimento das linhas não tem tanta influência na faixa de frequência fora da região de ressonância. É bom lembrar que no sistema horizontal as linhas não têm contato com a água. Já para o mar 03 (Hs= 7.8 m e Tp=15.35 s), mais energético do que os anteriores, os movimentos de 1ª ordem para os dois sistemas, horizontal e truncado, apresentaram pequenas diferenças no ajuste dos coeficientes de amortecimentos. Consequentemente, os movimentos lineares e as QTFs foram ligeiramente diferentes. Os coeficientes de amortecimento linear para os mares 01, 02 e 03 são apresentados nas Tabelas IV.3, V.5, IV.7 e IV.9. Já nas Tabelas IV.4, IV.6, IV.8 e IV.10 são apresentados os coeficientes de força de 2ª ordem.

Calibrados os períodos naturais e definidos os coeficientes de força de 2ª ordem foi realizada a simulação em ondas com o programa de análise acoplado DYNASIM e seus resultados comparados com os respectivos ensaios. Em geral, tantos os resultados numéricos espectrais e estatísticos foram bem semelhantes aos respectivos resultados experimentais, como apresentados nas Figuras IV.9 a IV.15 para o mar 01, nas Figuras IV.17 a IV.23 para o mar 02 e nas Figuras IV.25 a IV.31 para o mar 03.

IV.1. Ensaio de Offset

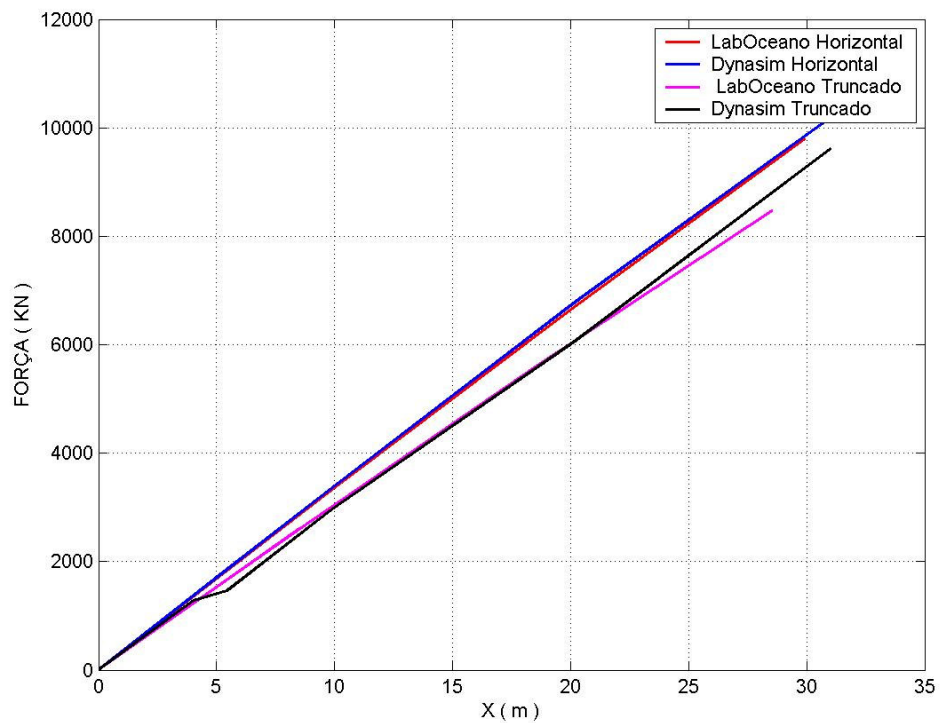


Figura IV.1 – Comparação numérica-experimental da curva de restauração

IV.2. Decaimentos

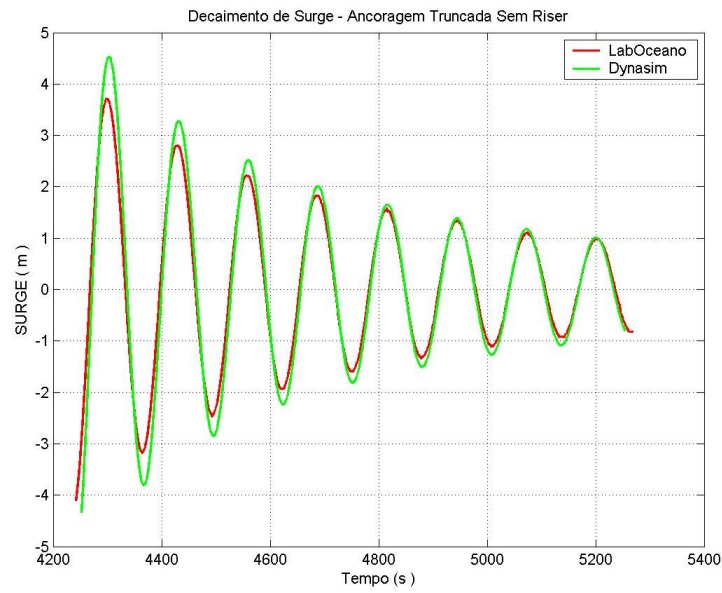


Figura IV.2 – Decaimento de Surge: Truncado sem Riser

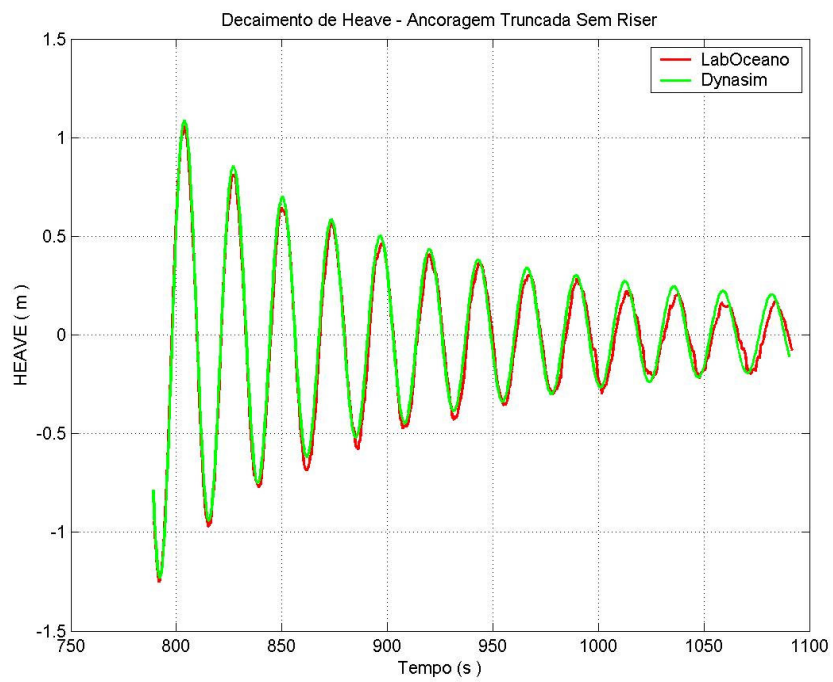


Figura IV.3 - Decaimento de Heave: Truncado sem Riser

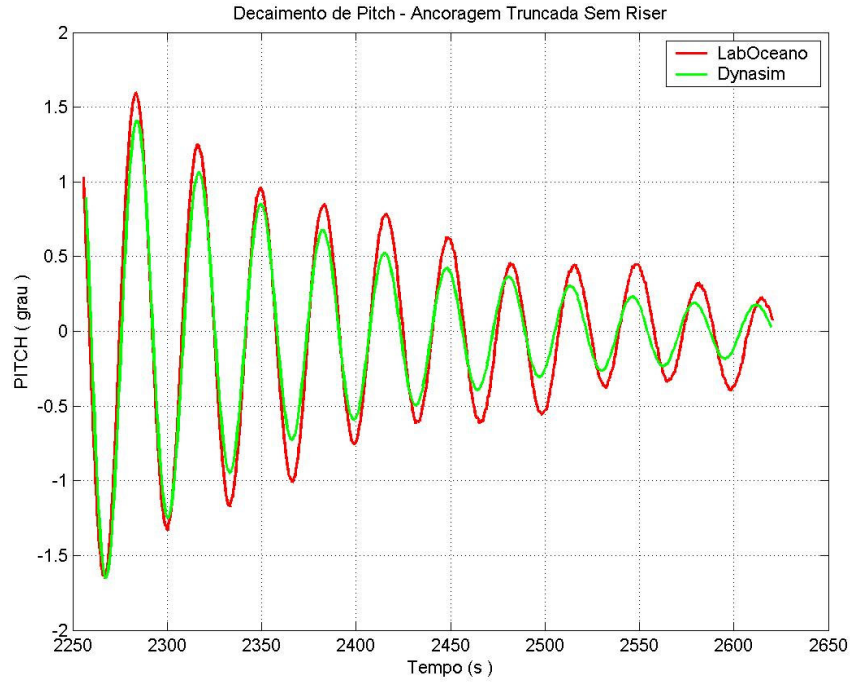


Figura IV.4 - Decaimento de Pitch: Truncado sem Riser

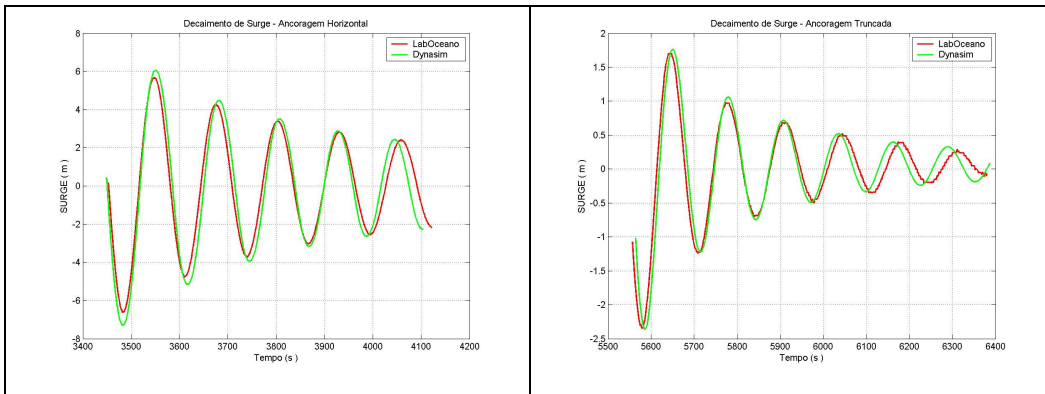


Figura IV.5 – Decaimento de Surge: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

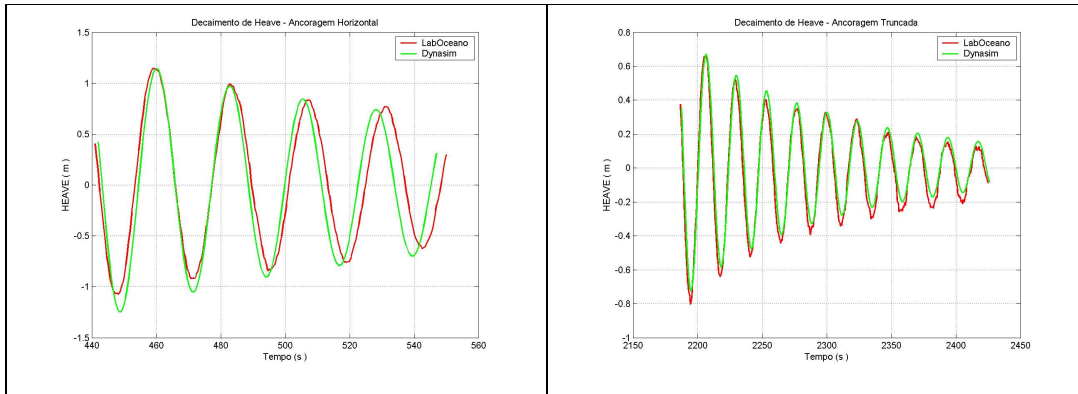


Figura IV.6 – Decaimento de Heave: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

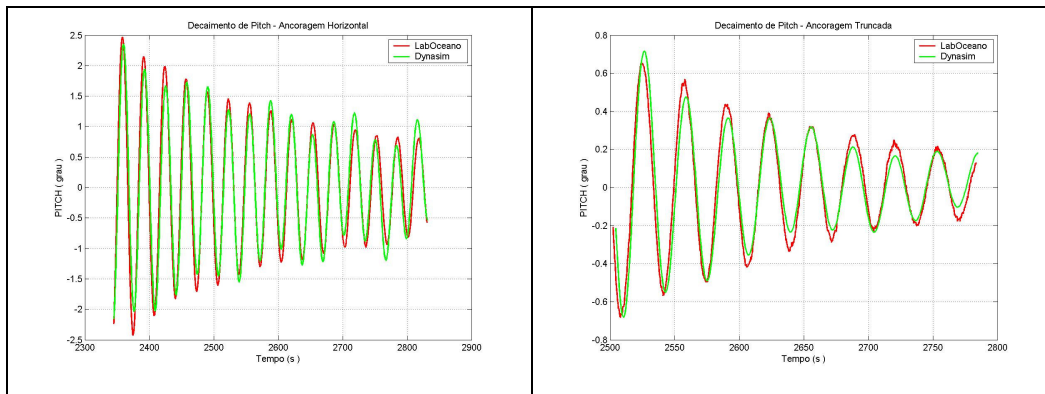


Figura IV.7 – Decaimento de Pitch: Horizontal (esquerda) e Truncado (direita).

Tabela IV.1 – Tabela de decaimento com ancoragem horizontal

Movimento	Horizontal					
	Tn		P1		P2	
	LabOceano	Dynasim	LabOceano	Dynasim	LabOceano	Dynasim
Surge	127.04	127.00	0.00044	0.00046	0.01945	0.01949
Heave	23.66	22.83	0.00319	0.00321	0.04642	0.04359
Pitch	32.93	32.50	0.00136	0.00317	0.96555	0.00425

Tabela IV.2 – Tabela de decaimento com ancoragem truncada.

Movimento	Truncado					
	Tn		P1		P2	
	LabOceano	Dynasim	LabOceano	Dynasim	LabOceano	Dynasim
Surge	128.50	128.50	0.00359	0.00327	0.08906	0.08979
Heave	23.29	23.33	0.01009	0.01010	0.05253	0.05525
Pitch	32.61	32.33	0.01004	0.01113	1.28370	0.00485

IV.3. Ondas Irregulares

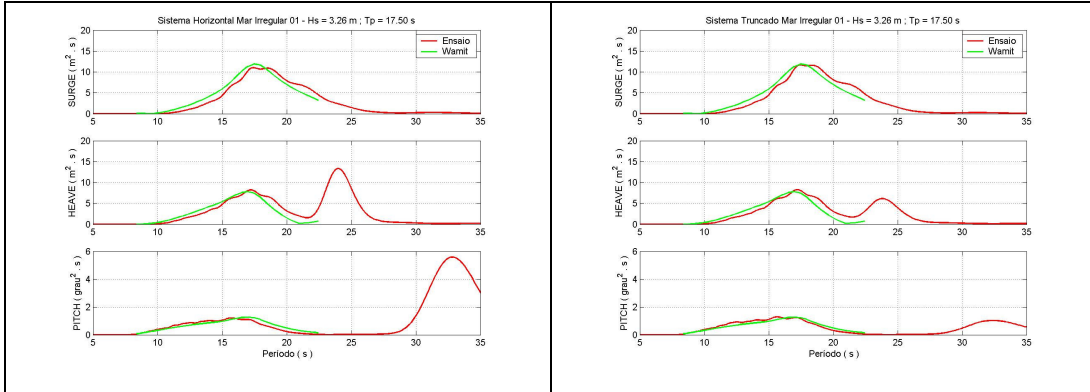


Figura IV.8 – Ajustes dos espectros de movimentos de 1ª ordem para mar 01 ($H_s = 3.26 \text{ m}$; $T_p = 17.5 \text{ s}$): Sistema Horizontal (esquerda), Sistema Truncado (direita).

Tabela IV.3 – Matriz de amortecimento linear do Sistema Horizontal e Truncado para o mar 01 ($H_s = 3.26 \text{ m}$; $T_p = 17.5 \text{ s}$)

400.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	362.586	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	185.300	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela IV.4 – Força de 2ª ordem do Sistema Horizontal e Truncado para o mar 01 (Hs = 3.26 m ; Tp = 17.5 s)

ômega (rad/s)	Heave (KN ² .s)	Roll (KN ² .m.s)	Pitch (KN ² .m.s)
0.16	8.44E+04	0.00E+00	3.38E+07
0.17	8.77E+04	0.00E+00	3.66E+07
0.18	8.85E+04	0.00E+00	3.96E+07
0.19	9.12E+04	0.00E+00	4.28E+07
0.2	9.50E+04	0.00E+00	4.63E+07
0.21	9.61E+04	0.00E+00	4.98E+07
0.22	9.71E+04	0.00E+00	5.35E+07
0.23	1.01E+05	0.00E+00	5.72E+07
0.24	1.01E+05	0.00E+00	6.07E+07
0.25	9.95E+04	0.00E+00	6.38E+07
0.26	9.57E+04	0.00E+00	6.60E+07
0.27	9.22E+04	0.00E+00	6.80E+07
0.28	8.99E+04	0.00E+00	6.98E+07
0.29	8.86E+04	0.00E+00	7.16E+07
0.3	8.66E+04	0.00E+00	7.34E+07
0.31	8.25E+04	0.00E+00	7.53E+07
0.32	7.67E+04	0.00E+00	7.70E+07
0.33	7.47E+04	0.00E+00	7.58E+07

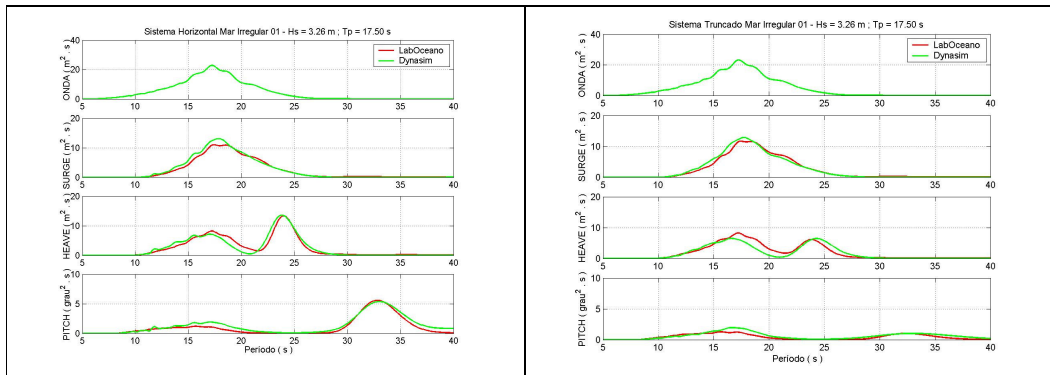


Figura IV.9 - Espectros LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

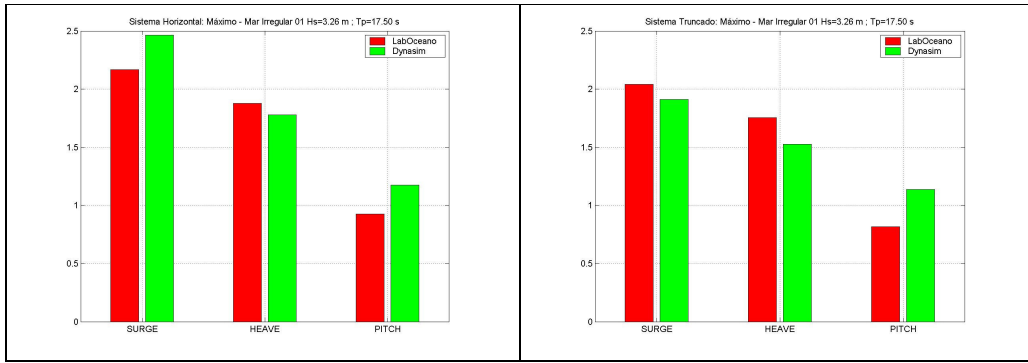


Figura IV.10 – Máximo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

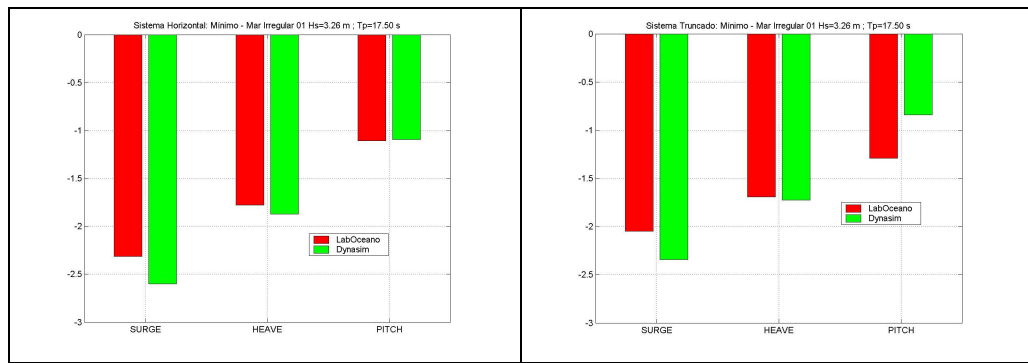


Figura IV.11 – Mínimo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

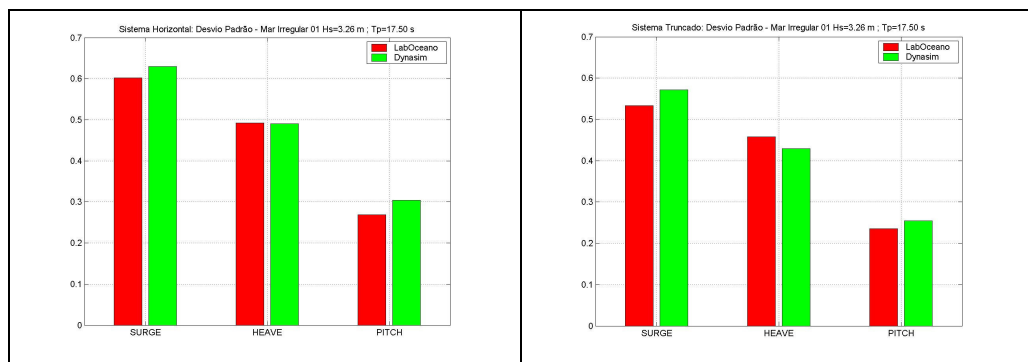


Figura IV.12 – Desvio Padrão LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

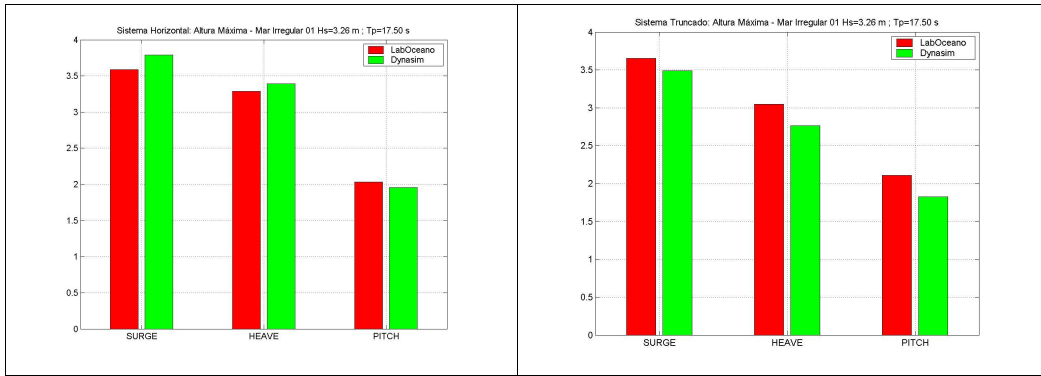


Figura IV.13 – Altura Máxima LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

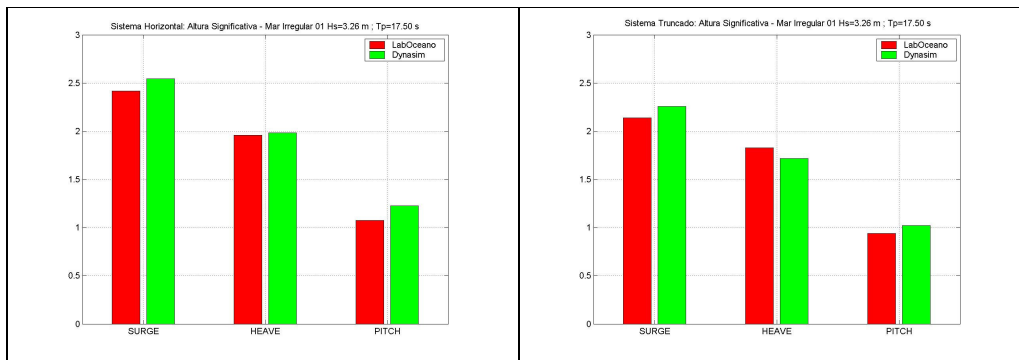


Figura IV.14 – Altura Significativa LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

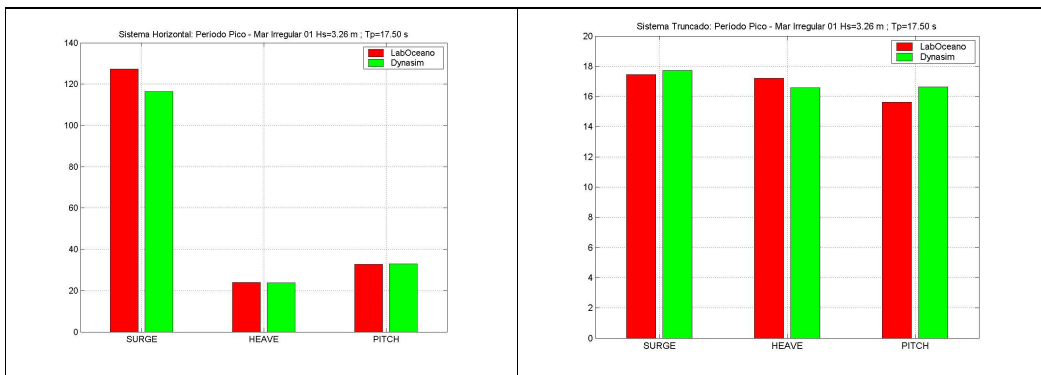


Figura IV.15 – Período de Pico LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

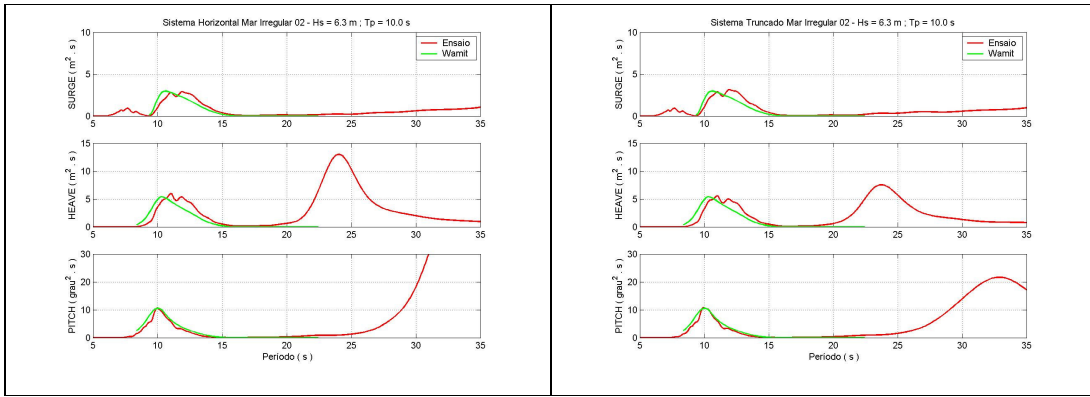


Figura IV.16 – Ajustes dos espectros de movimentos de 1ª ordem para mar 02 ($H_s = 6.30 \text{ m}$; $T_p = 10.0 \text{ s}$): Sistema Horizontal (esquerda), Sistema Truncado (direita).

Tabela IV.5 – Matriz de amortecimento linear do Sistema Horizontal e Truncado para mar 02 ($H_s = 6.30 \text{ m}$; $T_p = 10.0 \text{ s}$)

1750.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	1431.261	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	99.800	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela IV.6 – Força de 2ª ordem do Sistema Horizontal e Truncado para o Mar 02 (Hs = 6.30 m ; Tp = 10.0 s)

ω (rad/s)	Heave (KN ² .s)	Roll (KN ² .m.s)	Pitch (KN ² .m.s)
0.16	1.692E+06	0.00E+00	6.745E+08
0.17	1.530E+06	0.00E+00	6.964E+08
0.18	1.305E+06	0.00E+00	6.744E+08
0.19	1.173E+06	0.00E+00	6.431E+08
0.2	1.122E+06	0.00E+00	6.026E+08
0.21	8.743E+05	0.00E+00	5.549E+08
0.22	7.111E+05	0.00E+00	5.027E+08
0.23	5.823E+05	0.00E+00	4.427E+08
0.24	4.929E+05	0.00E+00	3.805E+08
0.25	3.841E+05	0.00E+00	3.204E+08
0.26	3.040E+05	0.00E+00	2.627E+08
0.27	2.251E+05	0.00E+00	2.115E+08
0.28	1.717E+05	0.00E+00	1.649E+08
0.29	1.239E+05	0.00E+00	1.198E+08
0.3	8.362E+04	0.00E+00	8.824E+07
0.31	5.406E+04	0.00E+00	5.828E+07
0.32	3.681E+04	0.00E+00	3.412E+07
0.33	2.441E+04	0.00E+00	1.968E+07

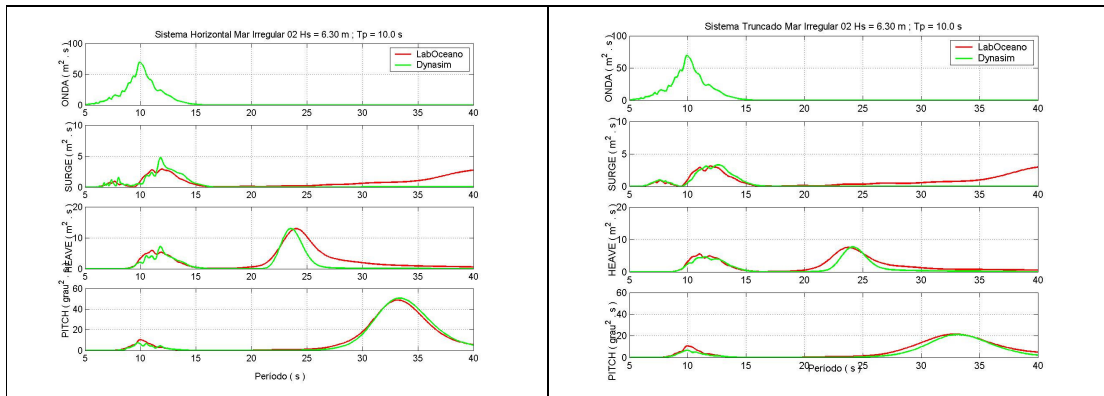


Figura IV.17 - Espectros LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

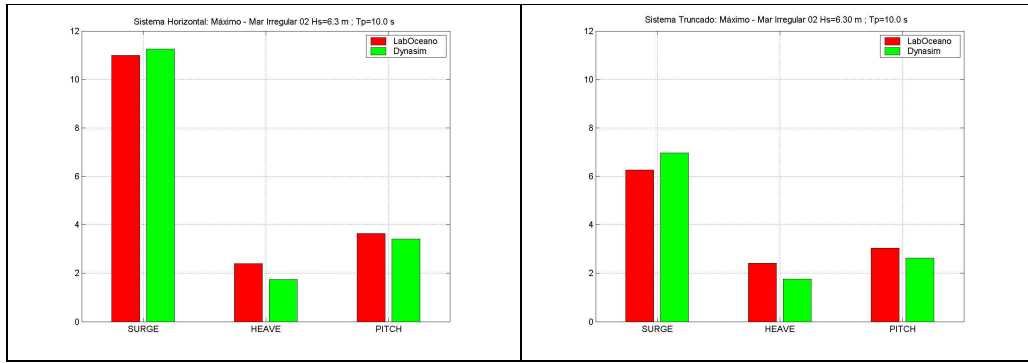


Figura IV.18 – Máximo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

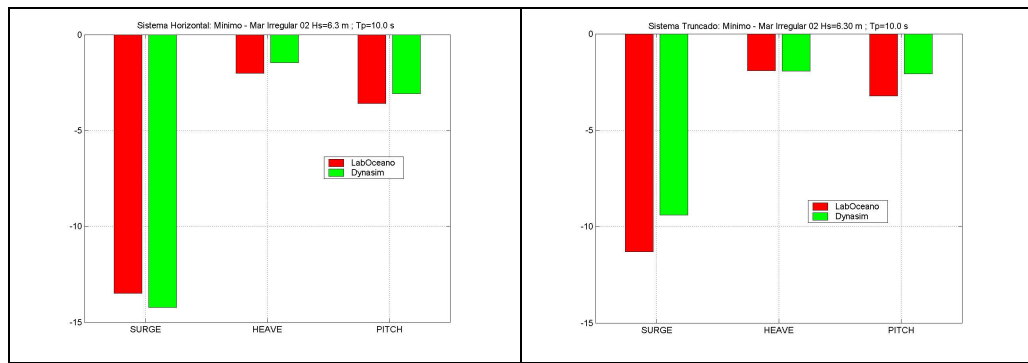


Figura IV.19 – Mínimo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

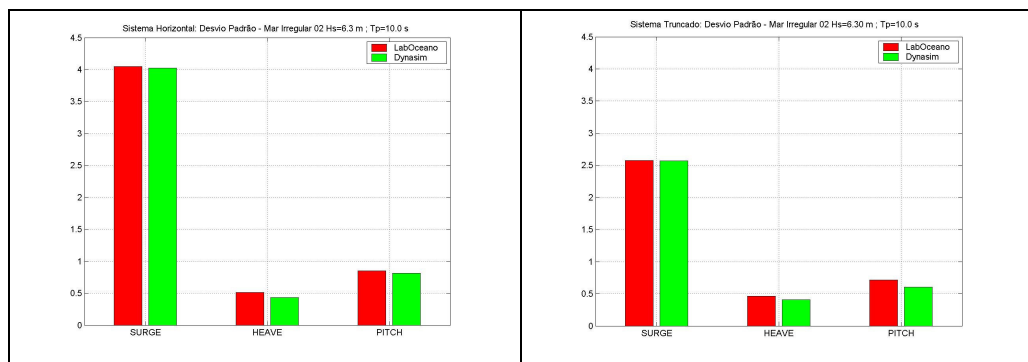


Figura IV.20 – Desvio Padrão LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

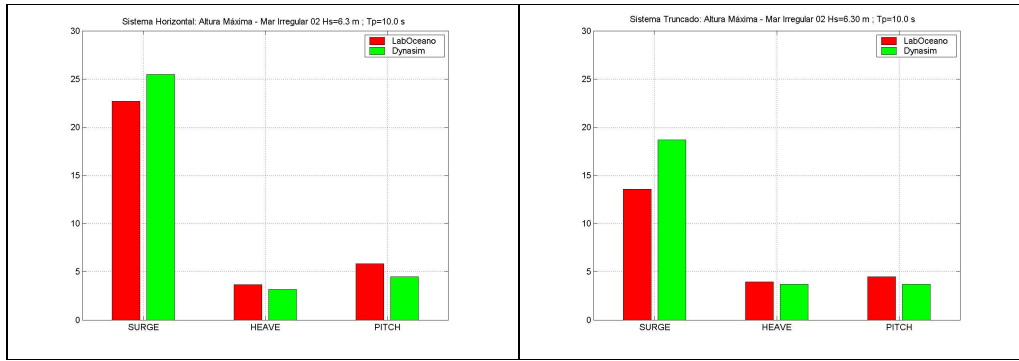


Figura IV.21 – Altura Máxima LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

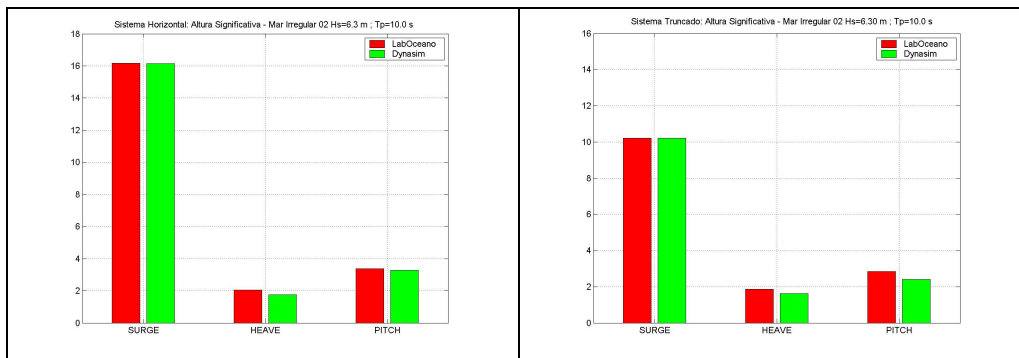


Figura IV.22 – Altura Significativa LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

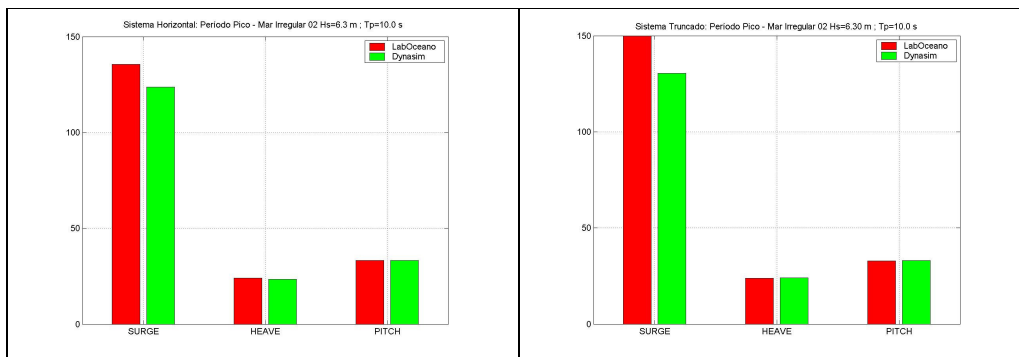


Figura IV.23 – Período de Pico LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

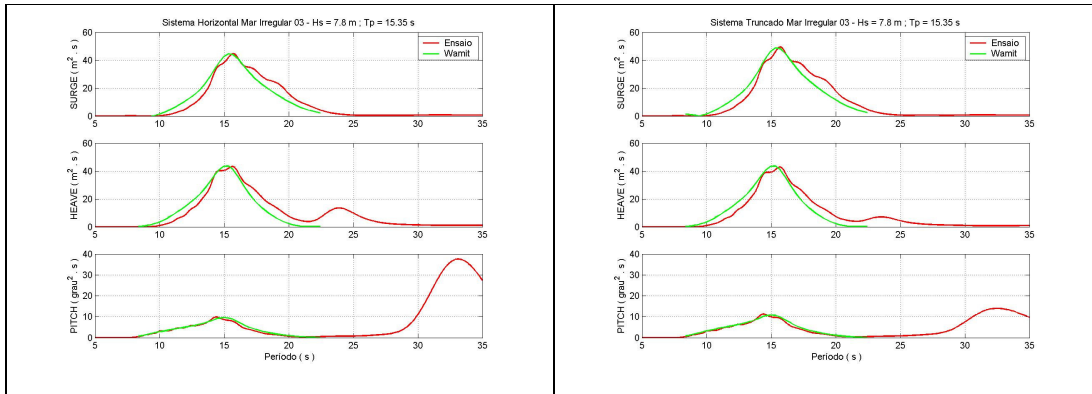


Figura IV.24 – Ajustes dos espectros de movimentos de 1ª ordem para mar 03 ($H_s = 7.80 \text{ m}$; $T_p = 15.35 \text{ s}$): Sistema Horizontal (esquerda), Sistema Truncado (direita).

Tabela IV.7 – Matriz de amortecimento linear do Sistema Horizontal para mar 03 ($H_s = 7.80 \text{ m}$; $T_p = 15.35 \text{ s}$)

650.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	477.0871	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	185.300	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela IV.8 – Força de 2ª ordem do Sistema Horizontal para o Mar 03 (Hs = 7.80 m ;
Tp = 15.35 s)

ômega (rad/s)	Heave (KN ² .s)	Roll (KN ² .m.s)	Pitch (KN ² .m.s)
0.16	4.362E+06	0.00E+00	1.635E+09
0.17	4.477E+06	0.00E+00	1.808E+09
0.18	4.384E+06	0.00E+00	1.980E+09
0.19	4.411E+06	0.00E+00	2.158E+09
0.2	4.641E+06	0.00E+00	2.335E+09
0.21	4.733E+06	0.00E+00	2.509E+09
0.22	4.659E+06	0.00E+00	2.680E+09
0.23	4.563E+06	0.00E+00	2.831E+09
0.24	4.508E+06	0.00E+00	2.947E+09
0.25	4.420E+06	0.00E+00	3.026E+09
0.26	4.202E+06	0.00E+00	3.070E+09
0.27	4.024E+06	0.00E+00	3.118E+09
0.28	3.849E+06	0.00E+00	3.151E+09
0.29	3.705E+06	0.00E+00	3.158E+09
0.3	3.484E+06	0.00E+00	3.135E+09
0.31	3.152E+06	0.00E+00	3.067E+09
0.32	2.848E+06	0.00E+00	2.869E+09
0.33	2.776E+06	0.00E+00	2.539E+09

Tabela IV.9 – Matriz de amortecimento linear do Sistema Truncado para mar 03 (Hs=
7.80 m ; Tp= 15.35 s)

550.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	477.0871	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	156.800	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela IV.10 – Força de 2ª ordem do Sistema Truncado para o Mar 03 ($H_s = 7.80 \text{ m}$;
 $T_p = 15.35 \text{ s}$)

ω (rad/s)	Heave ($\text{KN}^2 \cdot \text{s}$)	Roll ($\text{KN}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)	Pitch ($\text{KN}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)
0.16	4.220E+06	0.00E+00	1.601E+09
0.17	4.327E+06	0.00E+00	1.764E+09
0.18	4.229E+06	0.00E+00	1.927E+09
0.19	4.252E+06	0.00E+00	2.096E+09
0.2	4.476E+06	0.00E+00	2.264E+09
0.21	4.560E+06	0.00E+00	2.430E+09
0.22	4.482E+06	0.00E+00	2.592E+09
0.23	4.385E+06	0.00E+00	2.736E+09
0.24	4.331E+06	0.00E+00	2.846E+09
0.25	4.242E+06	0.00E+00	2.921E+09
0.26	4.032E+06	0.00E+00	2.962E+09
0.27	3.858E+06	0.00E+00	3.008E+09
0.28	3.688E+06	0.00E+00	3.041E+09
0.29	3.550E+06	0.00E+00	3.050E+09
0.3	3.338E+06	0.00E+00	3.029E+09
0.31	3.020E+06	0.00E+00	2.964E+09
0.32	2.728E+06	0.00E+00	2.774E+09
0.33	2.667E+06	0.00E+00	2.454E+09

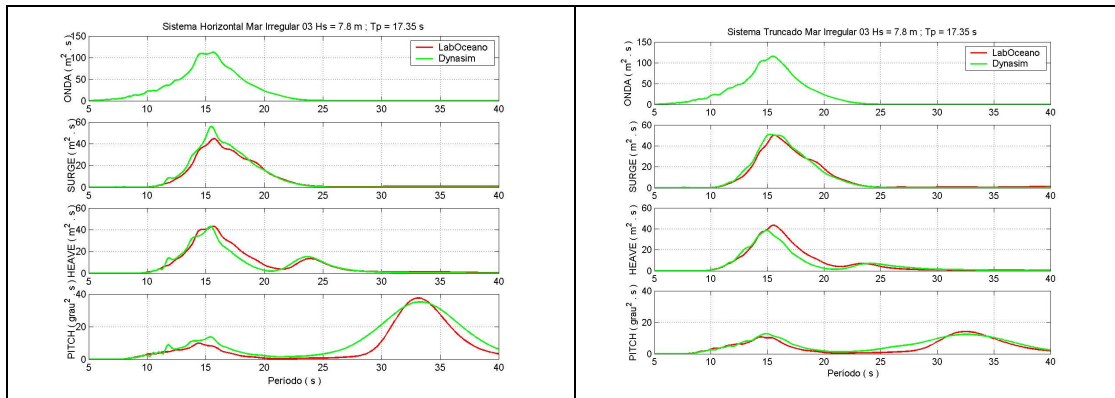


Figura IV.25 - Espectros LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 02 – $H_s = 7.80 \text{ m}$ $T_p = 17.35 \text{ s}$.

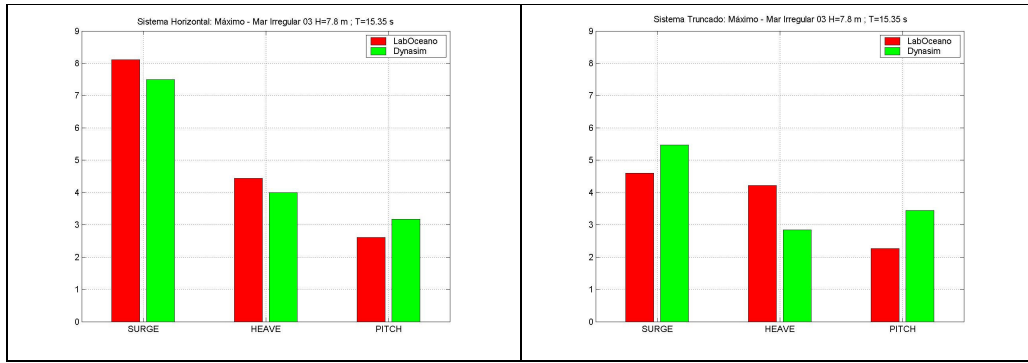


Figura IV.26 – Máximo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

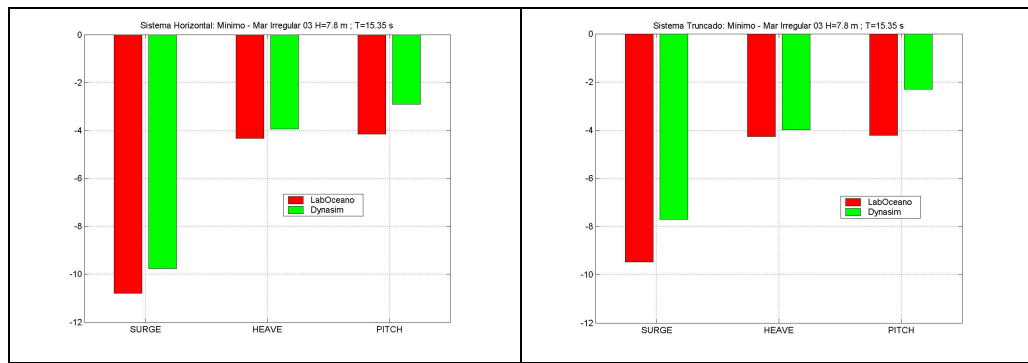


Figura IV.27 – Mínimo LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

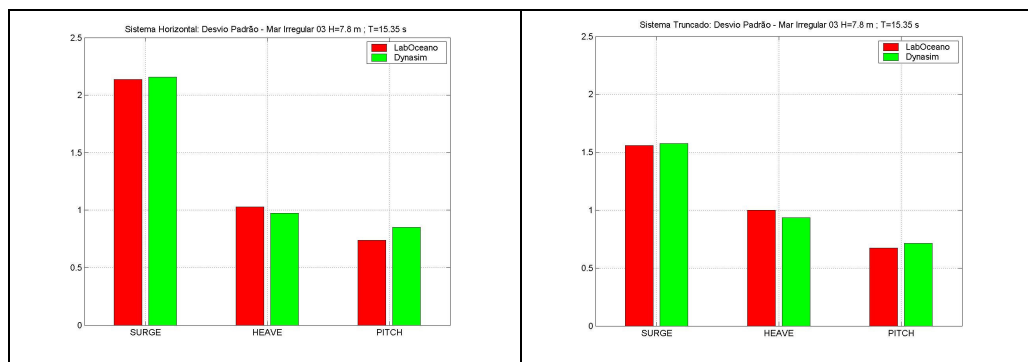


Figura IV.28 – Desvio Padrão LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

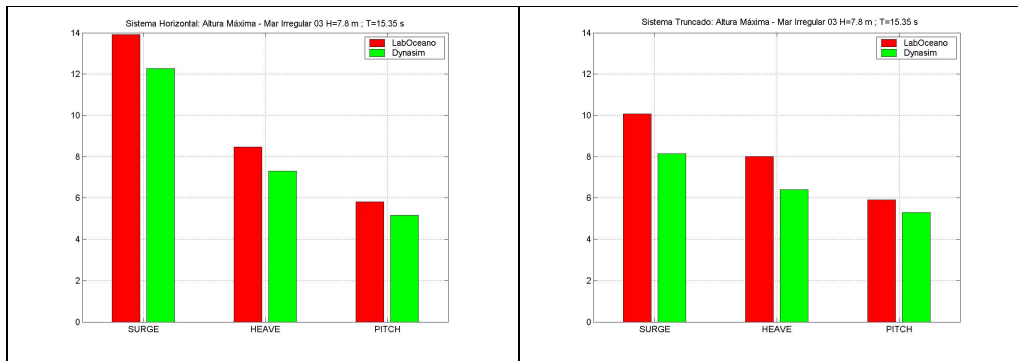


Figura IV.29 – Altura Máxima LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

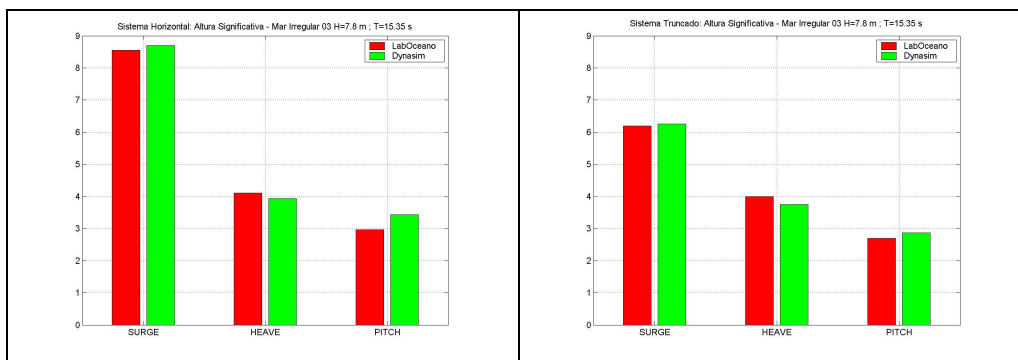


Figura IV.30 – Altura Significativa LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

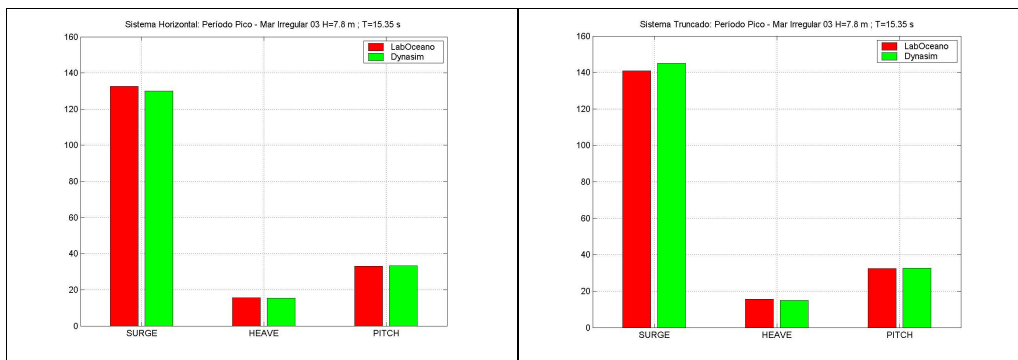


Figura IV.31 – Período de Pico LabOceano (vermelho) e Dynasim (verde): Sistema Horizontal (esquerda) e Truncado (direita) Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

V. COMPARAÇÕES NUMÉRICO-EXPERIMENTAIS DO SISTEMA COMPLETO

Neste Capítulo são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais do sistema completo (obtidos no LabOceano com profundidade de 12,5m) com os resultados das simulações numéricas do sistema completo (DYNASIM), utilizando os coeficientes (amortecimento linear do casco e QTFs) obtidos a partir das calibrações do sistema de ancoragem horizontal e truncado.

Todas as simulações numéricas do sistema completo foram realizadas com os mesmos coeficientes de linhas e risers apresentados no item III.3.1. O tempo de simulação foi de 3 horas, com o passo de tempo de 0.5 s. A seguir são apresentadas as comparações experimentais com os resultados das simulações numéricas.

Nas Figuras V.1 a V.21, em vermelho são apresentados os resultados experimentais do LabOceano, em verde e azul são apresentados os resultados numéricos das simulações do Dynasim do sistema completo utilizando os coeficientes de amortecimento linear (Tabelas V.3, V.5, V.7 e V.9) e de força de 2ª ordem (Tabelas V.4, V.6, V.8 e V.10) dos modelos calibrados horizontais e truncados, denotados na legenda: Dynasim Horizontal e Dynasim Truncado, respectivamente .

As comparações dos resultados espectrais e estatísticos para o mar 01 ($H_s = 3.26$ m ; $T_p = 17.5$ s) são apresentadas nas Figuras V.1 a V.7. Para o mar 02 ($H_s = 6.30$ m ; $T_p = 10.0$ s) nas Figuras V.8 a V.14, e para o mar 03 ($H_s = 7.80$ m ; $T_p = 15.35$ s) nas Figuras V.15 a V.21.

Em todos os mares os resultados numéricos do sistema completo obtidos com os coeficientes da calibração do sistema horizontal apresentaram maior nível de energia, principalmente no movimento de pitch, na região dos períodos naturais dos movimentos. Isto se deve ao fato de que os coeficientes de amortecimento obtidos da calibração horizontal são menores do que os obtidos da calibração do sistema truncado, pois é bom frisar mais uma vez que, as linhas do sistema horizontal não entram em contato com a água. Os resultados numéricos do sistema completo usando

os coeficientes da calibração do sistema truncado houve boa aderência com os resultados experimentais de energia espectral dos movimentos para todos os mares.

Já para os resultados estatísticos, houve boa concordância em todos os mares entre os resultados utilizando tanto os coeficientes oriundos do sistema horizontal quanto do sistema truncado.

Os períodos de pico tiveram algumas discrepâncias dos resultados experimentais devido aos níveis de amortecimentos utilizados nos modelos. O amortecimento linear atua de forma mais significativa nos períodos naturais. Sendo o amortecimento maior ou menor, o nível de energia nesta região varia. Dependendo da excitação de 1ª e 2ª ordem e do amortecimento utilizado, o período de pico pode variar entre a faixa de excitação de 1ª ordem e a faixa do período natural da estrutura. No mar 01, como o amortecimento do modelo completo com os coeficientes do sistema horizontal é menor, prevaleceu no movimento de pitch à energia no período natural. A mesma lógica pode ser observada para os outros dois mares.

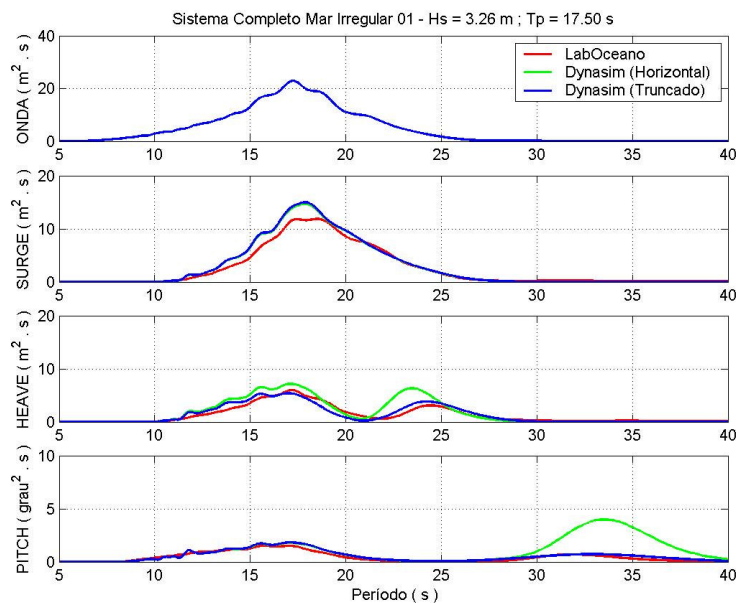


Figura V.1 – Espectros : Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50 s.

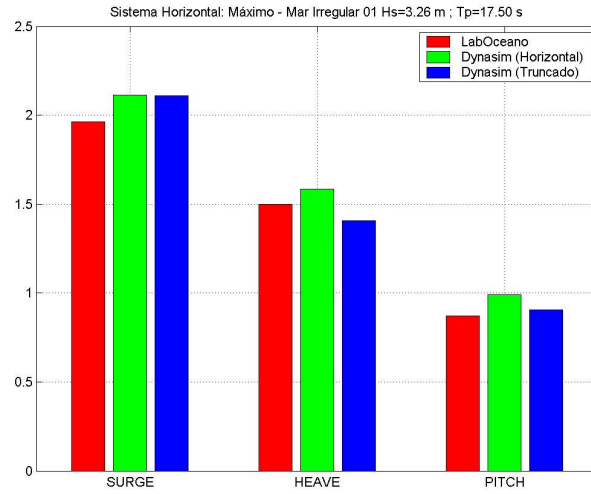


Figura V.2 - Máximo: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50s.

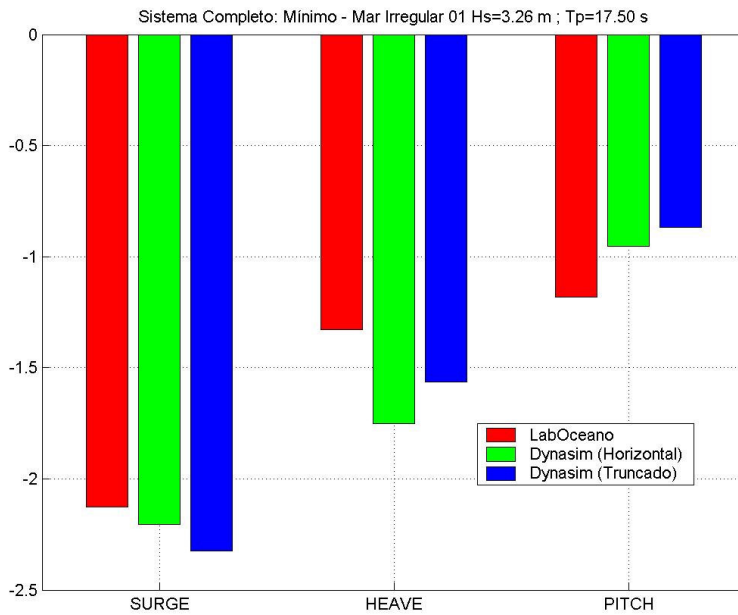


Figura V.3 – Mínimo: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50s.

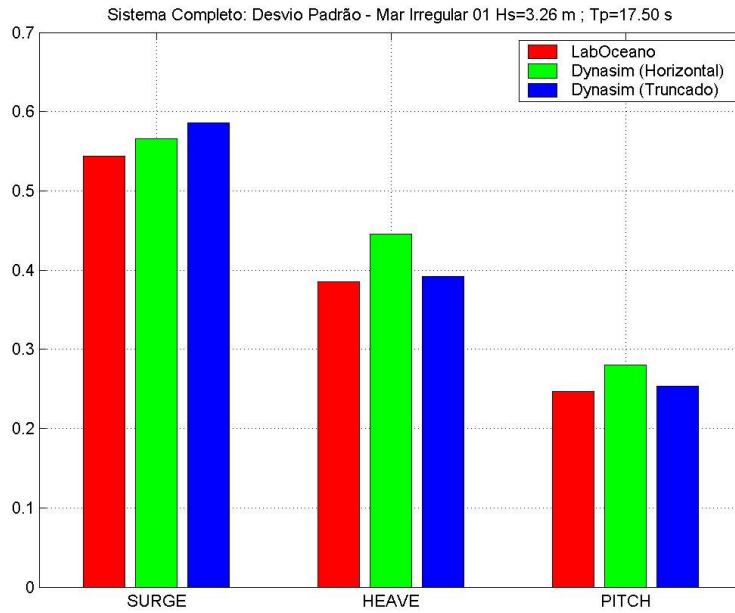


Figura V.4 – Desvio Padrão: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50s.

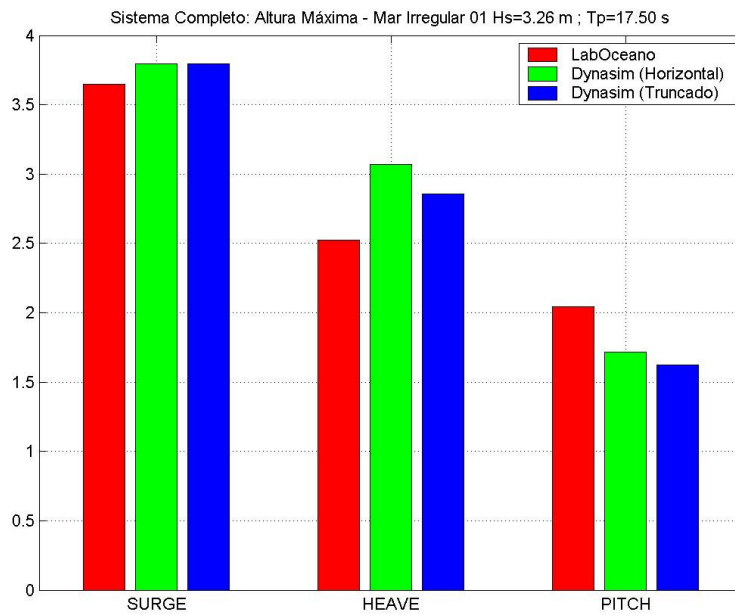


Figura V.5 – Altura Máxima: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m Tp= 17.50s.

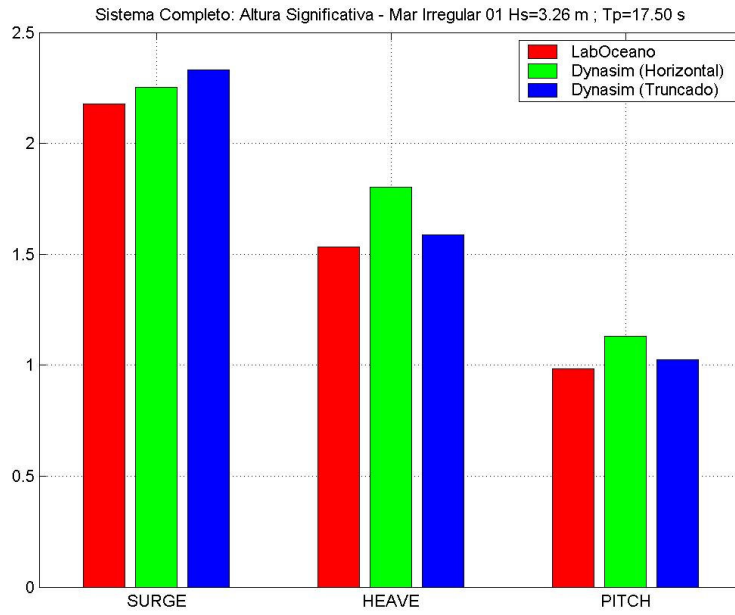


Figura V.6 – Altura Significativa: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m
Tp= 17.50s.

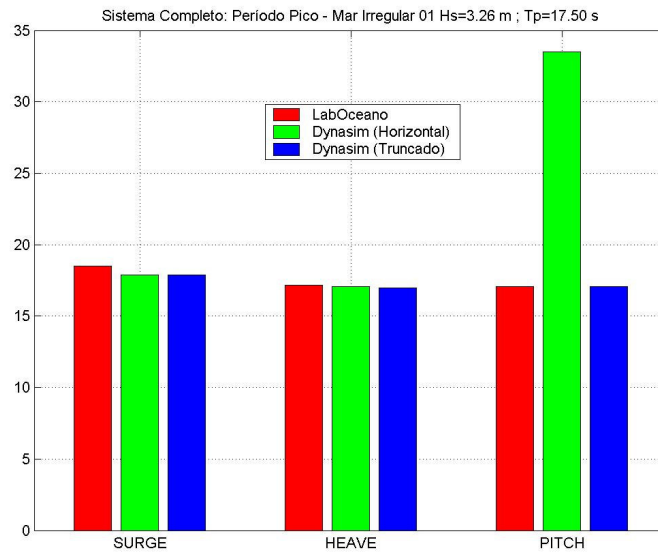


Figura V.7 – Período de Pico: Ancoragem Completa Mar Irregular 01 – Hs= 3.26 m
Tp= 17.50s.

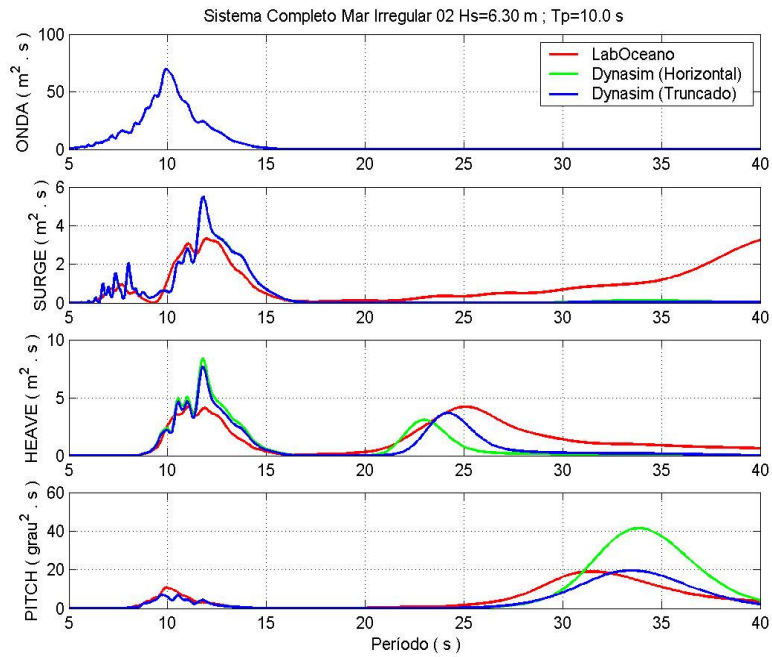


Figura V.8 – Espectros : Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.00 s.

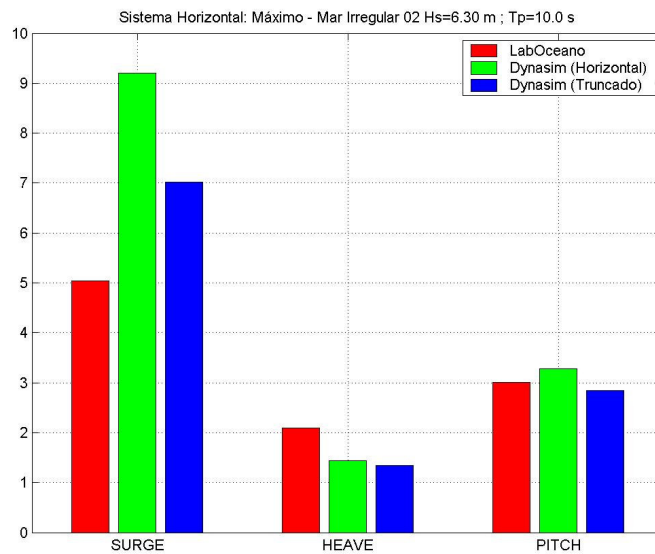


Figura V.9 – Máximo : Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

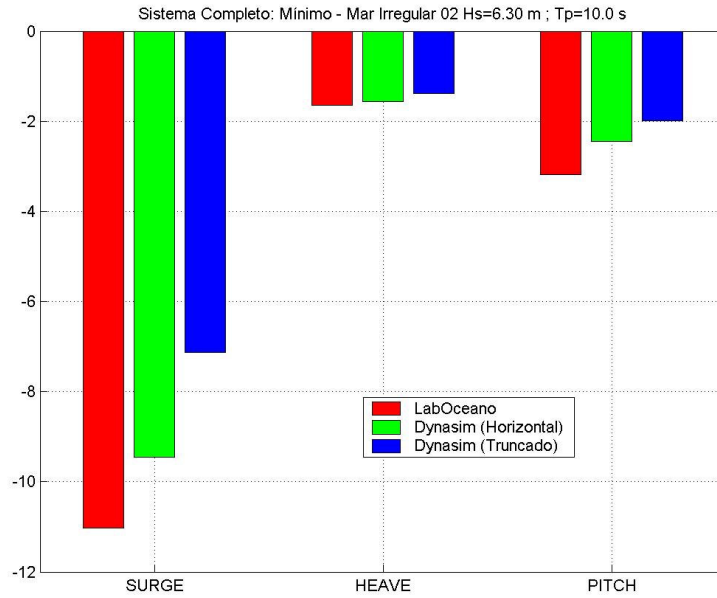


Figura V.10 – Mínimo: Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

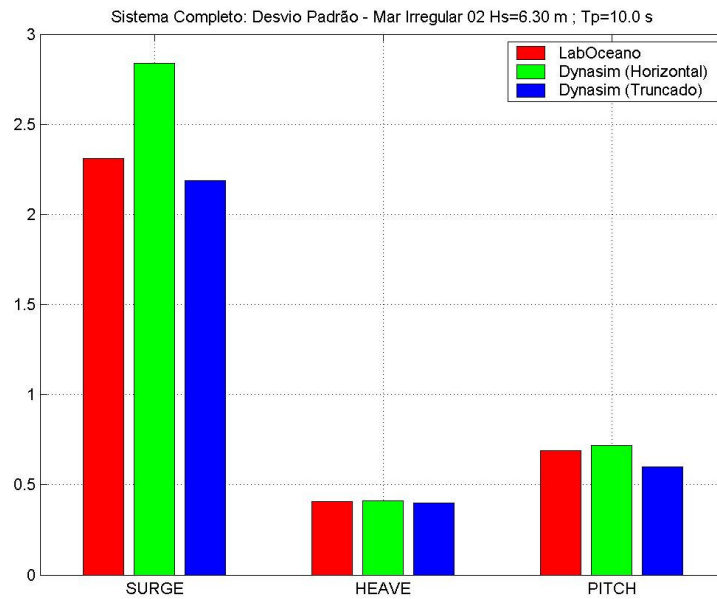


Figura V.11 – Desvio Padrão: Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m Tp= 10.0 s.

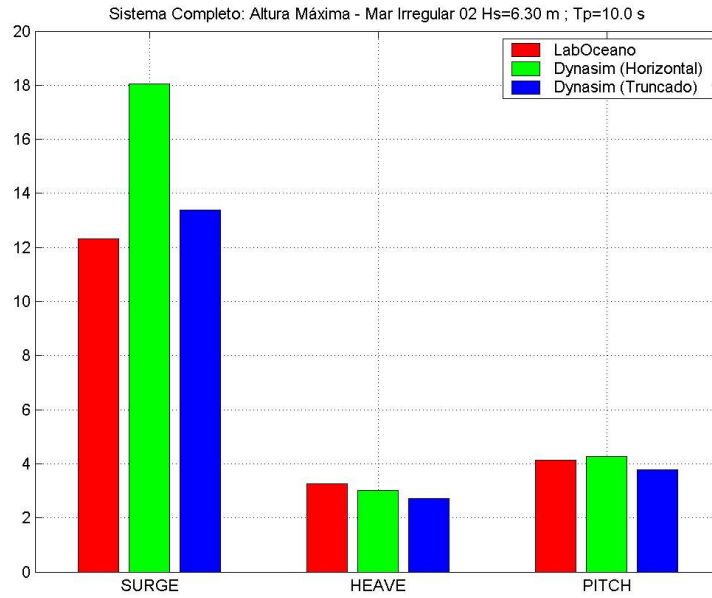


Figura V.12 – Altura Máxima: Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m
Tp= 10.0 s.

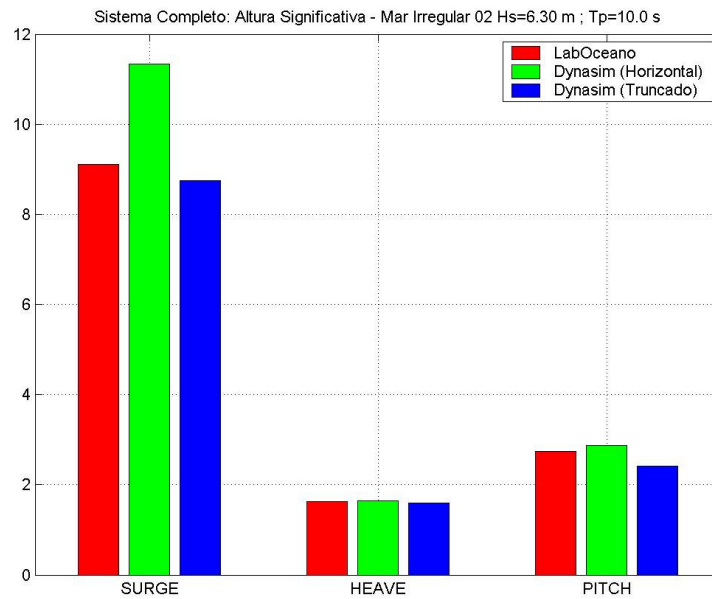


Figura V.13 – Altura Significativa: Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m
Tp= 10.0 s.

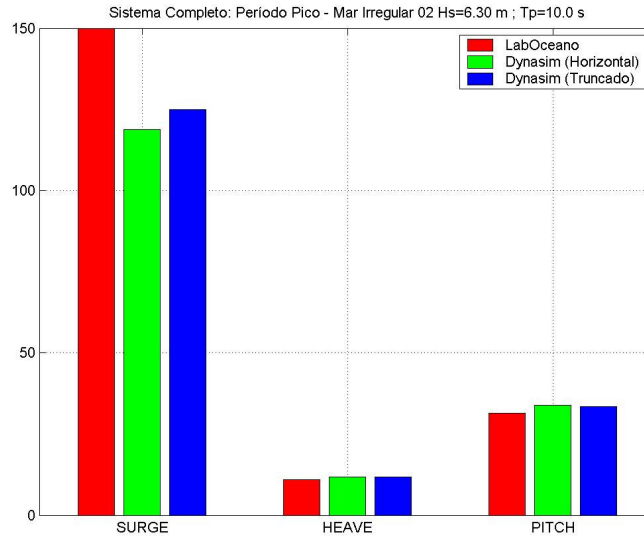


Figura V.14 – Período de Pico : Ancoragem Completa Mar Irregular 02 – Hs= 6.30 m
Tp= 10.0 s.

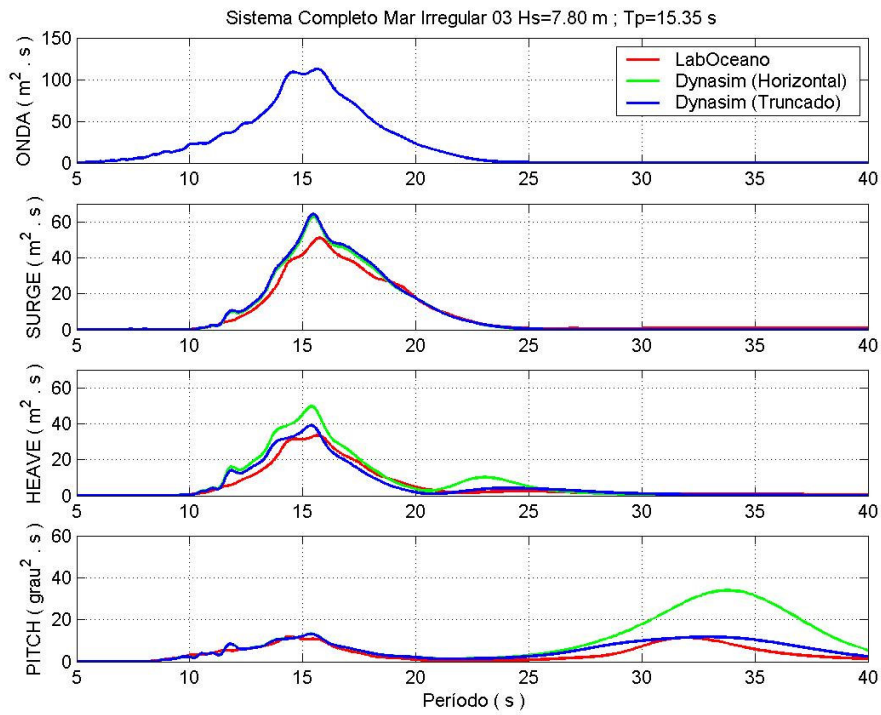


Figura V.15 – Espectros : Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp=
15.35 s.

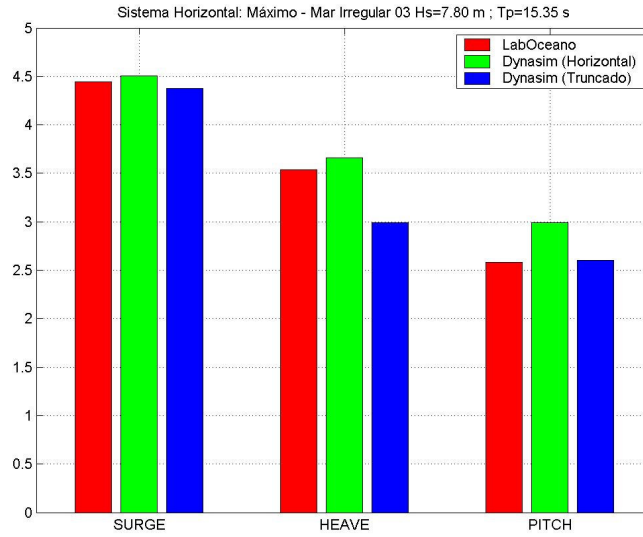


Figura V.16 – Máximo: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

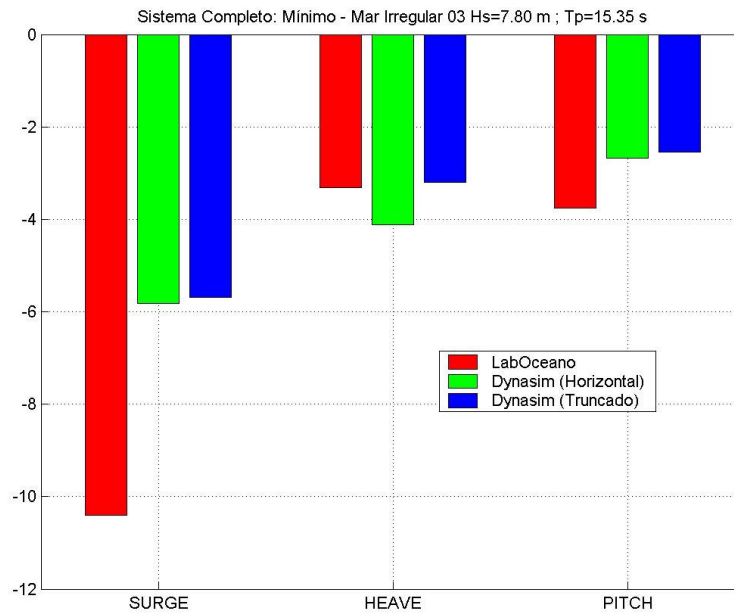


Figura V.17 – Mínimo: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m Tp= 15.35 s.

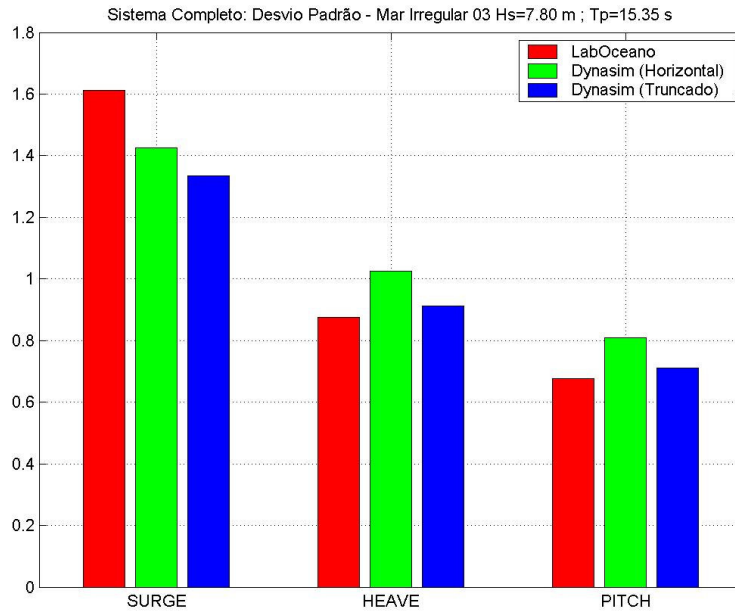


Figura V.18 – Desvio Padrão: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m
Tp= 15.35 s.

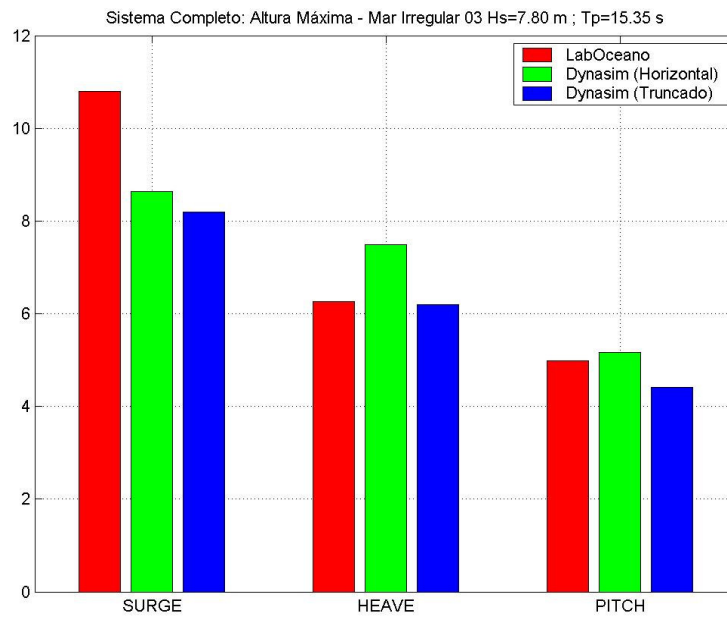


Figura V.19 – Altura Máxima: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m
Tp= 15.35 s.

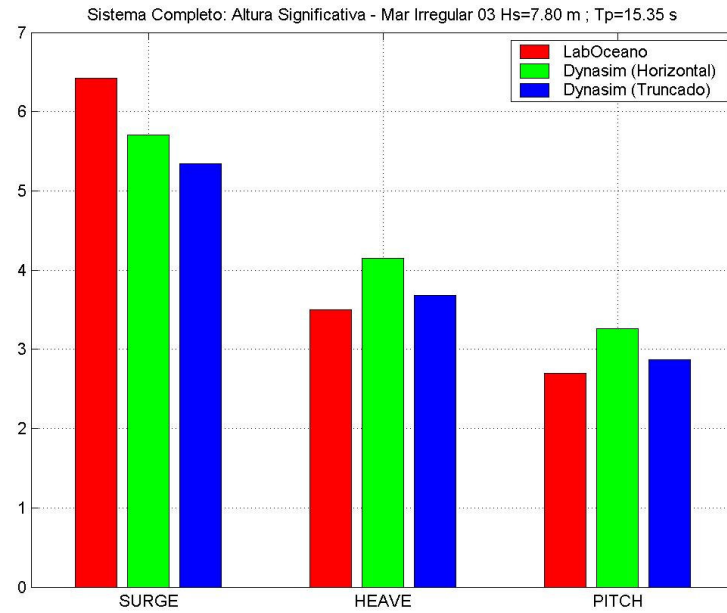


Figura V.20 – Altura Significativa: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m
Tp= 15.35 s.

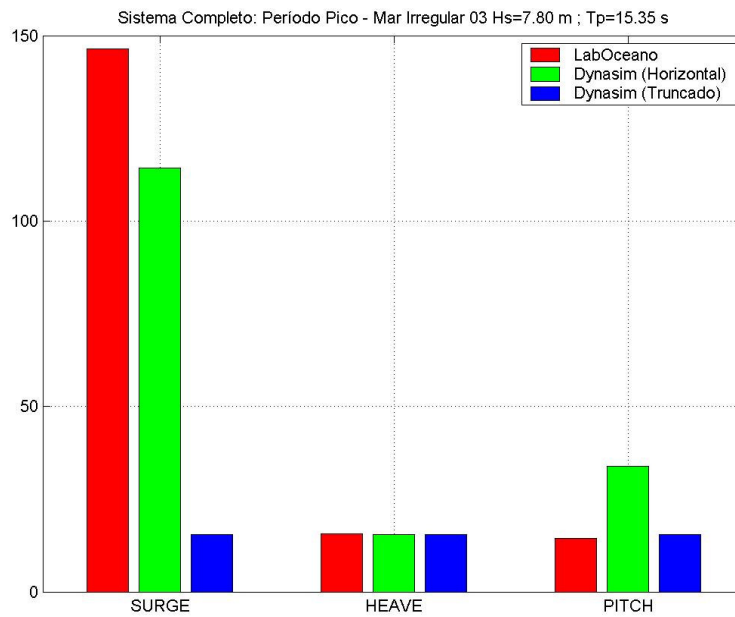


Figura V.21 – Período de Pico: Ancoragem Completa Mar Irregular 03 – Hs= 7.80 m
Tp= 15.35 s.

VI. CONCLUSÕES

O DYNASIM mostrou ser um programa no domínio do tempo de análise acoplada, com efeitos de 2ª ordem no plano horizontal e vertical, robusto e confiável para a simulação da dinâmica dos movimentos de plataformas oceânicas.

A metodologia híbrida com as calibrações do modelo horizontal e truncado proposta para a extrapolação dos resultados de movimentos de plataformas oceânicas mostrou-se adequada para condições ambientais de ondas.

Os resultados espectrais e estatísticos dos laboratórios do Marintek e LabOceano foram acurados, validando e certificando os procedimentos e métodos de execução dos ensaios, medição e aquisição dos sinais de ambos laboratórios.

Foram obtidos excelentes resultados estatísticos das simulações do sistema completo tanto com a extrapolação do modelo de ancoragem horizontal quanto com o modelo com a ancoragem truncada.

Os resultados espectrais das simulações numéricas do modelo completo mostraram ser importante a estimativa do amortecimento do mesmo, visto que no mar 01 a energia espectral do movimento de pitch obtido a partir do modelo horizontal foi muito maior, na região do período natural, do que o efetivo medido no ensaio.

Cuidados na modelação experimental dos modelos com ancoragem horizontal, truncado e completo são fundamentais para uma boa consistência dos resultados.

Algumas defasagens nas curvas espectrais dos movimentos foram observadas, possivelmente devido às diferenças na modelação numérica das linhas do sistema completo com a modelação experimental. É essencial ter o conhecimento das propriedades e dimensões dos materiais das linhas para uma boa modelação numérica.

De modo geral o presente trabalho serviu para validação do software Dynasim, validação do método híbrido com truncamento de linhas (Horizontal e Truncado) e comprovação da qualidade dos laboratórios Marintek e LabOceano através do “benchmarking” de seus resultados.

Trabalhos Futuros

Estudo focado na análise experimental e numérica do comportamento dinâmico das linhas para a sua modelação e conseqüente obtenção de seus coeficientes hidrodinâmicos.

Estudo do amortecimento das linhas no comportamento da dinâmica dos movimentos da plataforma.

Estudo dos efeitos de correnteza na metodologia híbrida com truncagem das linhas para extrapolação do modelo completo.

Validação experimental dos coeficientes de força de 2ª ordem.

Estudo sistemático do procedimento de truncamento para verificar a influência da rigidez das linhas e massa da plataforma no comportamento dinâmico da estrutura.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITTC, *22nd Conference, Report from the Specialist Committee on Deep Water Mooring*, Proceedings, Vol. II, Seoul, Korea & Shanghai, China, (1999), pp. 377 - 398.
- [2] CHAKRABARTI, S. K., *Offshore Structure Modeling*, Volume 9, ed. World Scientific
- [3] CHAKRABARTI, S. K., GRINIUS, V., "Role of Physical Simulation of Deepwater Floating Offshore Structures". *17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1998/0345)*. Lisboa, Portugal, 1998.
- [4] DYER, R.C., AHILAN, R.V., "The Place of Physical and Hydrodynamic Models in Concept Design, Analysis and System Validation of Moored Floating Structures". *19th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2000/OSU OFT 4192)*. New Orleans, LA, USA, 2000.
- [5] MOXNES, S., LARSEN, K., "Ultra Small Scale Testing of a FPSO Ship". In: *17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1998/0381)*. Lisboa, Portugal, 1998.
- [6] STANSBERG, C.T., ORITSLAND, O., KLEIVEN, G., "Reliable Methods for Laboratory Verification of Mooring and Station Keeping in Deep Water". *Offshore Technology Conference 2000 (OTC 2000/12087)*. Houston, TX, USA.
- [7] HUSE, E., KLEIVEN, G., NIELSEN, F.G., "Large Scale Model Testing of Deep Sea Risers". *Offshore Technology Conference 1998 (OTC 1998/8701)*. Houston, TX, USA.
- [8] GRANT, R.G., LITTON, R.W., MAMIDIPUDI, P., "Highly Compliant (HCR) Riser Model Tests and Analysis". *Offshore Technology Conference 1999 (OTC 1999/10973)*. Houston, TX, USA.

- [9] FERREIRA, A.C.P., MACHADO FILHO, R.Z., *Monitoração de Movimentos no Lançamento do Dummy*. In: Comunicação. Técnica PETROBRAS/CENPES, CT/TS – 013/2006.
- [10] WATTS, S., “Hybrid Hydrodynamic Modelling.” *Journal of Offshore Technology* 1999, The Institute of Marine Engineers, London, UK, pp. 13-17.
- [11] WATTS, S., “Simulation of Metocean Dynamics: Extension of Hybrid Modelling Technique to Include Additional Environmental Factors”. *SUT Workshop 2000: Deepwater and Open Ocean, The Design Basis for Floaters*. Houston, TX, USA.
- [12] BUCHNER, B., WICHERS, J.E.W., de Wilde, J.J., “Features of the State-of-the-art Deepwater Offshore Basin”. *Offshore Technology Conference 1999 (OTC 1999/10841)*. Houston, TX, USA.
- [13] DERCKSEN, A., WICHERS, J.E.W., “A Discrete Element Method on a Chain Turret Tanker Exposed to Survival Conditions”. *BOSS 1992 Conference*, Volume 1. London, UK, pp.238-250.
- [14] KIM, M.H., RAN, Z., ZHENG, W., BHAT, S., BEYNET, P., “Hull / Mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time-Domain”. *9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Brest, France, 1999, pp. 301-308.
- [15] CHEN, X., ZHANG, J., JOHNSON, P., IRANI, M., “Studies on the Dynamics of Truncated Mooring Line”. *10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Seattle, WA, USA, 2000, pp. 94-101.
- [16] STANSBERG, C.T., YTTERVIK, R., ORITSLAND, O., KLEIVEN, G., “Hydrodynamic Model Test Verification of a Floating Platform System in 3000 m Water Depth”. *19th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2000a/4145)*. Houston, TX, USA, 2000.
- [17] BAARHOLM, R., STANSBERG, C.T., FYLLING, I., “A Robust Procedure for Ultra Deepwater Model Testing”. *17th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Lisboa, Portugal, 2007.

- [18] COELHO, L.C.G., *Manual do Sistema Dynasim*, Versão 1.4, Análises de Sistema Ancorados
- [19] *DYNASIM - Manual Teórico*, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, Agosto de 2000.
- [20] OMBERG, H., STANSBERG, C.T., YTTERVIK, R., KLEIVEN, G., “Integrated Vessel Motion and Mooring and Analysis Applied in Hybrid Model Testing”. *9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Brest, France, 1999, pp.339 - 346.
- [21] STANSBERG, C.T., ORITSLAND, O., ORMBERG, H., “Challenges in Deep Water Experiments – Hybrid Approach”. *20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2001/1352)*. Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- [22] STANSBERG, C.T., ORITSLAND, O., KLEIVEN, G., “Reliable Methods for Laboratory Verification of Mooring and Station Keeping in Deep Water”. *Offshore Technology Conference 2000 (OTC 2000/12087)*. Houston, TX, USA..
- [23] WAALS, O., VAN DIJK, R.R.T., “Truncation Methods for Deep Water Mooring Systems for a Catenary Moored FPSO and Semi Taut Moored Semisubmersible”. DOT, 2004, New Orleans.
- [24] FYLLING, I.J., STANSBERG, C.T., “Model Testing of Deepwater Floating Production System: Strategy for Truncation of Mooring and Riser”. *Deep Offshore Technology Conference*, Vitoria, Brazil, 2005.
- [25] ITTC (2005), *24nd Conference, Report from the Ocean Committee*, Proceedings, Edinburgh, Scotland.
- [26] WAMIT®, User Manual, Versions 6.2, 6.2PC, 6.2S, 6.2S-PC. Wamit, Inc.
- [27] WAMIT®, 2005 Annual WAMIT Consortium Meeting. *Report*. Massachusetts, oct. 18-19. 200

- [28] MOLIN, B., *Second-Order Hydrodynamics Applied to Moored Structures*. In: 19th WEGEMT School. Nantes, 20-24 September 1993.
- [29] OGILVIE, T.F., "Second-Order Hydrodynamic Effects on Ocean Platforms". *International Workshop on Ship and Platform Motions*, University of California, Berkely, 1983
- [30] CHAKRABARTI, S.K. *Hydrodynamics of Offshore Structure*. 5. ed. Southampton, WIT Press, 1987.
- [31] NEWMAN, J. N., *Marine hydrodynamics*. Cambridge: The MIT Press, 1977.
- [32] FALTISEN, O.M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge Press, 1990.
- [33] NORBINN, N.A. "Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Maneuvering in Deep and Confined Waters". Göteborg, Stantena Skeppsprovninganstalt, 1971.
- [34] Hsu & Blenkan "Analysis of peak mooring forces caused by slow vessel drift oscillations in random waves", OTC 1970
- [35] Newman, I.N. "Second Order Slowly Varying Forces on Vessels in Irregular Waves", Proc. Int. Symp. on Dynamics of Marine Vehicle and Structure, 1974.
- [36] Pinkster, J. A. "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at Sea", Proc. 11th Symp. of Naval Hydodynamics, 1976.
- [37] Marthinsen, T. "Calculation of Slowly varying drift force", Applied Ocean Research. 5, 141-144, 1983.
- [38] Aranha & Fernandes "On the second order low frequency force spectrum", Applied Ocean Research 1994.
- [39] Nishimoto, K.; Aranha, J.A.P.; Matsuura, J.P.J.; Kaster, F.; Namba, H.; Masetti, I.Q.; "Full Scale Decay Test of Moored Tanker: Measurement Procedure of Surge Damping", *16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE 1997.

[40] ORITSLAND, O., BAARHOLM, R., STANSBERG, C.T., *Deep Water Model Testing - Numerical Simulations of Truncated and Full Depth Systems*. In: Marintek Report, Report no 580070.00.03, February 2007.

APÊNDICE I: FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS DO PROGRAMA DYNASIM

Neste Apêndice busca-se apresentar de forma sucinta as formulações matemáticas utilizadas na modelagem numérica das linhas de ancoragem e *risers* como também das unidades flutuantes de sistemas *offshore* acoplados, que se encontram tipicamente em programas baseados em modelos acoplados como o Dynasim. Estudos mais consagrados sobre estas formulações podem ser encontrados na literatura de dinâmica e elementos finitos e *offshore* [30, 31, 32].

No modelo numérico deste estudo não foram consideradas as forças de vento e nem correnteza, porém o programa tem essa capacidade.

AI.1 - Definições Iniciais

Nesta seção são apresentados os sistemas de coordenadas utilizados. Também são definidas as convenções adotadas para representação dos movimentos lineares e angulares dos corpos flutuantes, que na engenharia naval e oceânica são definidos, na língua inglesa, em seis graus de liberdade, como *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*.

AI.2 - Sistema de Coordenadas

Para a representação dos movimentos das estruturas flutuantes, são utilizados dois sistemas de coordenadas de acordo com a Figura A.1. Os diferentes sistemas são descritos a seguir:

- O sistema de coordenadas global, ou inercial, OXYZ é fixo a Terra. A trajetória do movimento do navio, ao longo do tempo, é escrita em relação a este sistema de coordenadas.
- O sistema de coordenadas local Gxyz é fixo ao navio, com origem no centro de gravidade do mesmo. As equações do movimento do navio são escritas e resolvidas neste sistema de coordenadas.

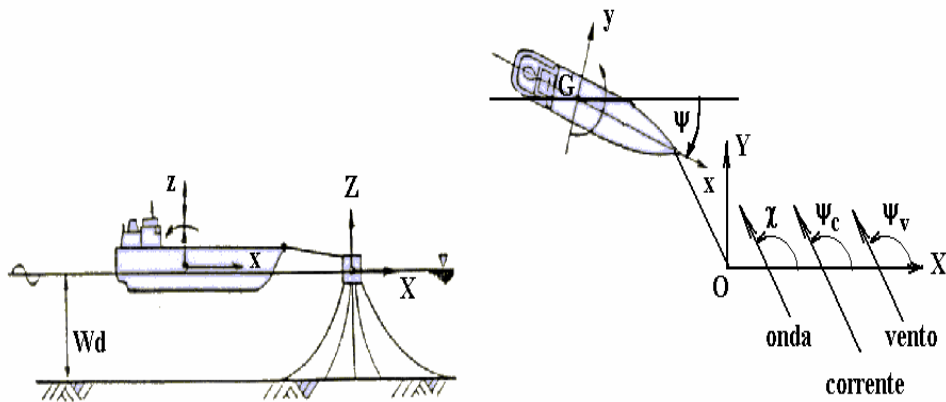


Figura A.1 - Sistema de Coordenadas

dados:

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ - vetor posição (sist. inercial)

$\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6)$ - vetor velocidade (sist. inercial)

$\ddot{\mathbf{x}} = (\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4, \ddot{x}_5, \ddot{x}_6)$ - vetor aceleração (sist. inercial)

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ - vetor deslocamento (sist. local)

$\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6)$ - vetor velocidade (sist. local)

$\ddot{\mathbf{x}} = (\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4, \ddot{x}_5, \ddot{x}_6)$ - vetor aceleração (sist. local)

Os indexadores de 1 a 6 correspondem aos graus de liberdade do navio:

1 - *surge* (movimento linear em x)

2 - *sway* (movimento linear em y)

3 - *heave* (movimento linear em z)

4 - *roll* (movimento de rotação em torno de x)

5 - *pitch* (movimento de rotação em torno de y)

6 - *yaw* (movimento de rotação em torno de z)

O sistema de coordenadas local tem como eixo “x” a direção longitudinal do navio, positivo à vante, e o eixo “z” na direção vertical, positivo para cima, formando um plano vertical de simetria do navio. O eixo “y” é disposto de forma a se obter um sistema de coordenadas positivo. A origem do sistema é colocada no centro de gravidade do navio, de forma a também se obter uma série de simplificações, no caso, nas expressões de inércia do sistema.

AI.3 - Transformação de coordenadas

A transformação de coordenadas do sistema local para o inercial é feita como segue:

$$\begin{aligned} X_j &= T x_j \\ \dot{X}_j &= T \dot{x}_j + \dot{T} x_j, j=1,2,3 \end{aligned} \quad (\text{AI.1})$$

$$\begin{aligned} X_j &= T_R x_j \\ \dot{X}_j &= T_R \dot{x}_j + \dot{T}_R x_j, j=4,5,6 \end{aligned} \quad (\text{AI.2})$$

Onde :

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\sin\psi & -\cos\phi\sin\psi & +\sin\phi\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{AI.3})$$

$$T_R = \begin{bmatrix} 1.0 & \text{sen}\phi \tan\theta & \text{cos}\phi \tan\theta \\ 0.0 & \text{cos}\phi & -\text{sen}\phi \\ 0.0 & \text{sen}\phi \text{sec}\theta & \text{cos}\phi \text{sec}\theta \end{bmatrix} \quad (\text{A1.4})$$

Os ângulos ϕ , θ , ψ das matrizes de transformação T e TR são os ângulos de Euler, definidos segundo Fig A.2.

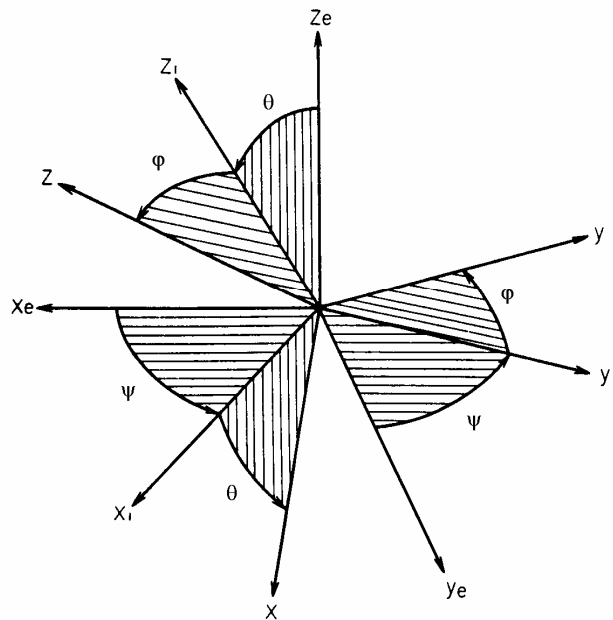


Figura A.2 - Ângulos de Euler

AI.4 - Equações do Movimento

A equação vetorial do movimento do navio em relação ao sistema de coordenadas local, com origem no seu centro de gravidade, pode ser escrita como:

$$M\ddot{x} = F_l + F_v + F_c + F_o + F_{dm} + F_{dl} + F_{am} + F_{res} + F_{pot} + F_{WD} + F_{AC} + F_{DC} \quad (\text{A1.5})$$

onde :

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A1.6})$$

F_I – força inercial adicional, decorrente da análise em um sistema não inercial

F_v – força de vento

F_c – força de corrente

F_o – força de onda de primeira ordem

F_{dm} – força de deriva média de ondas

F_{dl} – força de deriva lenta de ondas

F_{am} – força devida à amarração

F_{res} – força de restauração hidrostática

F_{pot} – força de amortecimento potencial

F_{WD} – força de wave drift damping

F_{AC} – força de amortecimento nas linhas

F_{DC} – força de arraste nas linhas

As equações do movimento do navio serão escritas e resolvidas em relação ao sistema de coordenadas local.

Em [19] são apresentados, com maiores detalhes, os modelos de todas as forças externas consideradas. Aqui serão apresentadas somente as forças que foram realmente utilizadas nas análises.

$$M\ddot{\mathbf{x}} = F_o + F_{dm} + F_{dl} + F_{am} + F_{res} + F_{pot} + F_{dv} \quad (\text{A1.7})$$

A equação do movimento linear, aplicando a 2ª lei de Newton, no sistema local é dada por :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ext} &= m \frac{d\dot{\mathbf{x}}}{dt} = m \frac{d}{dt} (\dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}) \\ &= m \left(\frac{d\dot{x}}{dt}\vec{i} + \dot{x} \frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{d\dot{y}}{dt}\vec{j} + \dot{y} \frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{d\dot{z}}{dt}\vec{k} + \dot{z} \frac{d\vec{k}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (\text{A1.8})$$

para pequenas rotações tem se que:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{i}}{dt} &= \frac{d\psi}{dt}\vec{j} - \frac{d\theta}{dt}\vec{k} \\ \frac{d\vec{j}}{dt} &= -\frac{d\psi}{dt}\vec{i} + \frac{d\phi}{dt}\vec{k} \\ \frac{d\vec{k}}{dt} &= \frac{d\theta}{dt}\vec{i} - \frac{d\phi}{dt}\vec{j} \end{aligned} \quad (\text{A1.9})$$

assim, a equação (A1.8) fica:

$$\mathbf{F}_{ext} = m \left(\ddot{x}\vec{i} + \dot{x}(\dot{\psi}\vec{j} - \dot{\theta}\vec{k}) + \ddot{y}\vec{j} + \dot{y}(-\dot{\psi}\vec{i} + \dot{\phi}\vec{k}) + \ddot{z}\vec{k} + \dot{z}(\dot{\theta}\vec{i} - \dot{\phi}\vec{j}) \right) \quad (\text{A1.10})$$

rearranjando:

$$\mathbf{F}_{ext} = m \left[(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\psi} + \dot{z}\dot{\theta})\vec{i} + (\ddot{y} + \dot{x}\dot{\psi} - \dot{z}\dot{\phi})\vec{j} + (\ddot{z} - \dot{x}\dot{\theta} + \dot{y}\dot{\phi})\vec{k} \right] \quad (\text{A1.11})$$

ou ainda, pela notação indexada:

$$\mathbf{F}_{ext} = m \left[(\ddot{x}_1 - \dot{x}_2 \dot{x}_6 + \dot{x}_3 \dot{x}_5) \vec{i} + (\ddot{x}_2 + \dot{x}_1 \dot{x}_6 - \dot{x}_3 \dot{x}_4) \vec{j} + (\ddot{x}_3 - \dot{x}_1 \dot{x}_5 + \dot{x}_2 \dot{x}_4) \vec{k} \right] \quad (\text{A1.12})$$

Os termos $(\ddot{x}_1 - \dot{x}_2 \dot{x}_6 + \dot{x}_3 \dot{x}_5), (\ddot{x}_2 + \dot{x}_1 \dot{x}_6 - \dot{x}_3 \dot{x}_4) e (\ddot{x}_3 - \dot{x}_1 \dot{x}_5 + \dot{x}_2 \dot{x}_4)$ equivalem às componentes da aceleração do navio em relação ao sistema de coordenadas local, instantâneo.

Para os movimentos angulares tem-se:

$$\mathbf{M}_{ext} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_X & -I_{XY} & -I_{XZ} \\ -I_{YX} & I_Y & -I_{YZ} \\ -I_{ZX} & -I_{ZY} & I_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{A1.13})$$

Caso a distribuição de massa seja simétrica vamos obter a seguinte expressão:

$$\mathbf{M}_{ext} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_X & 0 & 0 \\ 0 & I_Y & 0 \\ 0 & 0 & I_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{A1.14})$$

OU:

$$\mathbf{M}_{ext} = \frac{d}{dt} (I_X \dot{\phi} \vec{i} + I_Y \dot{\theta} \vec{j} + I_Z \dot{\psi} \vec{k}) \quad (\text{A1.15})$$

$$\mathbf{M}_{ext} = \frac{d(I_X \dot{\phi})}{dt} \vec{i} + I_X \dot{\phi} \frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{d(I_Y \dot{\theta})}{dt} \vec{j} + I_Y \dot{\theta} \frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{d(I_Z \dot{\psi})}{dt} \vec{k} + I_Z \dot{\psi} \frac{d\vec{k}}{dt} \quad (\text{A1.16})$$

Sabendo que o navio tenha a massa constante com o tempo, e consequentemente a inércia, e derivando os versores tem-se:

$$\mathbf{M}_{ext} = I_X \ddot{\phi} \vec{i} + I_X \dot{\phi} (\dot{\psi} \vec{j} + \dot{\theta} \vec{k}) + I_Y \ddot{\theta} \vec{j} + I_Y \dot{\theta} (\dot{\phi} \vec{k} + \dot{\psi} \vec{i}) + I_Z \ddot{\psi} \vec{k} + I_Z \dot{\psi} (\dot{\theta} \vec{i} + \dot{\phi} \vec{j}) \quad (\text{A1.17})$$

rearranjando:

$$\mathbf{M}_{ext} = [I_X \ddot{\phi} + \dot{\theta} \dot{\psi} (I_Z - I_Y)] \vec{i} + [I_Y \ddot{\theta} + \dot{\psi} \dot{\phi} (I_X - I_Z)] \vec{j} + [I_Z \ddot{\psi} + \dot{\phi} \dot{\theta} (I_Y - I_X)] \vec{k} \quad (A1.18)$$

ou ainda, pela notação indexada:

$$\mathbf{M}_{ext} = [I_X \ddot{x}_4 + \dot{x}_5 \dot{x}_6 (I_Z - I_Y)] \vec{i} + [I_Y \ddot{x}_5 + \dot{x}_6 \dot{x}_4 (I_X - I_Z)] \vec{j} + [I_Z \ddot{x}_6 + \dot{x}_4 \dot{x}_5 (I_Y - I_X)] \vec{k} \quad (A1.19)$$

AI.6 - Força de Onda (F_o)

As embarcações quando em mar irregular estão sujeitas a forças de onda, que podem ser divididas em três componentes:

1. A componente de alta frequência, na faixa de frequência das ondas, também chamado de Força de Onda de Primeira Ordem, são linearmente proporcionais a altura das ondas.
2. Componente constante, ou Força de Deriva Média.
3. Componente de baixa frequência, ou Força de Deriva Lenta, de intensidade menor que as duas primeiras. As frequências das Forças de Deriva Lenta estão associadas às frequências dos grupos de ondas, encontradas em mar irregular.

As duas últimas componentes são de segunda ordem, ou seja, são proporcionais à altura da onda ao quadrado.

Para a determinação dos efeitos das ondas sobre a dinâmica do navio amarrado, foram adotados modelos para determinar separadamente cada uma das componentes acima elencadas.

Força de Onda de Primeira Ordem (F_o)

Os espectros de forças de ondas de primeira ordem são calculados pelo cruzamento espectral, e o método de transformação inversa de Fourier é utilizado para geração da série temporal das forças de ondas de primeira ordem, atuantes no navio.

Dada a Função de transferência da força de excitação:

$$F_{z_j}(\chi, \omega) \text{ para } j = 3, 4, 5$$

Os espectros de força e momento podem ser calculados por:

$$S_{F_j}(\chi, \omega) = S(\omega)(F_{z_j}(\chi, \omega))^2 \quad (\text{Al.20})$$

As forças e momentos de primeira ordem, em função do tempo, são calculados via transformação inversa de Fourier como segue:

$$F_{O_j}(\chi, t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{F_j}(\chi, \omega_i)} d\omega \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (\text{Al.21})$$

χ é a direção de incidência da onda, em relação ao eixo do navio

ω é a frequência circular da onda harmônica (rad/s)

ϕ_i é o ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π

Força de Deriva Média de Onda (F_{dm})

A força de deriva média é considerada apenas para os movimentos no plano horizontal, ou seja, “surge”, “sway” e “yaw”.

A força de deriva média é obtida a partir das QTFs, *Quadratic Transfer Function*, definidas para os diversos valores de frequências de ondas harmônicas dentro da faixa do espectro do mar considerado.

$X_{dm1}(\chi, \omega)$, $x_{dm2}(\chi, \omega)$ e $x_{dm6}(\chi, \omega)$: QTFs

A força de deriva média para um dado ângulo de incidência, no espectro de mar considerado, é calculada por meio de cruzamento espectral.

$$F_{dmi}(\chi) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) x_{dmi}(\chi, \omega) d\omega \quad (A1.22)$$

onde: $F_{dmi}(\chi)$, $i=1, 2$, e 6 representam as forças/momento de deriva média na direção dos eixos G_x , G_y e G_z .

Força de Deriva Lenta de Onda (F_{dl})

A interação quadrática entre duas ondas harmônicas de frequências quaisquer, ω_i e ω_j , tem como resultado o aparecimento da Força de Deriva Lenta, que tem uma natureza oscilatória com frequência igual à “frequência diferença” ($\mu = \omega_i - \omega_j$).

Normalmente, a Força de Deriva Lenta tem intensidade menor que as outras componentes da onda, porém dependendo do sistema de amarração utilizado, esta força pode ter um efeito significativo, causando movimentos oscilatórios lentos de grande amplitude devidos à ressonância do sistema, resultando em altos picos de tensão no sistema de amarração.

Os métodos para obter estas forças foram intensamente pesquisados em [34, 35, 36, 37, 38] que propuseram fórmulas de cálculo simplificado.

A fórmula para o cálculo do espectro de deriva lenta, dada por:

$$Sx_i(\chi, \mu) = 8 \int_0^{\infty} S(\omega) S(\omega + \mu) \left[x_{dmi} \left(\chi, \omega + \frac{\mu}{2} \right) \right]^2 d\omega ; i = 3, 4 \text{ e } 5 \quad (A1.23)$$

Com os espectros de força de deriva lenta, as forças de deriva lenta no domínio do tempo (F_{dl}) podem ser calculadas aplicando a transformada inversa de Fourier.

$$F_{di}(\chi, t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{x_i}(\chi, \mu)} d\mu \cos(\mu t + \phi_i); \text{ para } i = 3, 4 \text{ e } 5 \quad (\text{Al.24})$$

onde: $d\mu = d\omega$ e $\phi =$ fase aleatória entre 0 e 2π

Al.7 - Força de Amarração (F_{am})

A força de amarração, independente do sistema adotado, é calculada num regime quase estático, sem considerar o efeito dinâmico nas linhas, que pode aumentar ainda mais os picos de força nas linhas. Neste caso, há duas componentes, a força de restauração horizontal e a força vertical da linha que são calculadas através das curvas características da linha (catenária), função da excursão horizontal.

Al.8 - Força de Restauração Hidrostática (F_{res})

A força de restauração hidrostática ocorre somente nos movimentos fora do plano horizontal e é proporcional à massa deslocada pelo corpo flutuante. Na direção de *heave*, corresponde à força de empuxo menos a força peso do navio, já nas direções de *roll* e *pitch* tem se o momento restaurador devido à inclinação do navio. Os coeficientes de restauração, c_{ij} , podem ser obtidos através do programa WAMIT.

$$F_{res}(1) = 0.0$$

$$F_{res}(2) = 0.0$$

$$F_{res}(3) = c_{33}x_3 + c_{35}x_5$$

$$F_{res}(4) = c_{44}x_4$$

$$F_{res}(5) = c_{55}x_5 + c_{53}x_3$$

$$F_{res}(6) = 0.0$$

Al.9 - Força de Amortecimento Potencial (F_{pot})

O amortecimento do casco do navio devido à radiação de ondas é calculado a partir de coeficientes obtidos com o programa WAMIT, que utiliza o método de distribuição de fontes. As componentes das forças de amortecimento potencial consideradas são dadas por:

$$\begin{aligned}
F_{pot}(1) &= -b_{11}\dot{x}_1 \\
F_{pot}(2) &= -b_{22}\dot{x}_2 - b_{26}\dot{x}_6 \\
F_{pot}(3) &= -b_{33}\dot{x}_3 - b_{35}\dot{x}_5 \\
F_{pot}(4) &= -b_{44}\dot{x}_{44} \\
F_{pot}(5) &= -b_{55}\dot{x}_5 - b_{53}\dot{x}_3 \\
F_{pot}(6) &= -b_{66}\dot{x}_6 - b_{62}\dot{x}_2
\end{aligned}
\tag{AI.25}$$

AI.10 - Força Dinâmica Vertical nas Linhas (F_{dv})

A amplitude da parcela dinâmica das forças nas linhas de amarração pode em alguns casos corresponder ao próprio valor médio, ou seja, a força pode oscilar de zero a duas vezes o seu valor médio. Apesar de sua significativa influência da força dinâmica na linha no dimensionamento da própria, esta tem pouca ou quase nenhuma influência na dinâmica do navio.

O método utilizado para o cálculo da força dinâmica na linha foi o dos Elementos Finitos (Relaxação Dinâmica), que, no entanto consome muito tempo, além de exigir adequados recursos computacionais. A força dinâmica aqui calculada considera a inércia das linhas de amarração e o amortecimento viscoso devidas ao movimento vertical das mesmas.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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