

JOÃO ALCINO DE ANDRADE MARTINS

**ANÁLISE DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES  
REDUZIDAS COM VISTAS À ENGENHARIA OCEÂNICA**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

São Paulo  
2003

**JOÃO ALCINO DE ANDRADE MARTINS**

**ANÁLISE DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS  
COM VISTAS À ENGENHARIA OCEÂNICA**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

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

**Orientador :**  
**Prof. Titular Célio Taniguchi**

**São Paulo**  
**2003**



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos 04 dias do mês de setembro de 2003, às 14:00 horas, no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores Célio Taniguchi, orientador do candidato, Celso Pupo Pesce, Kazuo Nishimoto, Antonio Carlos Fernandes e Carlos Antonio Levi da Conceição, iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do(a) Sr(a) JOÃO ALCINO DE ANDRADE MARTINS.

Título da Tese: "ANÁLISE DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS COM VISTAS À ENGENHARIA OCEÂNICA".

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado (a) candidato(a):

- Prof. Dr. Celio Taniguchi..... (Aprovado)
Prof. Dr. Celso Pupo Pesce..... (Aprovado)
Prof. Dr. Kazuo Nishimoto..... (Aprovado)
Prof. Dr. Antonio Carlos Fernandes..... (APROVADO)
Prof. Dr. Carlos Antonio Levi da Conceição..... (APROVADO)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 04 de setembro de 2003.
A COMISSÃO JULGADORA

CONFERI COM O ORIGINAL

Mara Fátima de Jesus Luz Sanches
PÓS-GRADUAÇÃO - EPUSP

Mara Fátima de Jesus Luz Sanches
Chefe da Seção de Pós-Graduação

Handwritten signatures of the commission members on a set of horizontal lines.

Secretária: Elisabete Apª F.S.Ramos

Obs.: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.

Homologado pela C.P.G. em reunião realizada 15/09/03.

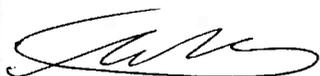
OK

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

São Paulo, 30 de Setembro de 2003.



Assinatura do autor



Assinatura do orientador

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Martins, João Alcino de Andrade**

**Análise de ondas em tanque de dimensões reduzidas com vistas à engenharia oceânica / João Alcino de Andrade Martins. ed. rev. -- São Paulo, 2003. 188 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.**

**1. Engenharia naval e oceânica (Ensaio) 2. Análise de ondas em laboratório 3. Ondas (Ensaio em tanque) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.**

*Às mulheres da minha vida :*

*Maria Margarida, Anna, Eliana,  
Maria da Penha, Thais, Inah  
e Dinah com meu profundo e  
sincero reconhecimento.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Célio Taniguchi, pelas disposição e dedicação em transformar proposições em fatos;

Aos meus colegas do Departamento, pelos estímulo e inestimável colaboração, particularmente Carlos Alberto Guedes Freire de Souza e Marlei Silveira Araújo, também pelos contínuos debates e questionamentos sobre o mundo que nos cerca;

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, que centralizou a reunião dos recursos necessários; bem como a FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, que subsidiou a implantação do gerador de ondas; e

À colega Neusa Nicolau Puopolo, que prematuramente deixou o nosso convívio, pelo espírito alegre e de esperança com que viveu e enfrentou o seu destino;

por propiciarem as condições para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho investiga a qualidade das ondas geradas, em função dos equipamentos e dispositivos utilizados, em um tanque de dimensões reduzidas, para ensaios em Engenharia Oceânica, tendo como fundamento a fenomenologia física da geração, propagação e absorção de ondas.

Para tanto, seguindo-se uma linha experimentalista, séries de ensaios foram realizadas no tanque de ondas do LENO – Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP. A análise comparativa entre os dados experimentais, a teoria e resultados de outros autores mostrou uma boa concordância, dentro das incertezas experimentais.

Finalmente, propõe-se uma metodologia particularmente adaptada para interpretação desses ensaios. Também mostrou-se que é possível realizar-se bons ensaios para Engenharia Oceânica, em tanque de dimensões reduzidas, desde que sejam dispensados cuidados especiais.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with small size testing tank for Offshore Engineering purposes. Tests have been conducted to investigate wave quality from generation, propagation and reflection point of view, keeping in mind the results application for offshore model testing.

The experimental data was acquired in the LENO – Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP test tank. The experimental results compared well to the theory and other published data. Some deviation was found but within the range of instruments and data scattering.

Finally, a specially developed methodology for testing in small size tank is proposed and also it is showed the tests are useful for Offshore model testing but an extra care must be taken.

## SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Justificativa.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Motivação.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>14</b>
<b>2. ONDAS OCEÂNICAS EM LABORATÓRIO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Teoria de Ondas.....</b>	<b>21</b>
2.1.1. Solução de Airy.....	24
<b>2.2. Alguns Modelos Numéricos.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3. Tanques de Ondas.....</b>	<b>41</b>

<b>3. GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1. Tanque de Ondas do LENO.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Metodologia.....</b>	<b>49</b>
3.2.1. Configurações dos Ensaios.....	52
<b>3.3. Equipamentos e Instrumentos Utilizados.....</b>	<b>56</b>
3.3.1. Sensor de Onda.....	59
<b>3.4. Medidas Experimentais.....</b>	<b>60</b>
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Incertezas nas Medidas.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2. Medidas de Ondas.....</b>	<b>78</b>
4.2.1. Velocidade de Propagação.....	82
4.2.2. Freqüência e Amplitude.....	84
<b>4.3. Funções de Transferência .....</b>	<b>89</b>
4.3.1. Força e Posição.....	90
4.3.2. Ondas.....	93
<b>4.4. Dissipação de Ondas.....</b>	<b>95</b>
4.4.1. Atenuação.....	96
4.4.2. Absorção.....	98
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>5.1. Definição das Faixas de Utilização.....</b>	<b>108</b>
<b>5.2. Proposta de Metodologia.....</b>	<b>109</b>
<b>5.3. Recomendações para Futuras Pesquisas.....</b>	<b>111</b>

<b>ANEXO 1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ONDAS OCEÂNICAS.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO 2 - BREVE SÍNTESE DA FORMULAÇÃO DA TEORIA DE ONDAS.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO 3 - SIMULAÇÃO DE ONDAS EM TANQUE COM O MODELO SWAN.....</b>	<b>135</b>
<b>LISTA DE REFERÊNCIAS.....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS TANQUES NA EUROPA</b>	
<b>GLOSSÁRIO</b>	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Desenho esquemático da Terra, com a divisão atual dos oceanos (IHO, 2000).....	6
Figura 1.2 – Histograma das frequências de ocorrências das elevações na superfície do planeta (adaptado de Randall, 1997).....	6
Figura 1.3 - Mapa destacando a faixa sombreada equivalente a 100 km da costa e a linha meridional próxima a longitude 52° Oeste. ....	9
Figura 1.4 - Mapa da densidade demográfica brasileira (IBGE, 2000).....	9
Figura 2.1 - Onda observada em uma certa região, como resultado dos processos de propagação e múltiplas interações.....	20
Figura 2.2 - Distribuição da energia da agitação marítima genérica, por período e fenômenos atuantes. (Adaptado de Kinsman, 1965).....	20
Figura 2.3 – Ilustração da aplicabilidade das teorias de ondas, em função de parâmetros da onda. (Adaptado de Le Méhauté, 1976).....	23
Figura 2.4 – Comparação gráfica entre as velocidades de ondas gravitacionais e capilares. (Adaptado de Horikawa, 1978).....	35
Figura 3.1 - Esquema simplificado do tanque de ensaios do LENO.....	48
Figura 3.2 - Vista geral do tanque, de montante para jusante. Em primeiro plano os sistemas de controle e de acionamento do atuador.....	48
Figura 3.3 - Resultados típicos de simulação com o SWAN, mostrando curvas de iguais alturas de ondas para diferentes absorvedores.....	51

Figura 3.4 - Croquis do tanque com a localização dos ondômetros.....	53
Figura 3.5 - Ilustração da posição dos sensores no sistema de geração de ondas.....	53
Figura 3.6 - Configuração do absorvedor na situação original e na situação modificada.....	54
Figura 3.7 - Esquema de interligação dos instrumentos e equipamentos ilustrados na figura 3.8.....	57
Figura 3.8 - Vista geral da bancada de instrumentação.....	58
Figura 3.9 - Detalhe do sistema de controle eletrônico.....	58
Figura 3.10 - Ilustração do arranjo para aferição dinâmica do ondômetro (direita) e o ondômetro testemunha (esquerda).....	62
Figura 3.11 - Exemplo de sinais obtidos durante a aferição dinâmica do ondômetro WPraiaCEN.....	62
Figura 3.12 - Exemplo dos sinais obtidos de altura de onda, para 0,9 Hz.....	63
Figura 3.13 - Exemplos de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 1,5 Hz.....	64
Figura 3.14 - Exemplo de sinais de altura de onda obtidos, para 2,5 Hz.....	65
Figura 3.15 - Exemplo de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 3,0 Hz.....	66
Figura 3.16 - Exemplo de alguns sinais obtidos , para uma excitação por varredura, de 0,4 Hz a 3,4 Hz.....	67
Figura 4.1 - Exemplo de curva de calibração estática do ondômetro WPraiaCEN. ....	72
Figura 4.2 - Exemplo de curva de calibração estática do ondômetro WPraiaESQ.....	72
Figura 4.3 - Exemplo da não linearidade de um ondômetro resitivo em aferição estática.....	73
Figura 4.4 - Espectro de energia dos sinais medidos na aferição dinâmica do ondômetro WPraiaCEN.....	75

Figura 4.5 - Função de Transferência entre os sinais do ondômetro e do deslocamento imposto, durante a aferição dinâmica.....	75
Figura 4.6 - Ilustração da região abrangida pelos ensaios e formas de ondas, associadas às teorias aplicáveis, em função de parâmetros da onda.....	79
Figura 4.7 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de altura de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WESQ.....	79
Figura 4.8 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de altura de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WPraiaCEN.....	80
Figura 4.9 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de altura de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WESQ.....	80
Figura 4.10 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de altura de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WPraiaCEN.....	81
Figura 4.11 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de altura de onda, para 3,0 Hz, ondômetro WESQ.....	81
Figura 4.12 - Gráfico comparativo entre os tempos de percursos medidos e os teóricos, em função da profundidade relativa.....	83
Figura 4.13 - Relações medidas entre alturas de ondas e deslocamentos da mesa do atuador, em função da frequência, para várias declividades de onda.....	88
Figura 4.14 - Função de Transferência mostrando as ressonâncias na parte atrás do atuador e a resposta do sistema de geração de ondas.....	91
Figura 4.15 - Função de Transferência mostrando as ressonâncias na parte atrás do atuador e a resposta do gerador de ondas, após modificações.....	91

Figura 4.16 - Funções de transferência entre acelerações no sistema de geração de onda e atuador.....	92
Figura 4.17 – Comparações entre as funções de transferência das ondas medidas nos vários pontos do tanque.....	94
Figura 4.18 - Comparações entre as funções de transferência das ondas, após as modificações.....	94
Figura 4.19 – Curvas médias de atenuação em função da declividade de onda e profundidade relativa.....	97
Figura 4.20 – Coeficientes de Reflexão determinados pela fórmula de Miche e valores medidos, em função da profundidade relativa.....	103
Figura 4.21 – Coeficientes de Reflexão determinados pela formulação empírica e valores medidos, em função da profundidade relativa.....	103
Figura 4.22 - Resultados experimentais de Wiegel (1964).....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. - Principais Teorias de Ondas, (Adaptado de Le Méhauté, 1976).....	22
Tabela 3.1 - Resumo das configurações dos ensaios.....	54
Tabela 4.1 – Constantes de calibração médias dos ondômetros, em situações extremas de aplicação (equação $y = Ax^2 + Bx + C$ ).....	71
Tabela 4.2 – Comparação entre alguns autovalores calculados e os picos das frequências determinados no ruído de fundo do tanque de ondas.....	85
Tabela 4.3 – Frequências calculadas das “edge waves” em função do modo e da inclinação da praia (Largura do tanque 4,85 m)....	87
Tabela 4.4 – Exemplo das variações dos resultados calculados pelo método de Nallayarasu et al. (1995), em função das resoluções das medidas de frequência e de fase.....	101

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas**

**ACES - Automated Coastal Engineering System**

**BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**

**CHL - Coastal and Hydraulics Laboratory**

**EMC - Environmental Modeling Center**

**ERDC - Engineer Research and Development Center**

**EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**

**FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo**

**FNMCO - Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center**

**IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**

**IHO - International Hydrographic Organization**

**ISO - International Organization for Standardization**

**ITTC - International Towing Tank Conference**

**LENO - Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica**

MEAS - Marine, Earth and Atmospheric Sciences (Department of).

MPC - Marine Prediction Center

NAE - Nível de Água Estático

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NCEP - National Center for Environmental Predictions.

NCSU - North Carolina State University

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NWS - National Weather Service.

OMB - Ocean Modeling Branch

SWAN - Simulating Waves Nearshore

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

USACE - United States Army Corps of Engineers

WAM - Wave Analysis Model.

WAMIT - Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology

WES - Waterways Experiment Station.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- a - amplitude da onda,  $(H/2)$ ;
- A - constante arbitrária;
- b - largura;
- B - constante arbitrária
- c - velocidade de propagação de onda,  $(L/T)$ ;
- C - constante arbitrária
- d - profundidade;
- D - derivada; ou constante arbitrária;
- e - base natural;
- E - constante arbitrária;
- f - frequência;
- F - constante arbitrária;
- F** – força,
- G - constante arbitrária;
- g - aceleração da gravidade  $(9,8 \text{ m/s}^2)$ ;
- h - altura;
- H - altura de onda
- k - número de onda  $(2\pi/L)$
- K - tensão superficial
- L - comprimento de onda;
- $\ell$  - comprimento;
- m - massa;
- M - massa total,  $(\rho V)$ ;
- MOD - configuração modificada do tanque;
- n - número inteiro;
- N - parâmetro de similaridade de onda;
- o - índice indicativo de águas profundas;

O – centro de referência de coordenadas;  
ORI - configuração original do tanque;  
 $p$  - pressão,  $(F/A)$ ;  
R - valor medido;  
 $r$  - desvio de medida;  
S - curso  
 $s$  - deslocamento;  
 $t$  - tempo;  
T - período;  
 $u$  - velocidade na direção x;  
 $v$  - velocidade na direção y;  
V - volume;  
 $w$  - velocidade na direção z;  
 $x$  - eixo das abcissas; plano horizontal, sentido da esquerda para a direita;  
X - variável  
 $y$  - eixo das ordenadas, direção vertical, sentido de baixo para cima;  
Y - variável  
 $z$  - eixo das ordenadas, plano horizontal, sentido do leitor para o papel;  
Z - variável

$\theta$  - ângulo de fase;  
 $\alpha$  - ângulo de inclinação da praia;  
 $\mathfrak{V}$  - campo de velocidades (vetor);  
 $\psi$  - coeficiente de atenuação adimensional;  
 $\beta$  - declividade da onda,  $H/L$ ;  
 $\rho$  - densidade;  
 $\delta$  - imersão do atuador;  
 $\partial$  - diferencial parcial

$\eta$  - elevação da onda;  
 $\varepsilon$  - espessura da camada limite;  
 $\zeta$  - fator de atenuação;  
 $\omega$  - frequência angular ( $2\pi f$ )  
 $\Delta$  - operador delta, diferença;  
 $\nabla$  - operador gradiente;  
 $\phi$  - potencial de velocidades;  
 $\tau$  - tensão cisalhante;  
 $\sigma$  - tensão mecânica, (F/A);  
 $\xi$  - tensor das tensões viscosas;  
 $\nu$  - viscosidade cinemática ( $\mu/\rho$ );  
 $\mu$  - viscosidade dinâmica;  
 $\nabla^2$  - operador Laplaciano;

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

*"Terra, planeta água."*

*Sabedoria popular*

## 1. INTRODUÇÃO

O trabalho apresentado a seguir versa sobre a simulação e análise de ondas oceânicas em condições de laboratório, para aplicações na área de Engenharia Oceânica. O enfoque é eminentemente fenomenológico e experimental, partindo-se da experiência obtida durante o processo de implantação e desenvolvimento de tres instalações com capacidade de gerar ondas, na Escola Politécnica da USP.

A boa modelagem da onda é importante devido a aplicação em experimentos para a determinação do comportamento de sistemas oceânicos, em escala reduzida, quer seja para fins de projeto, de operação ou de regulamentação. Também é necessária uma boa modelagem para estudos teóricos e validação de ferramentas numéricas, assim como para uma ampla gama de ensaios com modelos e ondas.

A estrutura do trabalho inicia com uma introdução para caracterizar o escopo, justificar a escolha do tema e apresentar uma síntese do conteúdo bibliográfico sobre o tema. A seguir, o capítulo 2 visa conceituar fisicamente e descrever as ondas oceânicas e fenômenos associados, bem como sintetizar a teoria pertinente. Também, são mencionados alguns modelos numéricos comumente usados.

No capítulo 3, são desenvolvidos os aspectos experimentais da geração, propagação e reflexão de ondas oceânicas, do ponto de vista da simulação em laboratório, com ênfase nos equipamentos e instrumentos e na medição de variáveis físicas.

A questão principal é a otimização da onda gerada em um tanque de dimensões reduzidas, em função de modificações no tanque, sendo a mais importante a alteração da geometria do absorvedor e a introdução de telas plásticas como absorvedor viscoso. Os experimentos serão realizados no tanque de ondas do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do DEN-EPUSP.

Prosseguindo, no capítulo 4, todo o conjunto de resultados dos experimentos, antes e depois das modificações, é analisado, destacando-se a consistência dos dados e as comparações com as previsões teóricas e resultados de outros autores, publicados na literatura da área.

Finalizando, no capítulo 5, é feita uma síntese crítica dos resultados, ressaltando as melhorias obtidas, chegando-se a proposição de uma metodologia de análise de ondas para ser aplicada, especialmente, a tanques de dimensões reduzidas. Considera-se ainda que, o procedimento utilizado mostrou-se fundamental na validação de resultados de ensaios em tanques de dimensões reduzidas, visando a Engenharia Oceânica.

Complementando, ressalta-se que o conteúdo foi formatado e estruturado seguindo-se as *Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses*, do Serviço de Biblioteca da Escola Politécnica da USP, (USP, 2001) e devidamente aprovado pela Comissão de Pós Graduação da EPUSP. Segundo os autores, essas Diretrizes seguem as normas da ABNT e da ISO.

## 1.1. Objetivos

A questão a ser discutida neste trabalho refere-se a qualidade das ondas e a validade de resultados de ensaios realizados em um tanque de dimensões reduzidas. Este tipo de tanque é o que melhor atende os requisitos de baixo custo de implantação e de operação, mas são criticados em relação a necessidade do uso de escalas pequenas, bem como eventuais interferências das paredes e do absorvedor.

O objetivo central é investigar as ondas que se propagam no tanque, verificando-se as limitações dos instrumentos e as interferências das próprias instalações físicas, pretendendo-se propor uma metodologia de análise de ondas que permita definir uma zona de operação do tanque.

A experimentação ocorrerá durante o processo de otimização de um tanque de ondas oceânicas existente no Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Departamento de Engenharia Naval da EPUSP. Este processo consistirá na alteração física do absorvedor de energia de ondas ("praia") e de outros componentes, sendo esta melhoria um outro objetivo a ser alcançado.

Os dados experimentais serão analisados comparativamente com a teoria e com outros autores da literatura técnica disponível, e também na sua própria coerência, relativa a precisão e confiabilidade dos instrumentos e propagação de incertezas das medidas. A quantificação das incertezas e do intervalo de desvios das medidas é um objetivo paralelo a atingir.

Finalmente, um último objetivo deste trabalho é completar os requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, pelo Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP.

## 1.2. Justificativa

O planeta Terra, segundo o World Atlas (2002), tem aproximadamente 71% da sua superfície tomada pelas águas e os restantes 29% são terras emersas. Da porção superficial de água, 97 % é constituída por oceanos e mares, cerca de 2,5 % encontra-se no gelo dos polos terrestres e somente 0,5% é água doce na forma líquida, utilizável diretamente.

Dos  $3,6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$  de oceanos e mares, pode-se dizer que, a grosso modo, 50% pertence ao Oceano Pacífico, 30% ao Oceano Atlântico (inclui Oceano Ártico e parte do Meridional) e o restante 20% ao Oceano Índico (e parte do Meridional). A rigor, a UNESCO (2002) noticiou que a IHO International Hydrographic Organization, desde março de 2000, reconheceu a existência de cinco oceanos na face terrestre, como ilustrado na figura 1.1.

Em volume, de um total de  $1,1 \cdot 10^{21} \text{ m}^3$  da Terra, apenas cerca de um milésimo,  $1,35 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ , é constituído por água. Isto leva a uma estimativa de que a profundidade média dos oceanos é cerca de 3800 m, enquanto que as elevações terrestres têm, em média, aproximadamente 860 m.

Considerando-se pontos extremos, a maior elevação terrestre é o Monte Everest, na Cordilheira do Himalaia, Nepal, com 8850 m de altura, enquanto o ponto mínimo no oceano, correspondente a maior lâmina d'água, é a Fossa de Mariana, Mindanao, no Oceano Pacífico, com 11524 m de profundidade. Uma distribuição estatística das elevações e profundidades pode ser vista na figura 1.2, elaborada com dados extraídos de Randall (1997).

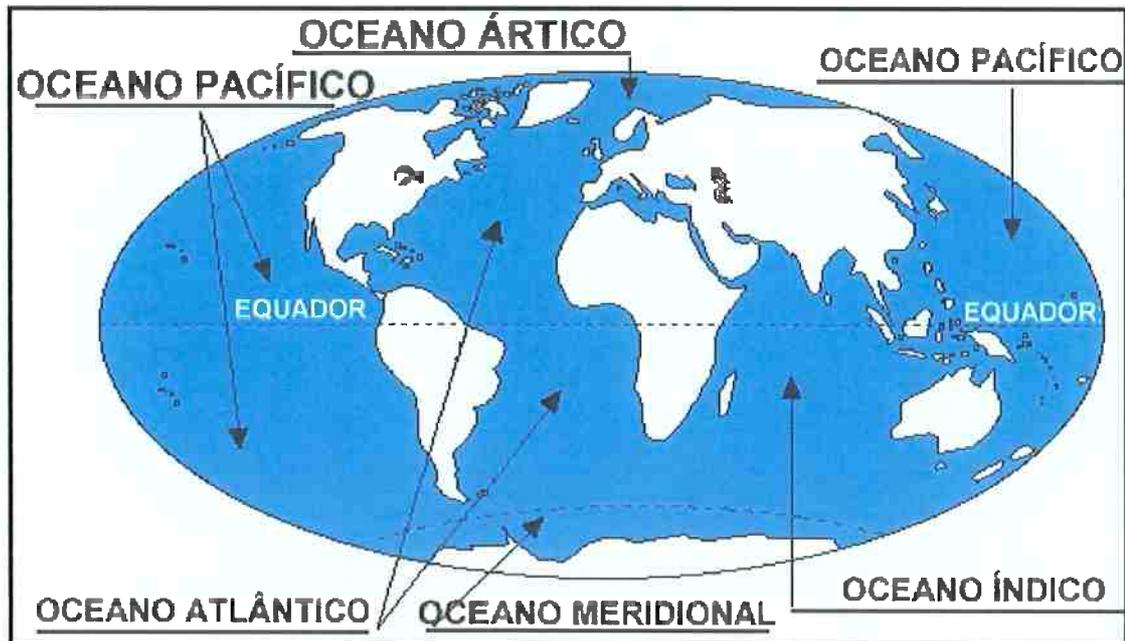


Figura 1.1 - Desenho esquemático da Terra, com a divisão atual dos oceanos (UNESCO, 2002).

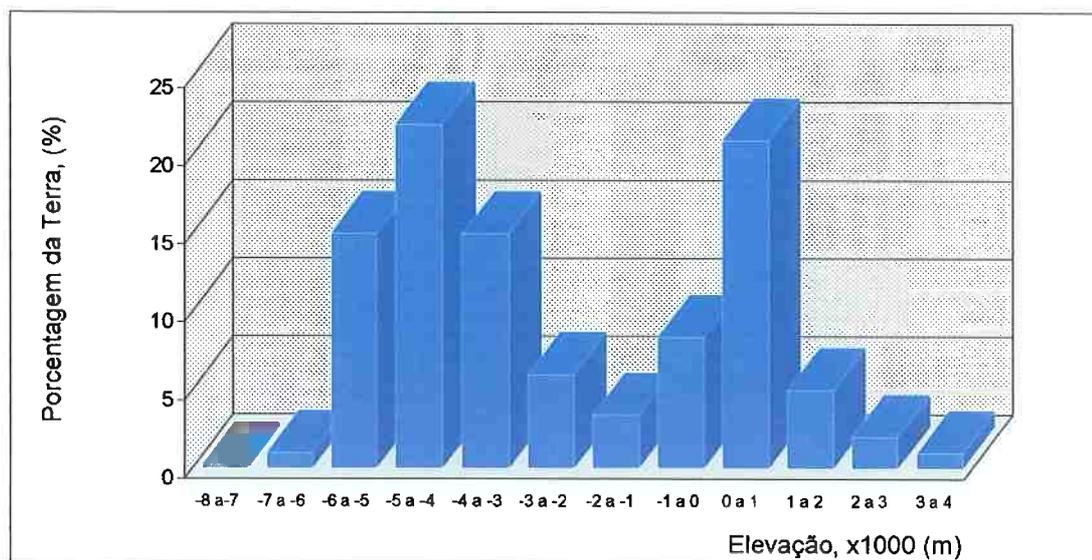


Figura 1.2 – Histograma das freqüências de ocorrências das elevações na superfície do planeta (adaptado de Randall, 1997).

Apenas estes dados estatísticos apresentados já seriam justificativa suficiente para despertar o interesse em investigar-se os oceanos, o planeta água. Encarando pelo ângulo deste trabalho, o interesse pelo oceano está relacionado ao maior fenômeno físico que nele ocorre, a agitação marítima. Mas, deve-se salientar que, a importância não é só estatística e sim relacionada à vida na Terra.

A extensão de água dos oceanos, na superfície da Terra, foi primordial para tornar o planeta habitável e é imprescindível para manter a vida, na forma como desenvolve-se na Terra. Os oceanos regulam o clima, reabastecem de água potável os rios e lagos, fornecem alimentos, bens e riquezas, energia, lazer e turismo, servem como via de transporte e até mesmo como depósito de resíduos.

A União Européia (1998) estimou que, cerca de 2,7 bilhões de pessoas, mais da metade da população humana terrestre na época, vivem em uma faixa de até 100 km da costa. Informa ainda que, a região costeira mundial ocupa uma linha de aproximadamente 600 mil km de extensão e é o lugar onde a interação homem-oceano dá-se de forma mais pronunciada.

Outros dados importantes podem ser vistos em Matzke (2002), informando que cerca de 80% da população nos Estados Unidos da América vive a menos de 80 km da costa, incluindo-se os Grandes Lagos, e que das 32 maiores cidades do mundo 22 situam-se em estuários.

A região costeira é caracterizada por contínuas mudanças, devido a processos eminentemente dinâmicos, causados pela agitação marítima e outros fenômenos atmosféricos, bem como pela ocupação humana. Lembre-se também que, cada vez mais o homem avança mar adentro, necessitando construir sistemas que suportem as solicitações ambientais

### 1.3. Motivação

O Brasil, descoberto e colonizado por via marítima, hoje ocupa quase metade da superfície da América do Sul, com mais de 8,5 milhões de km<sup>2</sup>. Sendo o quinto maior país do mundo em extensão territorial, praticamente contínua (Brasil, 2002), tem 13 dentre as 26 capitais de estados e um distrito federal, em cidades litorâneas, sendo três insulares (Florianópolis, Vitória e São Luis).

Três das maiores capitais não litorâneas, São Paulo, Porto Alegre e Curitiba, ficam dentro de um raio de 100 km do litoral, conforme mostrado na figura 1.3. Apenas nessas 16 cidades capitais, de um total de mais de 5500 municípios, vive quase 20% da população brasileira (IBGE, 2002), ilustrado na figura 1.4, que responde por mais de 25% do Produto Interno Bruto do país (Nascimento, 2002).

Geograficamente, traçando-se uma linha do Cabo Orange, foz do Rio Oiapoque, no Amapá, até a foz do Arroio Chuí, no Rio Grande do Sul, próxima a linha de longitude 52° Oeste, entre as latitudes 5° 30' N e 33° 45' S, nota-se que toda a face oriental brasileira é banhada pelo Oceano Atlântico, somando 7.367 km de extensão litorânea (IBGE, 2002).

A extensão da costa brasileira indica a importância que o conhecimento sobre ondas tem para o país. Apenas como exemplo, Parente Jr. (2002) informa que o potencial de energia elétrica do litoral brasileiro é cerca de 120 GWh. Esse potencial é equivalente a pelo menos oito usinas de Itaipú e se em torno de 20% dessa energia fosse realmente aproveitada, a média nacional seria 3,2 kWh por metro linear de praia. O valor energético é relativamente baixo devido a pequena altura das ondas, entre 1,5 m e 2,5 m, mas tem a vantagem de ser praticamente constante ao longo de todo o ano, comparando-se com outros países.



Figura 1.3 - Mapa destacando a faixa sombreada equivalente a 100 km da costa e a linha meridional próxima a longitude 52° Oeste.

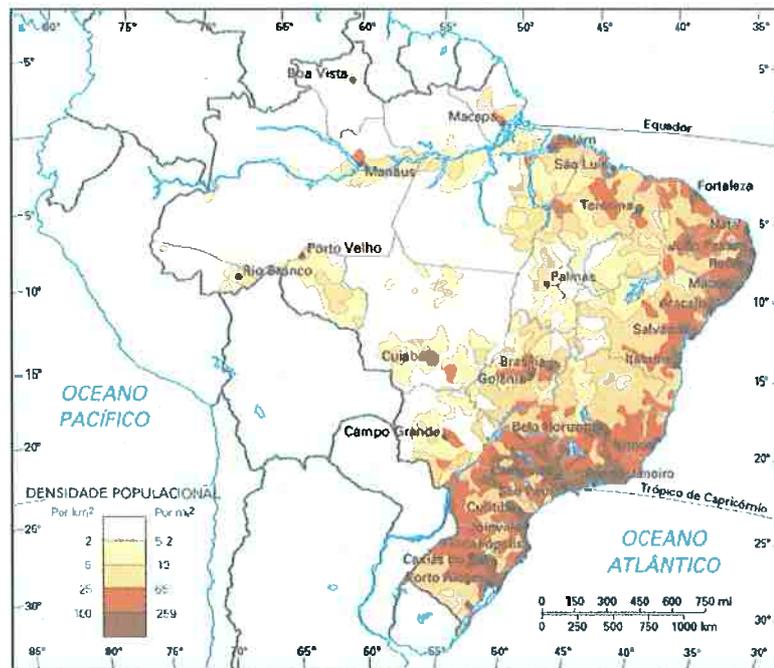


Figura 1.4 - Mapa da densidade demográfica brasileira (IBGE, 2000)

Acrescente-se o fato de que, a energia das ondas é não poluente e renovável o que certamente não causaria impacto negativo na matriz brasileira de produção de energia elétrica. Isso tem sido uma constante preocupação devido ao efeito estufa e impacto ambiental causado por fontes de energia poluentes ou degradantes do meio ambiente.

Por outro lado, o Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2001), relata que cerca de 89% da energia elétrica provém de hidrelétricas, 9% de termelétricas e o restante de fontes alternativas.

Informa ainda que, nos próximos anos o governo pretende duplicar a parcela das termelétricas para resolver o problema de segurança, causado pela baixa geração por hidrelétricas em períodos de estiagem. Assim, o consumo de combustíveis, a grande parcela sendo óleo e gás, deverá aumentar substancialmente e em conseqüência as taxas de emissão de poluentes.

No setor de transportes, dá-se o inverso, com o consumo de combustíveis derivados do petróleo chegando a mais de 82% (Economia & Energia, 2002). Segundo a ANP - Agência Nacional do Petróleo (2002), no ano de 2001, quase 40% do total da matriz energética global brasileira correspondeu a óleo e gás.

No Brasil, a produção em 2001 atingiu, em média, mais de 1,6 milhões de barris de petróleo por dia e 40 milhões de m<sup>3</sup> diários de gás natural, suprimindo 80% do consumo nacional, de acordo com dados divulgados pela Petrobrás (2002). Do total da produção de petróleo e gás, mais de 83% vem de poços marítimos, que somam pouco mais de 11% dos 8813 poços ativos.

No mar, a estatal brasileira do petróleo conta com 43 plataformas de exploração, 93 plataformas de produção, sendo 69 fixas e 24 flutuantes, e 119 petroleiros, dos quais 63 são propriedades da empresa. Ainda conforme a Petrobrás, as reservas brasileiras provadas somam cerca de 10 bilhões de barris de petróleo e gás equivalente, situando-se no mar em torno de 90% do óleo e 77% do gás.

Portanto, fica evidenciada a necessidade de interagir com o oceano, não só na região costeira, mas também em alto mar, para poder suprir a necessidade de energia do país, principalmente petróleo e gás. Para tanto, torna-se fundamental o conhecimento sobre os fenômenos ambientais que atuam sobre os sistemas oceânicos, sendo a onda um dos mais importantes.

Mas, o estudo experimental de ondas encontra grandes dificuldades como a vastidão dos oceanos, a ausência de um referencial fixo e a própria agitação marítima. Na faixa costeira a questão do referencial é amenizada mas as transformações que as ondas sofrem na arrebatada apresentam um fator de complexidade maior.

Normalmente, os sistemas oceânicos são bem maiores em tamanho e peso, quando comparados aos similares em terra, e sujeitos a solicitações ambientais muito mais severas e contínuas. Isso faz com que as observações e medições em escala real tornem-se muito trabalhosas, caras e dependentes de equipamentos sofisticados.

Uma alternativa, técnica e economicamente viável, para a experimentação nesta área é o emprego de modelos em escala. Através de princípios físicos, arbitra-se uma relação entre o protótipo e o modelo, reproduzindo-se no laboratório não só o sistema mas também o "mar".

Dessa forma, é possível simular uma região do oceano, gerando-se, controladamente, ondas, ventos e correntes, que poderão ser empregadas para estudo das próprias ondas e para aplicação de solicitações ao modelo em escala, convenientemente instalado em um tanque.

A utilização de modelos reduzidos na resolução de problemas da Engenharia Naval e Oceânica é notória e sobejamente conhecida nesse meio técnico, datando historicamente do século XVIII (Rouse, 2000). As vantagens e desvantagens da técnica experimental também tem sido largamente discutidas e muito desenvolvidas.

Notadamente, nos últimos 20 anos, com a disseminação de tecnologia eletrônica nos equipamentos de laboratório e, mais recentemente, com o surgimento de frutos da alta tecnologia em sensores e equipamentos de aquisição de dados, as técnicas de medição e, portanto, a quantidade e qualidade das variáveis medidas tem ampliado consideravelmente as fronteiras da experimentação.

Um exemplo prático, que corrobora esta afirmação, é a ampla utilização recente de um equipamento *laser* denominado P.I.V. - Particle Image Velocimeter, que possibilita não só a visualização, mas também a medição espacial, do fluxo e das velocidades das partículas em um escoamento, inclusive de ondas em um tanque, como relatam Pu et al. (2002) e Graw e Lengricht (2002).

No entanto, mesmo considerando-se estes avanços significativos, ainda não se encontra disponível uma formalização dos princípios e métodos que possibilitem o dimensionamento ou a avaliação de um tanque, quanto a sua capacidade de produzir ondas para ensaios oceânicos, em faixas especificadas.

Algumas questões são formuladas a seguir, entendidas como motivação e encaminhamento na consecução dos objetivos, com o intuito de estimular e balizar o desenvolvimento do tema :

- qual a confiabilidade das medidas, quais as incertezas e quanto afetam o resultado final?
- que influência tem as dimensões e geometria do tanque nos resultados?
- quais as dimensões mínimas de um tanque para ondas oceânicas?

As respostas não são simples e nem abrangentes o suficiente para resolver a contento as proposições deste trabalho. A maioria das vezes essas respostas são condicionais e vagas, não tendo grande utilidade prática para elucidarem satisfatoriamente muitos dos aspectos questionados.

#### 1.4. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica para este trabalho foi feita através dos textos conhecidos sobre Engenharia Oceanográfica, Engenharia Costeira e Engenharia Naval e Oceânica, no que concerne aos conceitos básicos e teorias. No aprofundamento de certas questões, principalmente de caráter experimental, foram consultados os periódicos mais destacados da área.

Em geral, foram consultados autores e obras conhecidas no meio técnico-acadêmico, tais como, Wiegel (1964), Le Méhauté (1976), Horikawa (1978), Sarpkaya e Isaacson (1981), Chakrabarti (1994), Randall (1997) e o clássico *Surface Waves*, de Wehausen e Laitone (1960). Para as questões específicas as fontes foram os periódicos: *Applied Ocean Research*, *Coastal Engineering*, *Ocean Engineering*, *Journal of Fluid Mechanics*, *Journal of Fluid and Structures*, entre outros.

Também foram fontes de consulta o *Coastal Engineering Manual*, do USACE - United States Army Corps of Engineers, e relatórios de comitês de especialistas do ITTC - International Towing Tank Conference.

O ponto de partida deste trabalho assemelha-se ao do artigo pioneiro publicado por Ursell et al. (1960), se bem que diferentemente daquele, este objetiva a onda e não o gerador. Uma consulta rápida a bibliografia mostra que, muitos artigos tem sido publicados sobre experimentos em tanques, das mais variadas dimensões e geometrias. Entretanto, raramente são mencionadas ou discutidas a precisão, a confiabilidade e a propagação de erros das medidas feitas.

Mesmo considerando-se o avanço da tecnologia, que tem possibilitado uma grande melhoria dos métodos e processos de medição, como relatam Krogstad e Barstow (1999), Graw (1994) e Mathew et al. (2001), as fontes de incertezas permanecem.

Pode-se dizer que a reflexão de ondas devido as fronteiras do tanque é um dos maiores problemas, e tem sido há muito objeto de estudos. Desde que Robert Miche estabeleceu a formulação teórica para a reflexão de ondas, conforme citado por Wiegel (1965), outros autores vem preocupando-se com o tema.

Sobre a determinação da reflexão de ondas encontram-se artigos de Goda e Suzuki (USACE, 1988), Miles (1990), Twu e Liu (1999) e Wu et al. (1998), esse no caso de placa porosa, sendo que vários métodos para determinação de ondas refletidas têm sido propostos, como em Nallayarasu et al. (1995) e Frigaard e Brorsen (1995). Formas mais elaboradas para determinar a reflexão podem ser vistas em publicações de Zhu (1999), Brossard et al (2000) e Suh et al (2001).

Devido às paredes laterais do tanque também ocorre a ressonância transversal, que pode ser excitada parametricamente, de acordo com Miles (1988), Simonelli e Gollub (1989), e Tsai et al. (1990). As laterais do tanque também podem afetar o resultado de ensaios com modelos, assunto que não será tratado aqui, como discutem Calisal e Sabuncu (1989), para coeficientes hidrodinâmicos; McIver (1993), para pressões e forças e também Neelamani et al. (1993), e Chakrabarti e Cotter (1994); enquanto Chen (1994) apresenta um modelo numérico e Xia e Krokstad (2001) demonstram que mesmo uma única parede lateral pode interferir nas medidas de força, principalmente as de segunda ordem.

Efeitos como ondas capilares parasitas, podem contribuir para dispersões nas medidas, conforme relatos de Fedorov et al. (1998) e Perlin e Schultz (1999), além de não linearidades, que podem surgir tanto na geração, mencionadas por Moubayed e Williams (1993), Zhang e Williams (1996) e Schäffer (1996), como na propagação, referidas por Duncan e Drake (1995), Beji (1998), Abohadima e Isobe (1999), entre outros.

Na tentativa de evitar-se, ou pelo menos minimizar, os problemas relacionados anteriormente, sem comprometer as dimensões úteis do tanque, vários dispositivos para absorção da energia da onda têm sido propostos.

Um tipo de absorvedor que preenche os requisitos para ser aplicado a tanque de dimensões reduzidas, vem sendo estudado por inúmeros autores, como mostram Losada et al. (1993), Twu e Liu (1994), Abul-Azm (1994), Twu e Chieu (2000), Chan e Lee (2001), e Kwon et al. (2003).

Portanto, utilizando-se as informações desta síntese bibliográfica, pode-se melhor elaborar a forma de executar a investigação experimental, relatada neste trabalho, bem como direcionar objetivamente a programação dos ensaios e das variáveis físicas a serem medidas.

Importante mencionar que, a recuperação de muitas das referências só foram possíveis graças ao uso intensivo da Internet e de mecanismos de busca, convenientemente utilizados, como sugerido por Martins (2002).

Também merece destaque a utilização dos recursos CAPES através do Portal de Periódicos, acessado via Internet. Ainda um outro acesso por meio eletrônico, que facilitou a localização de obras no âmbito da USP, é o Banco de Dados Bibliográficos da USP - Catálogo On-line Global - DEDALUS, que fornece a ficha catalográfica das obras disponíveis na Universidade.

A seguir, apresenta-se o capítulo 2, Ondas Oceânicas em Laboratório, onde são resumidas as bases matemáticas da teoria de ondas, com detalhamento da teoria linear.

# CAPÍTULO 2

## ONDAS OCEÂNICAS EM LABORATÓRIO

*"In mathematics you  
don't understand things.  
You just get used to them."*

*John von Neumann*

## **2. ONDAS OCEÂNICAS EM LABORATÓRIO**

Onda é um fenômeno físico causado por uma perturbação de energia que se propaga. Ondas mecânicas necessitam de um meio físico para propagarem-se e, no caso de ondas hidráulicas, este meio é um fluido, geralmente água. As ondas hidráulicas de interesse, para este trabalho, são as chamadas ondas de superfície, particularmente aquelas que se propagam na interface entre a água e o ar.

No caso de oceanos, o grau de complexidade é muito grande, já que as ondulações são produto de várias interações e superposições. Um detalhamento das características físicas e classificações de ondas podem ser encontrados no Anexo 1.

Um observador postado frente ao oceano certamente irá notar que a superfície da água apresenta uma forma bem difusa. O fenômeno em questão é chamado de agitação marítima, ilustrado esquematicamente na figura 2.1, sendo causada por diversos fatores,.

Os principais eventos que ocasionam a agitação marítima são as marés, as ondas gravitacionais, os ventos, as correntes, as tempestades e os deslocamentos de massas de gelo ou terra. Erupções vulcânicas e terremotos, em terra ou no oceano, podem contribuir para a agitação marítima e até causar ondas devastadoras (“tsunami”).

Cada um desses fenômenos provoca perturbações na superfície da água, que por sua vez podem interagir mutuamente, com obstáculos e com o fundo do oceano, gerando outras ondas, que interagem novamente e assim por diante. A agitação notada na superfície é o resultado desta série de ocorrências e suas interações.

Dentre os fatores citados, aquele que mais interessa neste estudo é a onda gravitacional, por ser o mais freqüente e o que concentra mais energia, conforme pode ser visto na figura 2.2. Usualmente, sob circunstâncias normais, a principal fonte geradora de ondas é o vento e a principal força restauradora é a gravidade terrestre.

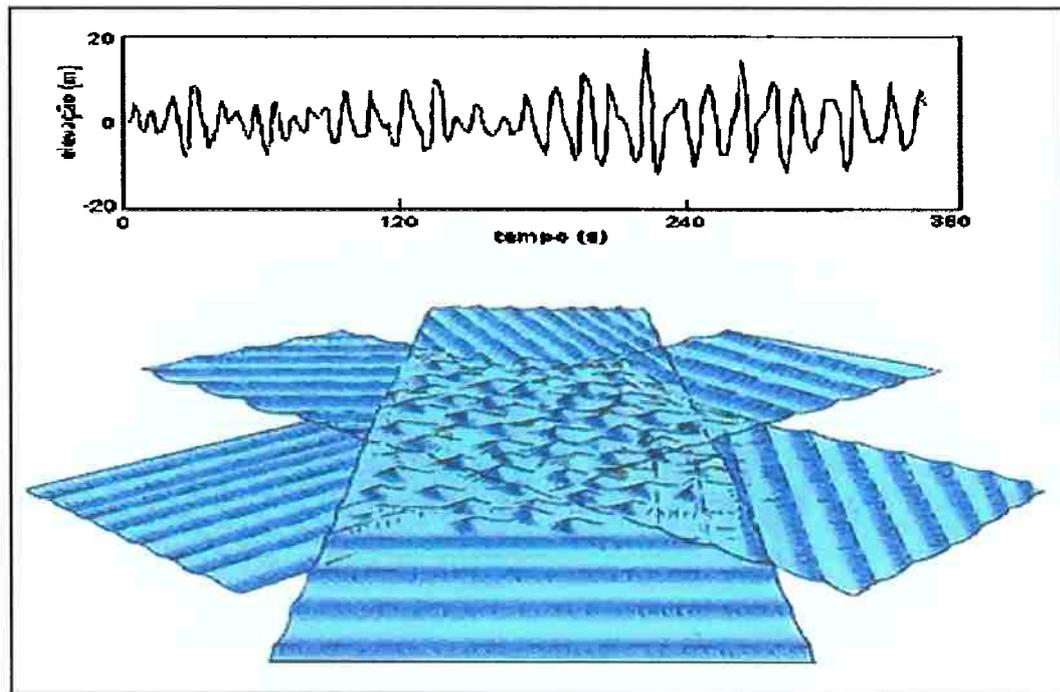


Figura 2.1 - Onda observada em uma certa região, como resultado dos processos de propagação e múltiplas interações.

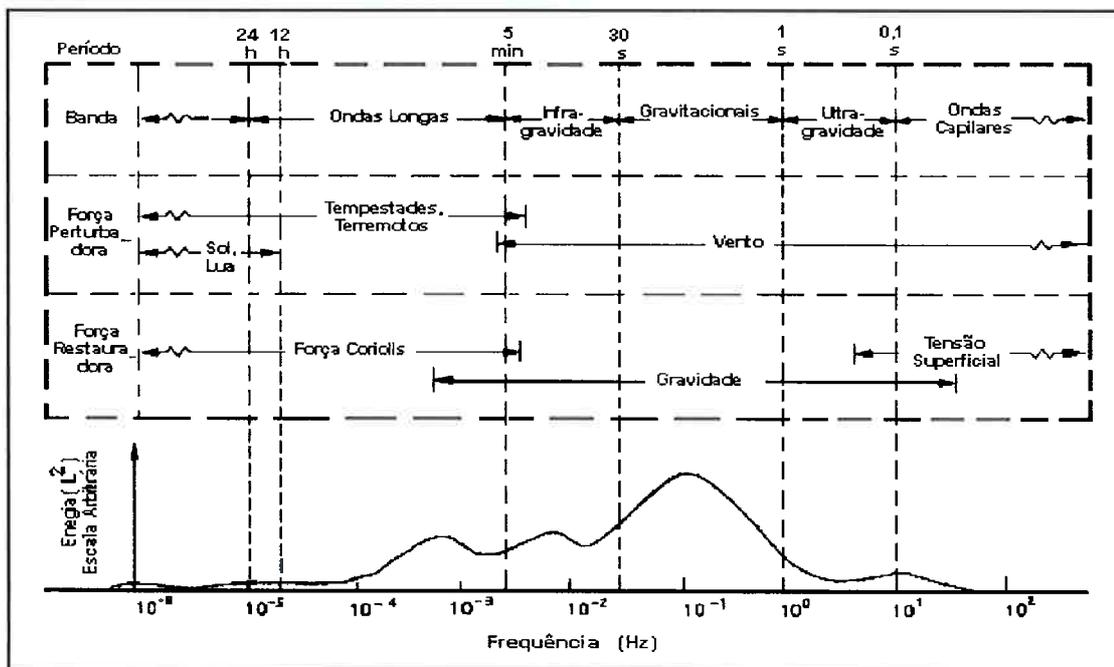


Figura 2.2 - Distribuição da energia da agitação marítima genérica, por período e fenômenos atuantes. (Adaptado de Kinsman, 1965)

## 2.1. Teoria de Ondas

Os fenômenos associados a agitação marítima são muitos, bastante complexos e impossíveis de serem modelados teoricamente de forma exata e abrangente. Segundo Wiegel (1964), matematicamente não existe uma solução geral para as ondas oceânicas e sendo assim, o mais importante torna-se estabelecer os limites de validade para cada teoria.

A matemática envolvida na modelagem de ondas oceânicas é tão variada quanto são os diferentes aspectos físicos, podendo ser linear ou não linear. Mesmo tomando-se casos mais particulares, muitas das simplificações utilizadas levam a equações que não tem solução fechada.

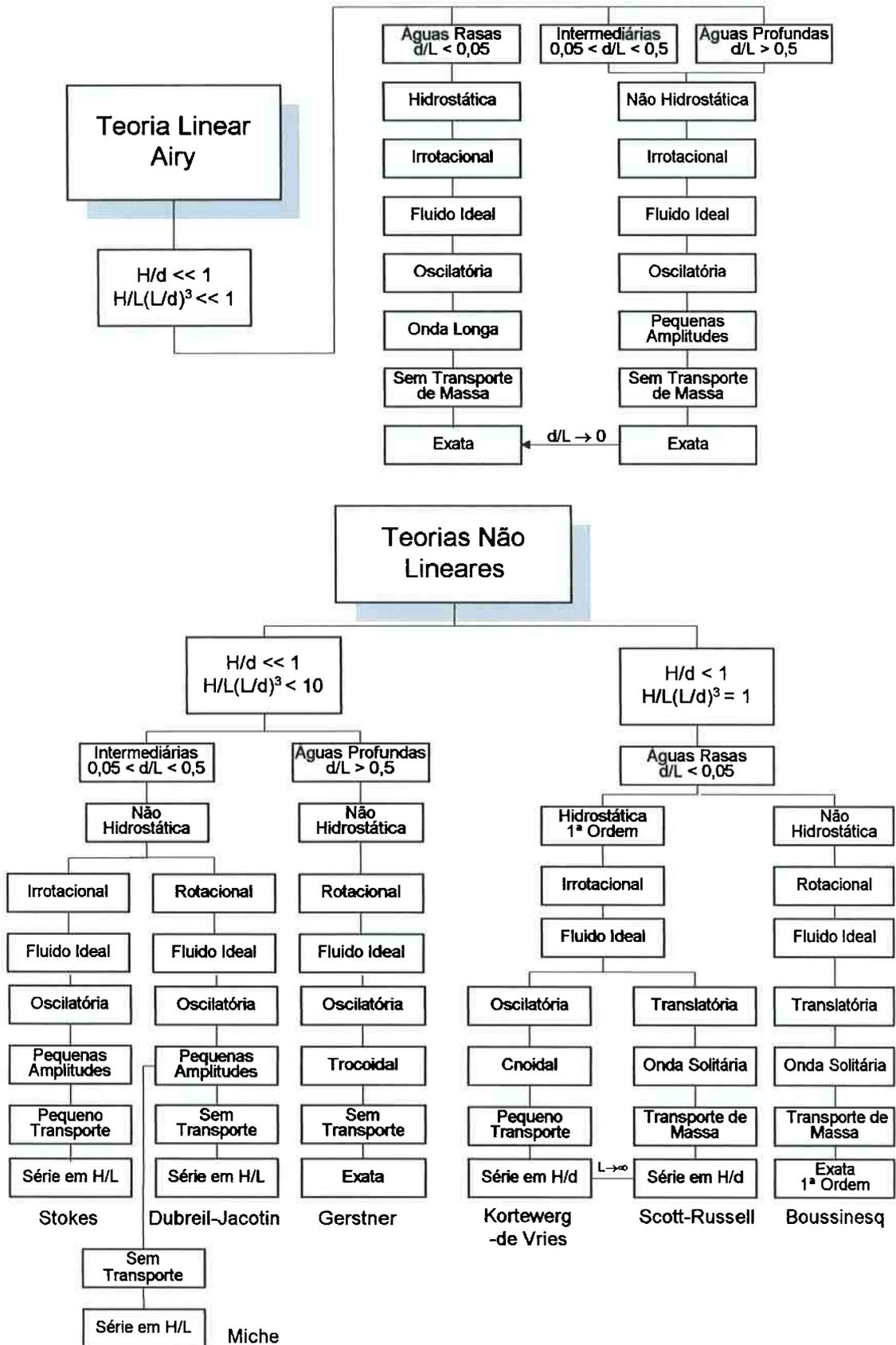
As idealizações sobre os fenômenos que levam a descrições matemáticas de ondas oceânicas têm origem na Mecânica dos Fluidos e desde o século XVIII muitos matemáticos e físicos trabalharam nessa área. Um quadro das principais teorias empregadas é apresentado por Le Méhauté (1976) e reproduzido na Tabela 2.1.

As ondas tem sido modeladas por várias teorias, abstraindo certas propriedades ou variáveis físicas do problema. Isto torna a tarefa matemática um pouco menos árdua, mas incorre em diversas restrições quanto a similaridade ou representatividade do fenômeno real.

A respeito das abstrações, Feynman (1963) relata que o matemático John Von Neumann referia-se, jocosamente, ao fluido idealizado como "dry water". Isto porque, as hipóteses sobre as propriedades da água, para tornar possível algumas das soluções matemáticas, são bastante restritivas, sendo a principal delas considerar a água invíscida.

Uma primeira aproximação sobre a adequação de uma teoria a certa situação pode ser feita através da interpretação da figura 2.3, na qual

Tabela 2.1 - Principais Teorias de Ondas. (Adaptado de Le Méhauté (1976)).



procura-se ilustrar as regiões de aplicação das teorias, em função de parâmetros da onda.

Como regra geral, aderida ao caráter experimental deste trabalho, serão privilegiadas as proposições e as interpretações físicas dos fenômenos, em detrimento do rigor das demonstrações matemáticas, que pode ser consultado em Wehausen e Laitone (1960) e também Dean e Dalrymple (1991).

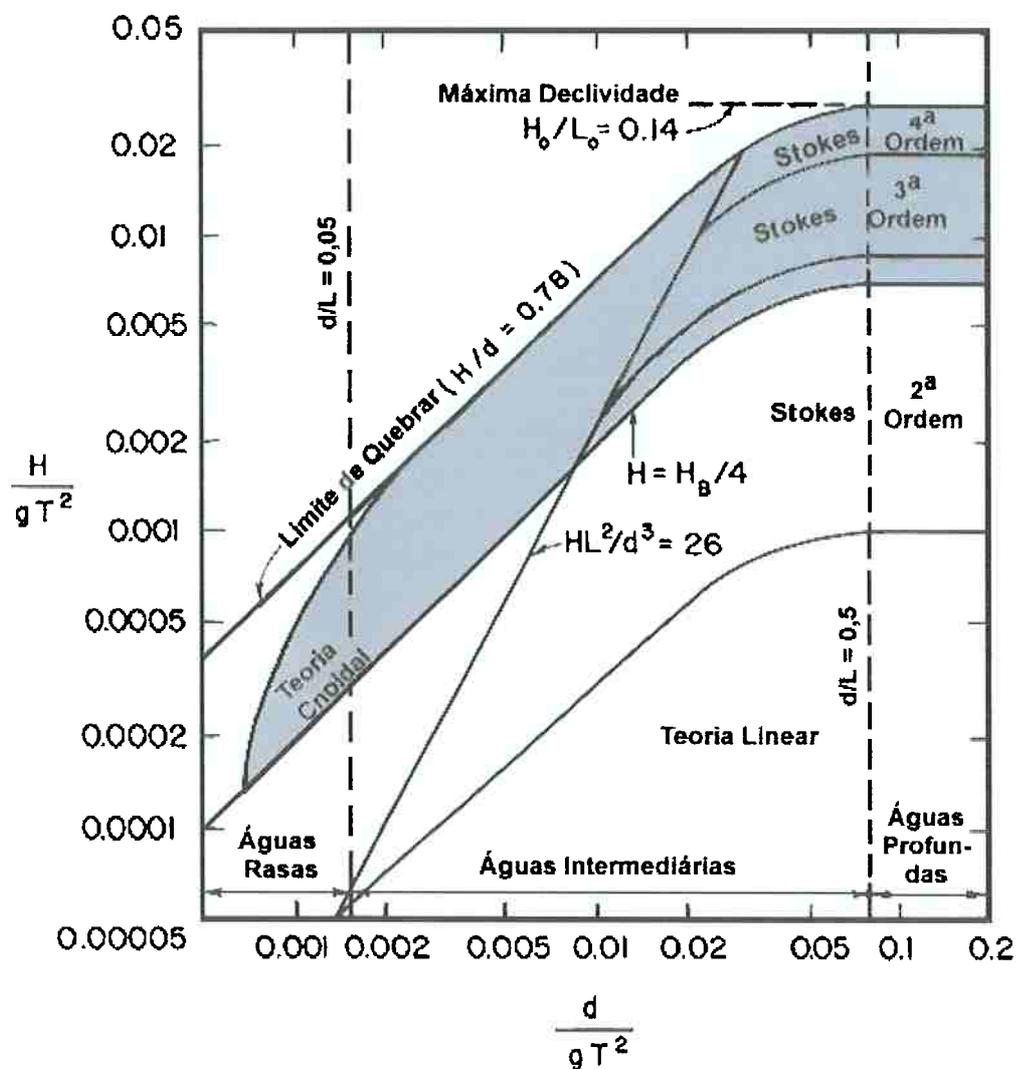


Figura 2.3 – Ilustração da aplicabilidade das teorias de ondas, em função de parâmetros da onda. (Adaptado de Le Méhauté, 1976)

### 2.2.1. Solução de Airy

Atribui-se a George Airy, matemático inglês, a proposição, em meados do século XVIII, da formulação linear. A teoria de Airy é a mais simples de todas e procura expressar um conjunto muito particular de ondas que, na verdade, não existem na natureza.

No entanto, essa abstração matemática é útil na solução, ou indicativo de solução, de um grande número de problemas reais, conduzindo à compreensão de outros fenômenos muito mais complexos. Apesar de grandemente simplificada, a também conhecida como teoria das pequenas amplitudes, é aplicável a diferentes casos e, segundo Le Méhauté (1976, p. 207), fornece resultados com um grau de precisão surpreendente.

Adiante, apresentam-se as condicionantes dessa teoria, que aplicadas a formulação geral conduzem à solução das ondas de pequena amplitude.

As equações que representam o problema da onda, como é demonstrado no Anexo 2, necessitam de condicionantes para serem resolvidas e no caso linear e bi-dimensional, utilizam-se as:

Equação de Laplace

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

Equação de Bernoulli Linearizada

$$p = \rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} - gy \right) \quad (2.2)$$

Fundo Impermeável

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{para } y = -d, \quad (2.3)$$

Condição Cinemática da Superfície Livre

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{para } y = 0, \quad (2.4)$$

Condição dinâmica da superfície livre linear, sem tensão superficial

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{para } y = 0, \quad (2.5)$$

Condições de superfície livre, combinadas, linearizadas

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{para } y = 0, \quad (2.6)$$

Periodicidade no espaço e no domínio do tempo

$$\phi(x, y, t) = \phi(x + nL, y, t); \quad \eta(x, t) = \eta(x + nL, t) \quad (2.7)$$

$$\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t + nT); \quad \eta(x, t) = \eta(x, t + nT) \quad (2.8)$$

com  $n$  um número inteiro.

Utilizando-se o método da separação de variáveis, usual na resolução de equações diferenciais, pode-se escrever:

$$\phi(x,y,t) \equiv X(x)Y(y)T(t) \quad (2.9)$$

Substituindo-se na equação Laplace e dividindo-se por  $XYT$ , obtém-se:

$$\frac{1}{X} \frac{D^2 X}{Dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{D^2 Y}{Dy^2} = 0 \quad (2.10)$$

Uma vez que  $X$  é somente função de  $x$  e  $Y$  somente de  $y$ , com  $x$  e  $y$  sendo variáveis independentes, tem-se:

$$\frac{1}{X} \frac{D^2 X}{Dx^2} = -k^2 \quad \text{e} \quad \frac{1}{Y} \frac{D^2 Y}{Dy^2} = +k^2 \quad (2.11)$$

Para  $k=0$ , a solução é dada por:

$$X = Ax + B \quad \text{e} \quad Y = Cy + E \quad (2.12)$$

e para  $k$  imaginário, toma-se  $|k|$ , o módulo de  $k$ , as soluções para as equações diferenciais podem ser expressas por :

$$X = Ae^{|k|x} + Be^{-|k|x} \quad (2.13)$$

$$Y = C\text{sen}(|k|y) + E\text{cos}(|k|y) \quad (2.14)$$

com  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $E$  constantes.

Finalmente, para  $k$  real e diferente de zero, tem-se as soluções que interessam:

$$X = A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx) \quad (2.15)$$

$$Y = Ce^{ky} + Ee^{-ky} \quad (2.16)$$

Substituindo-se  $X$  e  $Y$  na equação 2.9, e usando-se a equação 2.3,  $\phi$  resulta em:

$$\phi = \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} (Ce^{ky} + Ee^{-ky}) T(t) \quad (2.17)$$

$$\{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} (Cke^{-kd} - Eke^{kd}) T(t) = 0 \quad (2.18)$$

$$C = Ee^{2kd} \quad (2.19)$$

Substituindo-se a expressão de  $\phi$  na condição combinada de superfície livre, equação 2.6, resulta em:

$$\{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} Ee^{kd} 2 \left[ \operatorname{cosh}(kd) \frac{D^2 T}{Dt^2} + gk \operatorname{senh}(kd) T \right] = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{D^2 T}{Dt^2} = -gk \cdot \operatorname{tanh}(kd) \cdot T \quad (2.21)$$

A solução para esta equação é dada por:

$$T = G \operatorname{sen}(\omega t) + F \operatorname{cos}(\omega t) \quad (2.22)$$

com  $G$  e  $F$  constantes.

Resolvendo 2.21, chega-se a chamada relação de dispersão:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.23)$$

Esta equação expressa uma característica importante das ondas oceânicas que é a dependência entre o comprimento e a frequência, diferente, por exemplo, das ondas acústicas, que têm a velocidade constante, em meio homogêneo.

A solução completa para  $\phi$  é:

$$\phi = \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} e^{kd} 2 \operatorname{cosh}.k(d+y) \{G \operatorname{sen}(\omega t) + F \operatorname{cos}(\omega t)\} \quad (2.24)$$

A característica linear dessa equação permite que uma série de soluções sejam obtidas e inclusive combinações lineares dessas equações também sejam soluções. Para simplicidade apenas uma solução será trabalhada, sendo as demais homólogas. Suponha-se:

$$\phi = A_1 \operatorname{cosh} k(d+y) \operatorname{sen}(kx) \operatorname{sen}(\omega t) \quad (2.25)$$

Usando-se a condição dinâmica da superfície livre em (2.5), pode-se determinar o deslocamento da superfície correspondente ao potencial de velocidades em 2.25, como sendo:

$$\eta = \frac{1}{g} A_1 \omega \operatorname{cosh}(kd) \operatorname{sen}(kx) \operatorname{cos}(\omega t) \quad (2.26)$$

Para ondas estacionárias, a equação para o deslocamento da superfície livre deve apresentar dois termos, um que dependa só da posição e outro só do tempo. Por exemplo, da forma:

$$\eta = \frac{H}{2} \text{sen}(kx) \cos(\omega t) \quad (2.27)$$

Assim, determina-se o valor de  $A_1$  como sendo:

$$A_1 = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega \cosh(kd)} \quad (2.28)$$

A expressão para o potencial de velocidades é, portanto:

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g \cosh k(d+y)}{\omega \cosh(kd)} \text{sen}(kx) \text{sen}(\omega t) \quad (2.29)$$

As soluções para ondas progressivas podem ser obtidas por combinações de duas soluções estacionárias, ou permutando-se senos e cossenos. Empregando-se a expressão:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.30)$$

determina-se o potencial de velocidades para ondas progressivas:

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g \cosh k(d+y)}{\omega \cosh(kd)} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (2.31)$$

a qual, com  $k$  e  $\omega$  sendo positivos, representa o trajeto da onda na direção positiva  $x$ .

Considerando-se a onda progressiva, é importante determinar-se a velocidade com que se move. Supondo-se a fase  $\theta$  na forma  $(kx - \omega t)$ , para a fase constante, resulta que:

$$D\theta = D(kx - \omega t) \Rightarrow kDx - \omega Dt = 0$$

pois  $k$  e  $\omega$  também são constantes. Decorre, então, que:

$$\frac{Dx}{Dt} = \frac{\omega}{k} = c \quad (2.32)$$

Empregando-se a relação de dispersão, equação 2.23, a velocidade de fase pode ser expressa por:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2.33)$$

Observe-se que, a velocidade das ondas depende não somente do comprimento de onda, mas também da profundidade.

Uma das formas para determinar-se a velocidade de grupo, é examinando-se duas ondas com frequências ligeiramente diferentes, tal que:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H}{2} \cos(k_1 x - \omega_1 t) \quad (2.34)$$

onde,  $k_1$  e  $\omega_1$  são pequenas variações de  $k$  e  $\omega$ . Rearranjando-se, resulta em:

$$\eta = H \cos(kx - \omega t) \cos\left(\frac{\Delta k}{2} x - \frac{\Delta \omega}{2} t\right) \quad (2.35)$$

Assim, a velocidade da envoltória, pode ser calculada usando-se as relações básicas da ondulatória, da forma:

$$L_g = \frac{4\pi}{k - k_1} \quad T_g = \frac{4\pi}{\omega - \omega_1} \quad \frac{L_g}{T_g} = \frac{\omega - \omega_1}{k - k_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

Levando-se ao limite obtém-se:

$$\frac{D\omega}{Dk} = \frac{D}{Dk}(kc) = c + k \frac{Dc}{Dk} = c_g$$

sendo  $c_g$  a velocidade de grupo.

$$c_g = c + k \frac{D}{Dk} \left[ \frac{g}{k} (\tanh kd) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

$$c_g = \frac{1}{2} \underbrace{\left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]}_n c \quad (2.37)$$

Quando  $d$  é muito maior que  $L$ , ou seja, em águas profundas  $n=0,5$ , a velocidade de grupo é metade da velocidade de fase. Para  $d$  comparável a  $L$ , caso de águas rasas,  $n=1$ , resulta em velocidades iguais.

Até este ponto tratou-se a condição de ondas livres, sendo que é de interesse para um tanque de ondas estudar o caso de ondas produzidas por um corpo em movimento, dentro d'água. Restringindo-se ao caso prático de uma placa oscilante, parcialmente submersa, pode-se calcular o potencial de velocidades  $\phi(x,y,t)$  para as ondas de pequena amplitude geradas. Para uma parede movendo-se de forma harmônica, a condição de contorno específica será:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega s(y) \cos \omega t \quad (2.38)$$

Esta equação representa a condição limite do movimento da placa em  $x=0$ , onde  $s(y)$  denota a amplitude do deslocamento. Conforme Chakrabarti (1994), a solução para o potencial de velocidades,  $\phi$ , pode ser escrita como:

$$\phi = -\frac{\omega}{k} A \cosh ky \sin(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{k_n} A_n \cos k_n y \exp[-k_n x] \cos \omega t \quad (2.39)$$

sendo que  $k$  satisfaz 2.23 e  $k_n$  é a raiz positiva e real daquela equação, levando a:

$$A = \frac{2k \int_0^d s(y) \cosh ky Dy}{\sinh kd \cosh kd + kd} \quad (2.40)$$

$$A_n = \frac{2k_n \int_0^d s(y) \cos k_n y Dy}{\sin k_n d \cos k_n d + k_n d} \quad (2.41)$$

Do potencial de velocidades  $\phi(x,y,t)$ , os deslocamentos em  $x$  e  $y$  são obtidos por:

$$\Delta x = A \cosh ky \sin(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos k_n y \exp[-k_n x] \sin \omega t \quad (2.42)$$

$$\Delta y = A \sinh ky \cos(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin k_n y \exp[-k_n x] \sin \omega t \quad (2.43)$$

Percebe-se que, o transitório decai exponencialmente e aproxima-se de zero quando  $x > 3d$ . Então, para  $x > 3d$ :

$$\Delta y = A \operatorname{senh} ky \cos(\omega t - kx)$$

$$\Delta y = a \cos(\omega t - kx) \quad (2.44)$$

na qual  $a$  é a amplitude da onda e  $a = A \operatorname{senh}(kd) = H/2$ .

Para um gerador de ondas tipo placa basculante ("flap"), com imersão  $\delta$  e ponto de pivotamento  $\Delta d$ , o deslocamento pode ser descrito em termos de seu curso no nível de água estático,  $S$ , por:

$$\int s(y) = \frac{S}{\delta} (y - \Delta d) \quad \text{para } \Delta d \leq y \leq d \quad (2.45)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s(y) = 0 \\ \end{array} \right. \quad \text{para } y < \Delta d ; \Delta d = d - \delta \quad (2.45a)$$

$$A = 2S \frac{k\delta \operatorname{senh} kd - \cosh kd + \cosh k\Delta d}{k\delta(\operatorname{senh} kd \cosh kd + kd)} \quad (2.46)$$

$$A_n = 2S \frac{k_n \delta \operatorname{senh} k_n d + \cos k_n d - \cosh k_n \Delta d}{k_n \delta (\operatorname{sen} k_n d \cos k_n d + k_n d)} \quad (2.47)$$

Substituindo-se, resulta a expressão:

$$\frac{S}{H} = \frac{k\delta [\operatorname{senh} kd \cosh kd + kd]}{4 \operatorname{senh} kd [k\delta \operatorname{senh} kd - \cosh kd + \cosh k\Delta d]} \quad (2.48)$$

Esta é a equação do gerador de ondas tipo placa basculante, ou seja, a função que relaciona o curso da placa, no nível d'água estático, com a elevação da superfície d'água.

As expressões apresentadas foram deduzidas a partir de algumas simplificações que sob certas condições podem não ser representativas da realidade. No equilíbrio de forças para a condição de contorno da superfície livre, equação 2.5, considere-se a tensão superficial, como em Horikawa (1978) :

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=0} + g\eta - \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2\eta}{\partial x^2} = 0 \quad (2.49)$$

sendo  $K$  a tensão superficial.

Usando-se que  $\eta = a \cos(kx - \omega t)$ , pode-se mostrar que  $\eta$  satisfaz a equação  $\partial^2\eta/\partial x^2 = -k^2\eta$ . Reescrevendo-se a condição de contorno para a superfície livre e resolvendo-se:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=0} + \left(g + \frac{Kk^2}{\rho}\right)\eta = 0 \quad (2.50)$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{g}{k} + \frac{Kk}{\rho}\right) \tanh(kd)} \quad (2.51)$$

Para águas profundas,  $d \gg L$  e  $\tanh(kd) \approx 1$ , resulta:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} + \frac{Kk}{\rho}} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi K}{\rho L}} \quad (2.52)$$

Calculando-se com  $K = 73,5$  dina/cm para a tensão superficial, determina-se  $L_m=0,0172$  m e  $c_m=23,2$  cm/s, notando-se que esta é a menor velocidade de onda que existe na natureza.

Uma representação gráfica comparativa das equações 2.51 e 2.33, é apresentada na figura 2.4. Ressalta-se o comportamento das ondas capilares, com a velocidade crescendo com o aumento da freqüência, oposto do que ocorre com as ondas gravitacionais.

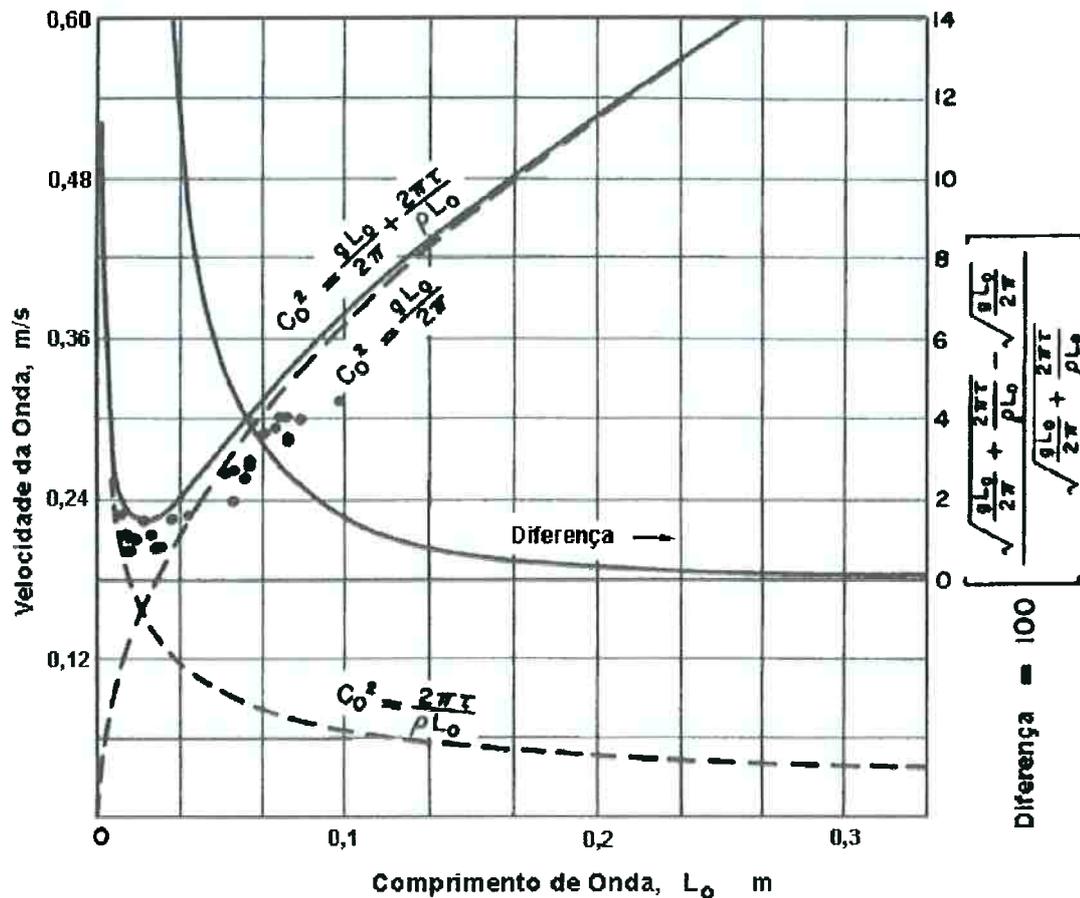


Figura 2.4 – Comparação gráfica entre as velocidades de ondas gravitacionais e capilares. (Adaptado de Horikawa, 1978)

Outro efeito que usualmente é ignorado, pode manifestar-se de forma significativa em situações bastante semelhantes às condições práticas encontradas em um tanque de ondas. A atenuação é um decréscimo da amplitude da onda em função da distância percorrida.

Uma forma de representar este fenômeno é apresentada por Sarpkaya e Isaacson (1981), pela expressão:

$$H = H_0 e^{-\zeta x} \quad (2.53)$$

na qual  $H_0$  é a altura de onda em uma referência e  $\zeta$  é o fator de atenuação, com dimensão inversa do comprimento, que pode ser definido explicitamente como:

$$\zeta = -\frac{1}{H} \frac{\delta H}{\delta x} \quad (2.54)$$

$$\psi = \zeta d = -\frac{d}{H} \frac{\delta H}{\delta x} \quad (2.55)$$

sendo  $\psi$  um coeficiente de atenuação adimensional.

Para o caso de um canal de ondas, o fator  $\zeta$ , conforme Hunt, citado por Sarpkaya e Isaacson (*op. cit.*), tem a expressão:

$$\zeta = \frac{k\varepsilon}{b} \left[ \frac{kb + \sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \right] \quad (2.56)$$

com  $b$  a largura e  $\varepsilon = (2\nu/\omega)^{1/2}$  refere-se à camada limite.

Ainda para canais, o coeficiente de atenuação  $\psi$  pode ser entendido como constituído de componentes devido às influências do fundo e das paredes laterais. Assim, usando-se o subscrito  $b$  para o fundo e  $w$  para as paredes, define-se:

$$\psi = \psi_b + \left(\frac{2d}{b}\right)\psi_w \quad (2.57)$$

$$\psi_b = \frac{k\varepsilon}{2} \left[ \frac{2kd}{2kd + \sinh(2kd)} \right] \quad (2.58)$$

$$\psi_w = \frac{k\varepsilon}{2} \left[ \frac{\sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \right] \quad (2.59)$$

No caso de águas profundas, e não havendo interações com paredes, a expressão reduz-se a:

$$\zeta = 4k^2 v \left(\frac{k}{g}\right)^{1/2} = 2k(k\varepsilon)^2 \quad (2.60)$$

Após esta síntese dos principais pontos da teoria de ondas, que serão abordados experimentalmente, a seguir, resume-se algumas breves noções sobre métodos numéricos, aplicados a tanque de ondas.

## 2.2. Alguns Modelos Numéricos

Os modelos numéricos são implementações de algoritmos de cálculo que resolvem computacionalmente as equações ou sistemas de equações de onda. Existe uma infinidade de tipos e versões, cada um mais voltado para uma determinada área de estudo e contendo módulos para quantificação de fenômenos específicos ou conjuntos de fenômenos de interesse.

O modelo mais atual é o de terceira geração, que resolve a equação de transferência de radiação por integração direta de todas as suas componentes sem assumir nenhuma condição prévia sobre a forma do espectro de energia. Os modelos anteriores baseiam-se em uma forma de espectro previamente arbitrada e na parametrização dos efeitos integrais da física da geração e dissipação de ondas. Um breve resumo crítico de alguns modelos numéricos pode ser encontrado no capítulo 15 de Stewart (2002).

Um dos grandes atrativos do modelo numérico é que uma vez calibrado, para uma certa configuração do problema, pode ser empregado para prever uma situação futura, dentro daquelas condições. Alguns exemplos são os modelos de previsão meteorológica e de ondas regionais, como pode ser constatado por resultados publicados na página do Inpe-CPTec (2002) e do FNMOC (2002).

Tradicionalmente, as instituições e organizações dedicadas a previsão do tempo investem muito no desenvolvimento desses modelos. Também as áreas de Engenharia Oceânica, Engenharia Costeira e Oceanografia, ligadas principalmente a exploração de petróleo no mar, tem seus interesses direcionados para estimar as ações das condições ambientais marítimas e os efeitos sobre sistemas oceânicos e costeiros.

Outro ponto de destaque é a chamada variação paramétrica, onde simulações são feitas fixando-se alguns parâmetros e variando-se outros. Isto é útil para estudar as influências de cada variável nos resultados, separadamente, e também as influências recíprocas das variáveis.

Existe um grande número de implementações numéricas para resolução das equações de ondas e não serão discutidas aqui. Para fins ilustrativos, pode-se mencionar alguns exemplos clássicos, tais como o WaveWatch, o WAM - Wave Analysis Model, o SWAN - Simulating Waves Nearshore e o CEDAS - Coastal Engineering Design and Analysis System.

O WaveWatch III (Tolman, 2002) é desenvolvido e aplicado pelo NOAA/NCEP (2002), tendo passado antes pela Universidade de Delft e pelo Centro de Vão Espacial Goddard, da NASA. Esse é um modelo de terceira geração que simula a circulação global, apresentando resultados de previsão de ondas para todo o planeta. Exemplos de aplicação podem ser vistos nas páginas do MPC - Marine Prediction Center (2002).

O modelo WAM (Günther et al., 1992), similar ao WAMDI (1988), desenvolvido pelo Max Planck Institut, da Alemanha, tem os mesmos fundamentos do WaveWatch, empregando equações semelhantes. Como as implementações numéricas diferem entre WaveWatch III e WAM os resultados diferem em certas circunstâncias.

Uma análise comparativa foi elaborada por Chen et al. (1999) concluindo que o WaveWatch III tem melhor desempenho do que o WAM, quando comparados a resultados de medidas feitas por bóias oceânicas e altímetros, em diversos locais do planeta. Diferenças significativas são : o WaveWatch calcula efeitos da dispersão, possui uma formulação mais avançada para a geração e dissipação das ondas e foi projetado para

processamento paralelo intensivo. O WAM permite a realimentação com espectros realmente medidos, melhorando a previsão local.

Um outro desenvolvimento, feito pelo MIT - Massachusetts Institute of Technology no final da década de 80, resultou no WAMIT (WAMIT, 2002) que é utilizado principalmente para cálculo de movimentos e esforços em sistemas oceânicos e navais. O estudo da interação entre ondas e estrutura é feito pela aplicação do método dos painéis, podendo fornecer resultados de primeira e segunda ordem para sistemas flutuantes e submersos.

Um conjunto de programas para projeto e análise de estruturas costeiras pode ser encontrado no CEDAS (CHL, 2002). O CEDAS foi originalmente desenvolvido pelo USACE - Waterways Experiment Station, com o nome de ACES - Automated Coastal Engineering System, e hoje é comercializado pela Veri-Tech Inc. (VERITECH, 2002), com vários outros módulos adicionais. Este programa pode realizar análises hidrodinâmicas multi-direcionais, hidrodinâmica costeira, processos litorâneos, estuários, canais, quebra-mares e outros sistemas similares.

O SWAM (Booij et al, 1999) também é um programa que emprega as equações de onda a partir do balanço global de energia, tendo em comum com outros modelos a filosofia básica de implementação. No entanto, a diferença fundamental reside nos métodos numéricos para resolução das equações, sendo esse algoritmo adaptado para regiões próximas da praia. Esse programa é de domínio público e a Universidade de Delft mantém uma página na Rede Mundial de Computadores, da qual o programa pode ser copiado.

### 2.3. Tanque de Ondas

Um tanque de ondas é um local devidamente preparado para gerar, propagar e absorver, assim como quantificar, diversas variáveis relativas ao fenômeno ondulatório. Também deve comportar a instalação de modelos de sistemas oceânicos, embarcações e sistemas costeiros, para que seja possível determinar o comportamento destes, sob a ação das solicitações ambientais típicas do oceano, devidamente representadas em escala.

Historicamente, nota-se que os tanques de ensaios tinham poucas dezenas de metros de extensão, metros de largura e poucos metros de profundidade. Esses tanques eram voltados para medidas de resistência ao avanço dos cascos, tracionados por sistemas de cabos, polias e pesos.

As dimensões desse tipo de tanque estão associadas à velocidade e dimensões do modelo e obviamente com o aumento da velocidade e do tamanho das embarcações, as dimensões do tanque necessário para os ensaios também aumentam. Isto porque, a escala não pode ser diminuída arbitrariamente, sob pena de serem violados os fundamentos físicos que regem as leis de semelhança entre modelo e protótipo.

No caso de tanque de ondas para ensaios com modelos estacionários, as premissas são um pouco diferentes. Para estudos de ondas, as limitações das dimensões têm razões relacionadas aos fenômenos ondulatórios, a instrumentação e ao método de análise a serem aplicados.

Atualmente existem pouco mais de 400 tanques no mundo (UNO, 1997) realizando testes e ensaios nas áreas Naval e Oceânica, Costeira, Hidrográfica, Oceanográfica e outras correlatas. Como exemplo da ampla

gama de tipos, apresenta-se, no Apêndice, uma lista resumida das principais instalações na Europa.

O tanque de ondas que pretende-se investigar é aquele mais voltado para ensaios e testes na área de Engenharia Oceânica. Isso quer dizer, o tanque deve ser capaz de reproduzir solicitações e comportar modelos reduzidos, de interesse para a área em questão. Não serão tratados os tanque de ondas capilares (*"ripple tank"*), mais aplicados em Física Ondulatória, e nem o tanque costeiro ou bacia, usado para investigações hidráulica e oceanográfica.

O que caracteriza um tanque para ensaios oceânicos é a faixa de freqüências e amplitudes de ondas possíveis de serem geradas, as dimensões e profundidade que permitam a instalação de modelos reduzidos de sistemas oceânicos, em escalas adequadas, e também as possibilidades de gerar-se corrente e vento, nas faixas compatíveis com as solicitações ambientais reais.

Lembre-se que, a reprodução do fenômeno físico associado a ondas gravitacionais é limitada em freqüência, como mostrou-se no item 2.2.1. O menor comprimento de onda, para aplicações práticas, é 0,0172 m, correspondente a uma freqüência de cerca de 3 Hz, para um desvio da ordem de 1% na velocidade da onda (figura 2.4, p. 35).

Um tanque de ondas diferente do tipo mencionado é o tanque virtual, ou tanque numérico. O tanque numérico pode ser entendido como uma simulação matemática dos fenômenos ondulatórios, através de um algoritmo, como aqueles mencionados no item 2.2. Trata-se da resolução, por um ou mais computadores, das equações de ondas, condicionadas a certos requisitos específicos do caso em estudo.

# CAPÍTULO 3

## GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS

*"Measure what is measurable,  
and make measurable  
what is not so."*

*Galileu Galilei*

### **3. GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS**

Alguns historiadores da Ciência (Encarta, 2002) consideram o grande mestre italiano Leonardo da Vinci, que viveu no final do século XV, como o primeiro cientista experimental. Da Vinci contribuiu muito para o desenvolvimento da Engenharia com observações e anotações bastante detalhadas de vários fenômenos naturais, inclusive jatos, ondas e vôo de pássaros, mas empregando apenas a observação.

O cientista que introduziu a experimentação junto com a observação foi o físico italiano Galileu Galilei, no final do século XVI. O método científico experimental só foi consolidado após os trabalhos de Francis Bacon, filósofo inglês, no início do século XVII (Encarta, *op.cit.*). Mas, somente no decorrer do século XVIII que vários matemáticos, dedicados a resolver problemas da Hidráulica, estabeleceram as bases teóricas usadas ainda hoje.

Daquela mesma época, na área de Engenharia Naval e Oceânica, conforme Rouse (2000), existem relatos de que Jean D'Alembert, matemático francês, teria lançado mão de um tanque de provas para testar o arrasto de modelos de embarcações, em 1752. Provavelmente os resultados dos testes deram origem a obra "*Essai d'une nouvelle theorie sur la resitance des fluides*".

Ainda Rouse (*op. cit.*) menciona que, o cientista norte americano Benjamin Franklin realizou ensaios com modelos em um tanque miniatura em período coincidente com D'Alembert. Entretanto, apenas em meados do século XIX que testes com modelos em tanque de provas resultaram em avanço significativo na área Naval e Oceânica.

William Froude, engenheiro naval britânico, foi quem sistematizou a experimentação de modelos em tanques de ensaios, com o propósito de melhor projetar embarcações em escala verdadeira, por volta de 1870, conforme Slade (1998). Chegou a construir e operar, em terreno de sua propriedade, um tanque de provas para ensaios com modelos, auxiliado por seu filho Robert. Assim, da análise dos resultados, Froude formulou a lei de semelhança para fluxos sujeitos a força da gravidade.

Ao final do século XIX, o engenheiro e matemático irlandês Osborne Reynolds, estudando escoamento de fluidos, estabeleceu a fronteira entre fluxo laminar e fluxo turbulento (Jackson, 2002). Interessante notar que, Reynolds é tido como o primeiro a utilizar a lei de semelhança de Froude, em modelo de testes a respeito da ação de ondas em um estuário.

Froude e Reynolds estabeleceram critérios (números adimensionais), que levam os respectivos nomes, e que, ainda hoje, são bases para os estudos com modelos em escala (TUDELFT, 2002).

### 3.1. Tanque do LENO

O tanque de ensaios em ondas do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica, foi adaptado de um tanque existente desde a década de 60, construído para experimentos de Hidrostática, nas dependências físicas do Edifício Mecânica e Naval, da Escola Politécnica, no campus da Universidade de São Paulo.

A adaptação consistiu basicamente na instalação de equipamentos eletro-mecânicos que possibilitam a geração de ondas hidráulicas, com amplitude e frequências controladas, por meio de uma placa basculante. Também um absorvedor de ondas passivo foi construído e instalado na extremidade oposta ao gerador. Um detalhamento dessa instalação é relatado por Souza et al. (1998).

O tanque em questão é considerado de dimensões reduzidas, em parte pelo seu comprimento. Medindo pouco mais de 21 m, o tanque objeto deste estudo, mostrado nas figura 3.1 e 3.2, tem uma largura e profundidade comparáveis a outros tanques no mundo.

Na configuração original, tinha um absorvedor do tipo potencial, constituído por uma rampa com dupla inclinação, feita com prancha de madeira e sarrafos. O ângulo da parte inferior era 27,8 graus e na parte superior o ângulo era 16,8 graus, com a superfície considerada rugosa devido aos sarrafos.

O absorvedor ocupava uma distância horizontal de 4 m e na vertical 1,85 m, iniciando no fundo e terminando pouco acima da parede, ocupando toda a largura do tanque.

O comprimento do tanque, considerado curto, e o absorvedor com inclinação acentuada impõem uma limitação no espectro de ondas a ser gerado, por causar reflexões de ondas de baixa frequência antes que seja possível obter-se de 5 a 10 ciclos com alturas constantes, no ponto de ensaios.

Uma forma de melhorar a qualidade da onda é gerar ondas com controle por equação de segunda ordem e sistema de geração em malha fechada com realimentação por amplitude medida da onda, estudados por Leeuwen e Klopman (1996).

Para minimizar o problema da reflexão emprega-se absorvedor de ondas ativo, basicamente um gerador de ondas trabalhando "ao contrário", como relatado por Moubayed e Williams (1993) e Schäffer (1996).

O absorvedor ativo mede a onda incidente e realiza um movimento para extinguir a amplitude medida. Simplificadamente, enquanto um sistema gera ondas em uma das extremidades de um tanque retangular, na outra extremidade um sistema semelhante gera uma anti onda e o resultado, teoricamente, é reflexão nula.

Entretanto, esse tema não será desenvolvido aqui, embora extremamente pertinente, devido a orientação para os objetivos mencionados anteriormente e as evidentes limitações de tempo e espaço.

Assim, para definir, inequivocamente, o espectro de ondas realmente utilizável no tanque do LENO, programou-se uma série de ensaios para verificar a qualidade da onda medida em diversos pontos, ao longo do tanque. Outras variáveis do sistema de geração de ondas também serão medidas para permitir análises posteriores mais abrangentes.

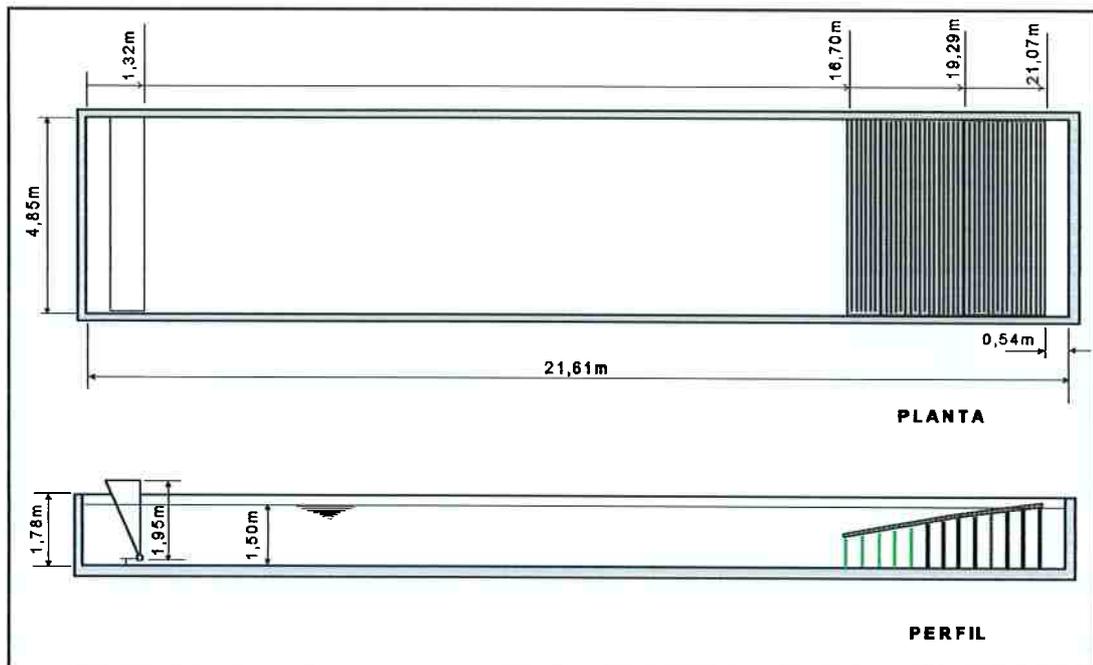


Figura 3.1 - Esquema simplificado do tanque de ensaios do LENO.



Figura 3.2 - Vista geral do tanque, de montante para jusante. Em primeiro plano os sistemas de controle e de acionamento do atuador.

### 3.2. Metodologia

A técnica a ser empregada neste estudo é basicamente experimentalista e os ensaios serão programados de forma a gerar um conjunto de dados para cada condição do tanque. O esquema julgado mais adequado é o de excitação/resposta, controlando-se a freqüência e amplitude das ondas geradas, através de um gerador de sinais.

Para cada um dos pares de freqüências e amplitudes, e para uma varredura em cada situação, do sinal de excitação deve-se obter a resposta do tanque. As freqüências a serem usadas não deverão coincidir com freqüências naturais do tanque, nem do sistema de geração. Para isso, deverão ser estimados os auto valores do sistema e então uma definição prévia determinará as freqüências a gerar.

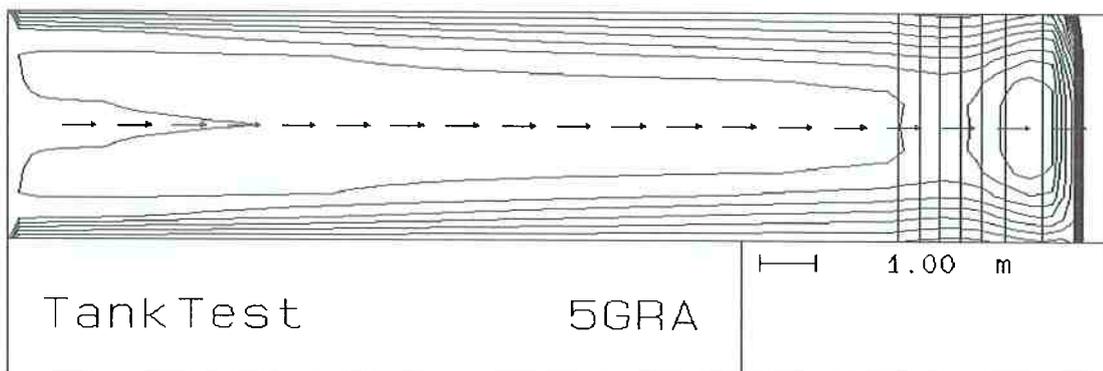
Assim que definidas as freqüências, as amplitudes serão estabelecidas de modo que as ondas produzidas tenham declividades dentro das faixas consideradas linear e também não linear, para a mesma situação. As varreduras deverão abranger as freqüências mínima e máxima, com pelo menos duas amplitudes distintas.

Antes de cada medição os instrumentos deverão ser calibrados e adequadamente ajustados para o fenômeno a ser investigado, em especial o ondômetro. Uma série de medidas deverá ser feita na situação denominada original, e outras séries serão feitas à medida que modificações sejam introduzidas no tanque. Este procedimento deverá gerar um conjunto de dados do tipo antes e depois, onde a cada etapa poderá ser determinada a relação excitação/resposta do tanque.

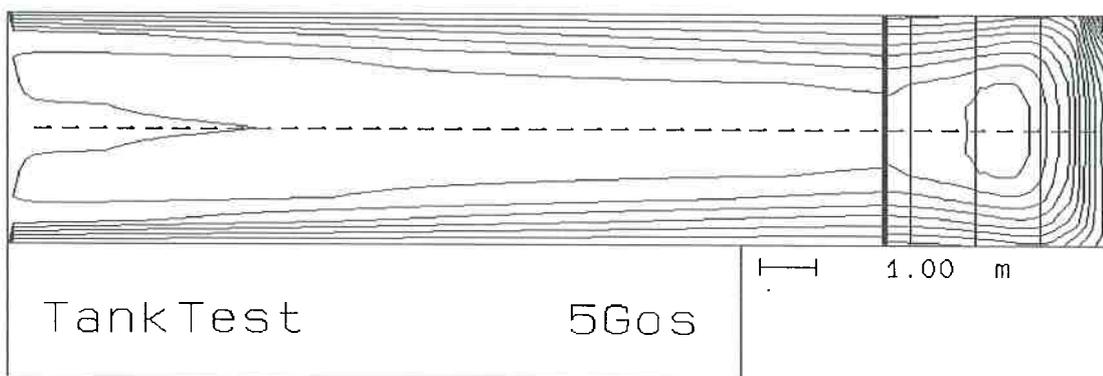
A análise dos dados obtidos com esta técnica deverá fornecer indicações de causa e efeito entre as modificações feitas e a qualidade da onda, ou o desempenho do tanque. Para tanto, os sinais das variáveis físicas medidas deverão ser analisados nos domínios do tempo e das frequências.

Uma tentativa de melhor definir a metodologia de ensaio, e o posicionamento dos ondômetros, foi feita a partir de algumas simulações numéricas com o programa SWAN, descrito anteriormente. O programa instalado em um computador tipo PC, Pentium III, 650 MHz, 128 Mb de Ram e disco de 12 Gb, não pode ser usado em sua plenitude devido às grandes limitações do recurso computacional disponível.

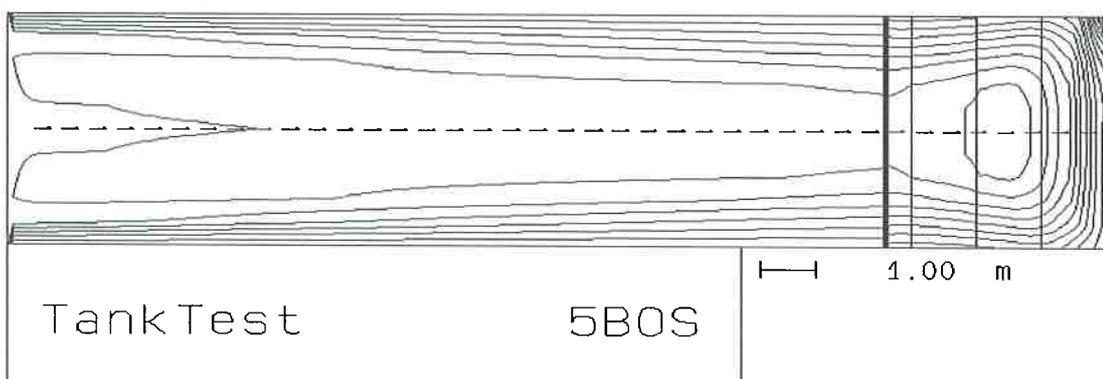
Pretendeu-se, também, otimizar o projeto do absorvedor com as simulações numéricas, mas as alturas de onda mostraram-se pouco sensíveis às diferentes situações, provavelmente devido às limitações dos recursos computacionais. Alguns dos resultados podem ser vistos na figura 3.3, sendo que mais detalhes das simulações são apresentados no Anexo 3.



a) Praia original, geração gaussiana; frequência central 0,5 Hz.



b) Praia modificada, geração gaussiana, frequência central 0,5 Hz; e



c) Praia modificada, geração de onda monocromática 0,5 Hz.

Figura 3.3 - Resultados típicos de simulação com o SWAN, mostrando curvas de iguais alturas de ondas para diferentes absorvedores.

(curvas de nível com  $\Delta = 0,01$  m)

### 3.2.1. Configurações dos Ensaios

Os instrumentos selecionados para as medições serão instalados tanto no sistema de geração, para determinação das variáveis de excitação, quanto ao longo do tanque, para caracterizar a resposta. As posições dos sensores podem ser visualizadas na figura 3.4, para o tanque e na figura 3.5, para o gerador. As posições serão mantidas em todas as configurações e para todas as medições.

A primeira série de ensaios será feita com o tanque na configuração denominada "original", ou seja, absorvedor com rampa de dupla inclinação, do fundo até o topo da parede. Também existem duas frestas de 45 mm entre o atuador e as paredes laterais do tanque, em toda a vertical. Estes espaços permitem um fluxo da água da parte traseira do atuador para a região de geração de ondas, e vice-versa, conforme o movimento do atuador.

A configuração original será ensaiada com o nível d'água estático (NAE) normal, isto é, 1,5 m e também com o nível d'água estático reduzido, a 1 m. Esta primeira série de ensaios visa estabelecer uma linha de referência para confirmação de dados existentes e para facilitar comparações posteriores.

A segunda série será realizada após as modificações, principalmente no absorvedor, que continuará a ser uma rampa com dupla inclinação, mas com ângulos menores e elevada em relação ao fundo do tanque. O espaço entre a rampa e o fundo do tanque receberá telas plásticas verticais, esticadas no sentido transversal do tanque, ortogonal à propagação da onda, distantes 0,35 m entre cada uma. Uma visualização das duas configurações pode ser feita na figura 3.6 e um resumo é apresentado na Tabela 3.1.

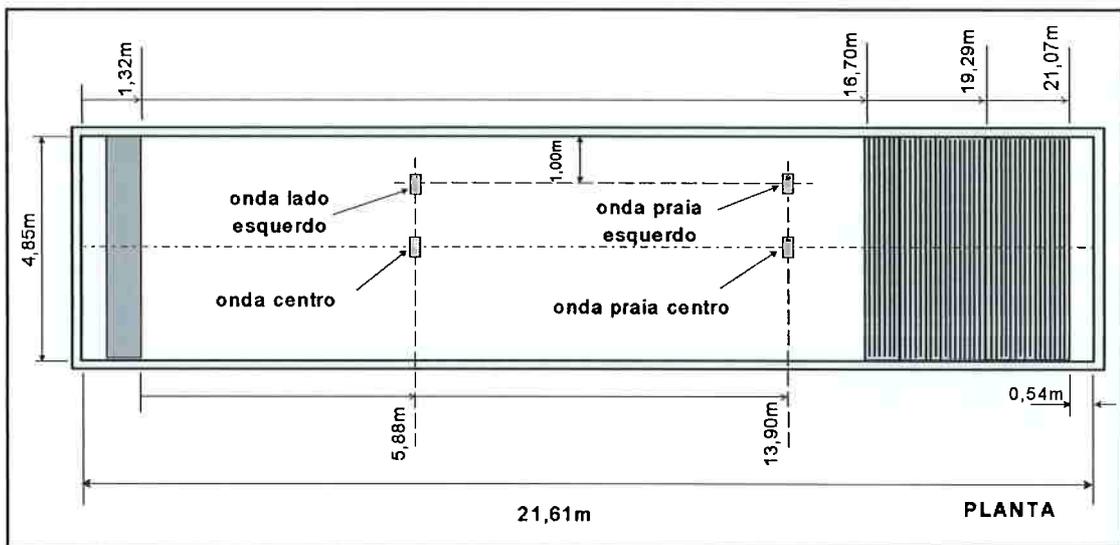


Figura 3.4 - Croquis do tanque com a localização dos ondômetros.

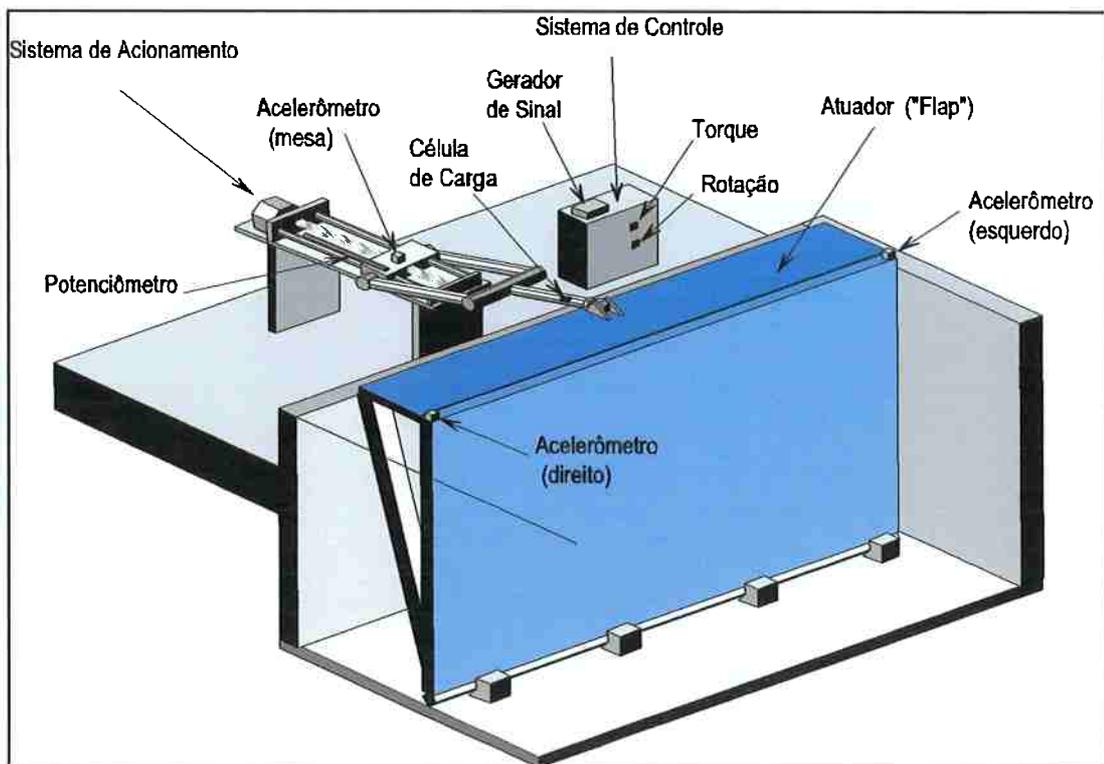


Figura 3.5 - Ilustração da posição dos sensores no sistema de geração de ondas.

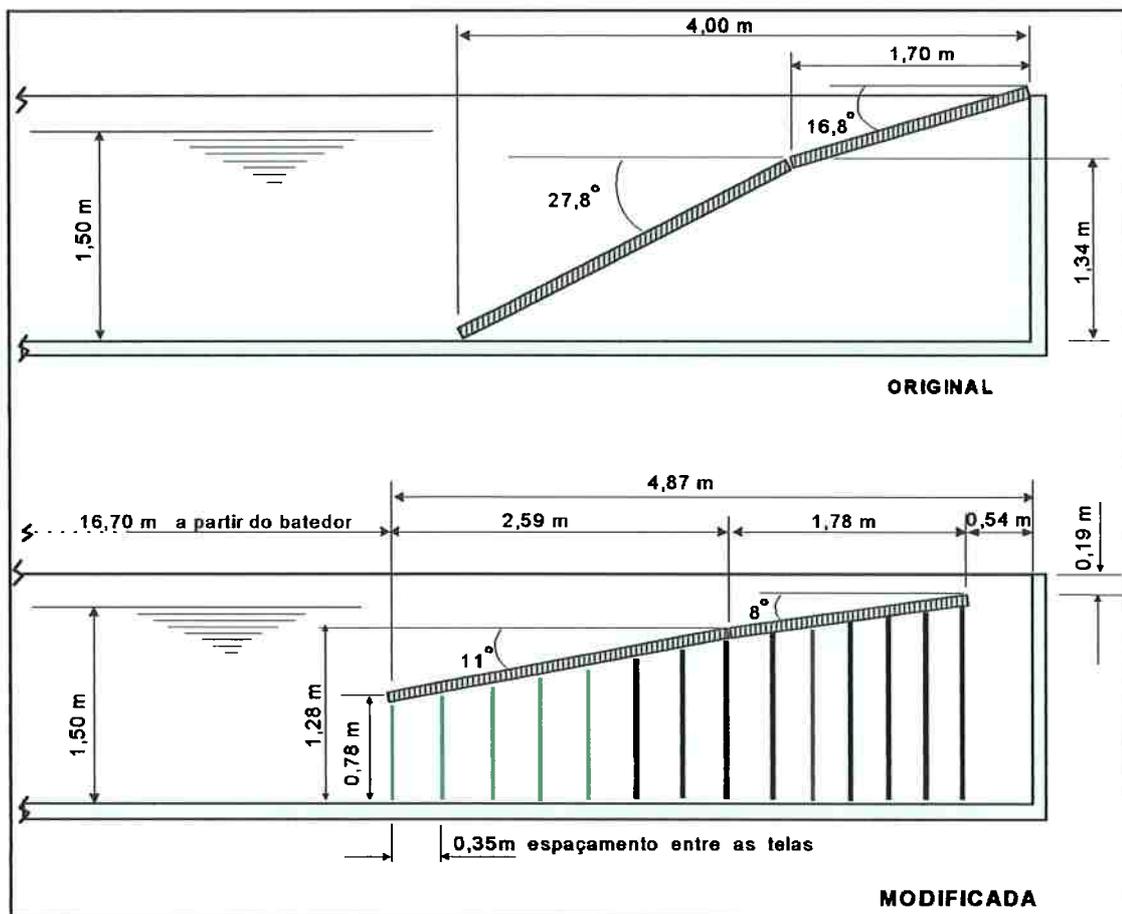


Figura 3.6 - Configuração do absorvedor na situação original e na situação modificada.

Tabela 3.1 - Resumo das configurações dos ensaios.

	Nível D'água Estático (m)	Onda $H/L < 3,5\%$	Onda $H/L > 3,5\%$	Observação
Série 1 (original)	1,5	Sim	Sim	
	1,0	Sim	Não	
Série 2 (modificada)	1,0	Não	Sim	
	1,5	Sim	Sim	
	1,5	Sim	Sim	+ Tela transv.
	1,5	Sim	Sim	+ Tela lateral

A segunda série de ensaios contemplará uma situação na qual estará presente o absorvedor modificado, uma segunda situação com uma tela esticada transversalmente, do fundo até 0,30 m acima do NAE de 1,5 m, na posição do início do absorvedor e outra, igual a segunda mas com duas camadas de tela plástica nas paredes laterais, ao longo de 6 m a partir do atuador.

Outras modificações na configuração original serão o preenchimento das frestas laterais do atuador, com poliuretano e o reforço estrutural de partes do sistema de acionamento e do atuador, com o intuito de diminuir vibrações próprias. Também, o espaço atrás do atuador receberá telas plásticas em camadas horizontais, uma tentativa para diminuir a onda gerada na parte traseira.

### 3.3. Equipamentos e Instrumentos

Como foi mencionado anteriormente, existem cerca de 400 tanques de ondas e instalações experimentais no mundo, dos mais diversos tipos. Isso quer dizer que, o mercado para Instrumentação nessa área é restrito e bastante específico, fazendo-se com que quase sempre sejam empregados instrumentos de outras áreas.

Isto requer adaptações, de graus variados de dificuldade conforme o caso, que podem modificar o desempenho original do equipamento. Assim, é muito importante que cada componente de um tanque de ensaios seja testado na função a que se destina, para que seja garantido o seu desempenho, e no caso específico de instrumentos de medidas, a sua curva de resposta.

Para atender os requisitos de ensaio serão utilizados os seguintes equipamentos, mostrados nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

- Gerador de Ondas; com sistema de controle Moog, composto de módulos eletrônicos de potência e servo motor de corrente alternada, fuso de esferas recirculantes e braço mecânico acoplado ao atuador;
- Gerador de sinais, amplitude e frequência variáveis, onda senoidal, triangular e quadrada, saída direta, modulada e varredura, HP-3312A;
- Osciloscópio digital, 2 canais, com memória, Tektronix TD-220;
- Amplificador Condicionador de Sinais Dinâmicos para extensômetros, Kyowa DPM-6K, resposta 0 a 10 kHz;
- Sistema de Aquisição de Dados Lynx AC2120 e módulo AI2160, com 16 canais, conversor A/D 12 bits, 60 kHz de amostragem;

- Computador tipo PC, Pentium 233 MHz, 32 Mb de RAM; disco rígido de 6 Gb, com programa AQDADOS-Lynx;
- Acelerômetros Kyowa AS2GA, +/- 2 G, resposta 0 a 60 Hz
- Potenciômetro Gefran LTM-275-S, 80 cm;
- Ondômetro IPT, resposta 0 a 5Hz, 40 cm de altura; e
- Sensor de força extensométrico, montado no braço de ligação entre o sistema de acionamento e o atuador.

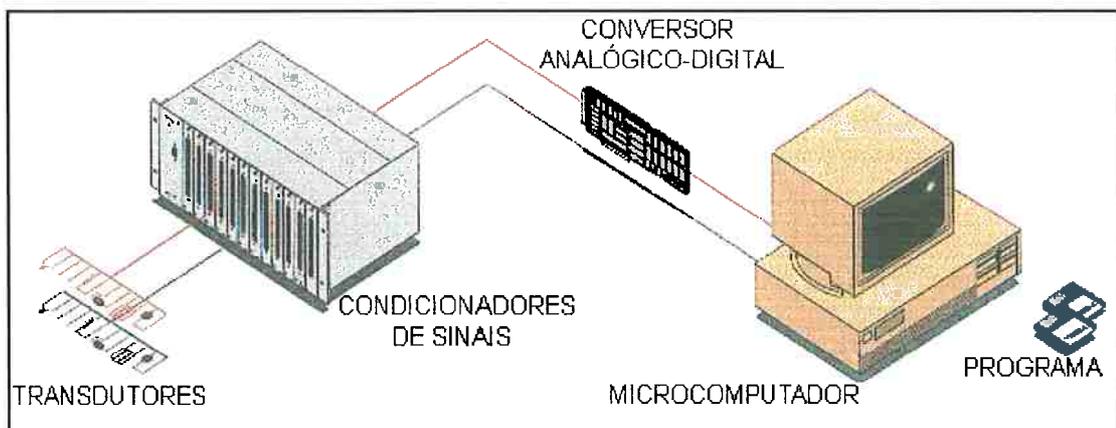


Figura 3.7 - Esquema de interligação dos instrumentos e equipamentos ilustrados na figura 3.8.



Figura 3.8 - Vista geral da bancada de instrumentação



Figura 3.9 - Detalhe do sistema de controle eletrônico.

### 3.3.1. Sensor de Ondas

O único instrumento de medida específico da área é o ondômetro ("wave probe"), que pode ter diversas configurações e utilizar diferentes princípios físicos. Os tipos mais comuns são o resistivo e o capacitivo, sendo o resistivo um pouco mais utilizado nas instituições européias (ITTC, 2002).

O funcionamento deste tipo de sensor dá-se pela variação de resistência entre dois elementos metálicos resistivos isolados quando a água fecha o circuito elétrico entre os elementos. Um circuito elétrico do tipo potenciométrico mede a variação de resistência que, dentro de uma certa faixa, é linear com o ponto onde o circuito foi fechado e, portanto, linear com a altura relativa do nível d'água.

Algumas das vantagens deste tipo de sensor são o baixo custo, a facilidade de construção e manutenção e resolução infinita, devido ao princípio físico de medição. A desvantagem é que a água do tanque interage com o circuito de medida e faz variar a proporcionalidade e o ponto de zero, além da formação de menisco, que pode introduzir dispersões nas medidas.

Destaca-se que, o modo de calibração estática convencional do ondômetro baseia-se na comparação dos deslocamentos estáticos do sensor em relação a uma referência métrica, usualmente calibrada em milímetros. Quanto à aferição dinâmica não foram encontradas referências sobre o assunto.

### 3.4. Medidas Experimentais

As medidas foram definidas a partir dos objetivos e da metodologia apresentados, lançando-se mão da instrumentação descrita. Para investigar a qualidade das ondas geradas considerou-se que as variáveis físicas de maior relevância são:

- força de acionamento do atuador
- posição da mesa do sistema de acionamento
- sinal de controle
- altura de onda na região próxima do gerador de ondas (montante)
- altura de onda na região próxima do absorvedor (jusante)

sendo estas duas últimas em dois eixos, um eixo central e outro a 1 m da parede lateral esquerda.

Para caracterizar o desempenho do ondômetro, realizaram-se calibrações estáticas semanais, ao longo de todas as séries de medidas, e sempre que o ondômetro era usado fazia-se, inicialmente, uma aferição com 10 pontos de medidas, sendo quatro positivos e quatro negativos, dois deles no fundo de escala, e dois na referência zero.

As aferições estáticas foram executadas movendo-se o sensor na vertical, para baixo e para cima, guiado por uma haste metálica perfurada, registrando-se o deslocamento referenciado a uma escala e o correspondente sinal elétrico de saída.

Além disso, efetuou-se uma aferição especial, com variação da frequência do deslocamento de excitação, permitindo assim uma observação detalhada da resposta dinâmica do sensor. Para tanto, empregou-se um sistema excitador, que usualmente é o gerador de ondas de um canal de ondas, cujo desempenho dinâmico foi estudado em detalhes por Martins e Souza (1993).

Após o sensor convenientemente instalado, de modo que apenas o filamento metálico tocava a água, ilustrado na figura 3.10, aplicou-se pares de amplitude de deslocamento e frequência variáveis ao gerador e, concomitantemente, mediu-se a resposta do ondômetro. Também, aplicou-se um sinal de varredura entre 0,05 Hz e 4 Hz, em três amplitudes diferentes, para determinar a resposta global do instrumento.

Os ensaios foram repetidos para três posições iniciais, de modo que as oscilações fossem em torno da porção média superior, do centro e da porção média inferior do sensor resistivo. Um exemplo dos sinais medidos durante os ensaios pode ser visto na figura 3.11. As séries de ensaios seguiram o esquema excitação/resposta com medidas em uma situação original e depois na situação modificada.

Foram geradas ondas senoidais puras nas frequências de 0,5 Hz; 0,9 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz; 2,5 Hz e 3 Hz, em pelo menos duas séries de amplitudes, que resultassem em uma declividade de onda abaixo e outra acima de 3,5%, conforme recomendado por Ursell et al. (1960). Também foram feitas medidas com sinal de entrada em varredura, com amplitude constante limitada pela máxima amplitude a 3 Hz.

Alguns sinais obtidos são apresentados nas figuras 3.12 a 3.16, para algumas frequências e algumas variáveis.



Figura 3.10 - Ilustração do arranjo para aferição dinâmica do ondômetro (direita) e o ondômetro testemunha (esquerda).

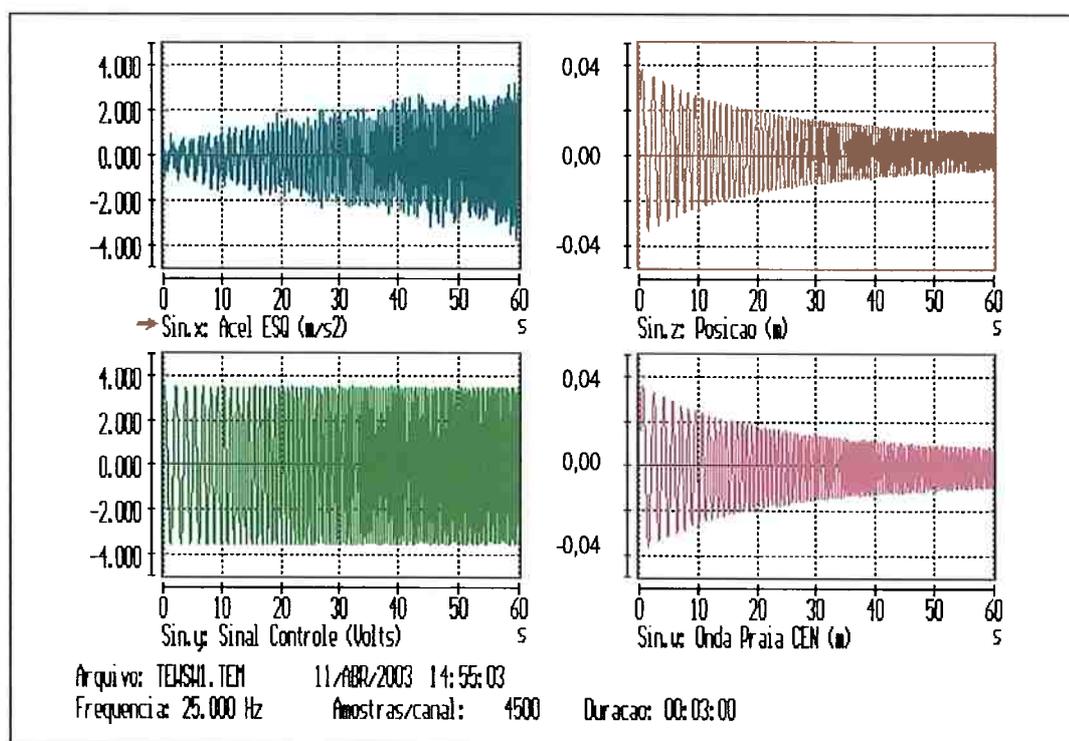


Figura 3.11 - Exemplo de sinais obtidos durante a aferição dinâmica do ondômetro WPraiaCEN.

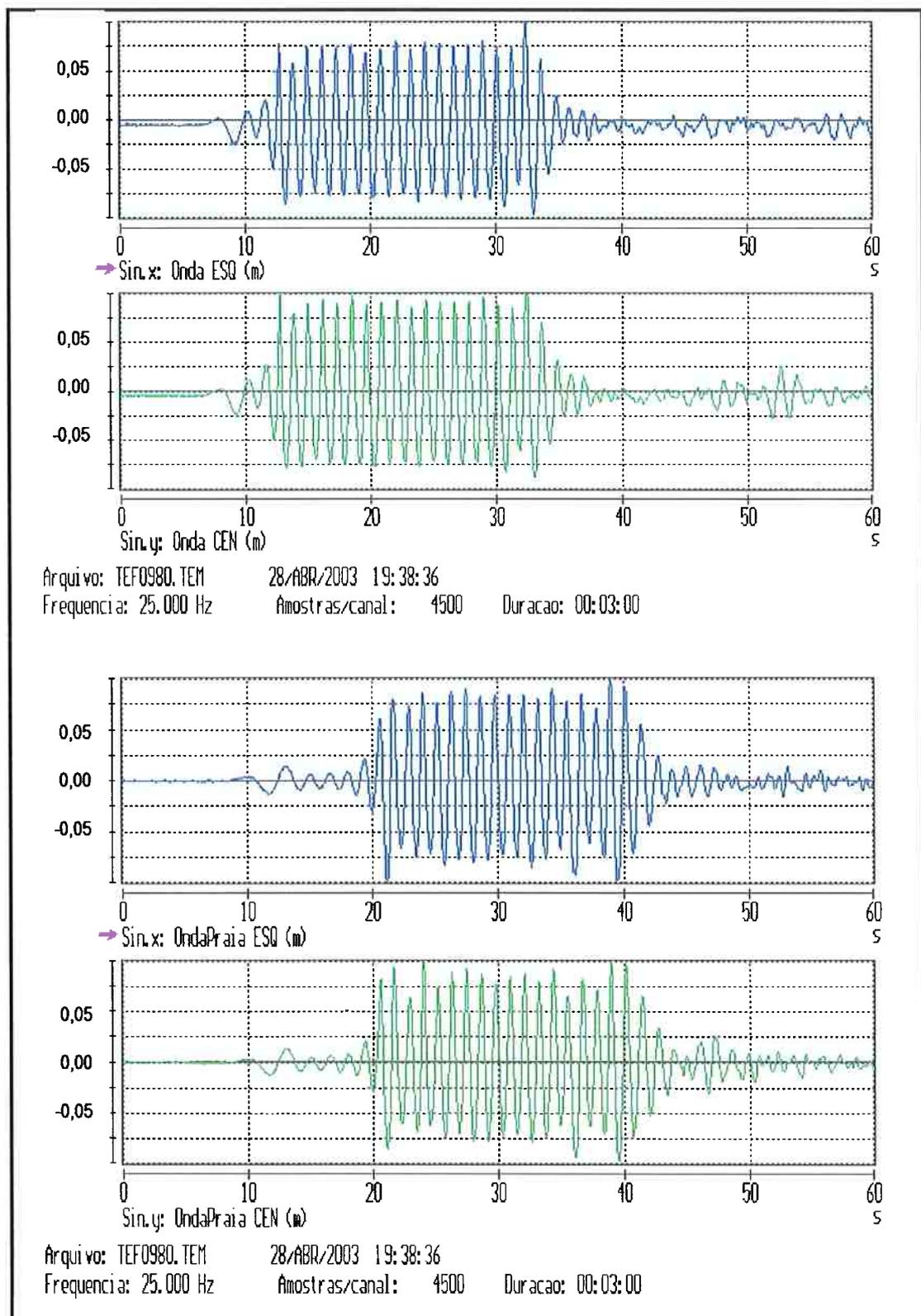


Figura 3.12 - Exemplo dos sinais obtidos de elevações de onda, para a frequência de 0,9 Hz.

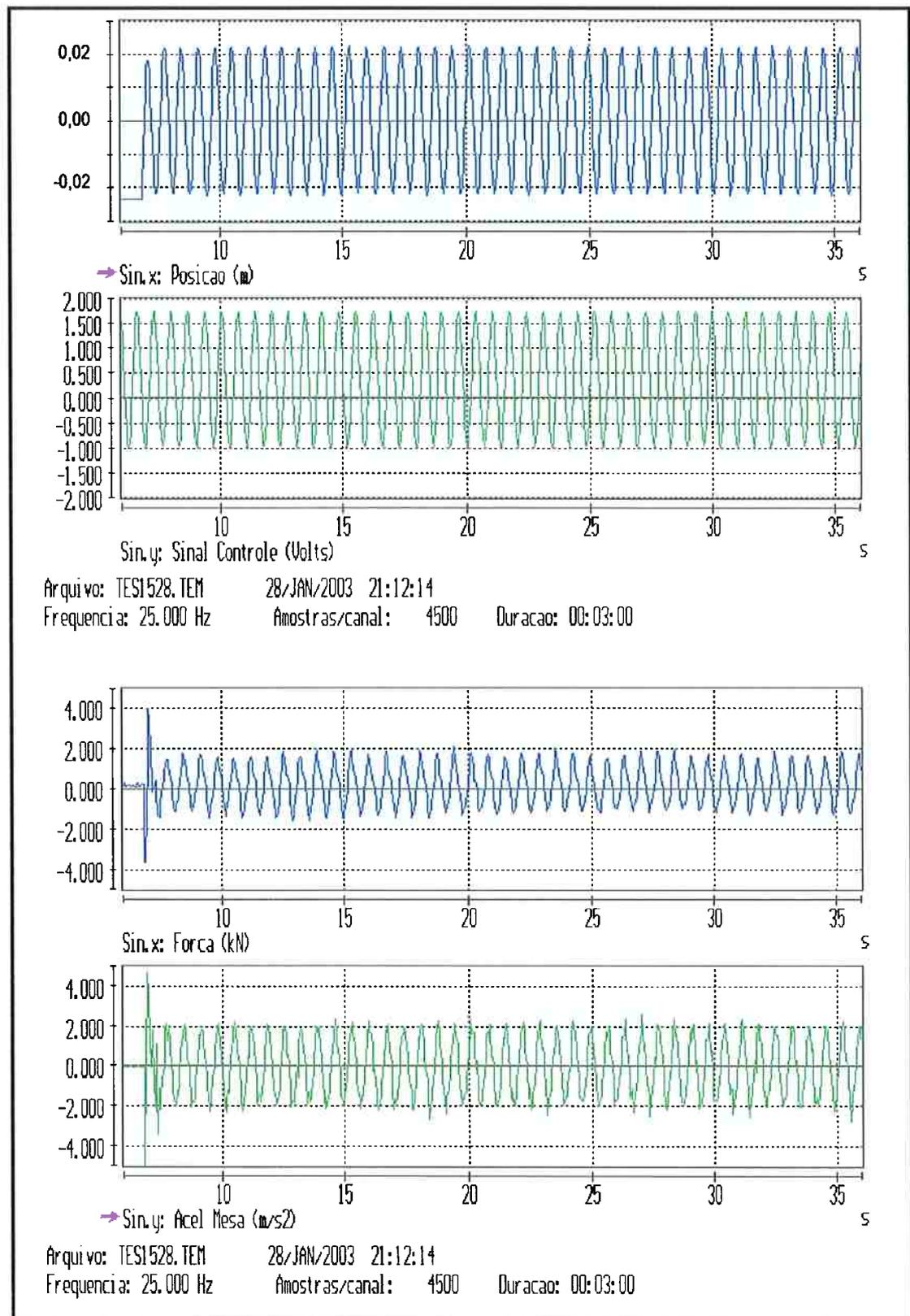


Figura 3.13 - Exemplos de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 1,5 Hz.

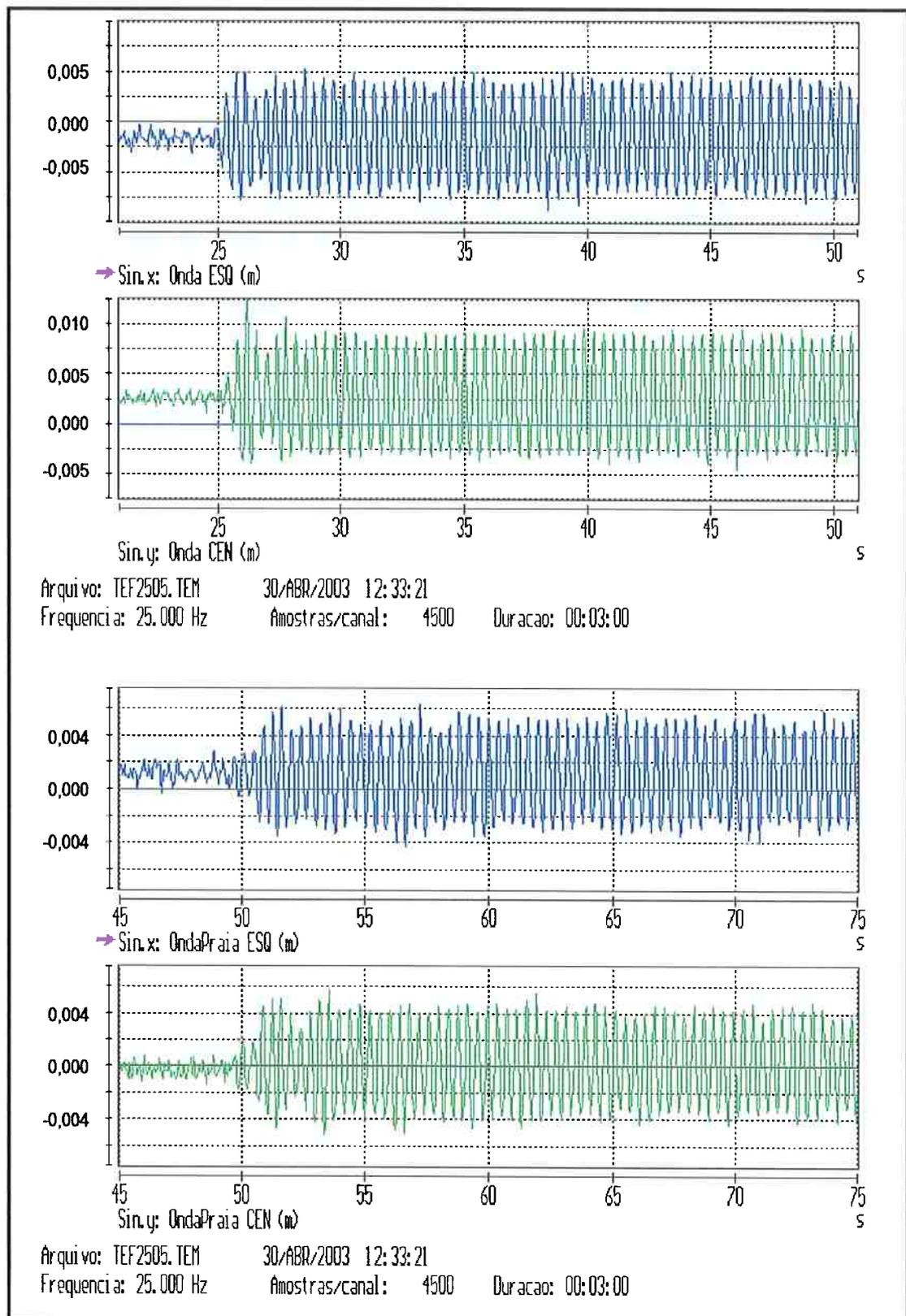


Figura 3.14 - Exemplo de sinais de elevações de onda obtidos, para a frequência de 2,5 Hz.

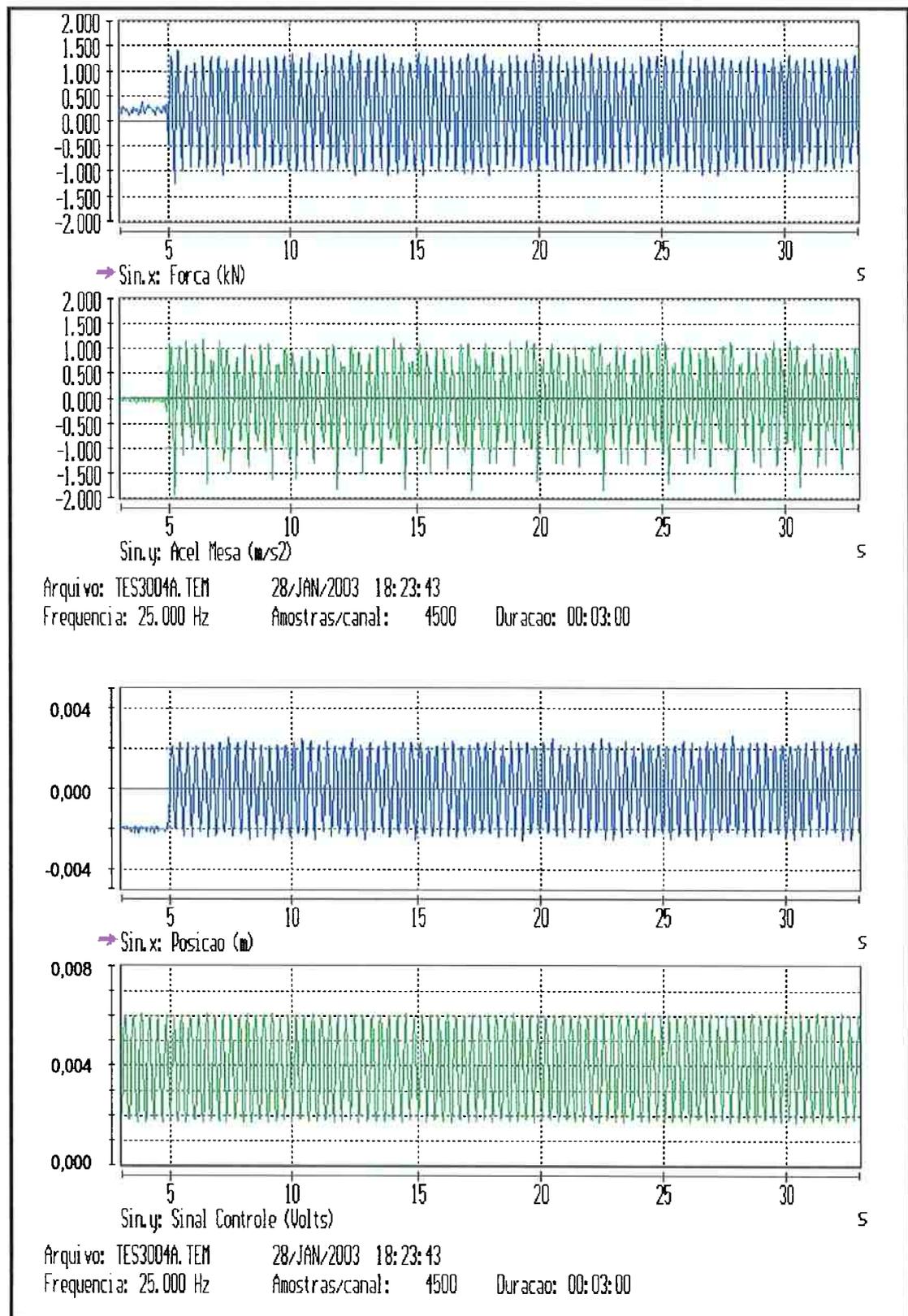


Figura 3.15 - Exemplo de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 3,0 Hz.

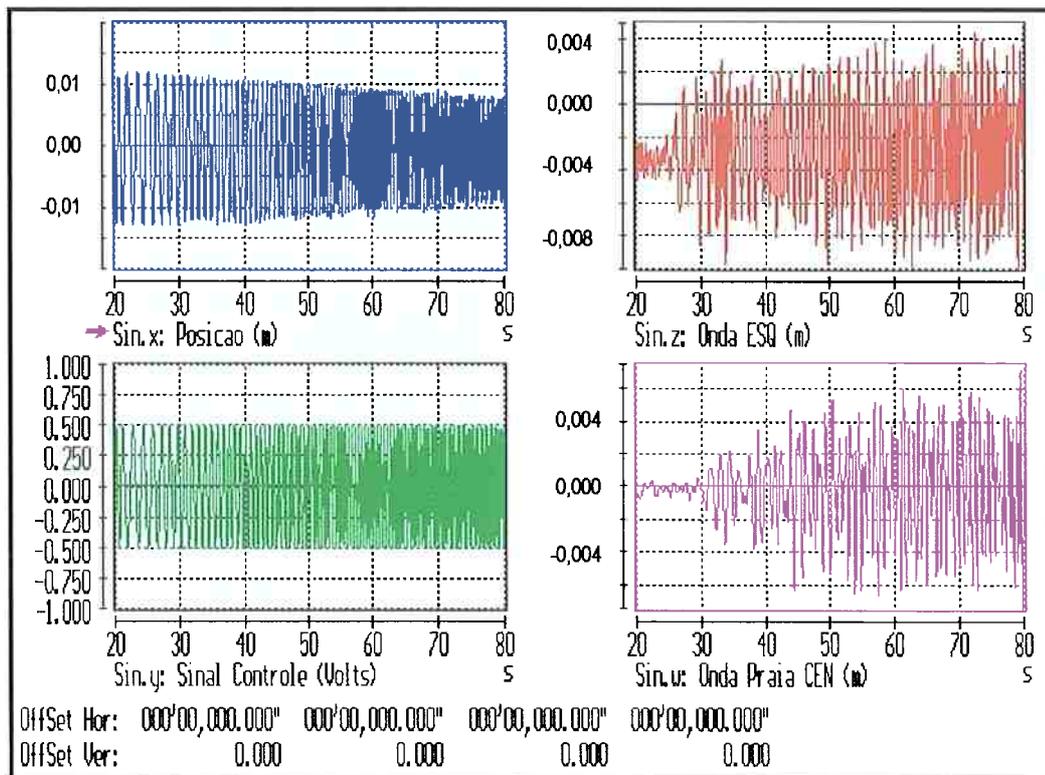


Figura 3.16 - Exemplo de alguns sinais obtidos , para uma excitação por varredura, de 0,4 Hz a 3,4 Hz.

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

*"Nessuna humana investigazione  
si puo dimandar a vera scienza  
s'essa non passa per le  
matematiche dimonstrazione."*

*Leonardo da Vinci.*

#### **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Após as séries de medidas serem feitas procedeu-se ao tratamento dos dados, conforme a metodologia estabelecida. Uma redução de dados preliminar consistiu em agrupar e examinar visualmente a qualidade dos sinais, procurando-se identificar fenômenos espúrios, que implicassem em aceitação ou descarte. Uma vez aceito, os sinais eram processado pelo programa Aqdados e pelo Sisdin, ambos desenvolvidos pela Lynx Tecnologia.

Importante ressaltar que, todos os sinais processados foram utilizados na forma bruta, isto é, sem filtragem ou qualquer outra manipulação, após a gravação dos dados no computador. Também são apresentados todos os pontos obtidos nos processamentos, não tendo sido feito nenhum tipo de eliminação ou escolha de valores.

Inicialmente, antes de discutir-se os resultados, necessita-se determinar as dispersões das medidas, examinando-se o conjunto de aferições e as calibrações feitas, da forma descrita anteriormente.

#### 4.1. Incertezas nas Medidas

As calibrações completas foram feitas regularmente, no mínimo a cada semana de trabalho, e, sempre, ao início de cada dia de ensaios, uma aferição com 10 pontos de referências. Na Tabela 4.1 são mostrados os resultados obtidos dos ajustes de curvas quadráticas aos pontos experimentais, onde os coeficientes A, B e C são referentes aos termos de segunda ordem, primeira ordem e ordem zero da equação, respectivamente.

Os desvios, apresentados na tabela, foram calculados como a diferença relativa entre a maior e a menor constante de primeira ordem, expressa em porcentagem, significando que 100% dos valores encontram-se dentro do intervalo mencionado.

Analisando-se os coeficientes A e B pode-se determinar a maior não linearidade, correspondente ao sensor WESQ, como sendo 0,4%, e a média dos outros sensores é menor que 0,14%. Note-se o bom ajuste das curvas com o menor coeficiente de correlação igual a 0,9986.

Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas algumas curvas de calibração típica dos sensores, ilustrando a linearidade e o ajuste da curva comentados anteriormente. Destaca-se na figura 4.3, um exemplo da não linearidade que pode ocorrer com a resposta do ondômetro, com o nível d'água propositamente muito próximo de uma das extremidades sensor.

Ressalta-se ainda que, as variações deveram-se às diferentes condições físico-químicas da água e do ambiente do tanque, nos dias nos quais foram feitas as calibrações, refletindo assim a necessidade imperiosa de aferições diárias dos ondômetros.

Tabela 4.1 – Constantes de calibração médias dos ondômetros, em situações extremas de aplicação (equação  $y = Ax^2 + Bx + C$ ).

Ondômetro	A	B	C	R <sup>2</sup>	Desvio %	Não Linearidade  A/B x100
WCEN	0,142	113,560	10,266	1,0000	±12,2	0,13
WESQ	-0,450	112,000	-12,505	0,9993	±12,7	0,40
WPraia CEN	0,485	339,960	147,960	0,9999	±11,4	0,14
WPraia ESQ	-0,470	339,190	-3,928	1,0000	±11,9	0,14

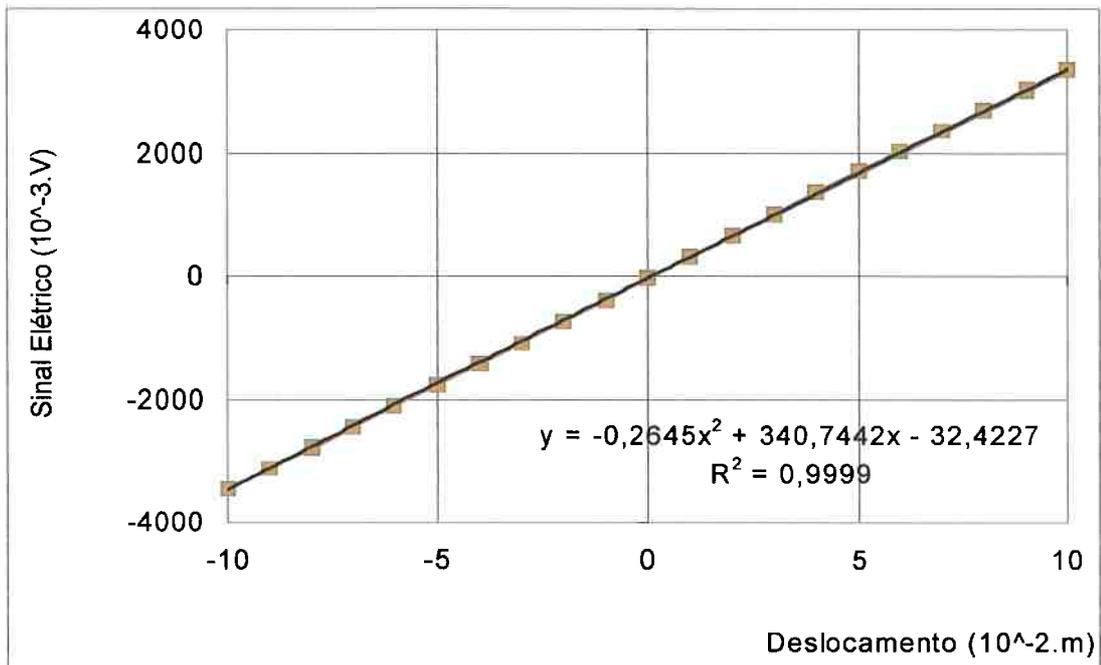


Figura 4.1 – Exemplo de curva de calibração estática do ondômetro WPraiaCEN.

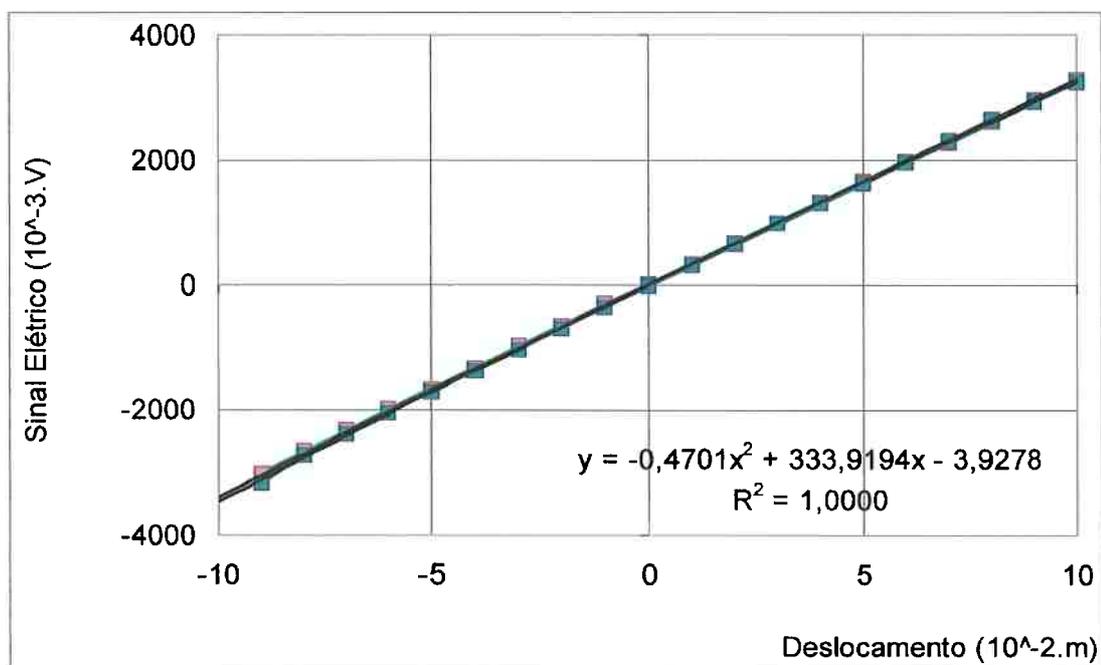


Figura 4.2 – Exemplo de curva de calibração estática do ondômetro WPraiaESQ.

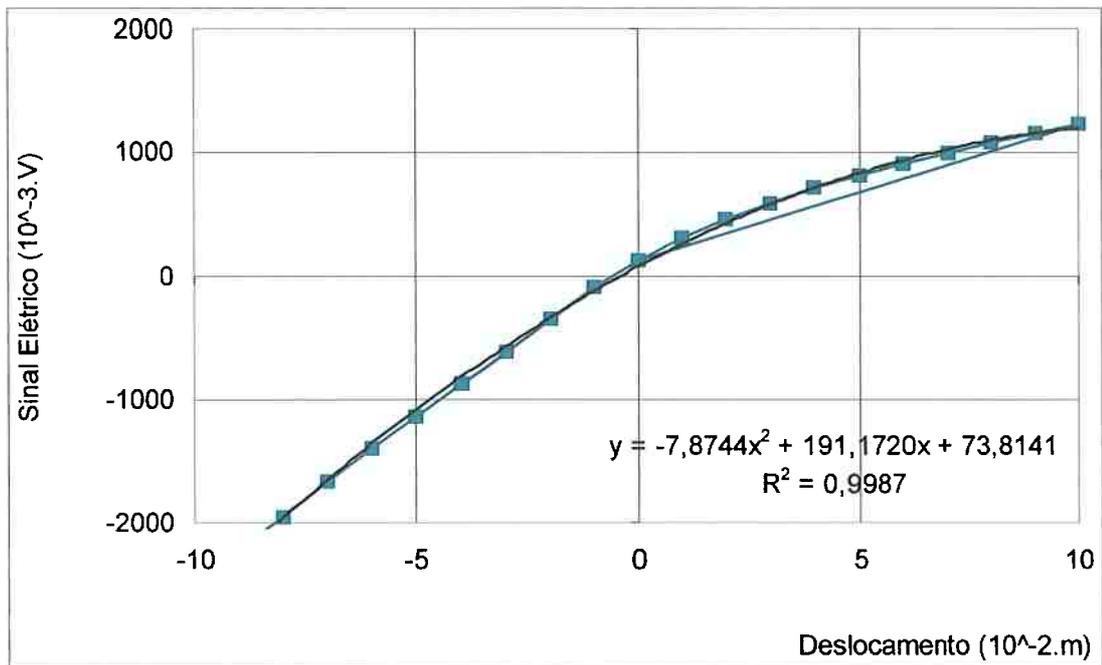


Figura 4.3 – Exemplo da não linearidade de um ondômetro resistivo em aferição estática.

Durante algumas das aferições, notou-se também que, uma pequena e fina camada de sujeira da água do tanque impregnava o filamento metálico e alterou em cerca de 10% a aferição, comparando-se com a situação após limpeza da água e dos filamentos do sensor.

Todos estes resultados foram usados para calibrar o sistema de aquisição de dados antes de cada dia de ensaio, para que fosse garantida a fidelidade dos dados colhidos.

A aferição dinâmica demandou um pouco mais de trabalho visto que foi necessário um dispositivo que aplicasse um deslocamento conhecido e que pudesse ser variado em amplitude e em frequência. O gerador de ondas de um canal, ao lado do tanque de ensaios, mostrou-se apropriado para cumprir os requisitos necessários.

O resultado obtido, no domínio da frequência, é mostrado na figura 4.4, como o espectro de energia RMS dos sinais de deslocamento, aceleração, controle e do ondômetro. Na figura 4.5 destaca-se a função de transferência entre onda e deslocamento, sendo notada a boa linearidade da amplitude entre 0,2 Hz e 3,2 Hz, mas cuja fase varia continuamente e linearmente na mesma faixa de frequência. A amplitude varia dentro de  $\pm 10\%$  do valor médio, na faixa ensaiada.

No arranjo montado, o acelerômetro e um segundo ondômetro serviam de testemunhos, o primeiro para os deslocamentos do quadro móvel e o segundo para garantir que o nível d'água estático permaneceria inalterado, nas vizinhanças do ondômetro sob investigação, durante a aferição.

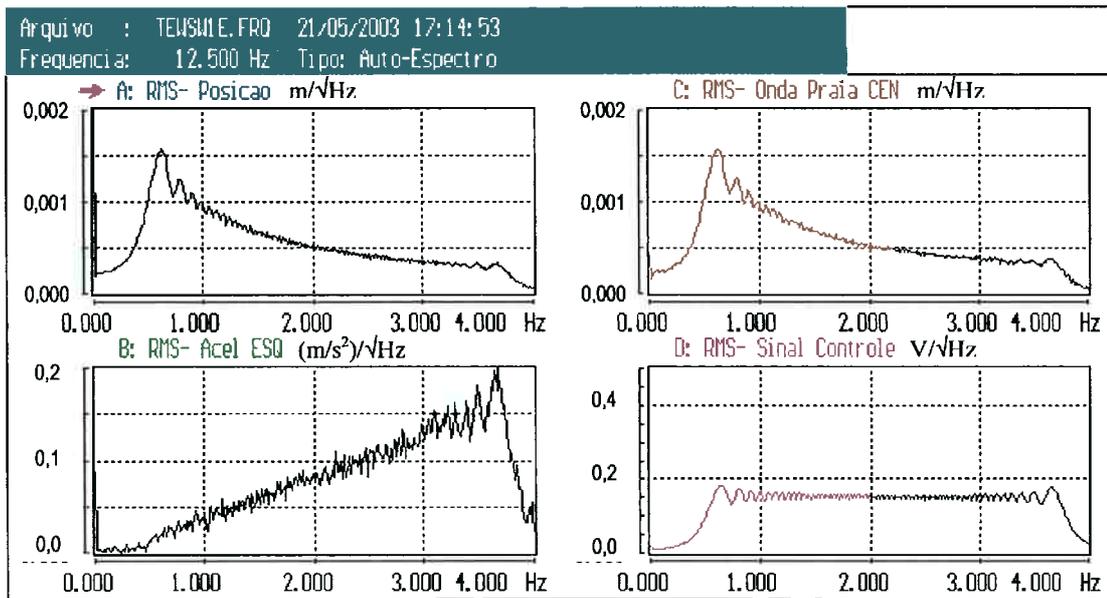


Figura 4.4 – Espectro de energia dos sinais medidos na aferição dinâmica do ondômetro WPraiaCEN.

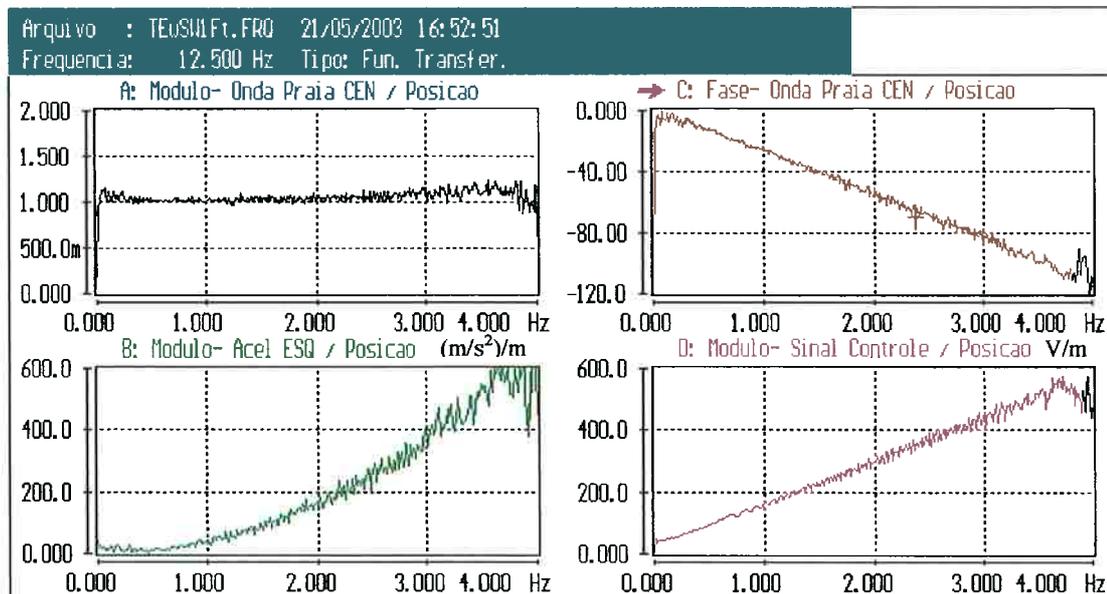


Figura 4.5 – Função de Transferência entre os sinais do ondômetro e do deslocamento imposto, durante a aferição dinâmica. (Fase em graus)

Finalmente, quanto às incertezas das medidas, causadas pelas resoluções dos instrumentos empregados, usou-se a formulação diferencial tradicional. Arbitrando-se uma resolução de 0,001 m para os deslocamentos e de 0,001 V para os sinais elétricos, considerando-se uma resposta linear do sensor, e fundos de escala de 0,20 m para os deslocamentos e alturas de onda e 5 V para os sinais elétricos, calcula-se a incerteza nas medidas de altura de onda pela expressão:

$$\Delta r = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta r_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta r_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta r_n\right)^2} \quad (4.1)$$

com  $f$  sendo a função,  $r$  o desvio e  $x_n$  as variáveis.

A função que relaciona as variáveis é:

$$R_O = \frac{R_P}{R_C} R_M \quad (4.2)$$

onde  $R_O$  é o sinal elétrico da altura de onda,  $R_P$  o deslocamento físico do sensor,  $R_C$  o sinal elétrico durante a aferição e  $R_M$  o sinal elétrico medido.

Substituindo-se os valores reais chega-se a uma incerteza relativa nas medidas de  $\pm 0,5\%$ . Um estudo de pior caso, onde acumulam-se todos os erros com um só sinal, resulta em uma incerteza relativa de  $\pm 1\%$ , referente ao fundo de escala.

A propagação de erros em operações matemáticas, para cálculos com variáveis afetadas de incertezas, serão dependentes da função matemática que relaciona as variáveis, como indica a equação 4.1.

Um exemplo da propagação de erros em um cálculo é trabalhado por Le Méhauté (1976, p. 295), e ilustra bem os desvios que ocorrem nos resultados de ensaios com modelos em escala. Nesse caso, é mostrado o efeito do uso de água doce no tanque de ondas, no qual a diferença de densidade, cerca de 3%, acarreta um desvio da ordem de 10% no peso de rochas usadas em quebra ondas, quando colocadas em escala real.

## 4.2. Medidas de Ondas

Ao longo dos ensaios, o questionamento da adequação da teoria linear era recorrente e portanto resolveu-se fazer uma comparação entre a forma de onda medida e aquela preconizada pela teoria das pequenas amplitudes. Antes, apenas para ilustração, elaborou-se o gráfico da figura 4.6 que situa os principais experimentos no universo das teorias mais empregadas, em relação a parâmetros da onda.

Na confrontação de alguns resultados com a teoria, utilizou-se uma função cosseno, expressa pela equação 2.30 (p. 29), adequando-se a amplitude, freqüência e fase, para gerar uma curva teórica comparável aos pontos realmente medidos nos ensaios.

Os gráficos obtidos e apresentados nas figuras de 4.7 a 4.11, mostram uma boa concordância, ao menos em uma avaliação visual, mesmo considerando-se que para a freqüência de 0,5 Hz os dados adquiridos sofreram influência de reflexão.

A figura 4.11, onda com freqüência de 3 Hz, apresenta um certo desacordo com a forma de onda teórica, visivelmente, muito mais em função de ruídos elétricos nas medidas do que eventuais não linearidades. A presença de não linearidade deveria acentuar e estreitar a crista, além de abater e alargar o cavado, fato que não é perceptível nos sinais coletados.

Portanto, se houve alguma não linearidade nos experimentos, esta pode ser considerada pouco pronunciada e, portanto, satisfatoriamente representado pela teoria linear, dentro das incertezas dos valores medidos.

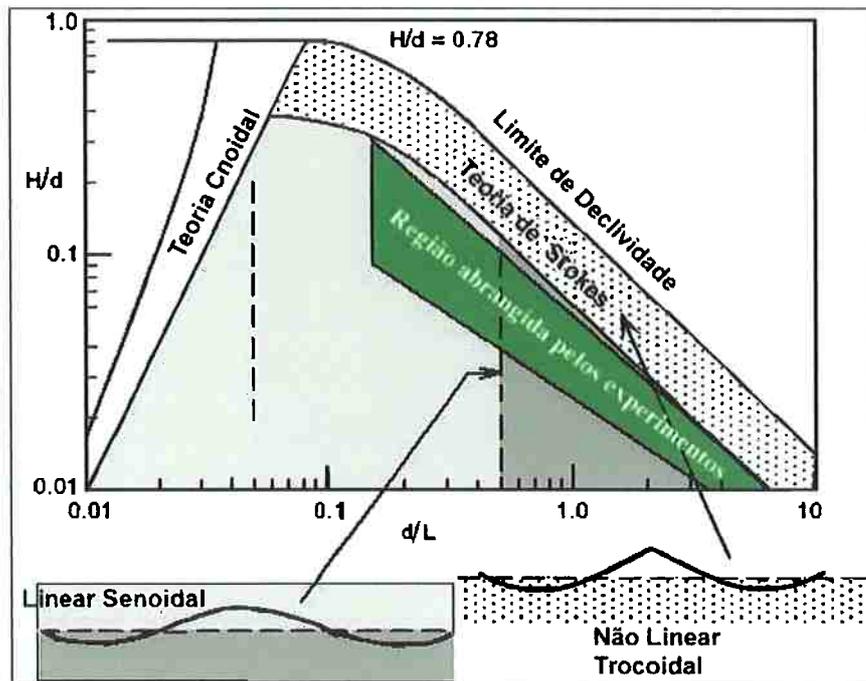


Figura 4.6 - Ilustração da região abrangida pelos ensaios e formas de ondas, associadas às teorias aplicáveis, em função de parâmetros da onda.

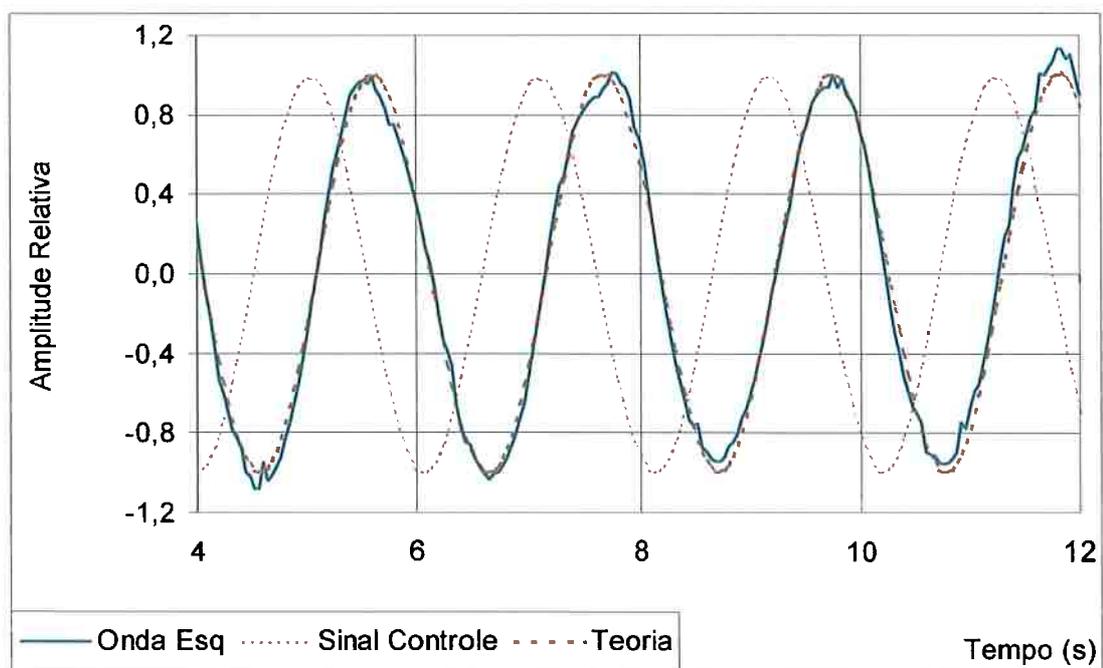


Figura 4.7 – Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de elevações de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WESQ.

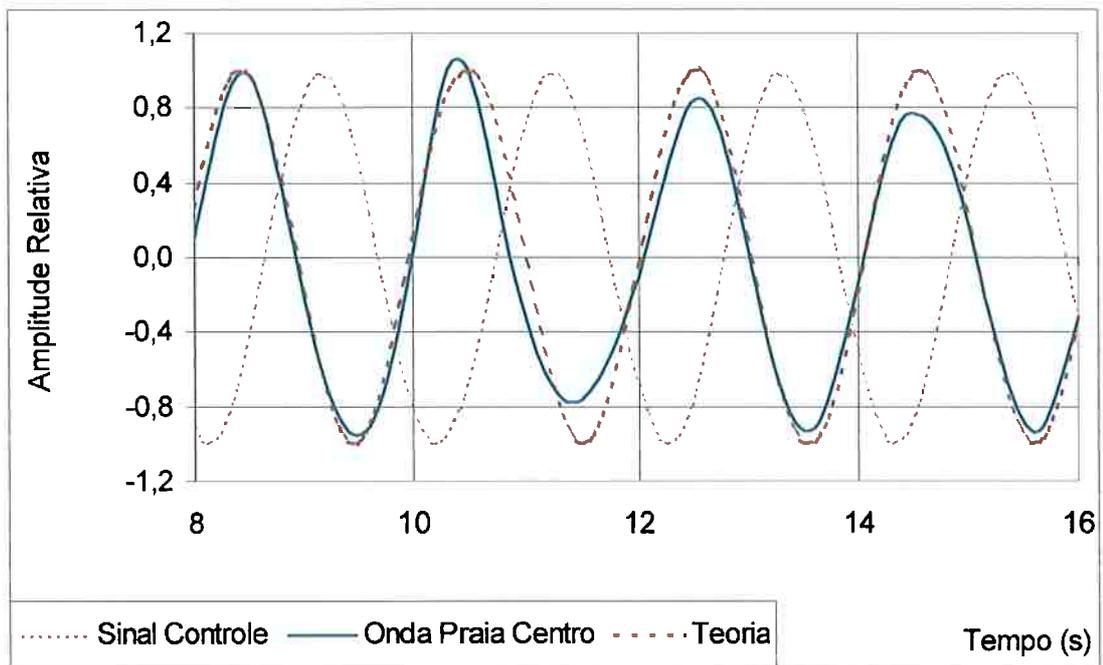


Figura 4.8 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de elevações de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WPraiaCEN.

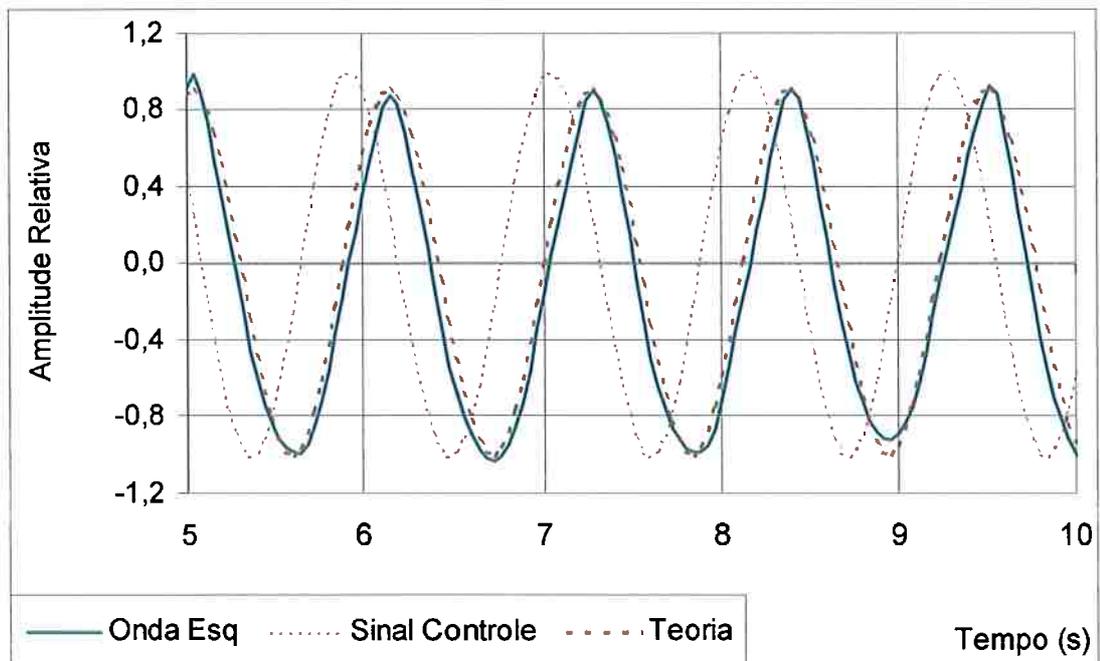


Figura 4.9 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de elevações de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WESQ.

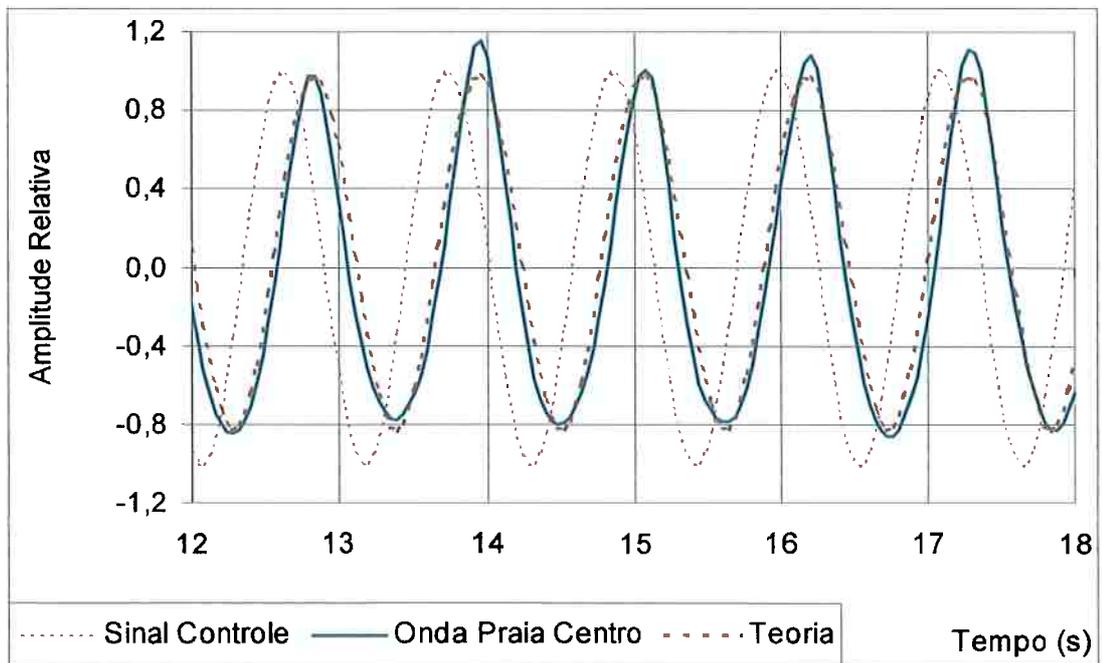


Figura 4.10 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de elevações de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WPraiaCEN.

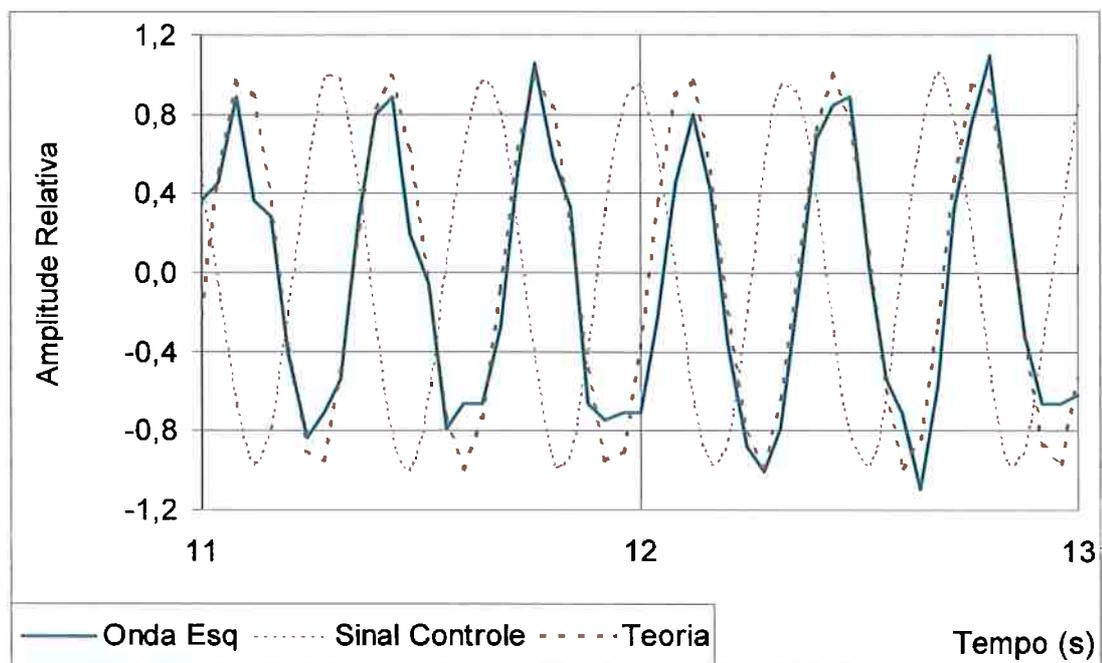


Figura 4.11 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de elevações de onda, para 3,0 Hz, ondômetro WESQ.

#### 4.2.1. Velocidade de Propagação

Tomando-se os históricos no domínio do tempo, elaborou-se uma tabela de tempos calculados teoricamente, para cada frequência e para cada situação ensaiada. Esta tabela serviu como um gabarito para delimitar as faixas de tempos de chegada das ondas nos ondômetros, possibilitando identificar as irregularidades nos sinais, causadas pelas reflexões.

Assim, as medidas dos tempos de chegada das ondas, associados à velocidade de grupo  $c_g$ , foram comparados diretamente, para que não houvesse propagação de erros ao processar os dados obtidos. Os resultados dos tempos de percurso, confrontados com a previsão teórica, equação 2.37 (p. 31), são apresentados na figura 4.12. Os símbolos significam:

- $t_1$ , tempo de percurso da onda entre a placa do gerador e os ondômetros a montante;
- $t_{wv}$ , tempo de percurso da onda entre os ondômetros, a montante e a jusante; e
- $t_2$ , tempo de percurso da onda entre a placa e os ondômetros a jusante.

De modo geral, as medidas comparam-se bem com a teoria, apresentando diferenças que podem ser atribuídas às incertezas. Se houve algum outro fenômeno presente, este não foi suficientemente definido por estar dentro do erro experimental. Observa-se que, há uma tendência dos tempos medidos serem ligeiramente maiores do que os previstos para comprimentos de onda menores e distâncias maiores.

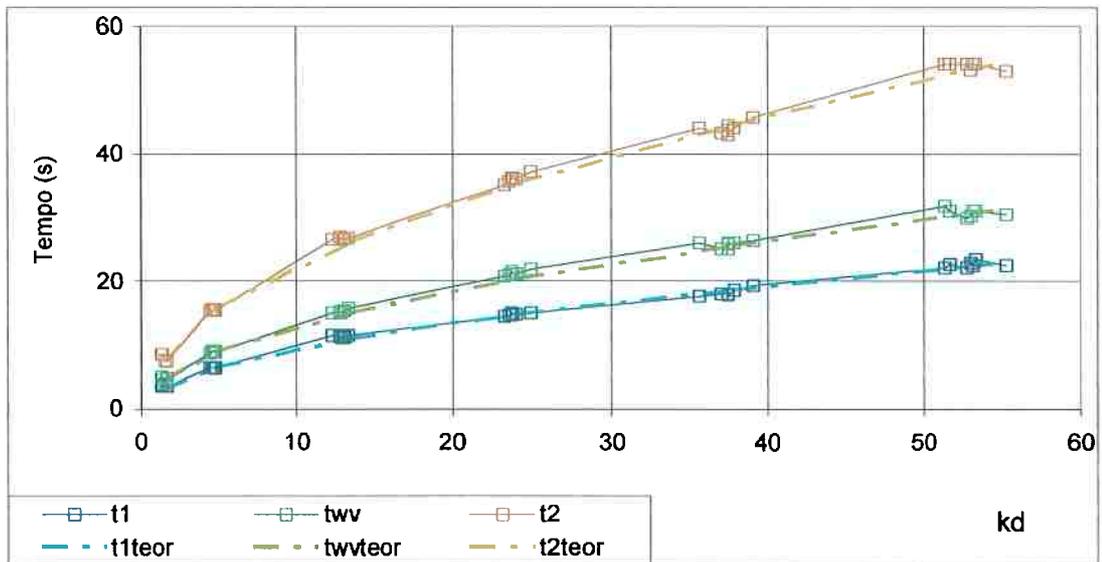


Figura 4.12 – Gráfico comparativo entre os tempos de percursos medidos e os teóricos, em função da profundidade relativa.

#### 4.2.2. Freqüência e Amplitude

Ao longo da redução de dados ficou evidenciado que a freqüência da onda é idêntica à do movimento, para todos os ensaios, dentro da resolução de  $\pm 0,01$  Hz. Exceções ocorreram quando houve excitação de oscilações naturais no tanque, tipicamente metade da freqüência excitadora.

As freqüências naturais do tanque podem ser calculadas considerando-se que são ondas estacionárias, e, portanto, aplica-se a expressão 2.27 (p. 29). Assim, as condições de contorno devem representar paredes rígidas e apenas podem ser formadas ondas com comprimentos múltiplos do comprimento do tanque,  $\ell$ , segundo a relação:

$$L = 2\ell/n \quad (4.3)$$

Sob estas condições, as freqüências naturais são calculadas pelas expressões 2.23 (p. 28) e 4.3 acima, da forma:

$$f_n = \left( \frac{ng \tanh(kd)}{4\pi\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

Para auxiliar na identificação das freqüências naturais do tanque realizaram-se algumas determinações de alturas de onda remanescente no tanque, ou seja, o denominado ruído de fundo. Na Tabela 4.2 são apresentados valores calculados, pela equação 4.4, e medidos, de freqüências longitudinais, transversais e longitudinais na parte traseira do atuador.

Tabela 4.2 – Comparação entre alguns autovalores calculados e os picos das frequências determinados no ruído de fundo do tanque de ondas.

Modo	Long	Transv	Atrás atuador	Medidas	Harmônicos identificados nas medidas
n	$f_L$ (Hz)	$f_T$ (Hz)	$f_A$ (Hz)	$f_m$ (Hz)	
1	0,099	0,347	0,806	0,098	$f_{1L}$
2	0,193	0,556	1,140	0,390	$4 f_{1L}$
3	0,278	0,693	1,396	0,488	$5 f_{1L}$
4	0,351	0,802	1,612	0,561	$f_{8L}$
5	0,415	0,897	1,803	0,757	$f_{14L}$
6	0,470	0,982	1,975	0,806	$f_{1A}$
7	0,518	1,061	2,133		
8	0,561	1,134	2,280	1,123	$2 f_{8L}$ e $f_{31L}$
9	0,599	1,203	2,418	1,196	$2 f_{9L}$ e $f_{35L}$
10	0,634	1,268	2,549	1,270	$13 f_{1L}$ e $f_{10T}$
11	0,667	1,330	2,674	1,331	$f_{11T}$
12	0,698	1,389	2,793		
13	0,727	1,446	2,907	1,440	$f_{51L}$ e $f_{13T}$
14	0,755	1,500	3,016	1,502	$f_{14T}$
15	0,782	1,553	3,122	1,550	$f_{59L}$ e $f_{15T}$
16	0,808	1,604			
17	0,833	1,653			
18	0,857	1,701			
19	0,881	1,748			
20	0,904	1,793			
31	1,125				
35	1,195				
51	1,443				
59	1,552				

Algumas das freqüências calculadas, nas direções longitudinal e transversal do tanque, e longitudinal da parte traseira do atuador, comparam-se muito bem com as medidas. Note-se que, o número de ordem dos harmônicos calculados, tanto longitudinal quanto transversal, acima de oito, guardam uma relação entre si muito próxima da relação comprimento sobre largura do tanque.

Portanto, as freqüências determinadas a partir do ruído de fundo, bem como os harmônicos, devem ser evitadas, sob pena de suscitarem o surgimento de ressonâncias no tanque. Essas ressonâncias paramétricas interferem na freqüência e podem alterar muito a amplitude da onda gerada.

Outro fenômeno que pode ocorrer é a “edge wave”, característica de praias nas quais incidem ondas obliquamente. Essas ondas dependem funcionalmente da largura do tanque e do ângulo de inclinação da praia. Na tabela 4.3 são mostradas as freqüências dessas ondas, que são tipicamente excitadas por metade da freqüência incidente.

As freqüências listadas também devem ser evitadas, mas no caso das “edge waves” o problema é a excitação direta das ressonâncias transversais, já que a amplitude desse tipo de onda diminui no sentido para fora da praia, isto é, extinguem-se para águas profundas.

Selecionadas as freqüências a gerar, cuida-se para que as amplitudes estejam dentro de limites previamente estabelecidos pelas teorias ou pela forma de análise escolhida. As alturas de ondas medidas, quando relacionadas com o deslocamento da mesa do atuador, apresentaram o comportamento ilustrado na figura 4.13.

Tabela 4.3 – Frequências calculadas das “edge waves” em função do modo e da inclinação da praia (Largura do tanque 4,85 m).

Modo	Frequência (Hz)		
	n	8 graus	12 graus
1	0,299	0,366	0,334
2	0,423	0,517	0,473
3	0,518	0,633	0,579
4	0,598	0,731	0,668
5	0,669	0,818	0,747
6	0,733	0,896	0,819
7	0,792	0,968	0,884
8	0,846	1,034	0,945
9	0,898	1,097	1,003
10	0,946	1,156	1,057
11	0,992	1,213	1,108
12	1,036	1,267	1,158
13	1,079	1,318	1,205
14	1,119	1,368	1,250
15	1,159	1,416	1,294
16	1,197	1,463	1,337
17	1,234	1,508	1,378
18	1,269	1,551	1,418
19	1,304	1,594	1,457
20	1,338	1,635	1,495
21	1,371	1,676	1,531
22	1,403	1,715	1,568
23	1,435	1,754	1,603
24	1,466	1,791	1,637
25	1,496	1,828	1,671
26	1,526	1,865	1,704
27	1,555	1,900	1,737
28	1,583	1,935	1,768
29	1,611	1,969	1,800
30	1,639	2,003	1,830

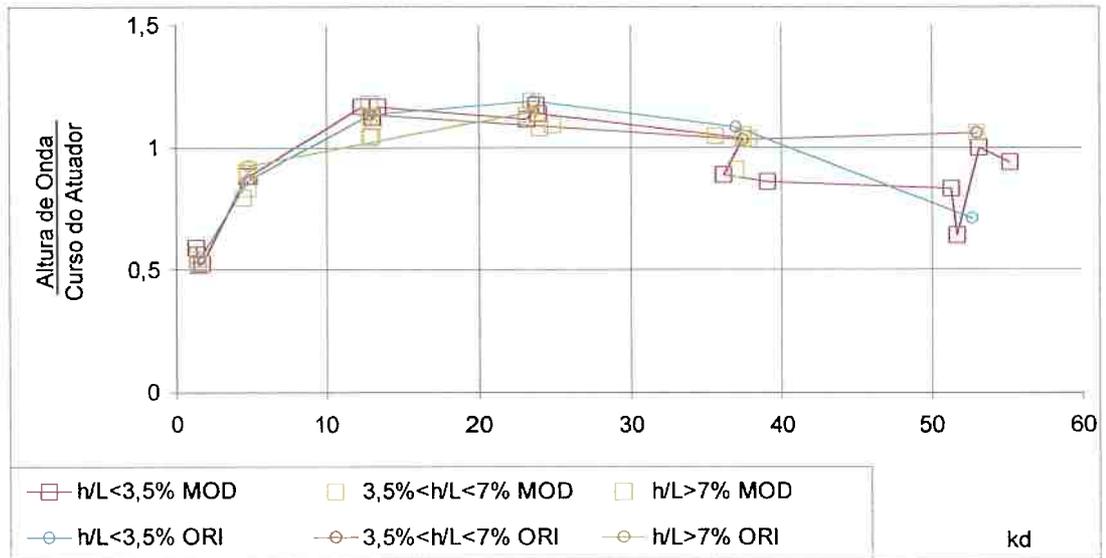


Figura 4.13 – Relações medidas entre alturas de ondas e deslocamentos da mesa do atuador, em função da profundidade relativa, para várias declividades de onda.

### **4.3. Funções de Transferência**

Além do processamento das medidas no domínio do tempo fez-se também análises e correlações entre variáveis no domínio das frequências. As análises dos auto espectros de energia RMS e as correlações as funções de transferência, quando corretamente interpretadas, podem fornecer importantes subsídios para a otimização de um sistema.

Os ensaios foram feitos com a geração de ondas de amplitude constante e frequência variável, controladas pelo gerador de sinais no modo varredura. A amplitude máxima foi determinada pelo máximo valor admissível na maior frequência, para preservação da integridade do atuador. A faixa de frequências definida foi de 0,4 Hz a 3,2 Hz, com variação da frequência continuamente, e uma duração total de 135 s, ou seja, uma razão de 0,02 Hz/s.

Empregaram-se as funções de transferência para auxiliar na análise da qualidade da onda gerada, ou seja, verificação do desempenho do tanque. Também foi possível observar o comportamento do sistema de geração, principalmente em relação ao espaço atrás do atuador.

#### 4.3.1. Força e Posição

Inicialmente, com as variáveis medidas no sistema de geração de ondas, correlacionou-se a força como resposta à excitação em posição. Nas figuras 4.14 e 4.15 são apresentadas as curvas referentes ao módulo e fase das funções de transferência.

Notem-se as significativas alterações nas curvas das funções, após as modificações, com a diminuição do valor de pico em 0,806 Hz para menos da metade e a resposta em fase, que mostra uma expansão da faixa de fases idênticas a partir de 2,2 Hz.

Também são mostrados os gráficos da função de transferência entre onda e posição, nos quais o ponto de destaque é 2,5 Hz, quando ocorre um decréscimo no módulo da função, fato já mencionado anteriormente.

Esses gráficos comparam-se bem com o apresentado na figura 4.13, sendo aquele obtido a partir de dados coletados durante geração de ondas monocromáticas e calculado ponto a ponto.

Interessante destacar as funções de transferência entre os sinais dos acelerômetros, colocados na mesa e nas extremidades direita e esquerda do atuador, ilustrados na figura 4.16. Esses sinais poderiam revelar movimentos indesejáveis da placa, que certamente induziriam ondas na água, perturbando a geração.

Como as funções são unitárias, tanto em fase quanto em frequência, pode-se afirmar que os movimentos do atuador obedecem rigorosamente os comandos do sinal de controle.

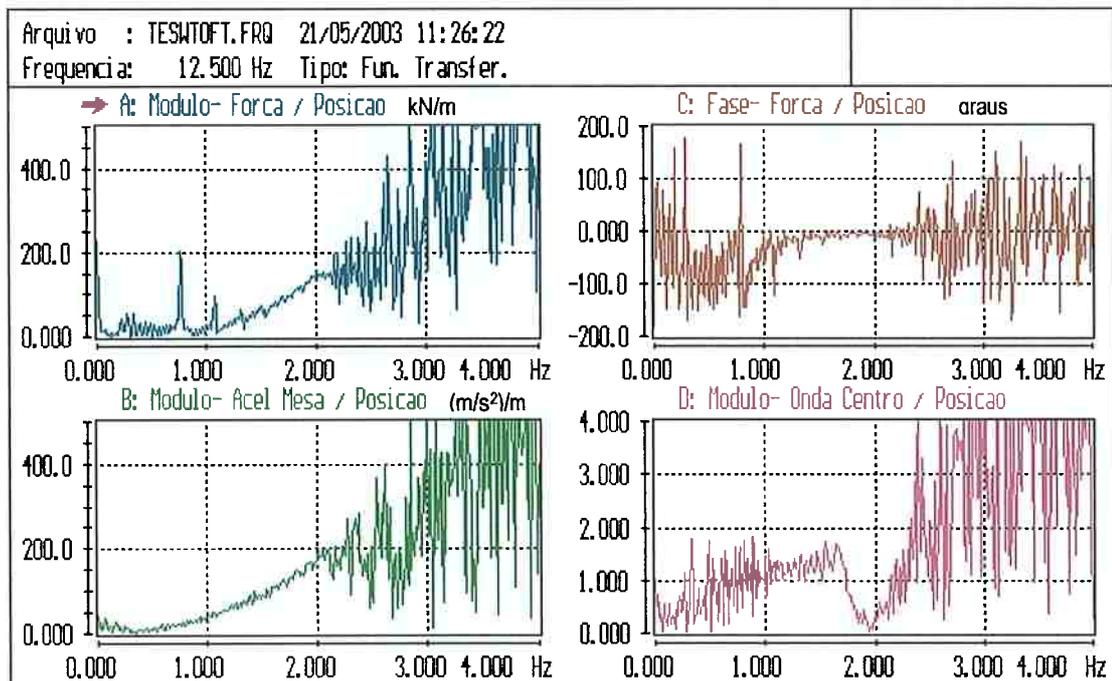


Figura 4.14 – Funções de Transferência mostrando as ressonâncias na parte traseira do atuador e a resposta do sistema de geração de ondas.

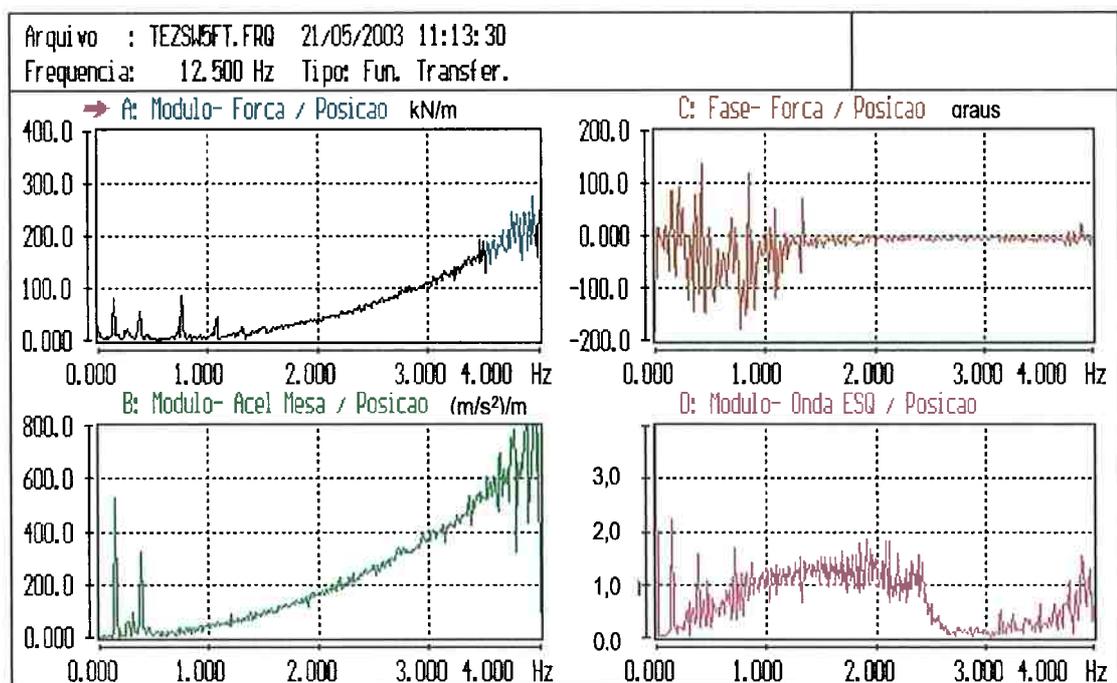


Figura 4.15 – Funções de Transferência mostrando as ressonâncias na parte atrás do atuador e a resposta do gerador de ondas, após modificações.

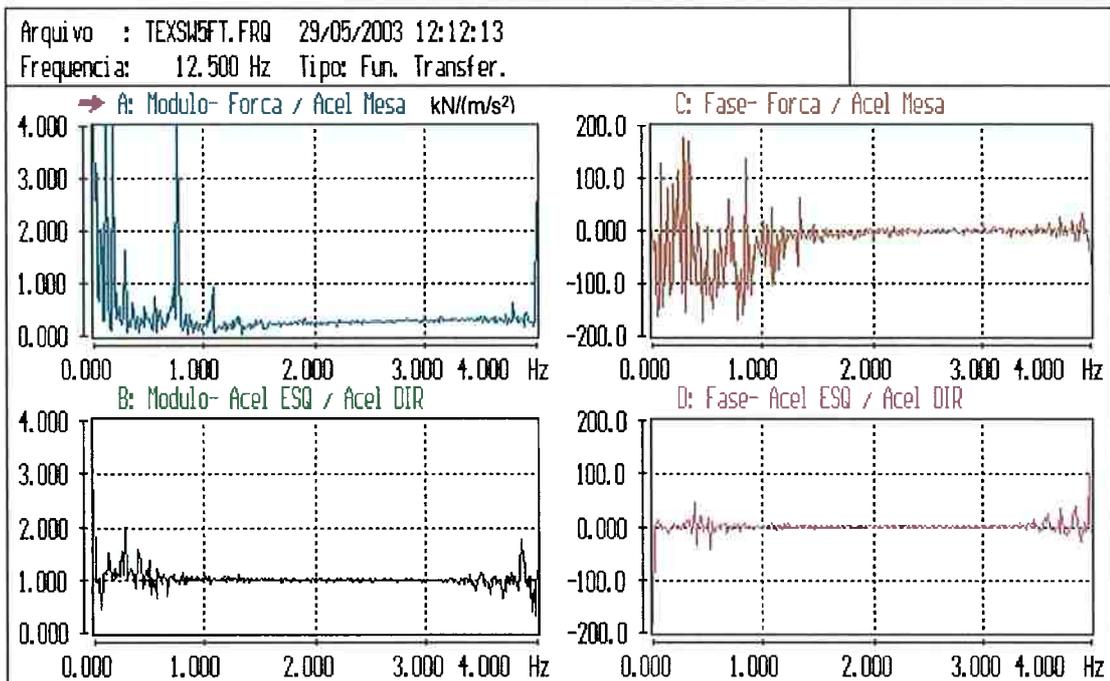


Figura 4.16 - Funções de transferência entre acelerações no sistema de geração de onda e atuador. (Fase em graus)

#### 4.3.2. Ondas

Uma forma de examinar-se a qualidade da onda é comparar diretamente os sinais fornecidos pelos ondômetros, verificando-se a coincidência dos valores, nos diversos pontos auscultados.

As funções de transferência entre os ondômetros WCEN e WESQ, a montante, e também entre WPraiaCEN e WPraiaESQ, a jusante, determinaram se as alturas das ondas são homogêneas e se a frente de onda é uniforme, retilínea e ortogonal às paredes.

As funções de transferência entre os ondômetros WCEN e WPraiaCEN, e WESQ e WPraiaESQ definiram se a propagação interfere nas alturas das ondas e quantificaram eventuais diferenças entre a linha central e aquela a 1 m da parede do tanque.

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados das transformações entre os sinais dos ondômetros. Constata-se que a função de transferência entre os diversos sinais de onda é unitária, tanto em frequência quanto em fase.

Assim, a análise indica que a frente de onda satisfaz os requisitos de qualidade, no tocante a homogeneidade, paralelismo e uniformidade, dentro dos erros experimentais. Ressalte-se que, após as modificações houve um aumento na faixa de resposta unitária das funções, garantindo uma gama maior de frequências possíveis de serem empregadas nos ensaios.

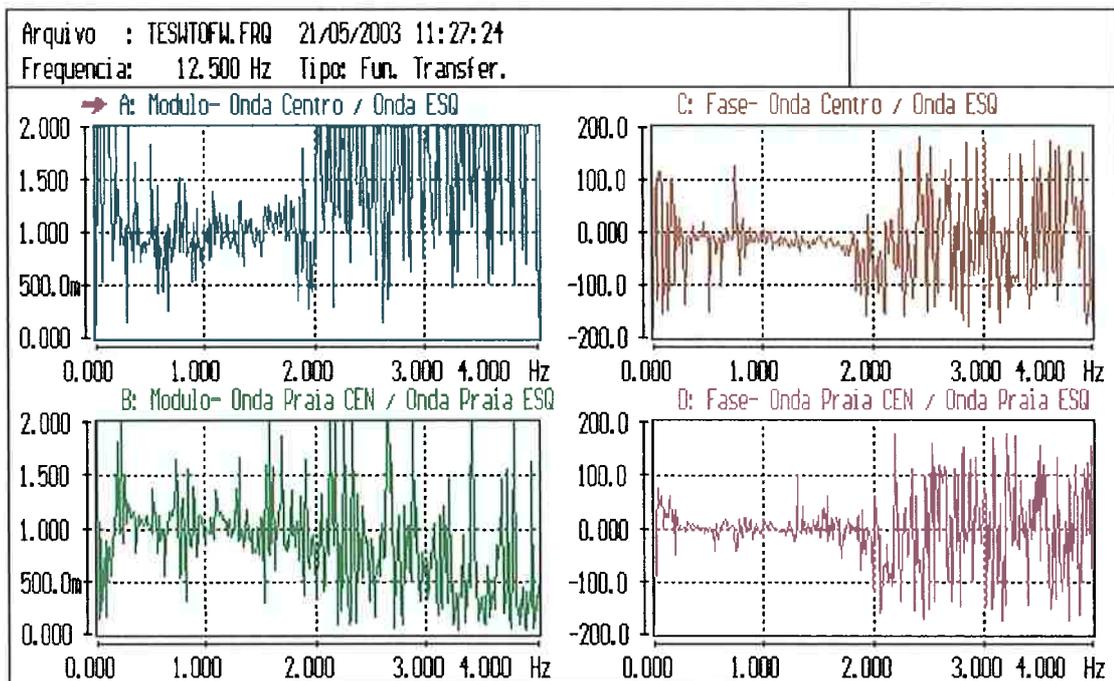


Figura 4.17 – Comparações entre as funções de transferência das ondas medidas nos vários pontos do tanque. (Fase em graus).

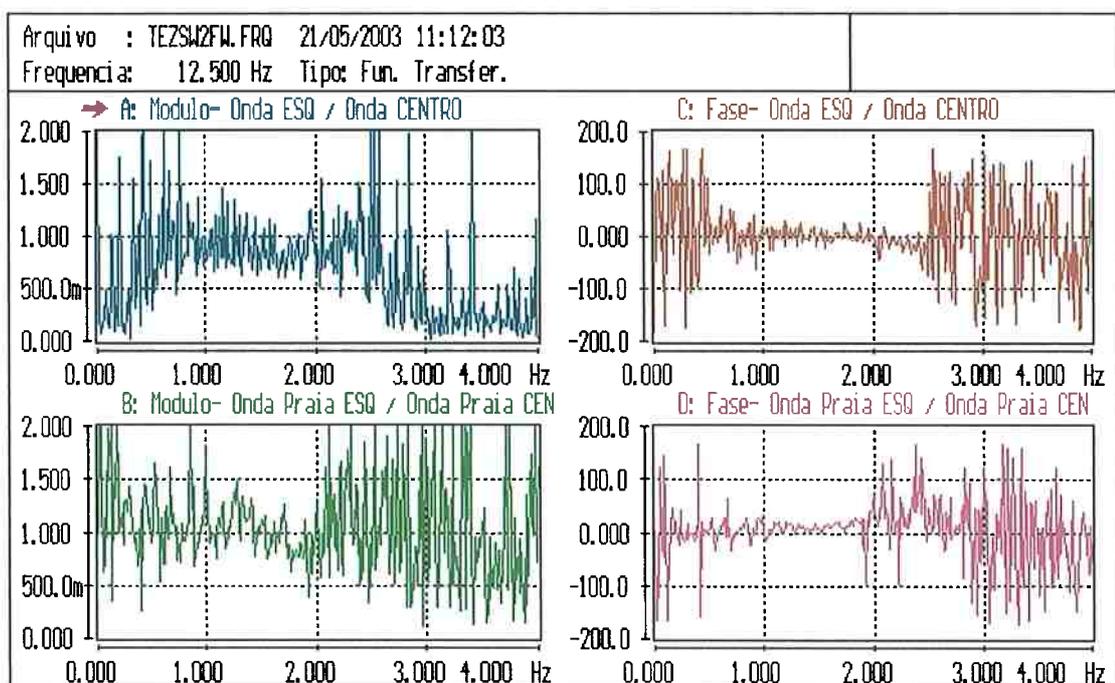


Figura 4.18 - Comparações entre as funções de transferência das ondas, após as modificações. (Fase em graus).

#### 4.4. Dissipação de Ondas

Um fator muito importante para a avaliação da qualidade da onda é a determinação da constância das forma, amplitude e freqüência, no espaço e no tempo. Deve-se verificar se a energia propaga-se de forma constante ao longo do tanque, visto que, esse fenômeno depende fundamentalmente da freqüência.

Nesse caso, a dissipação da energia da onda ao longo do tanque pode ocorrer, primariamente, pela atenuação causada pelo fundo e pelas paredes.

Adiante, serão discutidos os resultados referentes às medidas de atenuação e comparados com a previsão teórica, apresentada no capítulo 2, p. 36 e 37.

#### 4.4.1. Atenuação

As alturas de ondas, medidas nos ondômetros a montante e a jusante, foram usadas no cálculo da atenuação. O resultado obtido é apresentado graficamente na figura 4.19, juntamente com a curva teórica calculada pelas expressões 2.53 (p. 36) e 2.60 (p. 37).

A análise dessa figura indica uma concordância na tendência da atenuação para toda a faixa de frequência, sendo que a curva teórica apresenta-se como envoltória superior dos pontos obtidos nos ensaios.

Usualmente, em condições normais, nos tanques de grandes dimensões, onde a máxima frequência empregada nos ensaios não ultrapassa 1,5 Hz, a atenuação é inferior a 1%. A parcela da atenuação devida à capilaridade, segundo Le Mehauté (1976, p. 295), só tem significância para lâminas d' água da ordem de 0,02 m.

Mas há que se considerar esse fator, para frequências acima de 1,5 Hz e distâncias maiores que 5 m, casos típicos de tanque de ondas de pequenas dimensões, tendo em vista a precisão global das medidas de 1%.

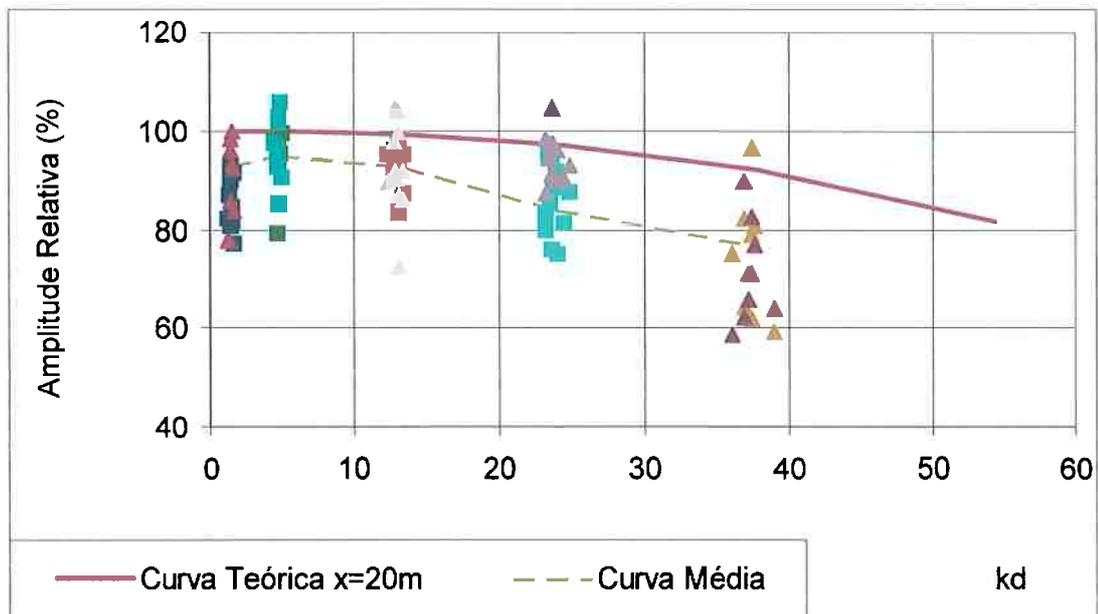


Figura 4.19 – Curvas médias de atenuação, entre os ondômetros, em função da profundidade relativa.

#### 4.4.2. Absorção

O fenômeno da absorção dá-se preferencialmente nas estruturas absorvedoras, as praias artificiais, instaladas nos tanques para minimizar a reflexão das ondas. A teoria preconiza que a absorção de ondas na praia é função, basicamente, da inclinação da praia e da declividade da onda.

Uma forma usual de expressar-se a absorção de uma praia é o coeficiente de reflexão, definido como a relação entre as alturas da onda incidente (I) e da onda refletida (R). Pela conservação da energia, sabe-se que da energia da onda incidente em uma estrutura, parte é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida, de modo que a energia total permanece constante.

Existem várias formas de determinar-se o coeficiente de reflexão experimentalmente, discutidas por Chakrabarti (1994), Frigaard e Borsen (1995), Brossard et al. (2000) e Huang et al. (2003).

Os métodos que empregam ondômetros fixos são mais simples e, no caso de dois sensores, requerem a determinação de duas alturas de onda,  $H_1$  e  $H_2$ , nos ondômetros e a diferença de fase  $\theta$  entre os sinais.

A formulação empregada nesse método, resumidamente, é :

$$H_1 = \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2 \cos(\Delta + \theta)}}{\text{sen } \Delta} \quad (4.5)$$

$$H_R = \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2 \cos(\Delta - \theta)}}{\sin \Delta} \quad (4.6)$$

sendo  $\Delta$  a distância adimensionalizada entre os ondômetros.

Ao longo desta pesquisa, tentou-se empregar um método, divulgado por Nallayarasu et al. (1995), que utiliza o histórico no tempo de um sensor fixo e, simplificada, pressupõe que a onda gerada é conhecida.

O equacionamento usado é o seguinte :

$$\eta = a_I \cos(\omega t) + a_R \cos(\omega t - \theta) \quad (4.7)$$

$$\eta_I = a_I \cos(\omega t) \quad \text{e} \quad \eta_R = a_R \cos(\omega t - \theta) \quad (4.8)$$

$$\eta_R(t_1) = a_R \cos(\omega t_1 - \theta) \quad \text{e} \quad \eta_R(t_2) = a_R \cos(\omega t_2 - \theta) \quad (4.9)$$

Apenas duas variáveis precisam ser determinadas,  $a_R$  e  $\theta$ , visto que as demais são determinadas por medida direta.

Um outro método, fundamentado na função de transferência, elimina a medida de fase, conforme Nishimoto (2003), usando apenas os coeficientes de séries de seno e cosseno das elevações de ondas medidas em dois ondômetros, similar ao método apresentado por Zhu (1999).

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \omega t + \theta_I) \quad \text{e} \quad \eta_R = a_R \cos(kx + \omega t + \theta_R) \quad (4.10)$$

$$\eta_I(x_1) = \eta_I(x_1) + \eta_R(x_1) = A_I \cos(\omega t) + B_I \sin(\omega t) \quad (4.11)$$

$$\eta_2(x_2) = \eta_I(x_2) + \eta_R(x_2) = A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t) \quad (4.12)$$

$$A_1 = a_I \cos \varphi_I + a_R \cos \varphi_R \quad \text{e} \quad B_1 = a_I \sin \varphi_I - a_R \sin \varphi_R \quad (4.13)$$

$$A_2 = a_I \cos(k\Delta x + \varphi_I) + a_R \cos(k\Delta x + \varphi_R) \quad \text{e} \quad (4.14)$$

$$B_2 = a_I \sin(k\Delta x + \varphi_I) - a_R \sin(k\Delta x + \varphi_R)$$

com  $\varphi_I = kx + \theta_I$  e  $\varphi_R = kx + \theta_R$

Manipulando-se as equações pode-se mostrar que :

$$a_I = \frac{1}{2|\text{sen}k\Delta x|} \sqrt{(A_2 - A_1 \text{cos}k\Delta x - B_2 \text{sen}k\Delta x)^2 + (B_2 + A_1 \text{cos}k\Delta x - B_1 \text{cos}k\Delta x)^2} \quad (4.15)$$

$$a_R = \frac{1}{2|\text{sen}k\Delta x|} \sqrt{(A_2 - A_1 \text{cos}k\Delta x + B_1 \text{sen}k\Delta x)^2 + (B_2 - A_1 \text{sen}k\Delta x - B_1 \text{cos}k\Delta x)^2} \quad (4.16)$$

podendo-se determinar  $a_I$  e  $a_R$  apenas em função de valores medidos.

Devido a resolução temporal empregada nessa pesquisa, função da frequência de amostragem de 25 Hz, as resoluções de frequência e de fase medidas implicaram em uma variação inaceitável do resultado calculado. Como exemplo dessa variabilidade construiu-se a tabela 4.3, mas para os cálculos do coeficiente de absorção recorreu-se à formulação de Miche.

Tabela 4.4 – Exemplo das variações dos resultados calculados pelo método de Nallayarasu et al. (1995), em função das resoluções das medidas de frequência e de fase.

Valores medidos no registro temporal						Valores calculados			
						Método Nallayarasu			Desv.
Freq (Hz)	H <sub>i</sub> (m)	t <sub>1</sub> (s)	H(t <sub>1</sub> ) (m)	t <sub>2</sub> (s)	H(t <sub>2</sub> ) (m)	Fase	H <sub>r</sub> (m)	H <sub>r</sub> /H <sub>i</sub>	(%)
0,51	0,080	9,7	0,084	10,185	0	1,5335	28,805	0,360	0
0,51	0,080	9,7	0,084	10,18	0	1,5205	30,093	0,376	4,44
0,51	0,080	9,7	0,084	10,22	0	1,6719	19,958	0,249	-30,8
0,50	0,080	9,7	0,084	10,22	0	1,1848	70,002	0,875	143,1

A expressão empregada foi extraída de Wiegel (1964) e tem a forma:

$$\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{MAX} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \left(\frac{\text{sen}^2 \alpha}{\pi}\right) \quad (4.17)$$

$$K'_R = \frac{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{MAX}}{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{MED}} = \frac{K_R}{\chi} \quad (4.18)$$

nas quais  $\alpha$  é a inclinação da praia,  $K_R$  o coeficiente de reflexão e  $\chi$  um fator de correção valendo 0,8 para praia plana, lisa e impermeável; 0,33 para praia rugosa e entre 0,3 e 0,6 para enrocamentos.

Utilizando-se a fórmula de Miche, para a reflexão de ondas, em conjunto com os valores medidos de altura e freqüência, construiu-se o gráfico apresentado na figura 4.20.

Alternativamente, empregou-se uma formulação totalmente empírica, também em conjunto com valores medidos, resultando este procedimento no gráfico da figura 4.21. A fórmula utilizada pelo USACE, devida a Seelig e Ahrens, mostra a seguinte relação:

$$K_R = \frac{N^2}{5,5 + N^2} \quad (4.19)$$

$$N = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_i/L_o}} \quad (4.20)$$

Nota-se que, de uma forma geral, a tendência do coeficiente de reflexão, é bastante semelhante nos dois casos, mesmo considerando-se que os valores absolutos não são iguais. De qualquer modo, mesmo que o valor do coeficiente determinado não seja exato, pode-se analisar estes gráficos comparativamente e comprovar os efeitos das modificações.

Para efeitos comparativos, ilustra-se na figura 4.22 alguns resultados experimentais relatados por Wiegel (1964) que indicam a mesma tendência e a mesma ordem de grandeza para os valores encontrados.

Outra comparação pode ser feita com resultados numéricos de Twu e Liu (1999) que apontam valores semelhantes aos determinados nessas análises, para o coeficiente de reflexão de uma praia plana.

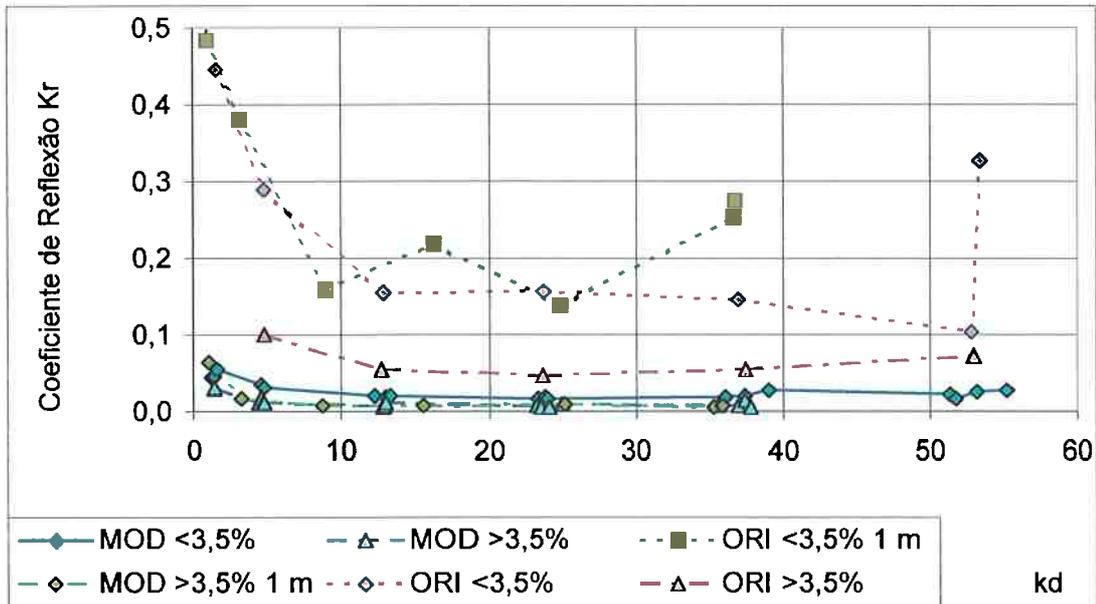


Figura 4.20 – Coeficientes de Reflexão determinados pela fórmula de Miche e valores medidos, em função da profundidade relativa.

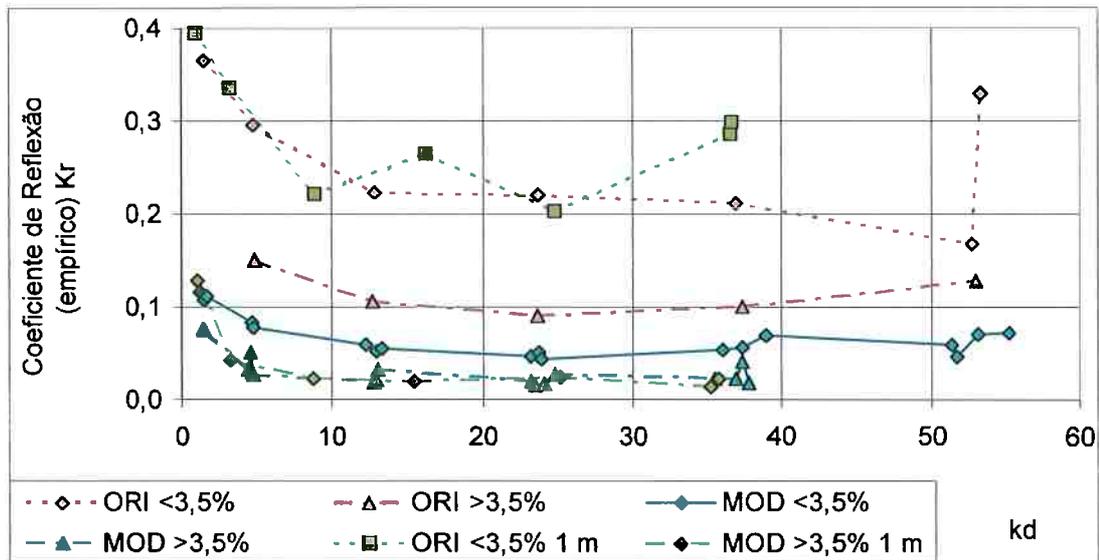


Figura 4.21 – Coeficientes de Reflexão determinados pela formulação empírica e valores medidos, em função da profundidade relativa.

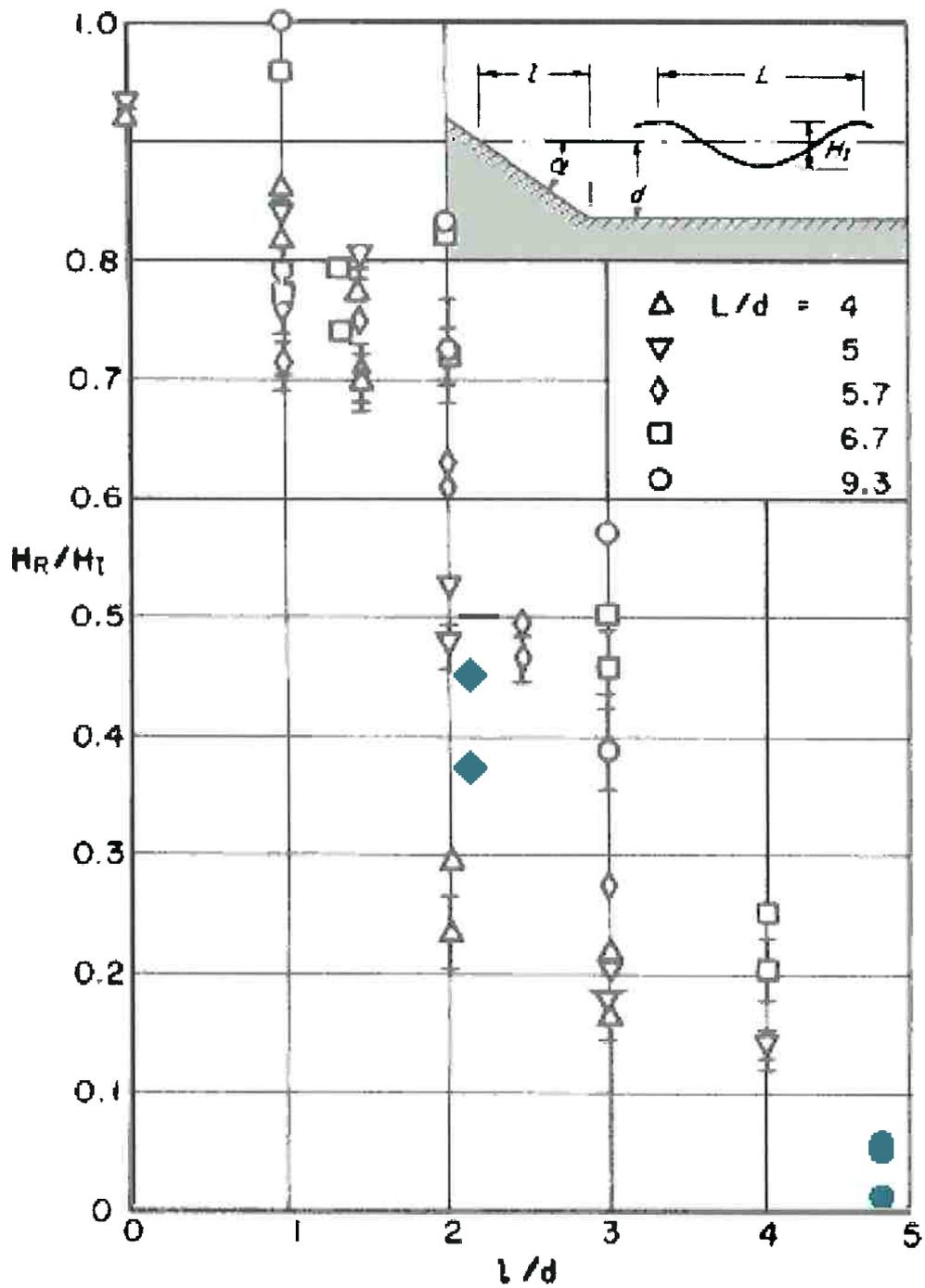


Figura 4.22 - Comparação dos resultados obtidos com os resultados apresentados por Wiegel (1964).

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

*"Truth is ever to be found  
in the simplicity,  
and not in the multiplicity  
and confusion of things."*

*Sir Isaac Newton*

## **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A mais importante conclusão, fruto da análise das medidas experimentais e confrontação com a teoria, é que o tanque de ondas de dimensões reduzidas do LENO pode ser utilizado, com sucesso, para ensaios com vistas à Engenharia Oceânica.

As calibrações periódicas de todos os instrumentos e as aferições diárias mostraram-se imprescindíveis para manter o grau de incerteza das medidas experimentais. Variações das propriedades físico-químicas da água e do ambiente do tanque podem induzir desvios nas calibrações dos ondômetros.

A montagem e o arranjo físico dos sensores devem ser feitos com atenção, pois podem introduzir erros adicionais nas medidas. Especial cuidado deve ser dispensado às fixações para não introduzirem desalinhamentos, movimentos indesejáveis e ressonâncias.

O processamento dos dados colhidos deve obedecer critérios mínimos que garantam a sua fidelidade e principalmente que sejam reprodutíveis. Parâmetros de aquisição de dados tais como frequência de amostragem, filtragens, de qualquer tipo, precisam ser muito bem definidos pois afetam toda a cadeia de propagação de erros. Uma redução de dados automatizada foi descartada face a existência de um número muito grande de variáveis a serem consideradas, sendo alguns aspectos até subjetivos.

Análises de variáveis no tempo, somente, não foram suficientes para determinar a qualidade de ensaios, no tanque de dimensões reduzidas, e o recurso de análise em frequência deve ser usado.

As funções de transferências feitas foram muito importantes para elucidação de fenômenos que ocorrem concomitantemente à geração das ondas. Em especial, o sistema de geração pode ser devidamente investigado através de funções de transferência, a partir de sinais de sensores convenientemente instalados.

Pelas análises elaboradas, fundamentadas nos experimentos e comparações com a teoria linear, nota-se que as modificações introduzidas foram efetivas na redução das reflexões das ondas. Isto significa que a qualidade da onda gerada foi substancialmente melhorada garantindo a qualidade de ensaios realizados dentro da faixa de frequências investigadas.

Reciprocamente, mostrou-se que a teoria linear utilizada representou bem os fenômenos, dentro de uma ampla gama de declividade de onda, visto que os resultados teóricos e experimentais tiveram uma boa concordância geral.

Também a metodologia empregada, medição, redução e análise dos dados, mostrou-se importante para a consistência e coerência dos resultados finais.

Conclui-se que, foi atingido o objetivo de melhorar o desempenho do tanque, resultando em um coeficiente de reflexão abaixo de 5%, em toda a faixa de frequência definida como de interesse para este trabalho. Especialmente em frequências entre 0,5 Hz e 1,0 Hz determinou-se uma redução de 5 vezes no coeficiente de reflexão.

### 5.1. Definição das Faixas de Utilização

A definição do intervalo de frequências utilizáveis para os ensaios no tanque é feita a partir das análises dos resultados obtidos. Notando-se que, já na frequência de 0,5 Hz ocorrem reflexões e um máximo de três ciclos incidentes podem ser conseguidos, conclui-se que esta será a menor frequência útil para ensaios no tanque estudado.

No outro extremo, teoricamente demonstrou-se que devido a influências de ondas capilares o limite máximo está nas vizinhanças de 3 Hz. Mas, examinando-se os registros gráficos, evidencia-se que acima de 2,5 Hz ocorrem várias dispersões dos valores experimentais em relação a teoria, ocasionadas, principalmente, por ressonâncias transversais. Conservadoramente afirma-se então que, o limite superior das frequências úteis para ensaios no tanque, na configuração testada, é em torno de 2,5 Hz.

Atendo-se rigorosamente às recomendações de ensaio da ITTC (2002), a faixa de utilização de um tanque é definida por:

- a onda deve ser medida por cerca de 10 ciclos, sem nenhuma interferências durante o tempo de aquisição de sinais;
- e um máximo de 40 ciclos deve ser gerado, após os quais a onda sofre instabilidades; e
- o ondômetro mais próximo do atuador deve estar a no mínimo 3 vezes a profundidade.

Calculando-se a partir dessa recomendação, para o tanque do LENO a menor frequência é 0,75 Hz e a maior seria a barreira dos 3 Hz. Na prática demonstrou-se que a faixa de atuação pode ser de 0,5 Hz a 2,5 Hz, empregando-se a metodologia desenvolvida, na configuração atual do tanque.

## 5.2. Proposta de Metodologia

Desde o início da redução de dados, ficou claro que um procedimento usual de análise e interpretação dos registros seria inadequado, visto que as ondas em tanque de dimensões reduzidas são mais sujeitas às reflexões, que interferem nas medidas.

Calibrações e aferições, estáticas e dinâmicas, devem ser executadas no início dos trabalhos, em todos os instrumentos. Particularmente o ondômetro deve ser aferido todos os dias de ensaio e mantido sempre nas mesmas condições. A parte sensora, no caso o filamento metálico deve estar sempre limpo e conservado.

A boa instalação do ondômetro é fundamental para que não sejam introduzidas mais incertezas nas medidas do que aquelas inerentes ao processo. A fixação deve ser tal que não permita vibrações, ressonâncias ou desalinhamentos que comprometam a fidelidade dos registros.

As propriedades físico-químicas da água do tanque devem ser mantidas constantes, visto que esta interfere na resposta do ondômetro resistivo e certamente de outros tantos que utilizem a água do tanque como parte constituinte do sensor.

A análise do histórico no tempo deve considerar as eventuais interferências e mapear os tempos de percurso à todas as singularidades, para criar um critério de escolha do ponto da onda a ser medido. Também é importante uma interpretação adequada das funções de transferência, módulo e fase, para que seja garantida a qualidade do resultado final.

Recomenda-se que, uma simulação numérica do ensaio seja feita, visto que, pode auxiliar no posicionamento dos sensores e detectar eventuais problemas com a qualidade da onda, que afetariam os resultados.

Diferentemente de tanques com mais de mil metros quadrados de área, ficou evidenciado que a interpretação dos dados de ensaio é muito mais sensível ao operador e sujeita a dispersão. Assim, uma atenção especial deve ser dada à redução dos dados, e ao pessoal a cargo dessa missão, que deve ser experiente e bem treinado para a tarefa.

Os dados devem ser tratados com as incertezas experimentais e a propagação de erros deve ser utilizada quando da apresentação de resultados de cálculo. Quando for o caso, o desvio padrão e o intervalo de confiança devem acompanhar o resultado final.

Finalmente, pode-se responder mais pragmaticamente às questões da página 13, considerando-se um gerador de ondas convencional e absorvedor passivo, a saber:

- as incertezas determinadas afetam os resultados em 0,5%, com uma confiabilidade de 68%, e pelo pior caso em 1%, para os instrumentos estudados;
- as dimensões e a geometria influenciam as medidas devido às reflexões e ressonâncias transversais, conforme item 4.2.2, p. 85 a p. 88 e página 108; e
- as dimensões mínimas de um tanque podem ser estimadas, de modo conservador, pelas recomendações do ITTC (2002), mencionadas na página 108.

### 5.3. Recomendações para Futuras Pesquisas

Após a experiência advinda deste trabalho recomendam-se diversos tópicos para futuros estudos e pesquisas, associados ao tema desenvolvido. Não tratou-se do gerador de ondas com termos de segunda ordem e nem do absorvedor ativo, que podem contribuir muito para tanques de dimensões reduzidas.

Em particular, as questões pertinentes a tanque de dimensões reduzidas devem continuar a serem pesquisadas, buscando-se a melhor relação custo benefício das instalações laboratoriais, sem comprometer a qualidade dos ensaios.

Especificamente, os tópicos sugeridos para futuras pesquisas são :

- estudar absorvedores viscosos e a utilização em tanques de dimensões reduzidas;
- desenvolver técnicas de ensaios para determinação de coeficiente de reflexão, de modo mais realista e mais prático;
- analisar em detalhes a aplicação do modelo SWAN na simulação de um tanque de ondas;
- estudar o acionamento do atuador e geração de ondas que eliminem ou minimizem os transientes e sinais espúrios;
- estudar a aplicação de gerador de segunda ordem e absorvedor dinâmico em tanques de dimensões reduzidas; e
- analisar a relação custo benefício do uso de gerador de segunda ordem e absorvedor dinâmico em tanque de dimensões reduzidas.

Finalmente, espera-se ter contribuído para o tema aqui desenvolvido, não só pela parcela de conhecimento consolidada ao longo desta pesquisa, mas também pelo questionamento de algumas posições e práticas vigentes.

# ANEXOS

*"The two operations of our understanding,  
intuition and deduction,  
on which alone we have said we must rely  
in the acquisition of knowledge."*

*René Descartes*

## **ANEXO 1**

### **A.1. – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ONDAS OCEÂNICAS**

Onda é um fenômeno físico causado por uma perturbação de energia que se propaga. Existem muitos tipos de ondas, como pode ser visto em qualquer livro de Física Ondulatória. Mas, neste trabalho serão discutidas apenas ondas mecânicas, mais especificamente as ondas hidráulicas.

Ondas mecânicas necessitam de um meio físico para propagarem-se e, no caso de ondas hidráulicas, este meio é um fluido, geralmente água. As ondas hidráulicas de interesse são as chamadas ondas de superfície, particularmente aquelas se que propagam na interface entre a água e o ar. Quando uma perturbação ocorre na superfície, a energia incidente é absorvida pela água, que a transforma em uma variação da forma da superfície, onde o rebaixamento alterna-se com a elevação do nível.

Esse fenômeno pode ser visualizado, imaginando-se duas pessoas distantes entre si, cada uma segurando uma ponta de uma corda. Uma delas faz um movimento de subir e descer a mão que segura a corda e facilmente percebe-se que a forma da corda é alterada pela energia imposta.

A alteração da forma propaga-se até a outra extremidade e a outra pessoa sente a mão sendo forçada para cima e para baixo. A energia perturbou a condição de repouso da corda e propagou-se, transferindo a

energia aplicada por uma pessoa até a outra. Este é um exemplo de onda oscilatória progressiva.

Existem ondas oscilatórias e ondas de transporte, sendo que neste trabalho só serão tratadas as ondas oscilatórias. As ondas oscilatórias podem ser progressivas, como no exemplo anterior, ou estacionárias. As progressivas propagam energia de um ponto para outro, ondulando tanto em função do tempo quanto em função da posição.

As estacionárias têm uma forma que depende apenas da posição não dependendo, portanto, do tempo. Uma corda de violão quando tocada exhibe uma onda oscilatória estacionária, notando-se que muitos pontos oscilam em uma mesma posição, enquanto outros pontos permanecem fixos.

Dos fenômenos ondulatórios, o de maior interesse para o tema a desenvolver-se aqui, é o fato das ondas só transportarem energia e não matéria, isto é, um objeto flutuando, e apenas sob a ação de ondas, oscila, desviando-se muito pouco da sua posição inicial, em muitos casos percorrendo uma trajetória circular fechada.

A Física ondulatória elementar utiliza certas convenções para facilitar a descrição matemática desse fenômeno. Alguns parâmetros de uma onda senoidal são definidos a seguir para facilitar o desenvolvimento posterior das equações, sendo que alguns deles são ilustrados na figura A.1.1.

No caso de oceanos, o grau de complexidade é muito maior pois dificilmente ocorre uma onda simples, com forma senoidal, já que as ondulações são produto de várias interações e superposições. Um observador postado frente ao oceano certamente irá notar que a superfície da água apresenta uma forma bem complexa. O fenômeno em questão é chamado de agitação marítima, sendo causada por diversos fatores.

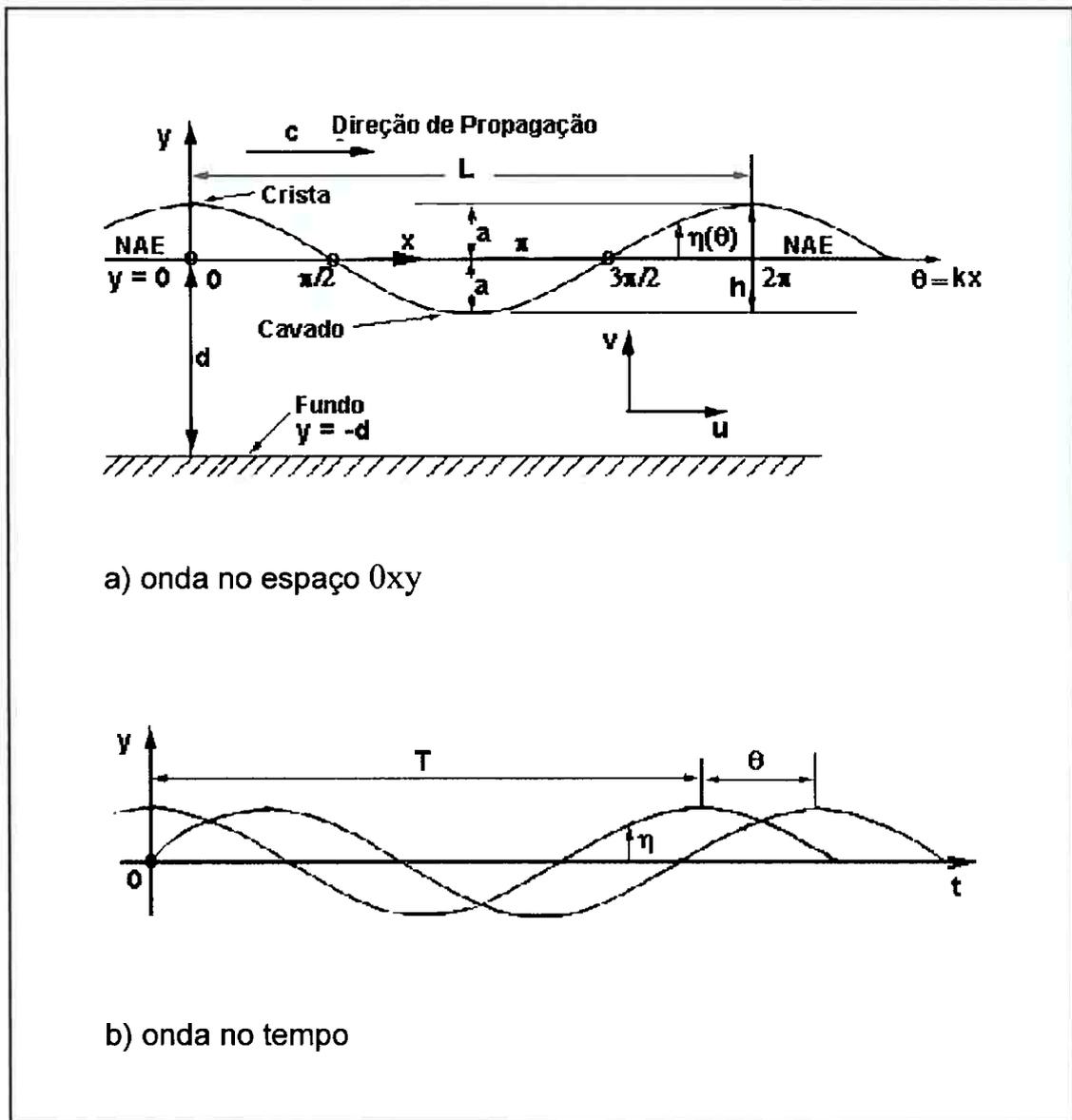


Figura A.1.1 - Ilustração dos parâmetros de uma onda.

### A.1.1 - Tipos de Ondas Oceânicas

Diversos autores, como Knowles (2000), Randall (1997) e Wiegel (1965) entre muitos outros, classificam as ondas oceânicas de quatro maneiras, de acordo com : a profundidade local, o período, o modo de geração e a força geradora.

As classificações são arbitrárias, e muitas vezes grosseiras, mas são importantes para facilitar e sistematizar o estudo e também para especificar e delimitar a aplicabilidade correta de uma teoria.

Uma onda avançando pela massa fluida tende a manter-se idealmente igual se nenhuma ação ou condição externa interferir. Alterações podem ser provocadas por vento, corrente, interações com outras ondas ou pela topografia do fundo, isto é, a batimetria.

A região oceânica onde a profundidade diminui até o nível do terreno emerso local é chamada praia. Nas praias, as ondulações sofrem modificações das formas e propriedades até desaparecerem por completo, visto que a energia é consumida por vários processos físicos.

Ao longo do caminho, entre mar aberto e a praia, à medida que o fundo e a superfície da água aproximam-se, a onda passa por tres condições denominadas águas profundas, águas intermediárias e águas rasas. A diferença entre estas condições está na relação entre o comprimento da onda,  $L$ , e a profundidade,  $d$ , em que se encontra.

Uma definição, geralmente aceita, denomina águas profundas quando a profundidade local é maior que metade do comprimento da onda,  $d/L > 0,5$  e águas rasas quando esta relação é um vigésimo,  $d/L < 0,05$ . Para uma situação entre estas duas relações, isto é,  $0,05 < d/L < 0,5$ , tem-se a condição chamada águas intermediárias.

O período,  $T$ , pode ser usado para classificar, aproximadamente, as ondas em capilares, gravitacionais e longas. As ondas capilares tem período inferior a 0,1 s, nas gravitacionais o período fica entre 1 s e 30 s, enquanto que as ondas longas tem período maior que 5 minutos. Esta separação não é muito rígida, visto que, nas regiões limítrofes podem coexistir dois tipos de ondas, conforme nota-se ao rever a figura 2.2, apresentada anteriormente.

Quanto ao modo como foram geradas, as ondas podem ser causadas por ventos ou impactos. Os impactos normalmente são provocados por rompimentos de geleiras nos polos, deslizamentos de encostas, deslocamentos de terra por terremotos ou erupções vulcânicas. Estes eventos podem ocorrer tanto na superfície quanto em profundidade, no leito oceânico ou em terra e, em geral, originam ondas de transporte, chamadas *tsunami*.

Guardando relação com a força geradora, as ondas podem ser ditas livres ou forçadas. Ondas livres são as que se propagam mesmo após cessado a causa inicial, como no caso de impactos. Ondas forçadas necessitam da ação contínua do agente causal, como nas ondas de ventos. Caso particular de ondas livre-forçadas ocorrem em tempestades quando o vento sopra contínua e persistentemente.

Adiante serão apresentados alguns fenômenos que ocorrem com ondas gravitacionais, do tipo que propaga apenas a energia.

### **A.1.2 - Fenômenos de Propagação**

Um dos fenômenos mais característicos das ondas oceânicas é a dispersão, ou seja, a dependência entre a velocidade e a frequência. Isso faz com que ondas vindas de muito longe incidam em uma praia, com uma forma quase senoidal. Esse tipo de onda, chamada marulho, tem uma frequência muito baixa e uma velocidade grande, afastando-se do ponto de origem muito rapidamente.

Uma curiosidade é o uso da dispersão para estimar-se a distância de uma tempestade pela chegada de ondas na praia. Medindo-se diferentes tempos de chegada para diferentes frequências, pode-se calcular a que distância da praia as ondas foram formadas.

Retornando à situação da propagação, a medida que ondas provenientes de uma região de águas profundas aproximam-se de uma região de águas rasas inicia-se uma interação com o fundo, causando uma transformação na onda, conforme Horikawa (1978), Stewart (2002) e Wiegell (1965). Diz-se que, a onda começa a "sentir" o fundo e, assim, ocorre o fenômeno da refração.

A refração é um dos principais fenômenos que ocorrem com as ondas, assim como a reflexão, a transmissão e a difração. Na refração, as frentes das ondas tendem a evoluir para uma posição paralela à linha da costa, da forma ilustrada na figura A.1.2. Por frente de onda entende-se como sendo a linha ortogonal ao vetor direção de propagação, que acompanha a cava da onda.

Pode-se imaginar que, ao atingir obliquamente um fundo inclinado, a frente de onda é influenciada primeiro pelo fundo na posição mais próxima da praia, diminuindo a velocidade, o que retarda a progressão. Enquanto isso, a porção mais distante, estando em local mais profundo,

mantém a velocidade, tendendo a curvar-se em direção a praia. Seria como se a região do fundo mais elevada servisse como um apoio, pivotando a frente de onda redirecionando-a para uma paralela à costa.

A difração é a capacidade da onda de, ao encontrar obstáculos, transmitir parte da energia em direção diferente da direção de propagação, no sentido de contornar o obstáculo. Ao atingir uma barreira, cada ponto de contato entre a frente da onda e o objeto transforma-se em uma pequena fonte que emite uma pequena frente de onda, de acordo com o chamado Princípio de Huygens. Diferentemente da refração, nesse caso não há variação da velocidade da onda.

A reflexão e a transmissão ocorrem quando a onda encontra uma barreira e podem coexistir com os outros dois fenômenos mencionados anteriormente. No caso da onda incidente encontrar uma barreira, esta terá parte da energia devolvida para o mesmo lado em que a onda incidiu, a reflexão, parte consumida no processo, dissipação, e parte poderá ultrapassar a barreira, a transmissão.

Para uma parede vertical, rígida, impermeável e lisa a reflexão será 100%, não ocorrerá transmissão, e o ângulo de reflexão será igual ao ângulo de incidência. Isso porque, as ondas hidráulicas seguem as mesmas leis da Óptica geométrica, ou Lei de Snell. Outro caso, em um quebra-ondas permeável, pedras justapostas, parte da onda é refletida, parte é dissipada ao passar pelo quebra-ondas e parte é transmitida.

Observando-se a incidência de ondas em uma praia, constata-se que a transformação ocorre com a diminuição da velocidade,  $c$ , a diminuição do comprimento,  $L$ , e o aumento da altura,  $H$ . Este processo causa o encapelamento, como se houvesse um empilhamento da água até um certo limite, limite este que, quando ultrapassado leva a quebrar, gerando

turbulência e aeração, grande interação com o fundo e dissipando a energia transportada, mostrada esquematicamente na figura A.1.3.

Um parâmetro usado para indicar a possibilidade de quebra de uma onda é a sua declividade, ou seja, a relação entre altura e comprimento. A teoria prevê valores para este parâmetro, conforme a região onde ocorre a propagação. Para quebrar em águas profundas a declividade deverá ser maior do que aproximadamente  $1/7$  e para águas rasas este valor dependerá da relação entre profundidade e comprimento, e também da inclinação da praia.

Evoluindo a caminho da praia, a diminuição da profundidade e o aumento da declividade causam um achatamento e um alongamento do cavado ao mesmo tempo que a crista torna-se mais estreita e pontiaguda. Nota-se também a formação de uma espuma clara, devido a aeração, que se inicia no topo, e a medida que a onda tende a quebrar, esta espuma desenvolve-se em direção a base, acompanhando a onda até a praia.

A região da praia onde as ondas começam a quebrar define a chamada zona de arrebentação. Na zona de arrebentação, como mostrado esquematicamente na figura A.1.4 as ondas podem quebrar de tres modos distintos, denominados: derrame, espiral e vagalhão. O fator mais determinante do modo como a onda quebra é a inclinação da praia.

Em praias de inclinação suave o modo mais comum é em derrame. A medida que a inclinação aumenta, as ondas quebram em espiral, formando os conhecidos tubos, tão procurados pelos surfistas. Nas inclinações maiores predominam as ondas em vagalhões, as chamadas praias de tombo, devido ao modo abrupto com que ocorre a quebra. Nessas condições as ondas só se quebram na linha da praia.

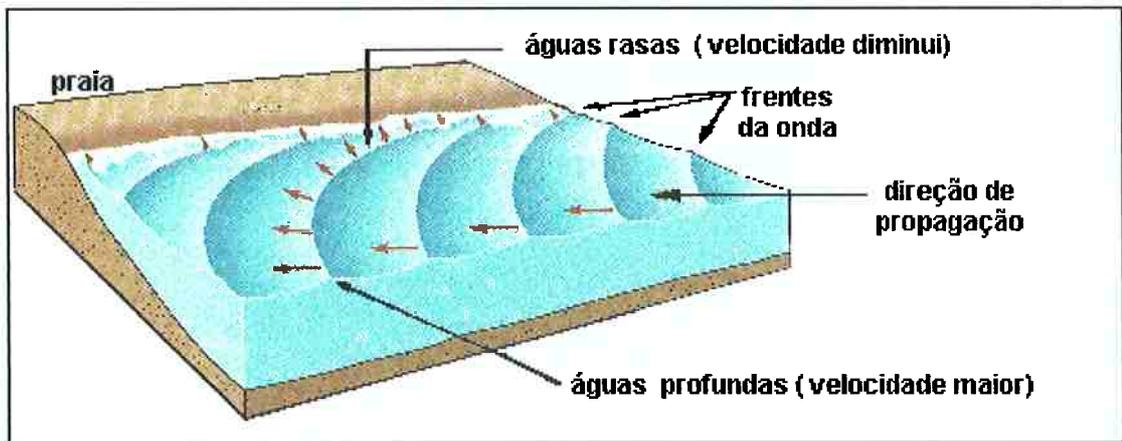


Figura A .1.2 - Ilustração da refração de ondas chegando em águas rasas, com as frentes de ondas alinhando-se paralelas à costa.

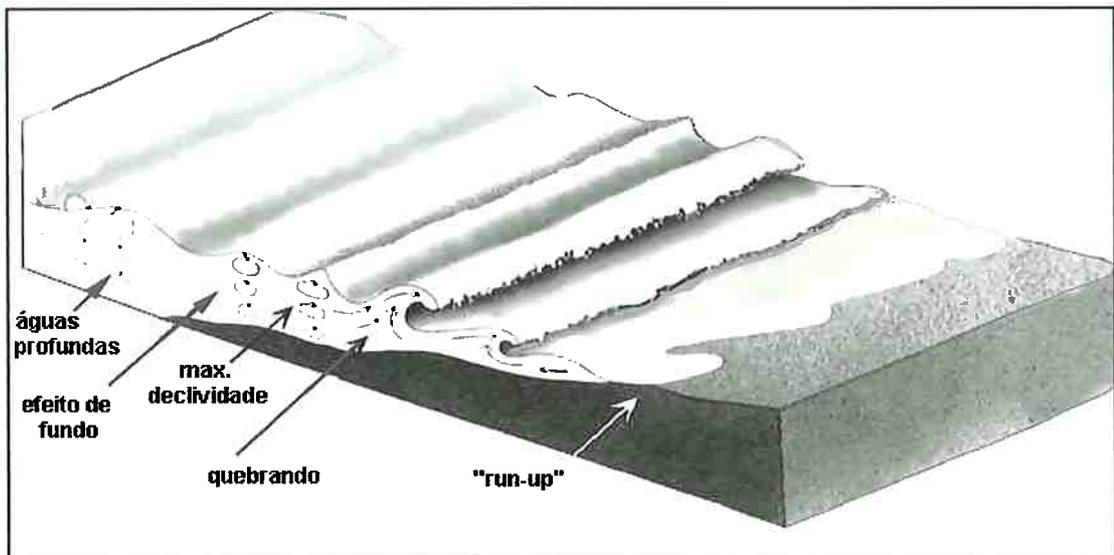


Figura A .1.3. - Esquema da evolução das ondas do mar aberto para a praia, destacando-se o movimento das partículas submersas.

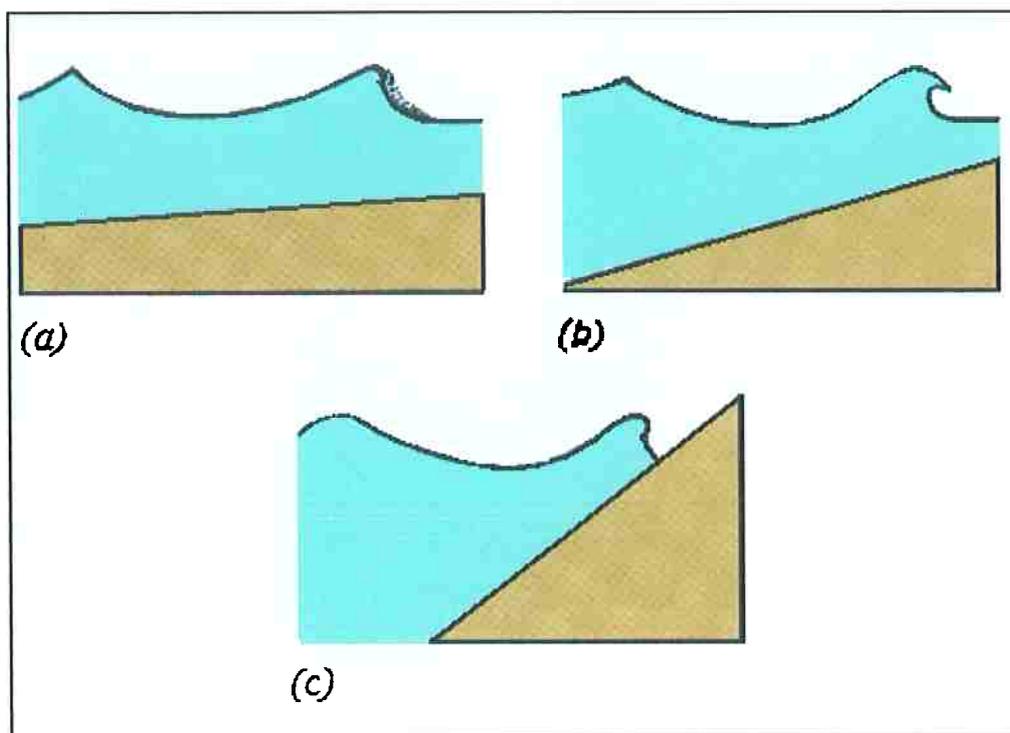


Figura A.1.4 - Modos como uma onda quebra na praia:  
a) derrame, b) espiral e c) vagalhão.

Atualmente, admite-se um tipo denominado colapsível, intermediário entre espiral e vagalhão. Na natureza pode ocorrer um misto destes tipos ou associações entre eles, nem sempre havendo predominância de um tipo, em função do vento e de correntes.

Até este ponto, procurou-se explorar a parte intuitiva das ondulações, tomando-se como ponto de partida a observação visual, servindo esta como base argumentativa preparatória para a teoria.

## ANEXO 2

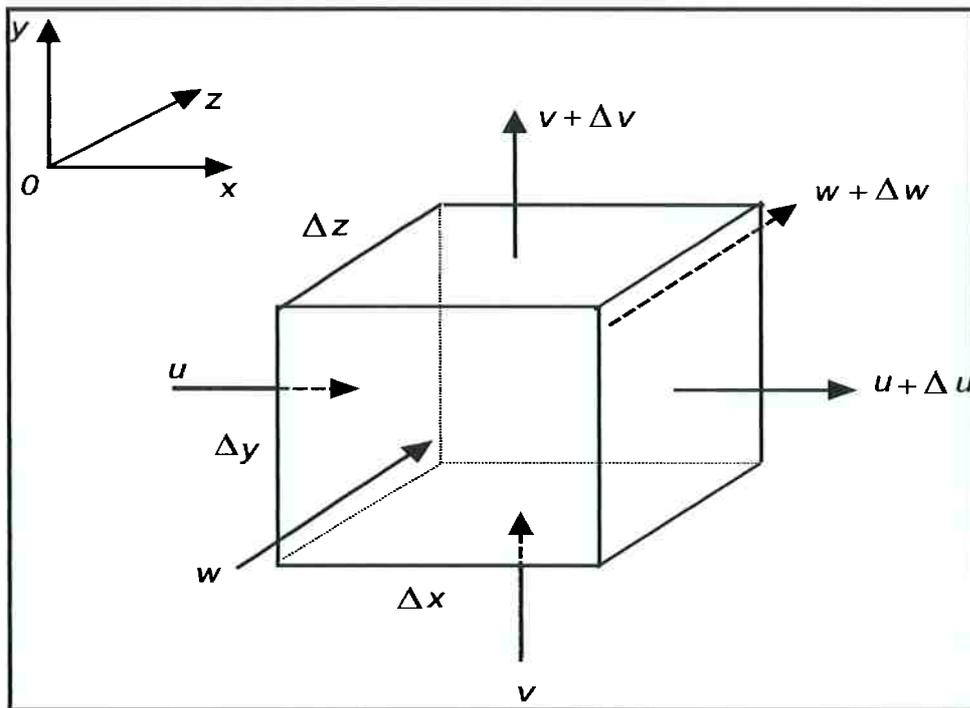
### A .2. - BREVE SÍNTESE DA FORMULAÇÃO DA TEORIA DE ONDAS

Após as considerações fenomenológicas, no Anexo 1, onde pretendeu-se destacar a Física das ondas oceânicas, serão apresentadas as bases matemáticas correspondentes aos casos de interesse.

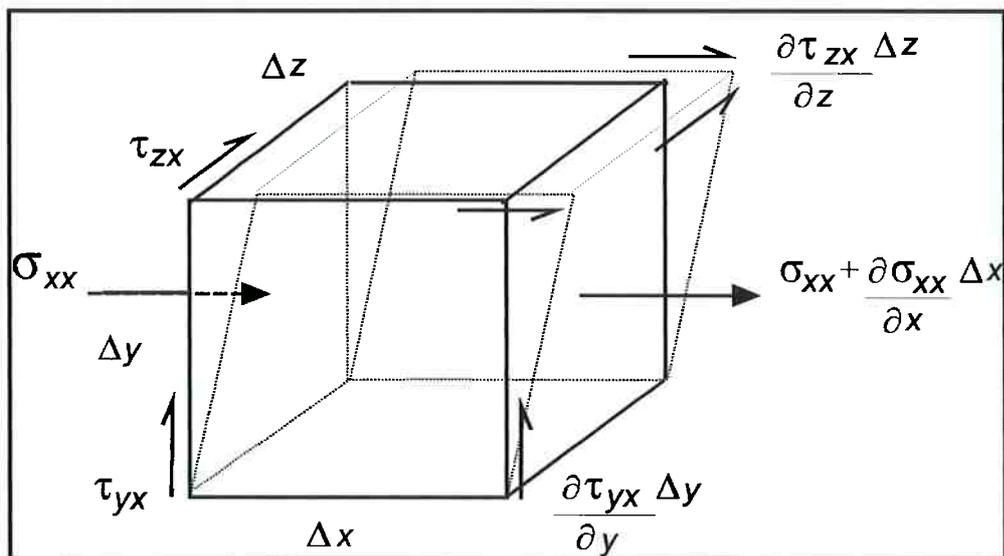
Inicialmente, considere-se um sistema de coordenadas cartesianas  $Oxyz$  com orientação positiva da esquerda para a direita, de baixo para cima e para dentro da página, respectivamente, conforme a figura A .2.1.

Nesse sistema, toma-se um pequeno elemento, fixo, de volume  $V$  com arestas  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , que contém uma massa  $m$  de fluido, e são pequenas o bastante para que variações das propriedades do fluido sejam representadas por funções lineares e suficientemente grandes para que ser considerado um meio contínuo.

Esse fluido tem uma densidade  $\rho(x,y,z,t)$  e está em movimento com uma velocidade  $\mathfrak{V}(x,y,z,t)$ , sendo  $u$  na direção  $x$ ,  $v$  na direção  $y$  e  $w$  na direção  $z$ . Em um intervalo de tempo  $\Delta t$  passa pelo elemento de volume uma quantidade de massa  $\Delta m$ .



a) Velocidades



b) Tensões

Figura A.2.1 - Representação da porção elementar de um fluido sujeito a um fluxo com velocidade  $\mathcal{S}$  e correspondentes esforços

Sabe-se que o fluxo que chega ao elemento é o produto da velocidade na direção considerada, pela densidade e pela área da face que atravessa. Neste volume  $V$ , não há fontes nem sorvedouros, e aplicando-se o Princípio da Conservação da Matéria obtém-se:

na face  $0yz$ , direção positiva de  $x$ :

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} (\Delta y \Delta z) = \rho u (\Delta y \Delta z) \quad (\text{A.2.1})$$

Homologamente, para  $y$  e  $z$  resulta  $\rho v (\Delta x \Delta z)$  e  $\rho w (\Delta x \Delta y)$ , respectivamente. Na face  $0yz+dx$ , na direção positiva de  $x$ :

$$\frac{\Delta m_4}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(u + \Delta u) \Delta y \Delta z \quad (\text{A.2.2})$$

$$\frac{\Delta m_5}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(v + \Delta v) \Delta x \Delta z \quad (\text{A.2.2.a})$$

$$\frac{\Delta m_6}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(w + \Delta w) \Delta x \Delta y \quad (\text{A.2.2.b})$$

Pela conservação da massa total  $M$  em  $0xyz$ , sabendo-se que  $M = \rho V$ :

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = [(\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3) - (\Delta m_4 + \Delta m_5 + \Delta m_6)] \frac{1}{\Delta t} \quad (\text{A.2.3})$$

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = \rho u \Delta y \Delta z + \rho v \Delta x \Delta z + \rho w \Delta x \Delta y - [(\rho + \Delta \rho)(u + \Delta u) \Delta y \Delta z + (\rho + \Delta \rho)(v + \Delta v) \Delta x \Delta z + (\rho + \Delta \rho)(w + \Delta w) \Delta x \Delta y]$$

Agrupando-se os termos e levando-se ao limite, resulta em:

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} = -\frac{\Delta(\rho u)}{\Delta x} - \frac{\Delta(\rho v)}{\Delta y} - \frac{\Delta(\rho w)}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.2.4})$$

denominada Equação da Continuidade, que pode ser escrita como:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathfrak{g}) = 0 \Rightarrow \frac{\delta\rho}{\delta t} + \rho\nabla\mathfrak{g} = 0 \quad (\text{A.2.5})$$

Aplicando-se a conservação da quantidade de movimento:

$$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_u = \frac{\Delta(\rho v)}{\Delta t} u \quad (\text{A.2.6})$$

em x :

$$\rho u(\Delta y \Delta z) u ; \rho v(\Delta x \Delta z) u ; \rho w(\Delta x \Delta y) u \quad (\text{A.2.7})$$

$$\left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x\right)(\Delta y \Delta z) u \Rightarrow \left(\partial u u + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial t} \Delta x\right) \Delta y \Delta z \quad (\text{A.2.8})$$

e da mesma forma para as outras componentes

$$\left(\rho v u + \frac{\partial(\rho v u)}{\Delta t} \Delta y\right) \Delta x \Delta z, \text{ e } \left(\rho w u + \frac{\partial(\rho w u)}{\Delta t} \Delta z\right) \Delta x \Delta y$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \Delta V &= \rho u u \Delta y \Delta z - \left( \rho u u + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z + \\
&+ \rho v u \Delta x \Delta z - \left( \rho v u + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z + \\
&+ \rho w u \Delta x \Delta y - \left( \rho w u + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y + F_x \quad (\text{A.2.9})
\end{aligned}$$

$$\left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = F_x$$

$$\left[ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta V = F_x$$

$$\left( \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_x \quad (\text{A.2.10})$$

Homologamente para y e z, obtem-se:

$$\left( \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_y \quad (\text{A.2.10.a})$$

$$\left( \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_z \quad (\text{A.2.10.b})$$

ou sinteticamente:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathfrak{g}}{\partial t} + \mathfrak{g} \cdot \nabla \mathfrak{g} \right) = F \quad \Rightarrow \quad \rho \frac{\delta \mathfrak{g}}{\delta t} = F \quad (\text{A.2.11})$$

Para a determinação das forças, da equação anterior, emprega-se o princípio da conservação, tal que, para as forças de superfície em x:

$$\sigma_{xx} \Delta y \Delta z + \left( \sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A.2.12})$$

$$\text{Pressão: } \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z ;$$

$$\text{Cisalhamento: } \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z \text{ e } \left( \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \quad (\text{A.2.13})$$

$$\sigma_{xx} = -p + \tau_{xx} ; \sigma_{yx} = \tau_{yx} ; \text{ e } \sigma_{zx} = \tau_{zx} \quad (\text{A.2.14})$$

$$\left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\left( -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A.2.15})$$

Para um fluido Newtoniano  $\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$  ;  $\mu$  a viscosidade dinâmica

$$\tau_{xx} = \mu \frac{\partial u}{\partial x} ; \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) ; \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (\text{A.2.16})$$

$$\left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \Delta V$$

$$\left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right] \Delta V$$

$$\left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right) \right] \Delta V \quad (\text{A.2.17})$$

Da mesma forma para y e z, resulta:

$$F_y = \left[ -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) \right] \Delta V \quad (\text{A.2.17.a})$$

$$F_z = \left[ -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right) \right] \Delta V \quad (\text{A.2.17.b})$$

Para as forças de volume, como a força inercial, e sendo a direção y coincidente com a vertical, tem-se:

$$F_i(x) = m g(x) = 0 \quad (\text{A.2.18})$$

$$F_i(y) = m g(y) = (\rho \Delta x \Delta y \Delta z) g(y); F_i(y) = \rho g(y) \Delta V \quad (\text{A.2.18.a})$$

$$F_i(z) = m g(z) = 0 \quad (\text{A.2.18.b})$$

A força total em y será:

$$F_{ty} = F_y + F_i(y) \quad (\text{A.2.19})$$

$$F_y = \left[ -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} \right) + \rho g(y) \right] \Delta V \quad (\text{A.2.20})$$

Retomando (A.2.10.a) e usando (A.2.20), para y tem-se:

$$\begin{aligned} & \left( \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Delta V = \\ & = \left[ -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) + \rho g(y) \right] \Delta V \end{aligned}$$

Em x:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right) \right] \quad (\text{A.2.21})$$

Repetindo-se o processo para y e z:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) \right] + \rho \cdot g(y) \end{aligned} \quad (\text{A.2.21.a})$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.2.21.b})$$

ou agrupando e sintetizando:

$$\rho \frac{\delta \mathfrak{G}}{\delta t} = -\rho g(y) - \nabla p + \mu \nabla^2 \xi_{ijk} \quad (\text{A.2.22})$$

A equação A.2.22 é denominada Equação de Navier-Stokes, para um fluido Newtoniano, sendo  $\xi_{ijk}$  o tensor das tensões viscosas.

As equações (A.2.5) e (A.2.22) formam a base matemática para tratar um fluxo não estacionário em superfície livre sujeito à gravidade. Mas essas equações apresentam uma complexidade matemática que pode ser atenuada com algumas hipóteses simplificadoras, como, por exemplo,

$$\text{fluido homogêneo e incompressível} \Rightarrow \rho = \text{cte} \therefore \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0$$

Sendo  $\rho$  constante, a equação (A.2.5) reduz-se a:

$$\nabla \mathfrak{G} = 0 \quad (\text{A.2.23})$$

e também o termo gravitacional transforma-se em

$$-\rho g(y) = -\nabla \rho g y$$

que combinando com o termo da pressão

$$-\nabla p - \rho g(y) = -\nabla p - \nabla \rho g y = -\nabla(p + \rho g y) \quad (\text{A.2.24})$$

resulta na denominada pressão dinâmica.

Reescrevendo-se (A.2.22) para  $\rho$  constante e usando (A.2.24):

$$\rho \frac{\delta \mathfrak{G}}{\delta t} = -\nabla(p + \rho g y) + \mu \nabla^2 \mathfrak{G} \quad (\text{A.2.25})$$

Aplicando-se a hipótese de fluido invíscido,  $\mu = 0$ , e expandindo o termo a esquerda, chega-se a equação de Euler, expressa por:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathfrak{V}}{\partial t} + (\mathfrak{V} \cdot \nabla) \mathfrak{V} \right) = -\nabla(p + \rho gy)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathfrak{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathfrak{V}|^2 - \mathfrak{V} \times (\nabla \times \mathfrak{V}) \right) = -\nabla(p + \rho gy)$$

Pelo teorema de Kelvin, em fluidos invíscidos o rotacional é nulo; isto é,  $\nabla \times \mathfrak{V} = 0$ , portanto:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathfrak{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathfrak{V}|^2 \right) = -\nabla(p + \rho gy) \quad (\text{A.2.26})$$

Sendo o fluxo irrotacional, o campo de velocidades  $\mathfrak{V}$  pode ser descrito como o gradiente de um campo escalar, ou especificamente, um potencial de velocidades  $\phi$ :

$$\nabla \times \mathfrak{V} \Leftrightarrow \mathfrak{V} = \nabla \phi \quad (\text{A.2.27})$$

Assim, um fluxo irrotacional é chamado de fluxo potencial e um fluxo irrotacional que também é homogêneo e incompressível denomina-se fluxo ideal.

Decorre ainda que:

$$\mathfrak{V} = \nabla \phi \Leftrightarrow u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; v = \frac{\partial \phi}{\partial y}; w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{A.2.27.a})$$

Retomando-se a equação (A.2.23)

$$\nabla \mathcal{G} = 0 ; \nabla \nabla \phi = 0 \quad \therefore \nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{A.2.28})$$

ou

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.2.28.a})$$

conhecida como equação de Laplace, válida para fluxo homogêneo, incompressível e irrotacional.

Aplicando-se a equação (A.2.27) na equação (A.2.26):

$$\rho \left( \frac{\partial \nabla \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\nabla \phi|^2 \right) = -\nabla (p + \rho g y)$$

$$\nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \frac{|\nabla \phi|^2}{2} + \nabla \left( \frac{p}{\rho} + g y \right) = 0 \quad (\text{A.2.29})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{|\nabla \phi|^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g y = C \quad (\text{A.2.30})$$

que é a equação de Bernoulli para um fluxo ideal.

Outras teorias aplicáveis a estudos de ondas não lineares podem ser citadas como Teoria de Stokes, Teoria da Onda Cnoidal, Teoria da Onda Solitária, entre outras. Atualmente uma das teorias não lineares de maior utilização é a teoria de Stokes de quinta ordem, visto que, esta apresenta resultados muito próximos dos experimentais.

A aplicação da teoria linear ao problema da onda é mostrada no capítulo 2, com o desenvolvimento das soluções e condições de contorno para o caso em estudo.

## **ANEXO 3**

### **A.3 - SIMULAÇÃO DE ONDAS EM TANQUE COM O MODELO SWAN**

O modelo numérico SWAN, já mencionado no Capítulo 2, item 2.2, foi utilizado para modelar o tanque oceânico do Laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Este modelo foi escolhido por ser mais apropriado para regiões costeiras, ou seja, nas vizinhanças de praia. Também influenciou na escolha o fato desse programa ser aberto e de livre utilização, conforme licença de uso do programa.

Originalmente, pretendeu-se empregar o SWAN como uma ferramenta para otimizar o projeto de um novo absorvedor para o tanque e auxiliar na escolha dos locais para instalação de ondômetros. Para tal, o módulo que realiza a interação entre ondas precisaria ser habilitado. No entanto, esse módulo e o programa exigem uma quantidade de memória e uma capacidade de processamento muito acima daquelas disponíveis no momento.

Utilizando-se ao máximo o recurso computacional acessível, decidiu-se implantar o programa e simular os casos possíveis, para, posteriormente, efetuar-se uma análise comparativa entre os casos, minimizando-se os efeitos da escolha de parâmetros ou da falta de precisão. Antes, porém, houve a necessidade de determinar-se os limites mínimos de resolução de certas variáveis que satisfizessem os requisitos de precisão e de capacidade de processamento.

### A.3.1 - Implantação do Programa

As variáveis de controle do programa mais sensíveis às limitações de recursos encontradas foram as discretizações, ou resoluções, da:

- malha do fundo no sentido transversal;
- malha do fundo no sentido longitudinal;
- malha das propriedades do fundo;
- espalhamento direcional; e
- frequência.

e, portanto, tornou-se imperativo, primeiramente, caracterizar o grau de influência dessas variáveis nos resultados.

Para iniciar, o programa SWAN é alimentado por dados gerais de configuração geométrica, de batimetria, de especificações dos locais para saída de resultados, de propriedades do fundo, modo, direção e intensidade das solicitações ambientais, entre outras. Modelo da folha de dados é mostrado na tabela A.3.1 adiante, com exemplo de dados realmente empregados nas simulações.

Definiu-se um conjunto básico de propriedades do fundo e parâmetros do tanque e, então, uma série de casos foram processados para possibilitar uma avaliação do efeito das variáveis de controle nos resultados. A tabela A.3.2 apresenta os casos que foram simulados.

A geração de ondas pode ser de dois tipos, espectro gaussiano, definindo-se uma frequência central e um desvio padrão, e monocromática ou senoidal, especificando-se a frequência desejada, para ambos os regimes estacionário e não estacionário.

Tabela A.3.1 – Exemplo simplificado da folha de dados gerais

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'TankTest' '5BC'
    'SWAN em tanque de ondas'
    'GERACAO BIN/ estac'
$
$ PURPOSE OF TEST: Test of the refraction formulation
$
SET 0. 90. 0.001
$
$*****MODEL INPUT*****
$
CGRID 0.0 0.0 0.0 20. 5. 100 30 CIRCLE 100 0.3 0.7 22
$
INPGRID BOTTOM 0.0 0.0 0.0 20 1 1.0 5.0
READINP BOTTOM 1. 'tankst.bot' 5 4 FREE
$
BOU SHAPE BIN
BOUN SIDE W CCW CON PAR 0.2 2. 0. 500.
$
OFF QUAD
BREA
OFF WCAP
$
$***** OUTPUT REQUESTS *****
$
SITE 'WAVEP' 5.5 2.5 TOWN &
    'PINI' 16.0 2.5 TOWN &
    'PMEI' 17.5 2.5 TOWN &
    'PFIM' 19.0 2.5 TOWN
$
POINTS 'WAVEP' FILE 'tankst.loc'
$
QUANTITY XP  HEXP 100
QUANTITY YP  HEXP 100
QUANTITY DIST HEXP 100
$
CURVE 'WAVEP' 0. 2.5 100 20. 2.5
TABLE 'WAVEP' DIST DEP HS TM01 DIR RTP DSPR
TABLE 'WAVEP' HEAD  'tnk05BEC.txt' DIST HS TM01 DIR
$TABLE 'WAVEP' NOHEAD 'tnk05BEC.tab' XP YP DEP HS TM01 DIR RTP DSPR
SPEC  'WAVEP' SPEC1D 'tnk05BEC.esp'
$
$PLOT 'COMPGRID' FILE 'tnk30BEC.plt' ISO DEP
$PLOT 'COMPGRID' FILE 'tnk30BEC.plt' ISO HS VEC TDI
$
TEST 0,0
POOL
COMPUTE
STOP
$

```

Tabela A.3.2 - Simulações realizadas com variações paramétricas dos elementos de controle do programa SWAN.

Regime Estacionário										
Freq.	Gera.	Número de Elementos Transversais.								
		1	2	3	4	5	A	B	C	D
0,5	B	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	G	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0	B						*	*	*	*
	G						*	*	*	*
1,5	B						*	*	*	*
	G						*	*	*	*
2,0	B						*	*	*	*
	G						*	*	*	*
2,5	B						*	*	*	*
	G						*	*	*	*
3,0	B	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	G	*	*	*	*	*	*	*	*	*

### LEGENDA

#### Geração

B = Monocromática; G = Gaussiana

#### Posição

S = Próxima ao gerador; P = Próximo a praia

#### Número de Elementos Transversais

A = 10; B = 20; C = 30; D = Unidimensional

Tabela A.3.3 (cont.) - Simulações realizadas com variações paramétricas dos elementos de controle do programa SWAN.

Regime Não Estacionário											
Freq.	Gera.	Pos.	Número de Elementos Transversais.								
			1	2	3	4	5	A	B	C	D
0,5	B	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		P	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	G	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		P	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0	B	S						*			*
		P						*			*
	G	S						*			*
		P						*			*
1,5	B	S						*			*
		P						*			*
	G	S						*			*
		P						*			*
2,0	B	S						*			*
		P						*			*
	G	S						*			*
		P						*			*
2,5	B	S						*			*
		P						*			*
	G	S						*			*
		P						*			*
3,0	B	S						*			*
		P						*			*
	G	S						*			*
		P						*		*	*

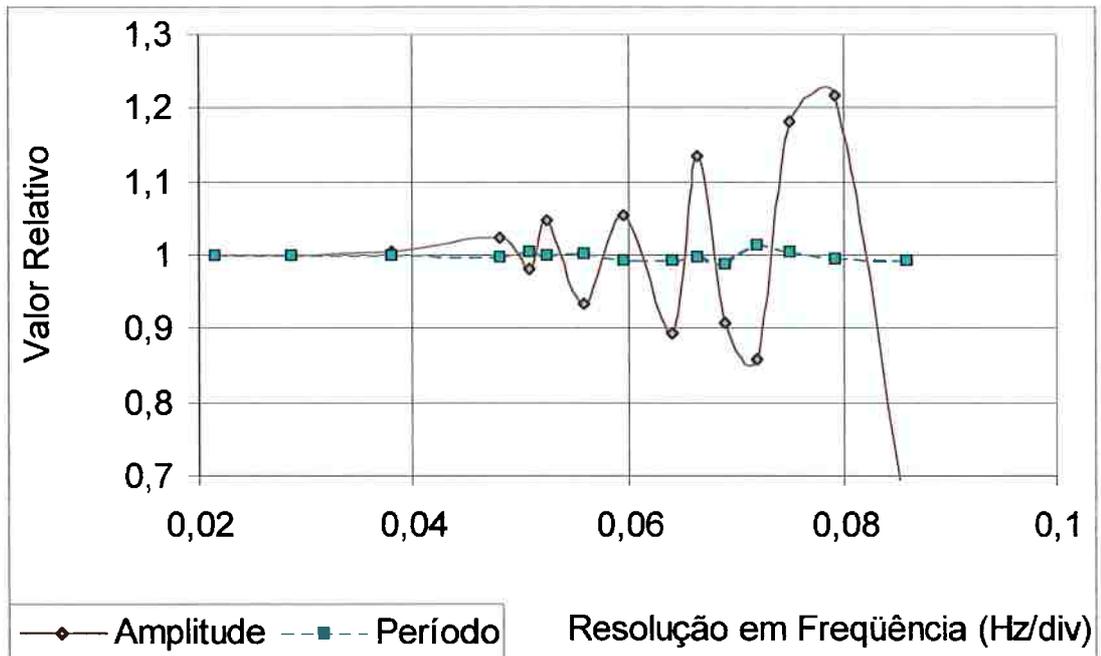
Usou-se um campo espacial de 360 graus, necessário para que haja cômputo da reflexão, com um espalhamento direcional limitado a  $\pm 1$  grau. A discretização do fundo, para quase todos os casos, foi fixada em 100 elementos, conseqüentemente medindo 0,20 m cada um, variando-se a grade transversal, conforme a tabela A.3.3 anterior.

Os principais resultados, desta parte prospectiva da implantação do programa, são apresentados em forma gráfica nas figuras de A.3.1 até A.3.10. Destaca-se, inicialmente, nas figuras A.3.1 e A.3.2 a variação que sofre o resultado em função da resolução em freqüência.

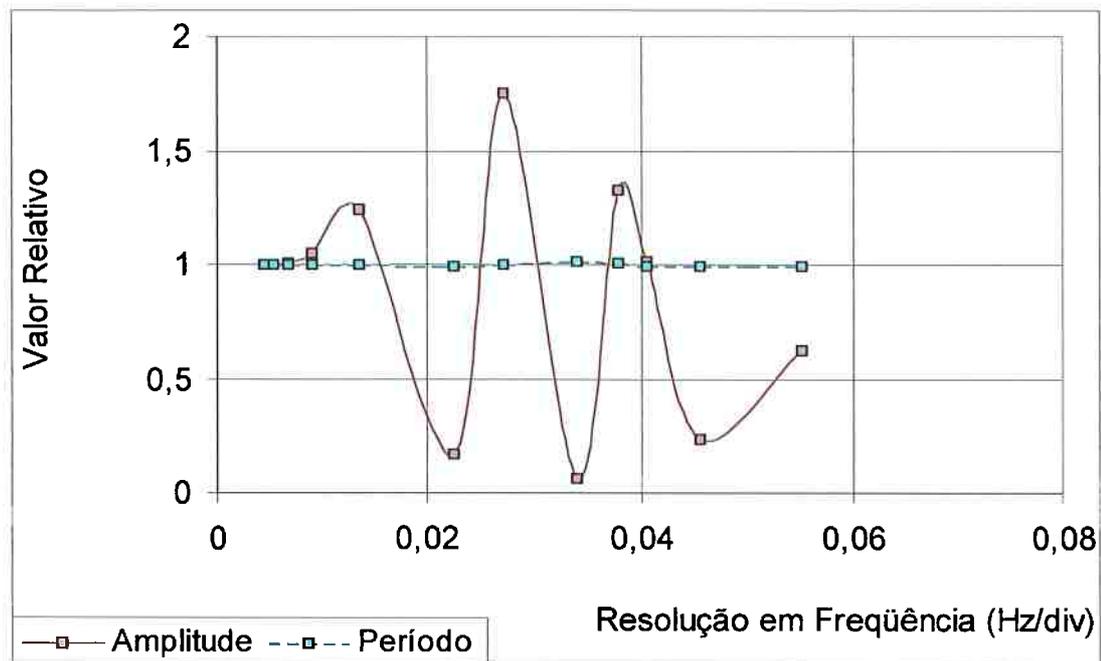
Verifica-se que, para a geração gaussiana a amplitude é muito mais alterada do que o período, para resoluções pobres, sendo que para freqüências maiores o efeito é mais pronunciado. Para a geração monocromática o período é mais influenciado do que a amplitude, se bem que em um grau muito menor, seguindo a mesma tendência anterior em relação à freqüência.

Desses dois gráficos conclui-se que, a resolução em freqüência deve ser menor que 0,01 Hz/div para que seja obtido uma precisão aceitável, qualquer que seja o modo de geração e qualquer que seja a freqüência gerada.

As figuras A.3.3 e A.3.4 ilustram a dependência do resultado em relação a discretização transversal do tanque. Note-se que, os resultados só convergem para um número de elementos maior do que 10, equivalente a 0,5 m no exemplo trabalhado. Isso é mais perceptível para a posição mais próxima da praia, a jusante, entretanto, nesse caso convergem mais rápido do que para a posição mais próxima do gerador, a montante.

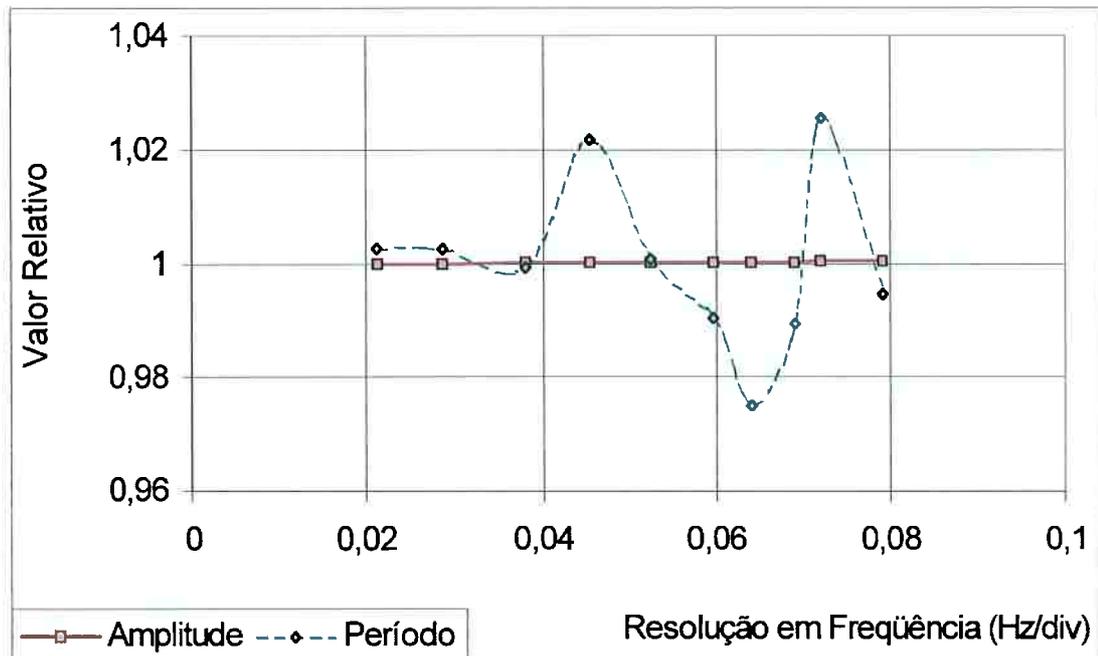


a) Freqüência 0,5 Hz

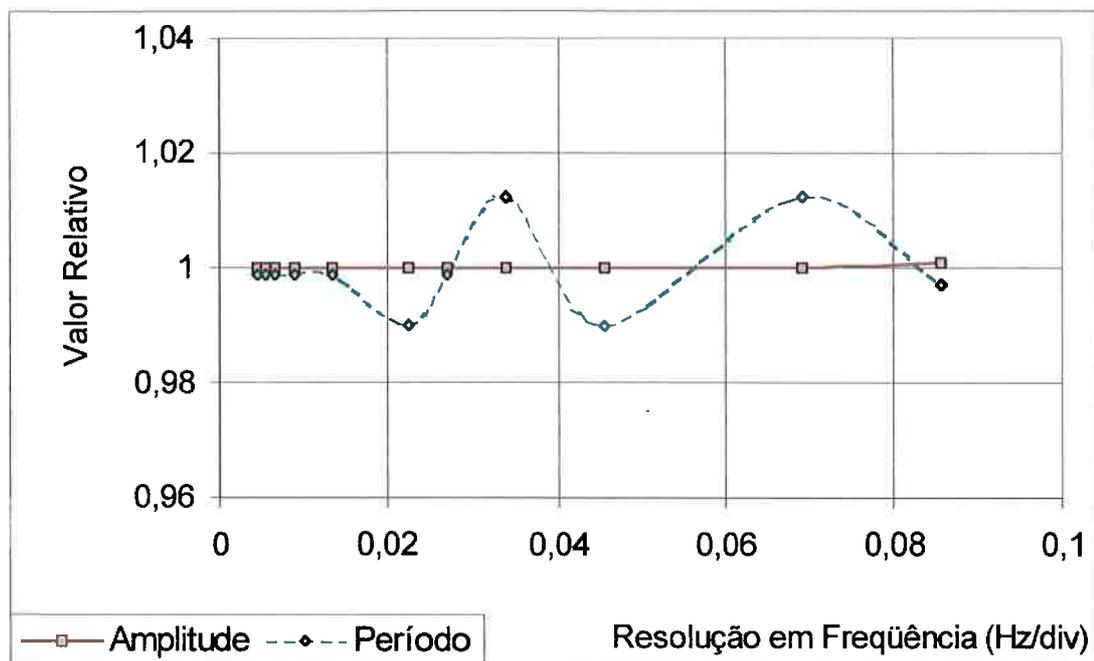


b) Freqüência 3,0 Hz

Figura A.3.1 - Influência da resolução em freqüência na amplitude e no período. Geração Gauss; Modo estacionário; Unidimensional.



a) Frequência 0,5



b) Frequência 3,0 Hz

Figura A.3.2 - Influência da resolução em frequência na amplitude e no período. Geração monocromática, Modo Estacionário; Unidimensional.

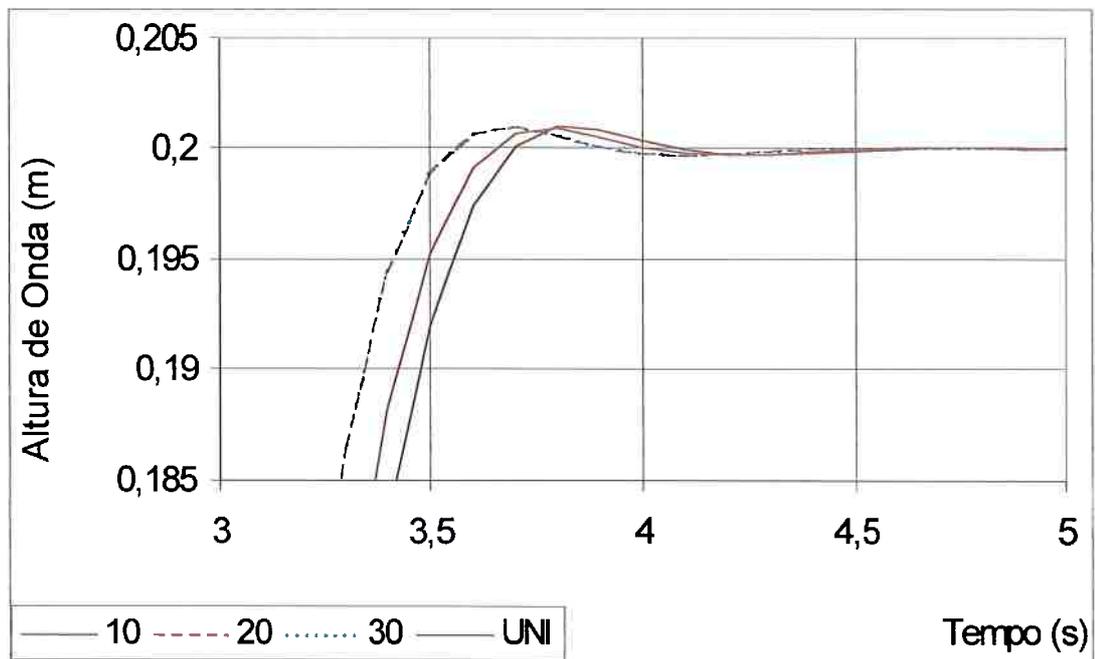
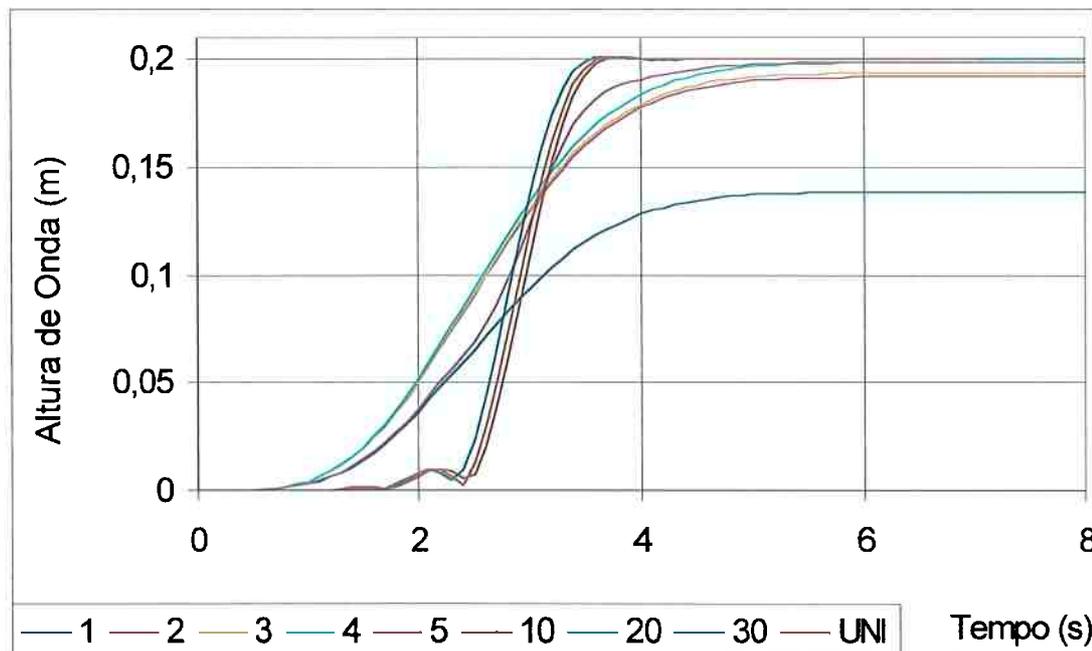


Figura A.3.3 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Modo não estacionário; Geração monocromática; Ondômetro a montante; Frequência 0,5 Hz.

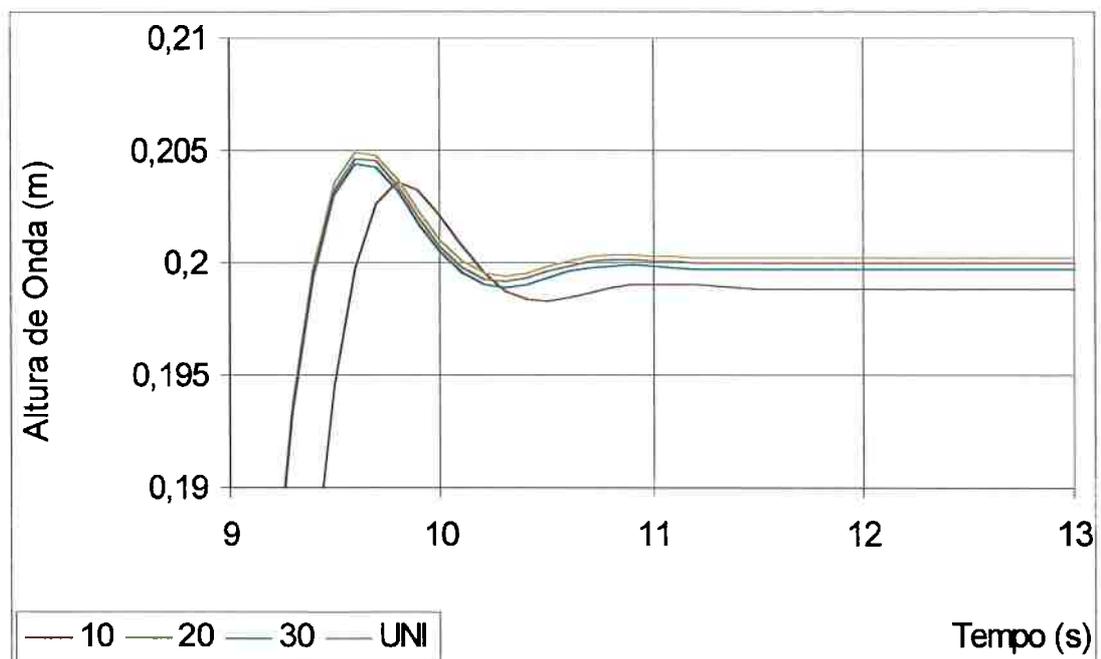
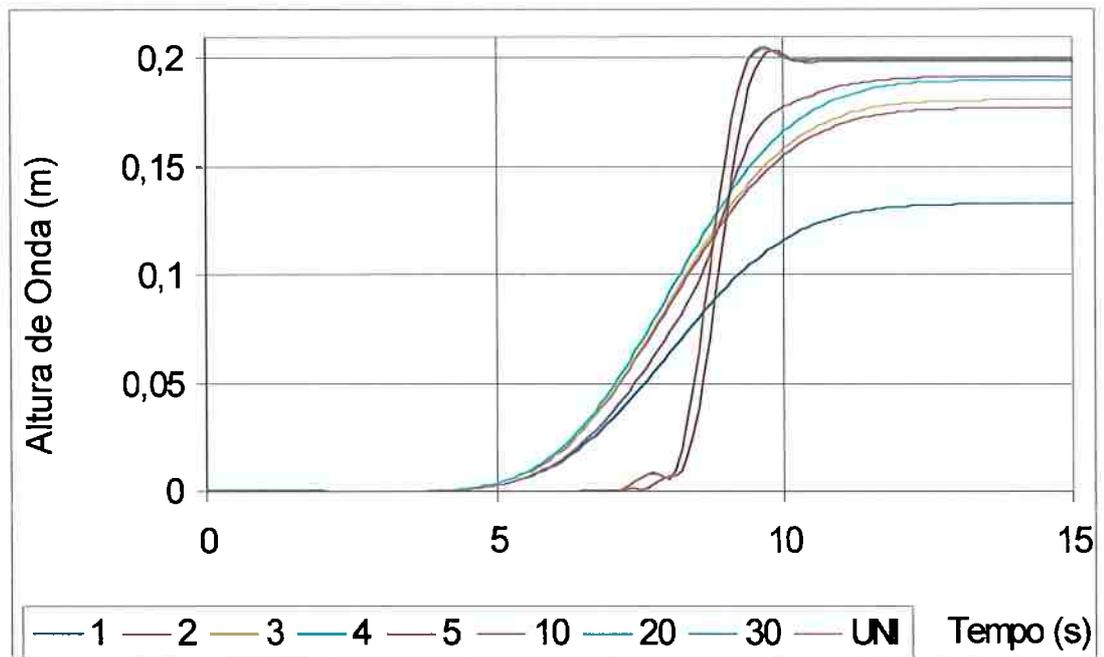


Figura A.3.4 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Modo não estacionário; Geração monocromática; Ondômetro a jusante; Frequência 0,5 Hz.

As influências do número de elementos transversais para as demais frequências são mostradas nas figuras de A.3.5 a A.3.8, nas quais foram empregados a geração gaussiana e modo estacionário.

Analisando-se os gráficos pode-se concluir que o número de elementos transversais deve ser maior do que 10 para frequências baixas. Acima de 1,0 Hz as variações notadas estão dentro de uma diferença menor do que 1 % na altura de onda, para 5 elementos transversais ou mais.

Aumentando-se a frequência, a influência do número de elementos transversais diminui, sendo que para 3,0 Hz e para um número de elementos transversais igual ou maior do que 4, os resultados variam em torno de 2% da altura de onda, valor perfeitamente aceitável.

Comparando-se a geração gaussiana com a geração monocromática percebe-se que a gaussiana apresenta maiores valores de altura de onda calculada. Provavelmente, a causa disso é o desvio padrão da frequência central que gera outras componentes que acabam contribuindo para a amplitude total da onda.

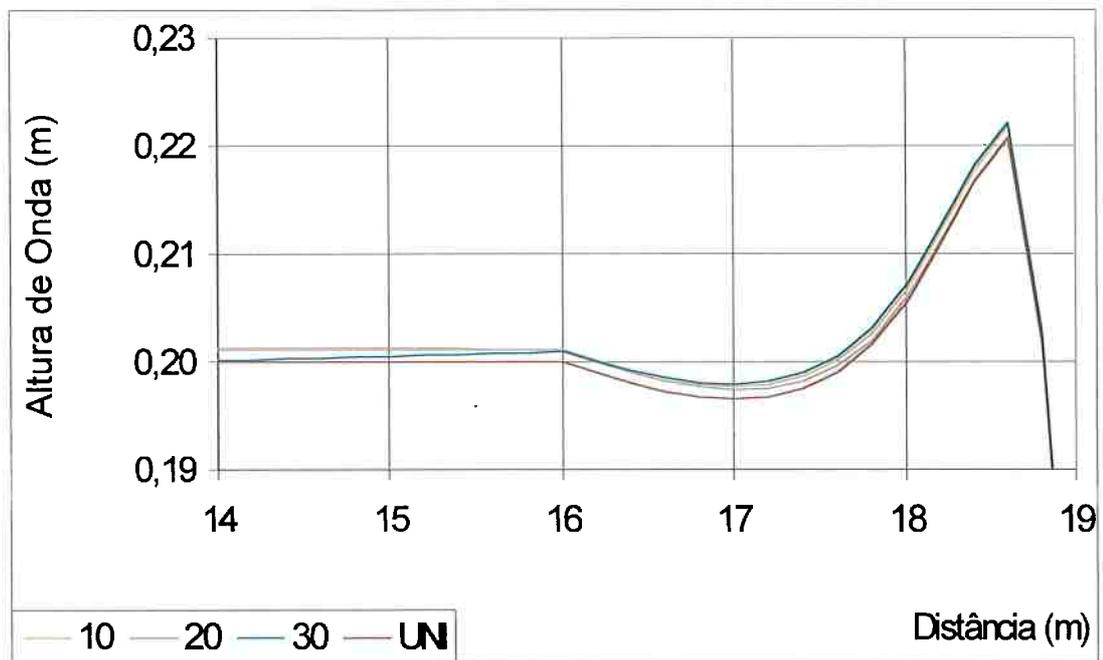
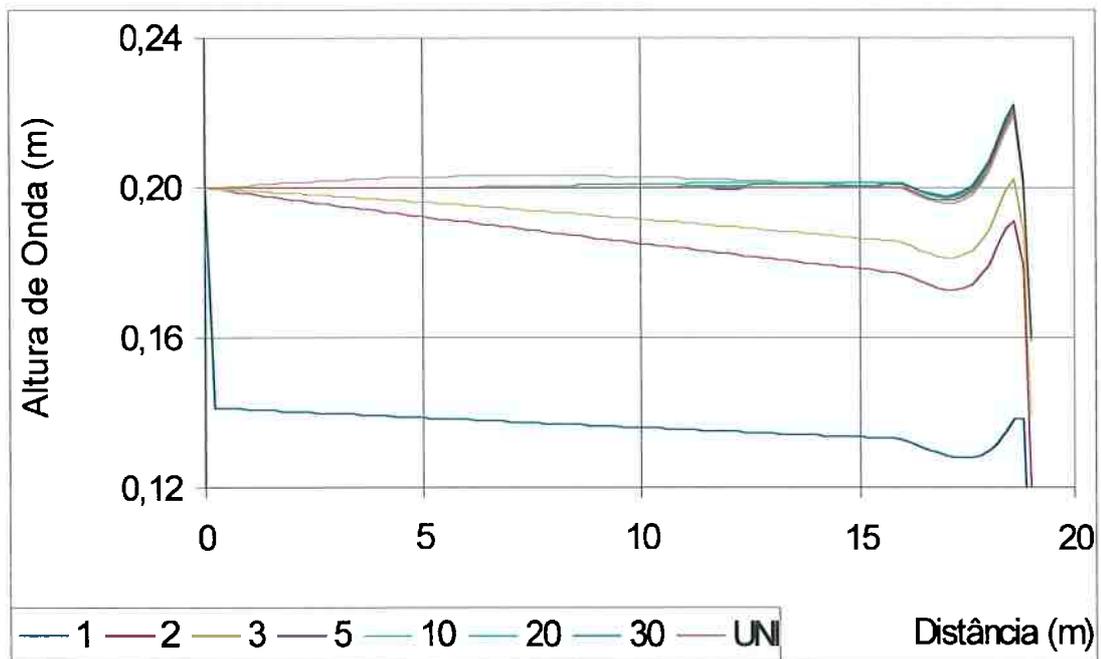


Figura A.3.5 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Geração Gauss; Modo estacionário; Frequência 0,5 Hz.

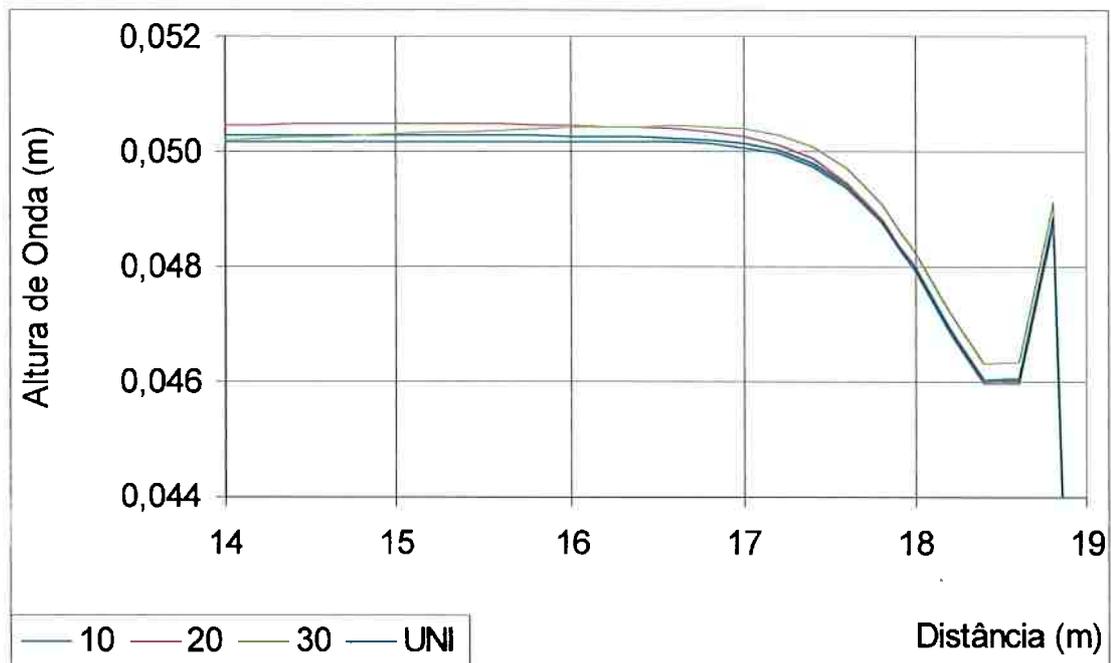
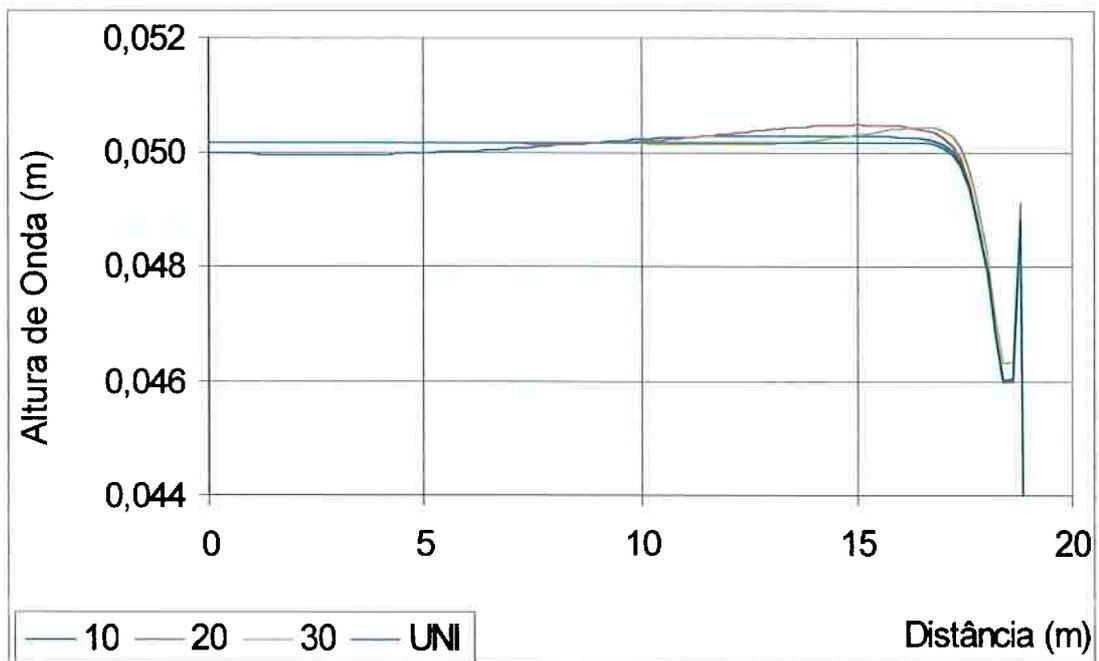


Figura A.3.6 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Geração Gauss; Modo estacionário; Frequência 1,0 Hz.

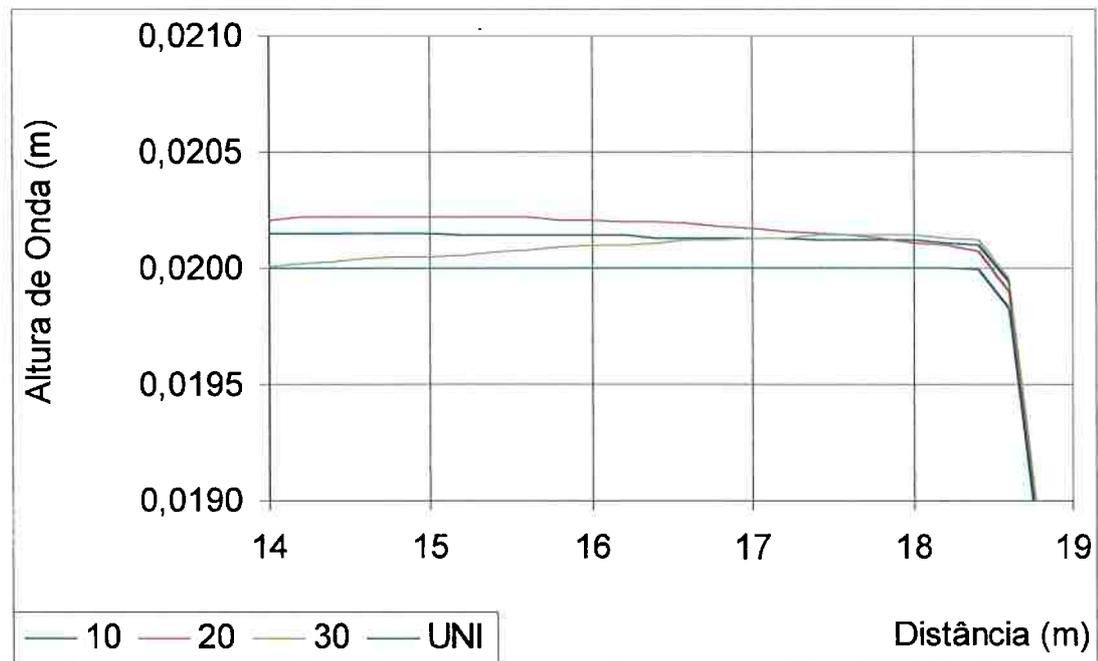
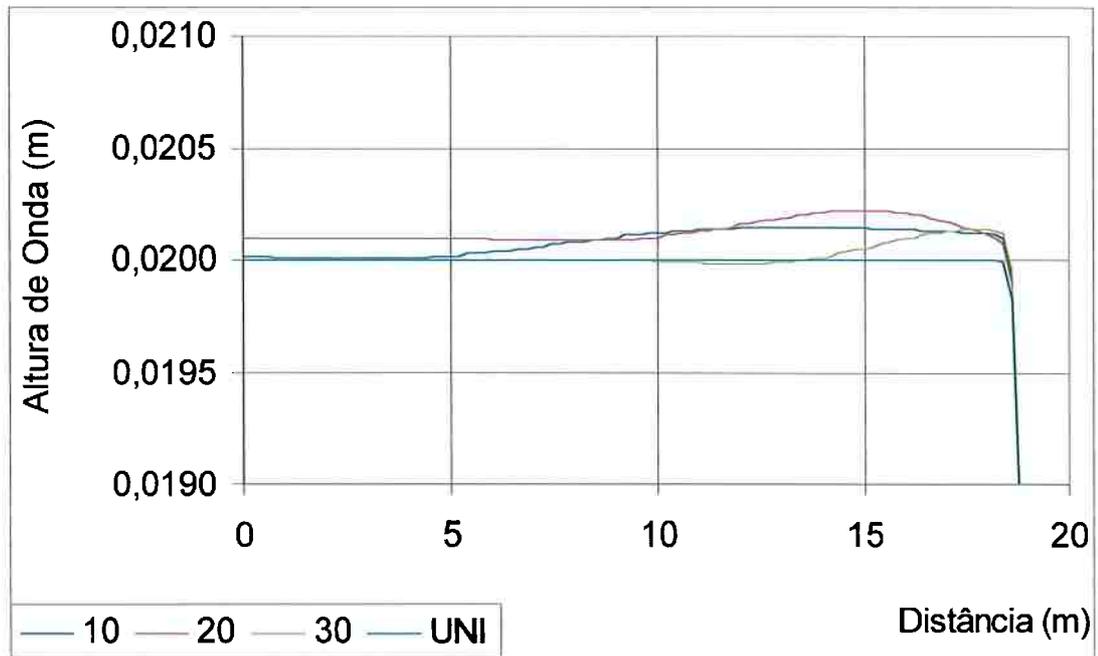


Figura A.3.7 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Geração Gauss; Modo estacionário; Frequência 2,0 Hz.

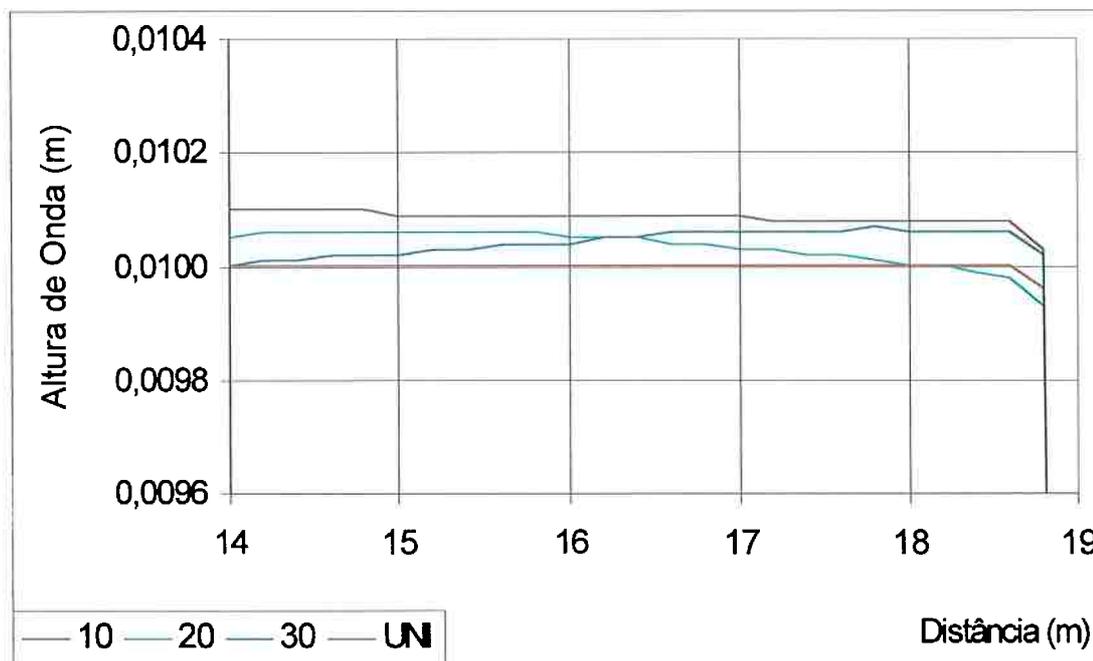
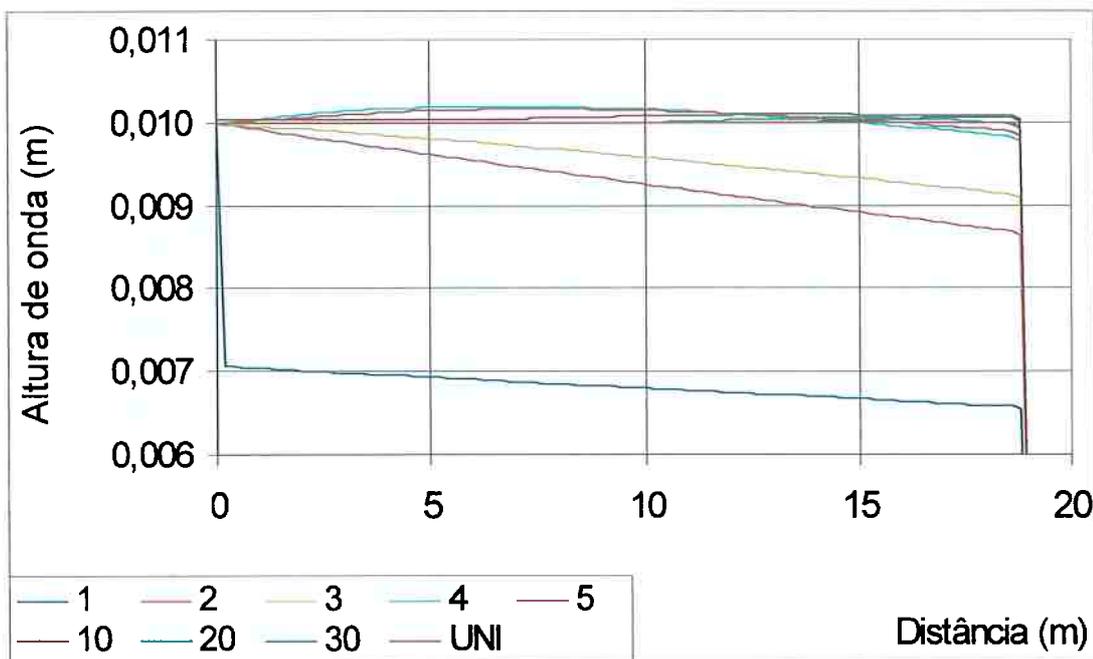


Figura A.3.8 - Influência do número de elementos transversais na altura de onda. Geração Gauss; Modo estacionário; Freqüência 3,0 Hz.

### A.3.2 - Simulações dos Absorvedores de Energia de Ondas

Uma vez quantificadas as influências das discretizações e das resoluções de algumas variáveis, fixou-se um conjunto básico de parâmetros de controle do programa. Esse conjunto fixado, e mantido em todas as simulações posteriores, visou proporcionar o melhor compromisso entre a precisão dos resultados e os recursos computacionais disponíveis, notadamente, memória e tempo de processamento.

Face aos resultados obtidos nas simulações, durante a implantação do programa, estima-se que a precisão obtida seja de  $\pm 1\%$  nos valores de altura de onda e de período.

As simulações com os diferentes modelos de praia foram feitas com o intuito de auxiliar a programação dos ensaios, pela localização dos ondômetros e avaliar previamente a eficiência das diversas propostas de praia. Os perfis das cotas das praias simuladas são apresentados na tabela A.3.3.

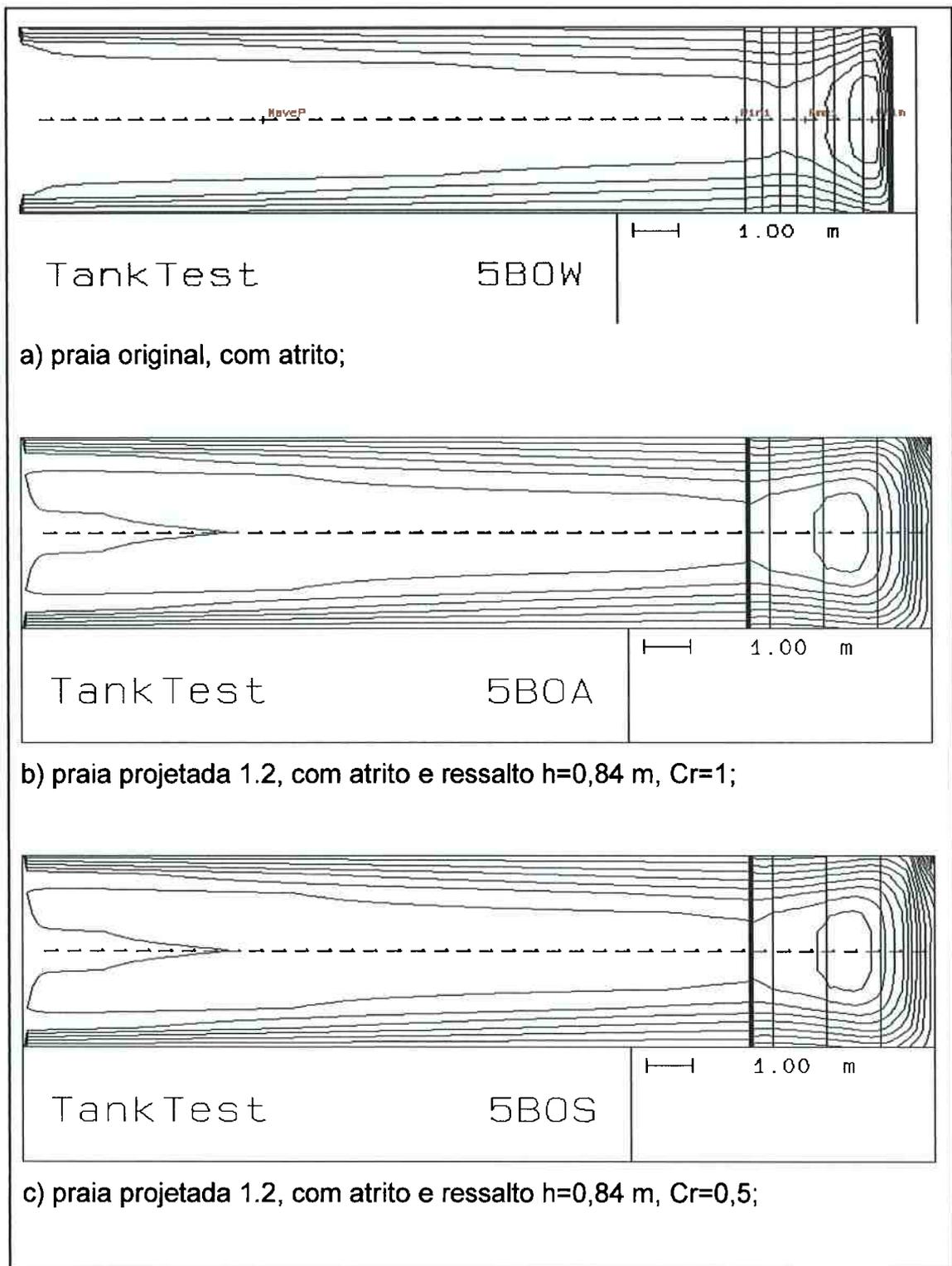
Para tanto, usou-se o recurso de gráficos de iguais alturas de ondas, uma das opções de saídas de resultados do SWAN. Esses resultados são apresentados nas figuras A.3.11 e A.3.12, nas quais também são mostradas a geometria do tanque e as curvas de nível da praia, para a frequência de 0,5 Hz, considerada a mais crítica..

Examinando-se diretamente os gráficos nota-se que, dificilmente esses resultados poderiam ser úteis no auxílio ao posicionamento dos ondômetros ou na decisão de escolha pelo perfil de praia mais conveniente. Isso porque, as curvas de iguais alturas de ondas mostraram-se pouco sensíveis aos parâmetros geométricos utilizados.

Tabela A.3.3 – Perfis idealizados das praias, empregados nas simulações numéricas.

Distância atuador	Configuração Original		Configuração Modificada	
	Praia Média	Praia Real	Praia Proj.1	Praia Proj. 1a
16	1,5	1,5	0,7	0,67
17	1,0	0,975	0,525	0,503
18	0,5	0,45	0,35	0,336
19	0,002	0,15	0,175	0,169
20	-0,5	-0,15	0,001	0,0011

OBS.: A praia Projetada 1.2 é a mesma praia Projetada 1, mas com 200 elementos no fundo, na direção longitudinal.



a) praia original, com atrito;

b) praia projetada 1.2, com atrito e ressalto  $h=0,84$  m,  $Cr=1$ ;

c) praia projetada 1.2, com atrito e ressalto  $h=0,84$  m,  $Cr=0,5$ ;

Figura A.3.9 - Curvas de iguais alturas de onda. Geração monocromática; Modo estacionário; 10 elementos transversais; Frequência 0,5 Hz. (Curvas de nível  $\Delta = 0,01$  m)

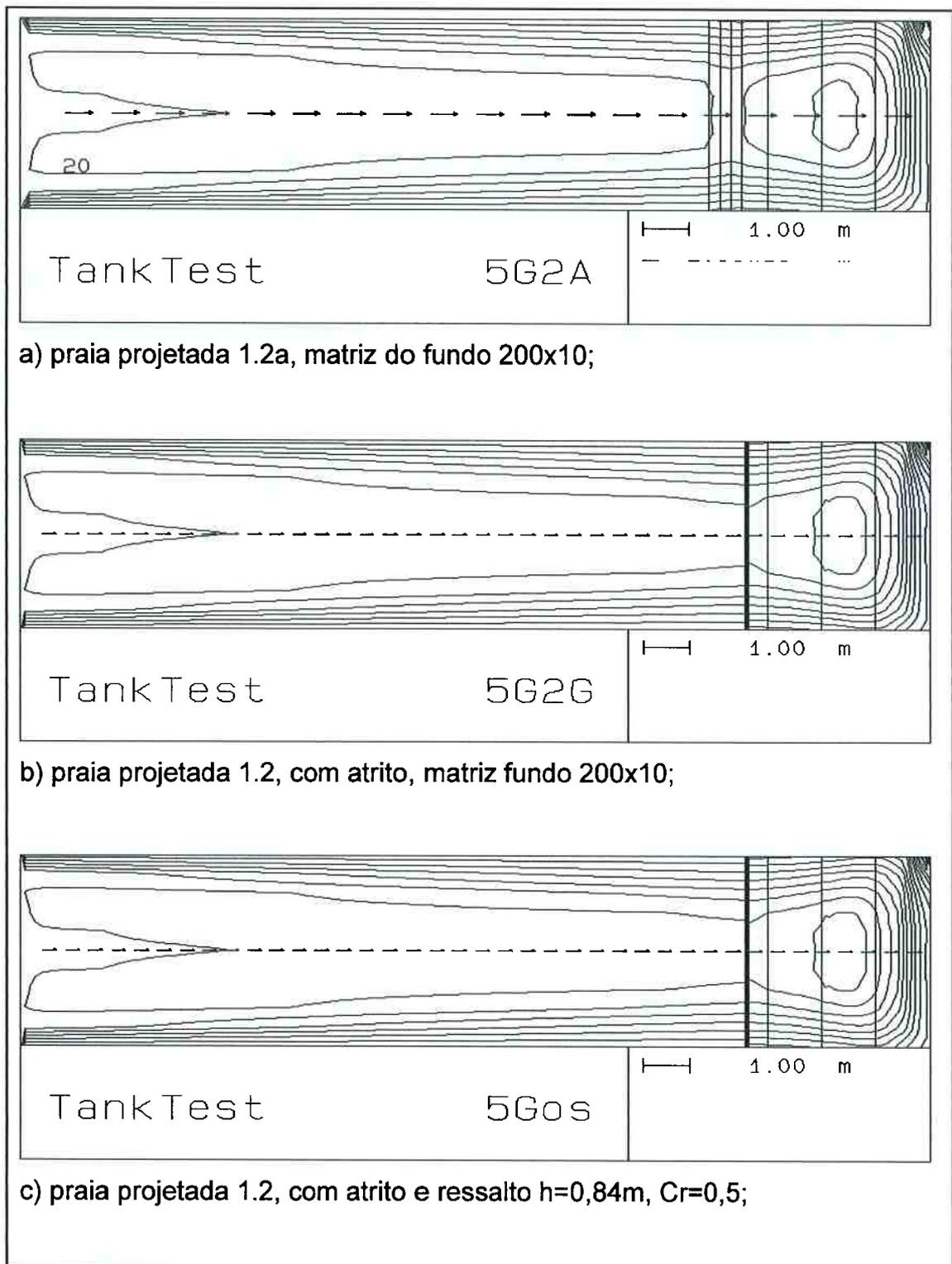


Figura A.3.10 - Curvas de iguais alturas de ondas. Geração gaussiana; Modo estacionário; 10 elementos transversais; Frequência 0,5 Hz. (Curvas de nível  $\Delta = 0,01\text{ m}$ )

As figuras de A.3.11 a A.3.14 mostram as variações das alturas de ondas em função de parâmetros da praia e da própria onda. Na primeira figura fica evidente que a altura de onda na frequência de 3,0 Hz é pouco ou nada influenciada pela geometria das praias projetadas.

Também, percebe-se que a altura de onda na frequência de 0,5 Hz sofre pouco efeito das diferentes praias. No entanto, há uma pequena diminuição na altura máxima da onda e um pequeno deslocamento desse pico, no tempo. Isso pode ser uma indicação de que a praia projetada absorve mais de energia do que a original. Na figura A.3.12 fica evidente que a resposta do modelo com 200 elementos na matriz de fundo é muito melhor.

Efeito semelhante é notado na figura A.3.13, dessa feita, pela variação da constante de quebra ( $H/d$ ) e do atrito com o fundo. Além de indicar uma perda de energia da onda, este gráfico sugere que, dependendo da situação, o início da praia pode interferir na altura da onda, mesmo antes da posição em planta desse início. Esse aspecto deve ser considerado quando do posicionamento de modelos ou sensores.

Na figura A.3.14 são ilustradas as variações das alturas de ondas devido ao posicionamento de um quebra ondas submerso, na tentativa de modelar a elevação do início da praia. Esse quebra ondas é chamado ressalto pois é indicado pela batimetria, em relação ao nível d'água estático.

Destaca-se que, o quebra ondas com altura maior influencia a altura de onda com o coeficiente de reflexão, fato que não é aparente no caso do quebra ondas mais baixo. Para o quebra ondas mais baixo, pode ocorrer maior transmissão, e nesse caso, a altura de onda após o ressalto sofreria pouca ou nenhuma influência do coeficiente de reflexão.

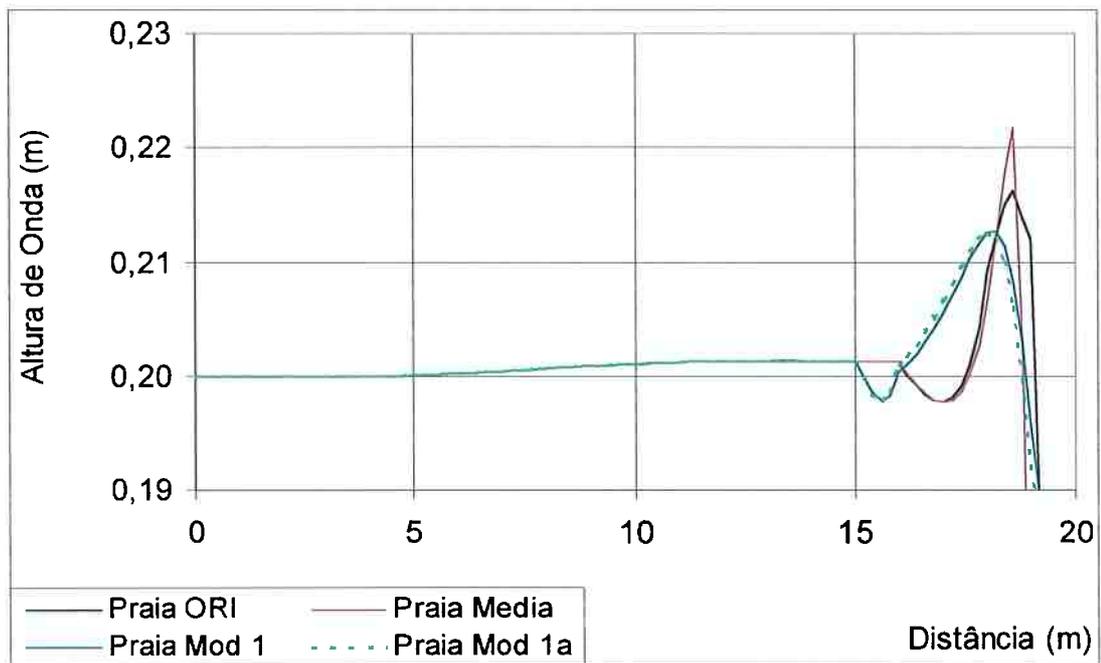
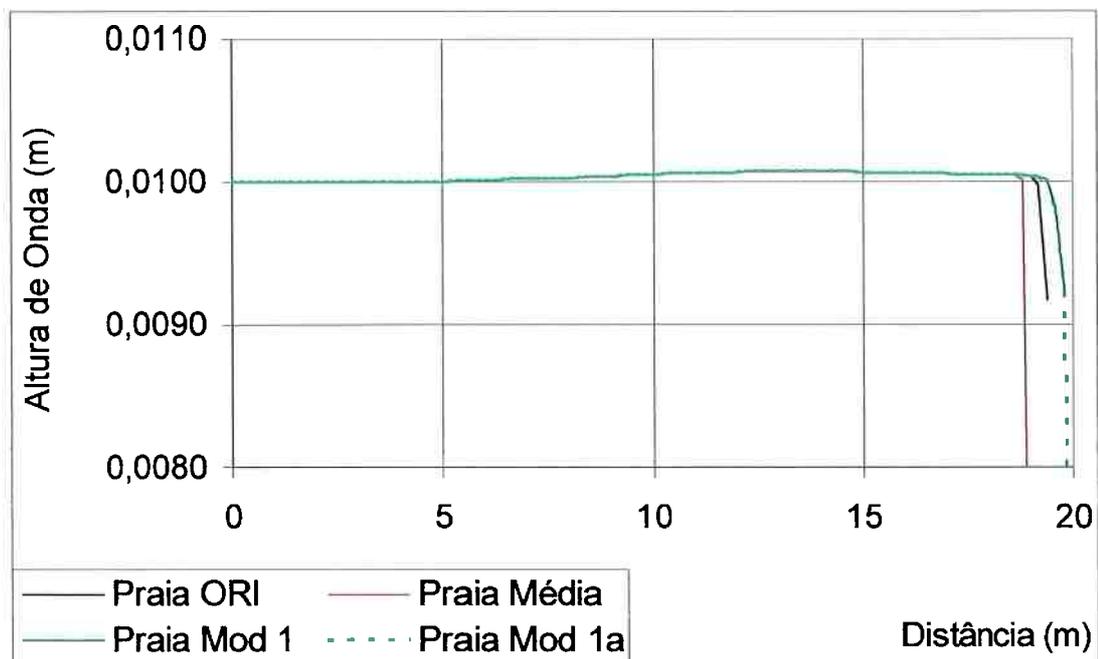
a) Perfis de alturas de onda nas diferentes praias,  $f=0,5$  Hzb) Perfis de alturas de onda nas diferentes praias,  $f=3,0$  Hz

Figura A.3.11 - Alturas de onda para diferentes praias. Geração gaussiana; Modo estacionário; 10 elementos transversais.

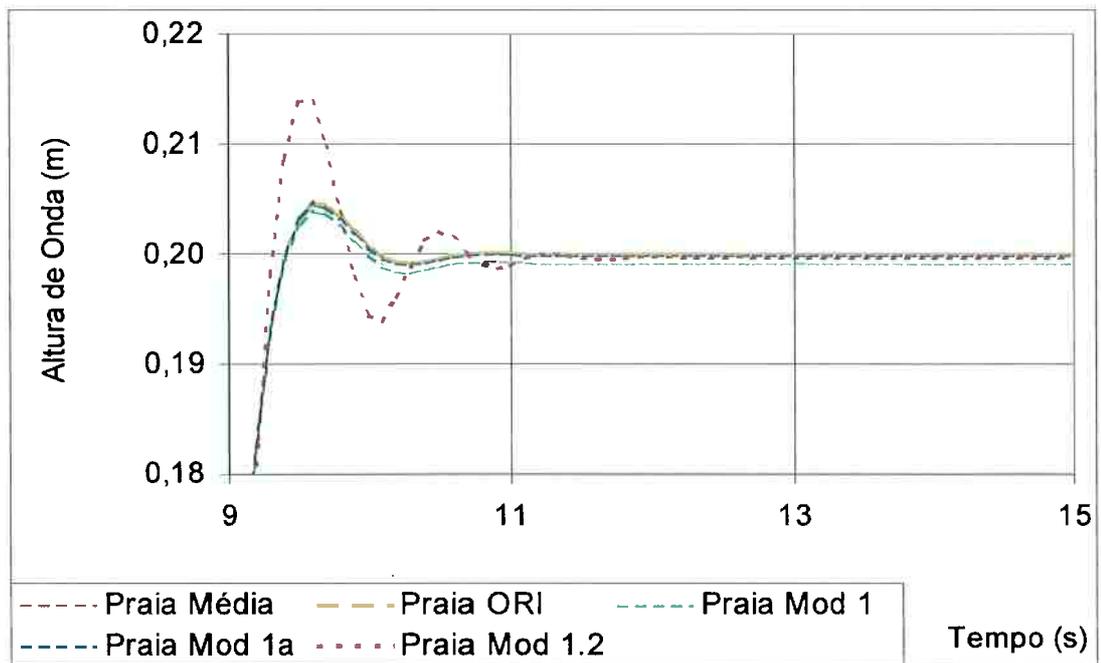


Figura A.3.12 - Alturas de ondas para as diferentes praias. Geração monocromática, modo não estacionário, 10 elementos transversais, frequência 0,5 Hz, posição próxima da praia.

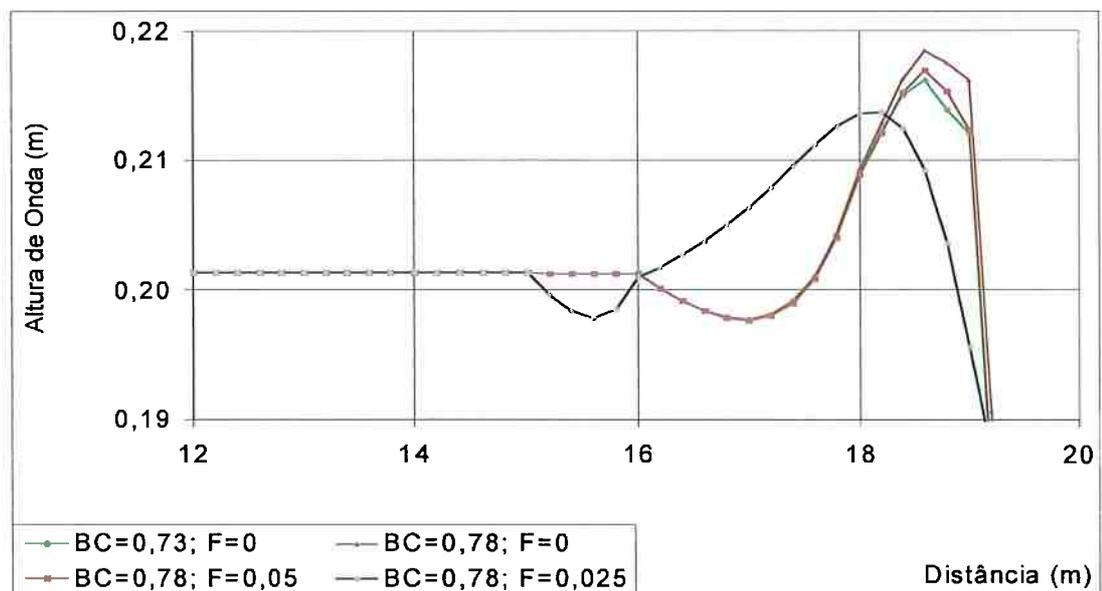


Figura A.3.13 - Influência da constante de quebra (BC) e do atrito (F) nas alturas de ondas. Geração gaussiana, Modo estacionário, 10 elementos transversais, Frequência 0,5 Hz.

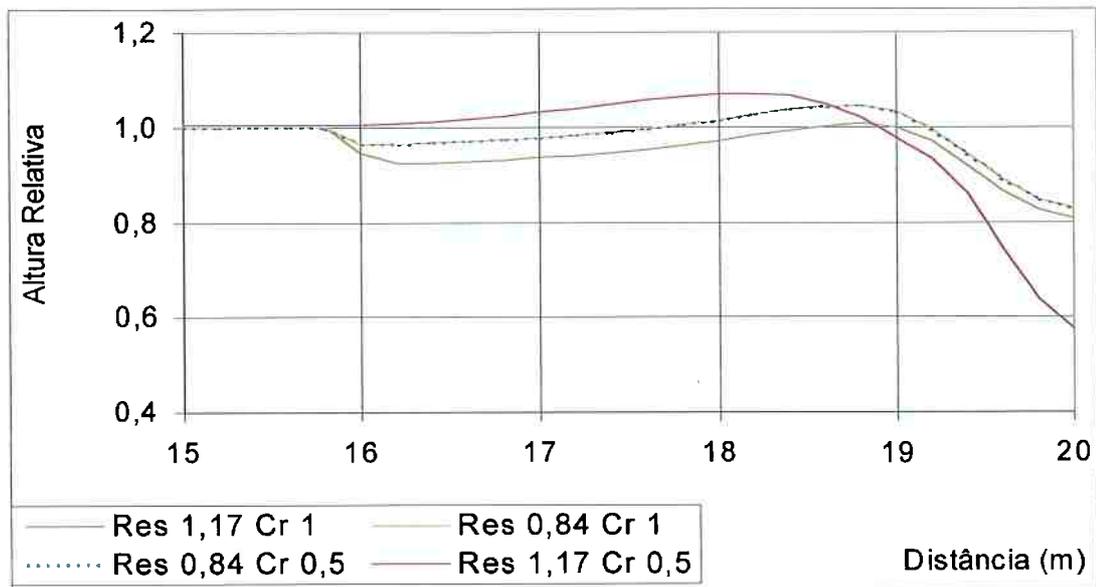


Figura A.3.14 - Variação da altura de onda em função de diferentes quebra ondas e coeficientes de reflexão.

Geração monocromática, modo estacionário, 10 elementos transversais, frequência 0,5 Hz e praia projetada 1.a.

Finalizando, comenta-se que os resultados das simulações foram obtido sob fortes limitações de recursos, limitando variáveis importantes, e também em condições que não espelham propriamente a realidade dos ensaios no tanque. Destaca-se as faltas de resolução no espalhamento direcional, nas matrizes do fundo do tanque e na modelagem do absorvedor.

Portanto, considera-se que os resultados apresentados não são uma indicação de que o programa SWAN é inadequado para modelar um tanque de ensaios com ondas. Apenas, reitera-se, faltaram recursos computacionais para uma utilização plena dessa ferramenta numérica valiosa.

Recomenda-se que, estudos da aplicação do modelo SWAN em tanques de ondas sejam feitos, com os recursos apropriados. Dessa forma, então, será possível uma avaliação completa e criteriosa do potencial de uso desse modelo numérico.

# LISTA DE REFERÊNCIAS

*"Books must follow science,  
and not sciences books."*

*Sir Francis Bacon*

## **BIBLIOGRAFIA**

ABOHADIMA, S.; ISOBE, M. Linear and nonlinear wave diffraction using the nonlinear time dependent mild slope equations. *Coastal Engineering*, v. 37, n.2, p. 175-192, jul. 1999.

ABOHADIMA, S. ; ISOBE, M. Limiting criteria of permanent progressive waves. *Coastal Engineering*, v. 44, n.3, p. 231-237, jan. 2002.

ABULAZM, A. G. Wave diffraction by double flexible breakwaters. *Applied Ocean Research*, v.16, n.2, p.87-99, 1994.

ANTÓN, O. : HIDALGO, R.; RIVERA, R. ; TOMASEL, F.G. Simple swept-sine analyzer for excitation and measurement of dynamic response in ocean structures. *Ocean Engineering*, v.29, n.10, p. 1209-1217, ago. 2002.

BALDOCK, T.E.; SWAN, C. Extreme waves in shallow and intermediate water depths. *Coastal Engineering*, v. 27,n.1-2, p. 21-46, maio, 1996.

BAQUERIZO, A.; LOSADA, M.A. Transfer function between wave height and wave pressure for progressive waves : comments. *Coastal Engineering*, v.24, n.3-4, p. 351-353, mar. 1995.

BAQUERIZO, A.; LOSADA, M.A.; LOSADA, I.J. Edge wave scattering by a coastal structure. *Fluid Dynamics Research*, v. 31, n.3-4, p.275-287, out. 2002.

BASU, A.K. Use of artificial damping for accurate evaluation of response under periodic wave loading. *Applied Ocean Research*, v.18, n.4, p.201-213, ago. 1996.

BATTJES, J. A.; GROENENDIJK, H. W. Wave height distributions on shallow foreshores. *Coastal Engineering*, v.40, n.2, 161-182, maio 2000.

BAYRAM, A. Experimental study of a sloping float breakwater. *Ocean Engineering*, v. 27, n.4, p. 445-453, abr. 2000.

BAYRAM, A. ; LARSON, M. Wave transformation in the nearshore zone : comparison between a Boussinesq model and field data. *Coastal Engineering*, v.39, n.3-4, p. 149-171, mar. 2000.

BEJI, S. Note on conservation equations for nonlinear surface waves. *Ocean Engineering*, v.25, n.7, p. 607-613, 1998.

BELLOTTI, G.; BROCCINI, M. On using Boussinesq-type equations near the shoreline : a note of caution. Technical Note. *Ocean Engineering*, v.29, n.12, p. 1569-1575, set. 2002.

BELZONS, M.; GUAZZELLI, E. ; PARODI, O. Gravity waves on a rough bottom : experimental evidence of one-dimensional localization. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 186, p.539-558, 1988.

BILLINGS, S.A.; STANSBY, P.K.; SWAIN, A.K.; BAKER, M. Accurate prediction of non-linear wave forces: part II (responding cylinder). *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.12, n.3, p. 487-498, 1998.

BIRD, P.A.D.; CRAWFORD, A.R.; HEWSON, P.J. ; BULLOCK, G.N. An instrument for field measurement of wave impact pressures and seawater aeration. *Coastal Engineering*, v.35, n.1-2, p. 103-122, out. 1998.

BOUIJ, N.; RIS, R. C. ; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. Journal of Geophysical Research Oceans, v.104, C.4, p.7649-7666, abr. 1999.

BOSBOOM, J.; KLOPMAN, G.; ROELVINK, J.A. ; BATTJES, J.A. Boussinesq modelling of wave-induced horizontal particle velocities. Coastal Engineering, v.32, n.2-3, p.163-180, nov. 1997.

BOSMA, J.; VUGTS, J. H. Wave kinematics and fluid loading in irregular waves. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRODYNAMICS IN ENGINEERING, Trondheim, 1981. Preprint. [s.L]. : [s.n.], 1981.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mre.gov.br/ndsg/textos/brinfg-p.htm>>. Acesso em: 28 set. 2002.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional. Brasília : [s.n.], 1999. p. 153.

BROSSARD, J.; CHAGDALI, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. Coastal Engineering, v.42, n.4, p. 277-290, abr. 2001.

BROSSARD, J.; HÉMON, A.; RIVOALEN, E. Improved analysis of regular gravity waves and coefficient of reflection using one or two moving probes. Coastal Engineering, v.39, n.2-4, p.193-212, mar. 2000.

ÇALISAL, S.M.; SABUNCU, T. A study of a heaving vertical cylinder in a towing tank. Journal of Ship Research, v.33, n.2, p.107-114, 1989.

CHAKRABARTI, S.K. Offshore structure modelling. Singapore : World Scientific, c1994. 470p. (Advanced series on ocean engineering , v. 9)

CHAKRABARTI, A.; SAHOO, T. Reflection of water waves in the presence of surface tension by a nearly vertical porous wall. *Journal of the Australian Mathematical Society : serie B*, v.39, Part 3, p.308-317, jan. 1998.

CHAKRABARTI, S.K. Pros and cons of transient waves. *Applied Ocean Research*, v.17, n.2, p. 91-92, 1995.

CHAKRABARTI, S.K. Wave interaction with an upright breakwater structure. *Ocean Engineering*, v.26, n.10, p. 1003-1021, out. 1999.

CHAKRABARTI, S.K. ; COTTER, D.C. Tank wall effects on broadside current forces on barge models. *Ocean Engineering*, v.21, n.5, p.489-497, 1994.

CHAKRABARTI, S.K.; KRIEBEL, D. Wave kinematics for simulated shallow water storm waves. Analysis and experiments. *Ocean Engineering*, v.24, n. 9. p. 835-865, 1997.

CHAN, A.T.; SAHOO, T.; CHWANG, A.T. Reflection of water waves by sloping porous structures. In:INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 9., Brest, France, 1999. Proceedings. Golden : ISOPE, 1999.

CHAN, A.Y. ; LEE, S.W.C. Wave characteristics past a flexible fishnet. *Ocean Engineering*, v. 28, n.11, p. 1517-1529, nov. 2001.

CHANG, H. K.; LIN, S. C. An explicit approximation to the wavelength of nonlinear waves. *Ocean Engineering*, v. 26, n.2, p.147-160, ago. 1999.

CHAPLIN, J.R. ; SUBBIAH, K. Velocity measurements in multi-directional waves using a perforated-ball velocity meter. *Applied Ocean Research*, v.16, n.4, p. 223-234, 1994.

CHAPLIN, J.R. Hydrodynamic damping of a cylinder at  $\beta \approx 10^6$ . *Journal of Fluids and Structures*, v.14, n.8, p. 1101 -1117, nov. 2000.

CHEN, L.; ZHANG, J. On interaction between intermediate depth long waves and deep water short waves. *Ocean Engineering*, v.25, n.6, p.395-423. 1998.

CHEN, X. On the side wall effects upon bodies of arbitrary geometry in wave tanks. *Applied Ocean Research*, v.16, n.6, p. 337-345, 1994.

CHL - Coastal Hydraulic Laboratory. Coastal Engineering Design and Analysis System (CEDAS). Acesso em 08/01/2003. Disponível em <http://chl.wes.army.mil/software/cedas/>.

CHU, J.H.; KIM, M. U. Two-dimensional oscillatory Stokes flow in the region with a semi-infinite plate parallel to an infinite plane wall. *Fluid Dynamics Research*, v. 31, n.4, p. 229-251, out. 2002.

CHUNG, Y.K.; LIM, J.S.; CHUNG, J.H. Variations of amplitude, wavelength and phase velocity of plane progressing waves over uniformly sloping beaches. *Ocean Engineering*, v.22, n.6, p. 527-543, ago. 1995.

CIESLIKIEWICZ, W.; GUDMESTAD, O.T. Stochastic characteristics of wave kinematics in laboratory-scale random waves. *Coastal Engineering*, v.26,n.1-2, p. 35-36, 1995.

CONTENTO, G.; CODIGLIA, R.; D'ESTE, F. Nonlinear effects in 2D transient nonbreaking waves in a closed flume. *Applied Ocean Research*, v.23, n.1, p. 3-13, fev. 2001.

CUNHA, C.; SOARES, C.G. On the choice of data transformation for modeling time series of significant wave height. *Ocean Engineering*, v.26, n.9, p. 489-506, jun. 1999.

DAOUD, B.; KOBUS, J. M. Irregular wave generation method with given characteristics in experimental tanks. *Ocean Engineering*, v.22, n.4, p. 387-410, 1995.

DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 2.ed. New Jersey : World Scientific, 1991. (Advanced Series on Ocean Engineering, v.2)

DEO, M.C. ; KUMAR, N.K. Interpolation of wave heights. *Ocean Engineering*, v.27, n.9, p. 907-919, 2000.

DeSILVA, S.J.; GUENTHER, R. B.; HUDSPETH, R. Irregular points in 2-D free surface flows with surface tension for the wavemaker boundary value problem. *Applied Ocean Research*, v.18, n.6, p. 293-302, dez. 1996.

Di Paola, M.; PISANO, A. A. Multivariate stochastic wave generation. *Applied Ocean Research*, v.18, n.6, p. 361-365, dez. 1996.

DOERING, J.C.; BARYLA, A.J. An investigation of the velocity field under regular and irregular waves over a sand beach. *Coastal Engineering*, v.44, n.4, p. 275- 300, fev. 2002.

DUNCAN, P.E.; DRAKE, K.R. A note on the simulation and analysis of irregular non-linear waves. *Applied Ocean Research*, v.17, n.1, p. 1-8, 1995.

ECONOMIA E ENERGIA. Matriz Energética e de Emissões: Módulo Setorial. E&E nº 30: Jan/ Fev 2002.

ENCARTA Online Encyclopedia 2002. [s.l] : Microsoft Corporation, 2002. Disponível em: <<http://encarta.msn.com/encnet/features/reference.aspx>>. Acesso em: 19 nov. 2002.

FEDOROV, A.V.; MELVILLE, W.K.; ROZENBERG, A. An experimental and numerical study of parasitic capillary waves. *Physics of Fluids*, v.10, n.6, p.1315-1323, jan. 1998.

FERREIRA, J.A.; SOARES, C.G. Modelling distributions of significant wave height. *Coastal Engineering*, v.40, n.4, p. 361-374, 2000.

FEYNMAN, R.P. Waves. In: *The Feynman lectures on physics*. Reading : Adison-Wesley, 1963. v.2, Cap. 40.

FILIANOTI, P. Diffraction of random wind-generated waves by detached breakwater gap. *Ocean Engineering*, v.27, n.11, p. 1249-1263, nov. 2000.

FRIGAARD, P.; BRORSEN, M. A time-domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coastal Engineering*, v.24, n.3-4, p. 205-215, mar. 1995.

GIMÉNEZ-CURTO, L.A.; LERA, M.A.C. Application of Fourier methods to water waves in small depths. *Applied Ocean Research*, v.18, n.5, p. 275-281, out. 1996.

GORMAN, R.M.; NEILSON, C.G. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary. *Coastal Engineering*, v.36, n.3, p. 197-217, abr. 1999.

GOUMILEVSKI, A.; CHENG, J. Y.; CHAHINE, G.L. Wave breaking on a sloping beach : comparison between experiments and simulations. [s.l.] : Dynaflo, Inc., [s.d.], . p. 1-6.

GRAW, K.U. Comparison of wave theories with velocity measurement. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WAVES*, Vancouver, 1994. Proceedings. [s.l.] : University of British Columbia, 1994.

GRAW, K. U.; LENGRICT, J. PIV in coastal engineering. In: GERMAN-CHINESE JOINT SYMPOSIUM on COASTAL and OCEAN ENGINEERING., 1. Rostock, 2002. s.n.t.

GRIGOROPOULOS, G.J.; FLORIOS, N.S.; LOUKAKIS, T.A. Transient waves for ship and floating structure testing. Applied Ocean Research, v.16, n.9, p. 71-85, set. 1994.

GUILBAUD, M.; BOIN, J.P.; BA, M. Frequency domain numerical and experimental investigation of forward speed radiation by ships. In: SYMPOSIUM on NAVAL HYDRODYNAMICS., 22, Val de Reuil, France, 2000 . Proceedings. [s.l.] : [s.n.], 2000. p. 11-125.

GÜNTHER, H.; HASSELMANN, S.; JANSSEN, P.A.E.M. The WAM model cycle 4. [s.l.] : Deutsches Klimarechen Zentrum, 1992. Technical Report n. 4

GUO, J. Simple and explicit solution of wave dispersion equation. Coastal Engineering, v.45, n.2, p.71-74, abr. 2002.

HAMM, L.; PERONNARD, C. Wave parameters in the nearshore : a clarification. Coastal Engineering, v.32, n.2-3, p. 119-135, 1997.

HORIKAWA, K. Coastal engineering : an Introduction to Ocean Engineering. Tokyo : University of Tokyo Press, 1978. 405 p.

HU, H.; WANG, K. H.; WILLIAMS, A.N. Wave motion over a breakwater system of a horizontal plate and a vertical porous wall. Ocean Engineering, v. 29, n.4, p. 373-386, out. 2002.

HUANG, W-P.; CHOU, C R. ; YIM, J.Z. Experiments on the reflection coefficients of a detached breakwater in a directional wave field. Coastal Engineering, v.47, n.4, p. 367-379, fev. 2003.

HUDSPETH, R.T.; SULISZ, W. Stokes drift in two-dimensional wave flumes. *Journal of Fluid Mechanics*, v.230, p. 209-229, set.1991.

HULL, P.; MÜLLER, G. An investigation of breaker heights, shapes and pressures. *Ocean Engineering*, v.29, n.1, p. 59-79, set. 2002.

HSU, H. H.; WU, Y. C. Scattering of water wave by a submerged horizontal plate and a submerged permeable breakwater. *Ocean Engineering*, v.26, n.4, p. 325-341, abr. 1999.

IAHR - International Association of Hydraulic Engineering and Research, 2002. Disponível em: <<http://www.iahr.org>> Acesso em: 22 out. 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2000. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www1.ibge.gov.br/censo/default.php>>. Acesso em: 11 nov. 2002.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Previsão do Tempo. São José dos Campos, SP, 2002. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 11 nov. 2002.

International Towing Tank Conference - The Loads and Responses Committee. Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC.

International Towing Tank Conference The Specialist Committee on Environmental Modeling. Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC.

ITTC - The Specialist Committee on Trials and Monitoring. Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC.

JACKSON, J.D. Osborne Reynolds : scientist, engineer and pioneer. Manchester : Manchester School of Engineering, 2002. Disponível em: <<http://www.eng.man.ac.uk/historic/reynolds/oreyna.htm>>. Acesso em: 29 nov.2002.

JANSSEN, P. The wave model. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. p. 1-61, May 1995.

JENG, D.S. Wave kinematics of partial reflection from a vertical wall. Technical Note. Ocean Engineering, v.29, n.13, p. 1711-1724, jun. 2002.

JENSEN, A.; GRUE, J. A note on the difference in the speed of gravity waves in a physical and numerical wave tank . Wave Motion, v.36, n.1, p. 41-48, jun. 2002.

JIANG, L.; REN, X.; WANG, K. H.; JIN, K. R. Generalized Boussinesq model for periodic non-linear shallow-water waves. Ocean Engineering, v.23, n.4, p. 309-323, 1996.

JOHANNESSEN, T.B.; SWAN, C. Non linear transient water waves : pt 2: a numerical method of computation with comparisons to 2-D laboratory data. Applied Ocean Research, v.19, n.5-6, p. 293-308, out. 1997.

JOO, S.W., SCHULTZ, W.W.; MESSITER, A.F. An analysis of the initial value wavemaker problem. Journal of Fluid Mechanics, v.214, n.5, p. 161-183, maio 1990.

KANORIA, M. Water wave scattering by thick rectangular slotted barriers. Applied Ocean Research, v.23, n.5, p. 285-298, out. 2001.

KENNEDY, A.B.; KIRBY, J.T. An unsteady wave driver for narrow-banded waves: modeling nearshore circulation driven by wave groups. [s.l.] : [s.n.] , 2002. p. 1-37.

KENNEDY, A.B.; KIRBY, J.T.; GOBBI, M.F. Simplified higher-order Boussinesq equations I : linear simplifications. Coastal Engineering, v.44, n.3, p. 205- 229, 2002.

KIM, J.W.; ERTEKIN, R.C. A numerical study of nonlinear wave interaction in regular and irregular seas : irrotational Green-Naghdi model. Marine Structures, v.13, n.415, p.331-347, jul. 2000.

KINSMAN, B. Wind waves. New Jersey : Prentice Hall, 1965.

KLAKA, K. Model tests on a circular cylinder with appendages. Perth, Western Australia : Centre for Marine Science and Technology/Curtin University of Technology, 2001. (Report CMST 2001-14)

KORDE, U.A. On providing a reaction for efficient wave energy absorption by floating devices. Applied Ocean Research, v.21, n.5, p. 235-248, out. 1999.

KROGSTAD, H.E.; ARNTSEN, A.Ø. Linear wave theory : regular waves. Trondheim, Norway : Norwegian University of Science and Technology, 2000. pt:A , p. 1-42, 2000.

KROGSTAD, H.E.; WOLF, J.; THOMPSON, S.P.; WYATT, L.R. Methods for intercomparison of wave measurements. Coastal Engineering, v.37, n.3-4, p. 235-257, ago. 1999.

KROGSTAD, H.E.; BARSTOW, S.F.; AASEN, S.E.; RODRIGUEZ, I. Some recent developments in wave buoy measurement technology. Coastal Engineering, v.37, n.3-4, p. 309-329, ago. 1999.

KROGSTAD, H.E.; BARSTOW, S.F. Recent advances in wave measurement technology. In: INTERNATIONAL OFFSHORE and POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 9., Brest, France, 1999. Proceedings. Cupertino, California : International Society of Offshore and Polar Engineers, c1999. v.3, p.19-26, 1999.

KUO, Y. Y.; CHIU, J. F. Transfer function between wave height and wave pressure for progressive waves: reply to the comments of A.Baquerizo and M.A. Losada : short communication. Coastal Engineering, v.24, n.3-4, p. 355-356, mar. 1995.

KWAY, J.H.L.; LOH, Y. S ; CHAN, E. S. Laboratory study of deep-water breaking waves. Ocean Engineering, v.25, n.8, p. 657-676. ago. 1998.

KWON, S.H. ; MOON, W.M.; LEE, H.S. Experimental and numerical studies on the development of a new wave absorber. Ocean Engineering, v.30, n.2, p. 185-203, set. 2001.

LARSON, M.; KRAUS, N.C.; WISE, R. A. Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves. Coastal Engineering, v.38, n.1, p. 59-85, set. 1999.

LE MÉHAUTÉ, B. An introduction to hydrodynamics and water waves. New York : Springer-Verlag, 1976. 310 p.

LEBEY, M.; RIVOALEN, E. Experimental study of the working principal and efficiency of a superposed inclined planes wave absorber. Ocean Engineering, v.29, n.11, p. 1427-1440, maio 2002.

LEE, J. F; LAN, Y. J. A second-order solution of waves passing porous structures. Ocean Engineering, v.23, n.2, p. 143-165, 1996.

LEEUWEN, P.J ; KLOPMAN, G. A new method for the generation of second order random waves. *Ocean Engineering*, v.23, n.2, p.167-192, 1996.

LI, M. Control analysis of the wave generator in ocean engineering. In: IEEE CONFERENCE on MECHATRONICS AND MACHINE VISION in PRACTICE, 8., Hong Kong, 2001. [s.l] : [s.n.] , 2001. p. 173-175.

LI, W. ; WILLIAMS, A.N. Second-order waves in a three-dimensional wave basin with perfectly reflecting sidewalls. *Journal of Fluids and Structures*, v.14, n.4, p. 575 - 592, maio 2000.

LIN, C. ; HWUNG, H. H. Observation and measurement of the bottom boundary layer flow in the prebreaking zone of shoaling waves. *Ocean Engineering*, v.29, n.12, p.1479-1502, maio 2002.

LIU, P.L.F.; LOSADA, I.J. Wave propagation modeling in coastal engineering. *Journal of Hydraulic Research*, v.40, n.3, p.229-240, 2002.

LONGRIDGE, J. K. ; RANDALL, R. E. ; ZHANG, J. Comparison of experimental irregular water wave elevation and kinematic data with new hybrid wave model. *Ocean Engineering*, v.23, n.4, p. 277-307, 1996.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Eulerian and Lagrangian aspects of surface waves. *Journal of Fluid Mechanics*, v.173, p. 683-707, dez. 1986.

LOSADA, I.J.; LOSADA, M.A.; BAQUERIZO, A. An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers. *Applied Ocean Research*, v.15, n.4, p. 207-215, 1993.

LYNETT, P.J.; LIU, P.L. F. A two-dimensional, depth-integrated model for internal wave propagation over variable bathymetry. *Wave Motion*, v.36, n.3, p. 221-240, set. 2002.

MA, R.; LI, G. Spectral analysis of Stokes waves. *Ocean Engineering*, v.29, n.6, p. 593-604, fev. 2002.

MAI, S. ; OHLE, N. ; DAEMRICH, K. F. Numerical simulation of wave propagation compared to physical modeling. In: HYDRALAB-WORKSHOP ON EXPERIMENTAL RESEARCH AND SYNERGY EFFECTS WITH MATHEMATICAL MODELS, Hannover, Germany. Proceedings. [s.l.] : [s.n.] , 1999. p. 1-10.

MANSOUR, A.M.; WILLIAMS, A.N.; WANG, K. H. The diffraction of linear waves by a uniform vertical cylinder with cosine-type radial perturbations. *Ocean Engineering*, v.29, n.3, p. 239-259, 2002.

MARSON, A.E. Laser Induced fluorescence experiments on breaking waves. In: FIRST year progress report . [s.l.] : Department of Physics and Astronomy, 2001.

MARTIN, T.R.; SMITH, J.B. Analysis of the performance of the prefabricated erosion prevention (P.E.P.) : reef system town of palm beach. In: COASTAL Engineering Manual. Florida : [s.n.] , 1997. (CETN-II-36 3/97).

MARTINS, J. A. de A. A Internet como fonte de pesquisa bibliográfica. In: ANDRADE, M.M. Como preparar trabalhos para curso de pós graduação. 5. ed. São Paulo : Atlas, 2002. p. 143-156.

MARTINS, J. A. de A.; SOUZA, C. A. G. F. Características do tanque de ensaios em ondas da USP. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL, 14., Rio de Janeiro, 1992. Anais. Rio de Janeiro : Sobena, 1992. v.2. p.195-210.

MARTINS, J. A. de A.; SOUZA, C. A. G. F. Um tanque de ensaios em ondas para ensino e pesquisa exploratória. In: PANAMERICAN CONGRESS OF NAVAL ENGINEERING, 13., Caracas, 1993. Anais do IPEN'93. [São Paulo] : [s.n.], 1993.

MASSEL, S.R. On the largest wave height in water of constant depth. Ocean Engineering, v.23, n.7, p. 553-573, 1996.

MATHEW, V.; BHATTACHARYYA, S.K.; IDICHANDY, V.G. Perforated-ball velocity meter measurements of the water wave kinematics in nonlinear, long and short crested waves. Applied Ocean Research, v.23, n.4, p. 235-248, ago. 2001.

McIVER, P. The wave field scattered by a vertical cylinder in a narrow wave tank. Applied Ocean Research, v.15, n.1, p. 25-37, 1993.

MELITO, I.; MELBY, J.A. Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC®. Coastal Engineering, v.45, n.1, p. 33-52, maio 2002.

MILES, J. Wave reflection from a gently sloping beach. Journal of Fluid Mechanics, v.214, p. 59-66, maio 1990.

MILES, J. Edge waves on a gently sloping beach. Journal of Fluid Mechanics, v.199, p. 125-131, fev. 1989.

MILES, J. Parametrically excited, standing cross-waves. Journal of Fluid Mechanics, v.186, p. 119-127, jan. 1988.

MOUBAYED, W. I.; WILLIAMS, A.N. Second-order bichromatic waves produced by a generic planar wavemaker in a two-dimensional wave flume. Journal of Fluids and Structures, v. 8, p. 73-92, 1994.

MOUBAYED, W. I.; WILLIAMS, A.N. On the second-order bichromatic wave field produced by a flap-type wavemaker in a two-dimensional flume. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARTIC ENGINEERING, 12., Glasgow, Scotland, 1993. OMAE 1993 : proceedings. New York : the Society, 1993. v.1, p.99-105.

MPI-MET - MAX PLANCK INSTITUT für METEOROLOGIE. Disponível em: <<http://www.mpimet.mpg.de>> Acesso em: 29 nov. 2002.

MPC- Marine Prediction Center. Disponível em: <<http://mpc.ncep.noaa.gov.>> Acesso em: 29 nov. 2002.

NALLAYARASU, S.; FATT, C.H.; SHANKAR, N.J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments. Ocean Engineering, v.22, n.1, p. 77-86, 1995.

NASCIMENTO, E.R. Situação fiscal dos municípios brasileiros após a constituição de 1988. Brasília, 2002. Disponível em: <[http://federativo.bndes.gov.br/bf\\_bancos/estudos/e0001729.pdf](http://federativo.bndes.gov.br/bf_bancos/estudos/e0001729.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2002.

NEELAMANI, S.; BHARATKUMAR, B.H.; MAHADEVAN, R. ; SUNDAR, V. Flume confinement effect on wave-induced dynamic pressures on twin-tandem cylinders. Ocean Engineering, v.20, n.3, p.313-337, 1993.

NEELAMANI, S.; VEDAGIRI, M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers. Ocean Engineering, v.29, n.2, p. 215-238, set. 2002.

NEELAMANI, S.; RAJENDRAN, R. Wave interaction with T-type breakwaters. Ocean Engineering, v.29, n.2, p. 151-175, set. 2002.

NEELAMANI,S.; RAJENDRAN, R. Wave interaction with "T" type breakwaters. Ocean Engineering, v.29, n.5, p. 561-589, 2002.

NEUMANN, J. V. Quotations. In:O'CONNOR, J.J ; ROBERTSON, E.F. The MacTutor history of mathematics archive. Disponível em: <[http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Von\\_Neumann.html](http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Von_Neumann.html)> Acesso em: 11/11/2002.

NEWMAN, J.N. Wave effects on multiple bodies. Hydrodynamics in ship and ocean engineering. [s.l.] :RIAM Kyushu University, Japan, 2001. p. 3-26.

NIEDZWECKI, J.M.; VAN DE LINDT, J.W.; SANDT, E.W. Characterizing random wave surface elevation data. Ocean Engineering, v.26, n.5, p. 401-430, maio 1999.

NISHIMOTO, K. Comunicação Pessoal. Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica, EPUSP, 2003.

NOAA - National Ocean and Atmospheric Administration. Disponível em: <<http://www.noaa.gov>>. Acesso em: 29 nov. 2002.

NOCA, F.; SHIELS, D.; JEON, D. Measuring instantaneous fluid dynamic forces on bodies, using only velocity fields and their derivatives : special brief note. Journal of Fluids and Structures, v.11, n.3, p. 345 - 350, 1997.

NOHARA, B. T Motion control application of digital signal processing. Japan : Mitsubishi Heavy Industries, [s.d.] p. 1158-1162.

O'HARE, T.J.; DAVIES, A.G. A comparison of two models for surface-wave propagation over rapidly varying topography. Applied Ocean Research, v.15, n.1, p. 1-11, 1993.

OZANNE, F. ; CHADWICK, A.J.; HUNTLEY, D.A.; SIMMONDS, D.J.; LAWRENCE, J. Velocity predictions for shoaling and breaking waves with a Boussinesq-type model. Coastal Engineering, v.41, n.4, p. 361-397, nov. 2000.

PARENTE JR., N. Clima do país favorece novas energias. Entrevista a Maura Campanili O Estado de São Paulo, São Paulo, 25 out .2002.

Disponível em: <http://www.estado.com.br/editorias/2002/10/25/ger009.html>.

PAYNE, P.R. The response of a hydrofoil to wave orbital velocity fields. Ocean Engineering, v.4, n.3, p. 235-263, 1997.

PELINOVSKY, E. ; TALIPOVA, T.; KURKIN, A. ; KHARIF,C. Nonlinear mechanism of tsunami wave generation by atmospheric disturbances. Natural Hazards and Earth System Sciences, p. 243-250, 2001.

PERLIN,M. ; SCHULTZ, W.W. Capillary effects on surface waves. Ann Arbor, MI : University of Michigan, 1999. p. 1-24,1999.

PU, Y.; CAO, L.; MENG, H. Fundamental issues and latest development in holographic particle image velocimetry. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, New Orleans, Louisiana, 2002. Proceedings. [s.l.] : ASME, 2002.

RANDALL, R.E. Elements of ocean engineering. New Jersey : Society of Naval and Marine Architects, 1997. 332 p.

RAO, S. ; RAO, N.B.S. ; SATHYANARAYANA, V.S. Technical Note : laboratory investigation on wave transmission through two rows of perforated hollow piles. Ocean Engineering, v. 26, n.7 p. 675-699, jul. 1999.

REPETTO, R. A. Numerical towing tank : analysis of accuracy and practicability. In: EUROPEAN CONGRESS on COMPUTATIONAL METHODS IN APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING,. Barcelona, 2000. ECCOMAS 2000. [s.l.] : [s.n.] , 2000. p. 11-14.

REQUEJO, S. ; VIDAL, C.; LOSADA, I.J. Modelling of wave loads and hydraulic performance of vertical permeable structures. Coastal Engineering, v.46, n.4, p. 249-276, set. 2002.

RIJKEN, O.R.; NIEDZWECKI, J.M. Direct displacement measurements of submerged objects. Ocean Engineering, v.25, n.4-5, p. 309-321, 1998.

ROGERS, D.; KING, G.B. Wave generation using ocean wave data : version 4.0. [s.l.] : Edinburgh Designs, 1999. 1999.

ROJAS, L.P. Diez años de I+D en el canal de la Etsin. In: SESIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA NAVAL, 36., Cartagena, 1999. s.n.t.

ROUSE, H. Highlights in the history of hydraulics. From Books at Iowa, 38 abr. 1983, 2000. Disponível em: <<http://www.lib.uiowa.edu/spec-coll/Bai/hydraul.htm>> Acesso em:11/11/2002

SANTOS, J.R.S. Gás natural na matriz energética. Rio de Janeiro : Petróleo Brasileiro, 2002.

SARPKAYA, T.; ISAACSON, M. Mechanics of wave forces on offshore structures. New York : Van Nostrand Reinhold, 1981.

SCHÄFFER, H. A. Second-order wavemaker theory for irregular waves. Ocean Engineering, v. 23, n. 1, p.47-88, 1996.

SCULLEN, D.C. Accurate computation of steady nonlinear free-surface flows. Adelaide, 1998. 146p. Thesis (Doctor) - University of Adelaide. p. 1-146.

SILVA, R. ; SALLES ; P. PALACIO, A. Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed. Coastal Engineering, v.44, n.3, p. 239- 260, jan. 2002.

SKOTNER, C. ; APELT, C.J. Application of a boussinesq model for the computation of breaking waves -pt:1 : development and verification. Ocean Engineering, v.26, n.10, p. 905-925, out. 1999.

SLADE, S. Towing tank tests. The naval technical board : ship design and construction. Canada, 1998. Disponível em: <<http://www.warships1.com/W-Tech/tech-010.htm>> Acesso em: 11 nov. 2002.

SMITH, J.A.; RIEDER, K.F. Wave induced motion of flip : corrigendum. Ocean Engineering, v.24, n.5, p. 497, 1997.

SMITH, J.A.; RIEDER, K.F. Wave induced motion of flip. Ocean Engineering, v.24, n.2, p. 95-110, 1997.

SMITH, J.M. Modeling nearshore wave transformation with STWAVE. ERDC/CHL CHETN-I-64, 2001. Disponível em: <<http://chl.wes.army.mil/library/publications/chetn/pdf/chetn-i64.pdf> >

SMITH,S.F. ; SWAN, C. Extreme two-dimensional water waves: an assessment of potential design solutions. Ocean Engineering, v.29, n.4, p. 387-416, out. 2002.

SOBEY, R.J. ; HUGHES, S.A. A locally nonlinear interpretation of PUV Measurements . Coastal Engineering, v.36, n.1, p. 17-36, fev. 1999.

SONG, J.-B.; WU, Y. H. Statistical distribution of water-particle velocity below the surface layer for finite water depth. *Coastal Engineering*, v.40, n.1, p. 1-19, abr. 2000.

SOUTER, K. ; KRACHMAN, H.E. Measurement of local pressures resulting from hydrodynamic impact. ENDEVCO s.n.t. (Technical Paper, 269)

SOUZA, C. A. G. F. Implantação e análise de desempenho de um gerador de ondas tipo placa basculante. São Paulo, 2002. 117p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.

SOUZA, C. A. G. F.; MARTINS, J. A. de A. Desenvolvimento de um sistema controlado por micro computador para geração de ondas hidráulicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12., Brasília, 1993. COBEM : anais. Brasília : Abcm, 1993. p.305-307.

SOUZA, C. A. G. F.; MARTINS, J. A. de A.; MORISHITA, H. M.; ANDRADE, B. L. R.; BRINATI, H. L. Desenvolvimento e implantação de um tanque de ondas para ensaios mecânicos (EM CD-ROM). In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 17., Rio de Janeiro, SOBENA Anais 1998.

SÖYLEMEZ, M. A general method for calculating hydrodynamic forces. *Ocean Engineering*, v.23, n.5, p. 423-445, 1996.

SPELL, C.A. ; ZHANG, J. ; RANDALL, R.E. Hybrid wave model for unidirectional irregular waves - pt II: comparison with laboratory measurements. *Applied Ocean Research*, v.18, n.2-3, p. 93-110, 1996.

SROKOSZ, M.A. Breaking effects in standing and reflected waves. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRODYNAMICS IN OCEAN ENGINEERING, Trondheim, Norway, 1981. Proceedings. [Trondheim, Norway] : Norwegian Hydrodynamic Laboratories, 1981.

STANSELL, P.; WOLFRAM, J.; LINFOOT, B. Effect of sampling rate on wave height statistics. Ocean Engineering, v.29, n.9, p. 1023-1047, mar. 2002.

STAZIKER, D.J.; PORTER, D.; STIRLING, D.S.G. The scattering of surface waves by local bed elevations. Applied Ocean Research, v.18, n.5, p. 283-291, out. 1996.

STEELE, K.E.; WANG, D.W.; EARLE, M.D; MICHELENA, E.D.; DAGNALL, R.J. Buoy pitch and roll computed using three angular rate sensors. Coastal Engineering, v.35, n.1-2, p. 123-139, out. 1998.

STERN, F.; LONGO, J.; ABDEL-MAKSOU, M.; SUZUKI, T. Evaluation of surface - ship resistance and propulsion model : scale database for CFD validation. In: SYMPOSIUM ON MARINE APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, 1., McLean, VA,1998, Proceedings. s.n.t.

STEWART, R. H. Introduction to physical oceanography. [s.l.] : Texas A&M University, Department of Oceanography, 2002. 341 p.

SUH, H.D. ; CHOI, J.C. ; KIM, B.H. ; PARK, W.S. ; LEE, K.S. Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. Coastal Engineering, v.44, n.2, p. 141- 151, dez. 2001.

SUH, K.D.; LEE, C.; PARK, Y.H.; LEE, T.H. Experimental verification of horizontal two-dimensional modified mild-slope equation model. Coastal Engineering, v.44, n.1, p. 1-12, set. 2001.

SUH, K.D.; PARK, W.S.; PARK, B.S. Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Engineering*, 43, p.149-159, 2001.

SULISZ, W.; HUDSPETH, R.T. Complete second-order solution for water waves generated in wave flumes. *Journal of Fluids and Structures*, v. 7, p. 253-268, 1993.

SUN, Z. C.; ZHU, Z. H. Wave damping due to porous seabed effect. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE ,9., Brest, 1999. Proceedings. Cupertino : ISOPE, 1999. v.3, p.756-761.

TENG, M.H.; FENG, K.; LIAO, T.I. Experimental study on long wave run-up on plane beaches. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 10., Seattle, 2000. Proceedings. Cupertino. ISOPE, 2000. v.3, p.660-664.

TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCHIII. [s.l.] : NOAA / NWS / NCEP / MMAB, 2002. 133 p. (Technical Note, 222)

TRASSOUDAINE, D.; NACIRI, M. A comparison of a heuristic wave drift damping formula with experimental results : technical note. *Applied Ocean Research*, v.21, n.2, p. 93-97,abr. 1999.

TROCH, P.; De ROUCK, J. An active wave generating-absorbing boundary condition for VOF type numerical model. *Coastal Engineering*, v.38, n.4, p. 223-247, dez. 1999.

TROCH, P.; De ROUCK, J.; Van DAMME, L. Instrumentation and prototype measurements at the Zeebrugge rubble mound breakwater. *Coastal Engineering*, v.35, n.1-2, p. 141-166, out. 1998.

TSAI, C. P.; CHEN, H. B.; HSU, J.R.C. Calculations of wave transformation across the surf zone. *Ocean Engineering*, v.28, n.8, p.941-955, ago. 2001.

TSAI, W.; YUE, D.K.P.; YIP, K. Resonantly excited regular and chaotic motions in a rectangular wave tank. *Journal of Fluid Mechanics*, v.216, p. 343-380, 1990.

TUCKER, M.J. Recommended standard for wave data sampling and near-real-time processing. *Ocean Engineering*, v. 20, n.5, p.459-474, 1993.

TUDELFT - Naval Architecture and Marine Technology Delft University of Technology, Netherlands, 2002. Disponível em:  
<<http://www.froude.tudelft.nl/froude/content/froude/history.htm>.> Acesso em: 29 nov. 2002.

TUDELFT - SWAN, Simulating Waves Near Shore. Delft University of Technology, Netherlands, 2002. Disponível em:  
<<http://swan.ct.tudelft.nl/home.htm>.> Acesso em: 19 nov. 2002

TWU, S. W. ; LIU, C. C. The reflection coefficient of sloping walls. *Ocean Engineering*, v. 26, n.11, p. 1085-1094, nov. 1999.

TWU, S.W.; LIU, C. C. The elimination of re-reflected waves by a porous medium of finite thickness. *Ocean Engineering*, v.21, n.2, p. 179-194, fev. 1994.

TWU, S W.; DUANN, J J. An approach for eliminating re-reflected waves. *Ocean Engineering*, v.22, n.5, p. 421-437, jul. 1995.

TWU, S W.; CHIEU, C. C. A highly wave dissipation offshore breakwater. *Ocean Engineering*, v.27, n.3, p. 315-330, mar. 2000.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. Serviço de Bibliotecas. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses. Serviço de Bibliotecas da EPUSP. 2.ed. São Paulo, 39 p., 2001.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Press Release no.2002-53, Paris, 2002.. Disponível em : <<http://www.unesco.org/bpi/eng/unescopress/2002/02-57e.shtml>> Acesso em: 19 nov. 2002.

UNIÃO EUROPÉIA. Our planet ocean : at the edge of the ocean. RTD Info, n.19, Jun.jul. 1998, Bruxelas, Bélgica. . Disponível em: <<http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/en/world3.htm>>. Acesso em: 11 nov. 2002.

URSELL, F.; DEAN, R.G.; YU, Y.S. Forced small-amplitude water waves : a comparison of theory and experiment. Journal of Fluid Mechanics, v.7, pt 1, p. 33-52, jan. 1960.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual.: M.E 1110-2-1100. Washington : Army Corps of Engineers, 2002.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS Coastal Engineering Manual : direct methods for calculating wavelength. Washington : Army Corps of Engineers, 1985. (CETN-I-17 Revised 6/1985)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual : irregular wave runup on beaches. Washington : Army Corps of Engineers ,1995. (Technical Note, CETN - I-60, 3/1995)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering manual : irregular wave diffraction by goda's method. Washington : Army Corps of Engineers, 1988 (Technical Note, CETN -I-18, Revised 3/1988)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual : pipe profile method for beach surveys. Washington : Army Corps of Engineers , 1983. (CETN-II-9, 1/1983)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual : spectral wave modeling technology. Washington : Army Corps of Engineers , 1994. ( Technical Note, CETN I-58, 9/1994)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual : computer Program BERM. Washington : Army Corps of Engineers , 1991. (Technical Note,CETN -II -25, 3/1991)

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual : computer Program RCPWAVE. Washington : Army Corps of Engineers, 1986. (Technical Note, CETN - I -42, 9/1986.

UNO - University of New Orleans. The towing tank and ship-offshore structure design. New Orleans, 1997. Disponível em:

<<http://www.uno.edu/~enr/towtank/>> Acesso em: 29 nov. 2002

VERITECH - CEDAS, Coastal engineering design and analysis system. Disponível em: <<http://www.veritechinc.com>>. Acesso em: 19 nov. 2002.

WAMIT. Disponível em: <<http://www.wamit.com>>. Acesso em:29 out. 2002.

WAMSLEY, T.; HANSON, H.; KRAUS, N.C. Wave transmission at detached breakwaters for shoreline response modeling. ERDC/CHL CETN-II-45 mar. 2002.

WATTS, P.; GRILLI, S.T. Tsunami generation by submarine mass failure pt I: wavemaker models. In: WORKSHOP ON RESEARCH, NEES TSUNAMI FACILITY, Corvallis, Oregon, 2001. [s.l.] : Oregon State University, 2001.

WAVEWATCH III . Disponível em:

<<http://www.fnmoc.navy.mil/PUBLIC/MW3/index.html>>. Acesso em: 29 nov. 2002.

WEHAUSEN, J. V.; LAITONE, E. V. Surface waves. In : ENCYCLOPEDIA of Physics. [s.l.] : Springer Verlag, 1960. v.9., p. 446-778.

WEI, G. ; KIRBY, J.T.; SINHA, A. Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. Coastal Engineering, v.36, n.4, p. 271-299, maio 1999.

WIEGEL, R. L. Oceanographical engineering. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1965. 535 p.

WIEGEL, R.L. A presentation of cnoidal wave theory for practical application. Journal of Fluid Mechanics, v. 7 n. 2 p. 273-286 1960.

WILLIAMS, A.N. Dual floating breakwaters. Ocean Engineering, v.20, n.3, p. 215-232, maio 1993.

WINTERSTEIN, S.R. ; SWEETMAN, B. Air gap response of floating structures : statistical predictions versus observed behavior. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v.123, n.3, p.118-123, ago. 2001.

WOOD, D.J.; MUTTRAY, M.; OUMERACI, H. The SWAN model used to study wave evolution in a flume. *Ocean Engineering*, v.28, n.7, p. 805-823, jul. 2001.

WORK, P.A.; ROGERS, W.E. Wave transformation for beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, v.32, n.1, p. 1-18, out. 1997.

WORLD ATLAS : the List. Texas.. Disponível em:

<<http://www.worldatlas.com/geoquiz/thelist.htm>>. Acesso em: 22 out. 2002

WU, J.; WAN, Z.; FANG, Y. Wave reflection by a vertical wall with a horizontal submerged porous plate. *Ocean Engineering*, v. 25, n. 9, p. 767-779, 1998.

WU, J. S.; HSIEH, M. An experimental method for determining the frequency-dependent added mass and added mass moment of inertia for a floating body in heave and pitch motions. *Ocean Engineering*, v.28, n.4, p. 417-438, abr. 2001.

XIA, J. ; KROKSTAD, J.R. Wave forces on a body in confined waters. In: AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE, 14., Adelaide, Australia, 2001. Adelaide : Adelaide University, 2001.

YEH, H. Workshop on research with NEES tsunami facility - minutes. Corvallis, Oregon : Oregon State University, 2001.

YONG, D.H.; KEVORKIAN, J. Initial boundary-value problems for a pair of conservation laws. Berkeley : University of Washington / California Institute. p. 1-18, 2001.

YU, Y.X.; LIU, S.X.; LI, Y.S.; WAI, O.W.H. Refraction and diffraction of random waves through breakwater. *Ocean Engineering*, v.27, p. 489-509, 2000.

ZHAN, J.M.; LI, Y.S.; WAI, O.W.H. Numerical modeling of multi-directional irregular waves incorporating 2-D numerical wave absorber and subgrid turbulence. *Ocean Engineering*, v.30, n.1, p. 23-46, jan. 2002.

ZHANG, J.; PRISLIN, I.; YANG, J.; WEN, J. Deterministic wave model for short-crested ocean waves -pt II : comparison with laboratory and field measurements. *Applied Ocean Research*, v.21, n.4, p. 189-206, ago. 1999.

ZHANG, M.Y.; MONBALIU, J.; YU, C.S. A Eulerian- Lagrangian method for the simulation of wave propagation. *Ocean Engineering*, v.26, n.3, p.255-276, mar. 1999.

ZHANG, S.; WILLIAMS, A.N. Time-domain simulation of the generation and propagation of second-order stokes waves in a two-dimensional wave flume - pt I : monochromatic wavemaker motions. *Journal of Fluids and Structures*, v. 10, n. 4, p. 319-335, maio, 1996.

ZHU, S. Separation of regular waves by a transfer function method. *Ocean Engineering*, v.26, n.12, p. 1435-1446, dez. 1999.

# APÊNDICE

*All our science,  
measured against reality,  
is primitive and childlike.*

*And yet, it is the most  
precious thing we have.*

*Albert Einstein*

## APÊNDICE

**TABELA AP.1. - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS TANQUES NA EUROPA. (Dados extraídos de IAHR, 2002)**

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura. Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
Aberdeen Univ Engng. Dept.	UK	onda canal	20	0,45	0,7	Hs=0,22		regular irregular
Aberdeen Univ Engng. Dept.	UK	canal	12,5	0,3	0,5			Inclinação ajustável
Aberdeen Univ Engng. Dept.	UK	canal	11	0,4	0,2			
Aberdeen Univ Engng. Dept.	UK	canal	10	1,2				
ALSTOM CERG	F	canal	14,5	1,2	1,2			água sal. Fundo móvel
ALSTOM CERG	F	canal	18	3	0,8			água sal. Mesa girante
AUC	DK	bacia	12	18	0,7	Hs=0,25 2D		irregular
AUC	DK	bacia	15,5	8,5	3	Hs=0,3		absor. ativo 3-D
AUC	DK	canal	20	1,2	1,5	Hs=0,35 2D		irregular
AUC	DK	canal	25	1,5	0,7	Hs=0,2 2D		irregular

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
AUC	DK	canal	18	0,4	0,5	Hs=0,1 2D		regular
Bassin D'Essais des Carenes	F	tanque reboq	260	10	5	Hs=0,3	L > 0.4 m	regular irreg.
Bassin D'Essais des Carenes	F	tanque reboq	100	24,5	2,5	Hs = 0,3 regular irregular	0,7<T<3	PMM equipo 3-D
Bassin D'Essais des Carenes	F	tanque reboq	160	9,8	4			
Bassin D'Essais des Carenes	F	bacia manob.	65 m ø		5			Carro; rotativo
Bulgarian Ship Hydrodynamic Centre	BG	bacia	17	17	0,5	Hs=0,15 regular		
Bulgarian Ship Hydrodynamics centre	BG	canal	30	0,8	0,8	Hs= 0,02 0,2		irregular
Bulgarian Ship Hydrodynamics centre (BSHC)	BG	tanque reboq	170	40	5	Hs = 0,4 irregular + ARC		vento, carro 4m/s braço rotativo
Bulgarian Ship Hydrodynamics centre	BG	tanque reboq	200	16	1,5			
Bulgarian Ship Hydrodynamics centre (BSHC)	BG	tanque	64	40	2,5	Hs = 0,1 - 0,4 irregular	1<L<12m	
Canal de Experiencias Hidrodinamicas de el Pardo (CEHIPAR)	E	tanque reboq	320	12,5	6,5			
Canal de Experiencias Hidrodinamicas de el Pardo (CEHIPAR)	E	tanque	150	30	5	Hs=0,9 regular irregular	1,7<L<15 m	CPMC - 60 flaps

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
Cantabria Univ. Santander	E	tanque onda	28,4	8,5	1,2	Hs = 0,3	Tmax < 2	absor. e canal Lat. 1m
Cantabria Univ. Santander	E	canal onda	68,9	2	2	Hm=0,5; corrente Hm=0,25	Tmax < 2.5s	curso=1,2 m absor. Lateral
Cantabria Univ. Santander	E	canal onda	24	0,6	0,8	Hm=0,5; corrente Hm=0,25	Tmax < 2.5s	corrente; AWACS ab. Ativo
Cardiff University	UK	bacia	7	4	0,5			
Cardiff University	UK	canal	10	1,2	0,3			
CEDEX-Madrid	E	tanque	26	34	1,6	Hs=0,58 irregular		72 flaps, pit 3x3x1
CEDEX-Madrid	E	onda canal	90	3,6	6	Hs=1,6 irregular		flap seco Ab. Ativo
CEDEX-Madrid	E	onda canal	45	6,5	2	Hs=0,40 - 0,50 irregular		duplo flap absor. ativo
CEDEX-Madrid	E	onda canal	100	1	1,5	Hs=0,40 irregular		duplo flap ab. ativo
CEDEX-Madrid	E	onda canal	36	3	1,5	Hs=0,40 irregular		curso=1m
CEDEX-Madrid	E	onda canal	20	1,2	0,8	Hs=0,25 irregular		curso=0,4 m
CNRM/ GMEI/ SPEA	F	canal	30	3	1,6			$\rho=1200$ kg/m <sup>3</sup>
Coastal Research Centre ( FZK )	D	onda canal	324	5	5	H=2,5 Hs=1,5		regular, irreg
LEGI-UJF coriolis	F	canal	36	0,55	1,3	irregular		
LEGI-UJF coriolis	F	canal	24	0,8	0,8	regular		
CTO/Ship Design and Research Centre	PL	reboq. tanque	100	6	4	Hs = 0,6 irregular	>1 sec	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
CTO/Ship Design and Research Centre	PL	reboq. tanque	142	4,22	2,5	regular irregular	0,3<L<6m	
CUED	UK	canal	15,6	0,6	0,9	Hs=0,2 regular		
CUED	UK	canal	8	0,9	0,5			
Delft University	NL	canal	36	0,8	0,8	Hs = 0,3 irregular		correntes 2 dir+ARC
Delt University	NL	canal	33	0,8	0,8	H = 0,3		regular
Delft University	NL	canal	9,5	0,5	0,5	H = 0,25		regular
Delft University	NL	canal	27	2	0,4			
Delft University	NL	canal	21	0,5	0,4	H = 0,25		regular
Delft University, Ship Hydro Laboratoty	NL	tanque reboq	250	8	4,8			regular irregular
Delft University, Ship Hydro Laboratoty	NL	tanque reboq	220	9	3,8		1<L<10m	regular irregular
DERA	UK	tanque reboq	16,5	8,27	3	H = 0,4		
DERA	UK	bacia	120	60	5,5	Hs = 0,6 regular irregular	1 - 12 m	Braço rotat. 27m 5,7 rpm
DHI	DK	bacia, rasa	62	30	0,45	Hs=0,17 Irreg, uni		
DHI	DK	bacia, rasa	30	30	0,75	Hs=0,25 Irreg, uni		
DHI	DK	bacia, água rasa	35	25	0,8	3-D Hs=0,3 Irregular		absorv. Ativo 3-D
DHI	DK	bacia,	30	20	3	Hs=0,25 Irregular		Pit 12 m 3-D
DHI	DK	canal	35	11	0,8	Hs=0,30 Irreg, uni		var. ondas correntes

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
DHI	DK	canal	35	5,5	0,8	Hs=0,30 Irreg,		corrente; unidir.
DHI	DK	canal	28	0,74	1,2	Hs=0,33 Irreg, unidir,		absor. Ativo AWACS2
DMI	DK	tanque reboq.	246,5	11,95	5,8	regular irregular	1<L<20m	
DMI	DK	tanque reboq.	25	8	0,8			
Ecole Centrale de Nantes	F	tanque	50	30	5	Hm =1 irregular	0,5<T<5	48 flaps, pit 5x5x5
Ecole Centrale de Nantes	F	bacia	19,56	9,4	2	Hs = 0,4 regular irregular	0,5<T<3,3	
Ecole Centrale de Nantes	F	canal	40	0,5	1	Hs = 0,4 regular	T >0.7 s	irregular
Ecole Centrale de Nantes	F	canal	10	2	1,25			
FH Hamburg	D	canal	20	0,6	0,7			curso=1,2 m; absor. Lateral
Ecole Centrale de Nantes	F	tanque reboq.	220	13	4	Hs = 0,5 reg/irreg		
ENSTA	F	canal	10	0,25	0,3	irregular		
FH Hamburg	D	canal	50	2,5	0,4			onda
FH Karlsruhe	D	canal	20	0,6	0,6			Ab. Ativo AWACS
FH Karlsruhe	D	canal	18	4,2	0,5	Curso 0,8 m		rot=0,4m
FH Karlsruhe	D	canal	10	0,3	0,28			
FH Kiel	D	bacia	3,5	2	0,08	Hs=0,02		regular

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
FH Kiel	D	onda canal	12,5	0,3	0,4	H=0,23 Hs=0,15.		regular Irreg
FH Magdeburg	D	canal	17,5	0,6	0,7			
FH Magdeburg	D	canal	1	0,3	0,4			
Flanders Hydraulics	B	bacia	17,5	12,2	0,45	irregular		maré, fluxo lateral
Flanders Hydraulics	B	canal	56,2	2,4	1,15	irregular		absor. Ativo
Flanders Hydraulics	B	canal	31,7	0,7	0,86	irregular		
Flanders Hydraulics	B	reboq. tanque	60	6	1,8	Regular irregular		
Gent University	B	canal bacia	18	3,2	0,9			
Gent University	B	canal bacia	15	2,6	0,7			estruturas hidrául.
Gent University	B	canal	16	0,8	0,6			fluxo perm.
Gent University	B	canal	12	0,4				fluxo não estacion.
Gent University	B	tanque reboq	44	1	1,5			
GKN Westland	UK	tanque reboq	55	7	3	Regular irregular	0,35<L< 14m	
GKN Westland	UK	tanque reboq	77	4,6	2,7	H = 0,24		
GKN Westland	UK	tanque reboq	89,6	3,8	2,2	regular		
GKN Westland	UK	tanque reboq	76	3,7	1,68	regular irregular	0,6<L<10 m	Vento
HR Wallingford	UK	canal	52	1,2	1,7	Hs = 0,4		reg/irreg
HR Wallingford	UK	bacia	54	27	0,8	Hs=0,2		3-D

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
HR Wallingford	UK	canal	40	1,5	0,8	Hs = 0,2		reg/irreg
HR Wallingford	UK	canal	27,5	2,4	1,3			
HR Wallingford	UK	canal	98,5	1,5	0,8			
HR Wallingford	UK	canal	20	3	0,7			
HR Wallingford	UK	canal	27,4	0,61	0,3			
HR Wallingford	UK	tanque	24	24	2	Hm=0,5 reg/irreg	T < 2.0 s; L < 6m	
HSVA	D	canal	80	3,8	0,8			
HSVA	D	tanque reboq	280	12	6	Hs = 0,6 reg/irreg	0,4<L<25 m	fundo falso
HSVA	D	tanque reboq	80	5	3	H = 0,3 regular	L = 6 m	
HUT	FIN	tanque reboq	130	11	5,5	H = 0,4; regular	1,5<L<12 m	
IFREMER	F	bacia	50	12,5	10m, 20 m	Hs=0,65 regular		
IFREMER	F	canal	50	4	2,5	H = 0,35 regular		
IMA	IS	bacia	40	20	0,75	Hs=0,25		
IMFT	F	canal	114	4	4			
INHA-Europroject	E	onda tanque	22,5	27,6	1,2	Hs=0,40 irregular	Tp > 0.4	3 flaps, 6m,10m
INHA-Europroject	E	onda canal	52	1,8	2	Hs=0,70 irregular	Tp > 0.5s	Pistão curso=1m
Instituto di Architettura Navale (INSEAN) Rome	I	tanque reboq	60	40	2,1	Hs =0,3 regular irregular	0,5<T<3	ondas 0° - 90°
Instituto di Architettura Navale (INSEAN) Rome	I	tanque reboq	470	13,5	6,5			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
IRPHE	F	canal	40	2,6	1	regular irregular		ondas e vento
IST (Tech. Un. of Lisbon)	P	onda bacia	11,5	6,6	0,4	Hs=0,20 reg/irreg		
IST (Tech. Un. of Lisbon)	P	onda canal	21,5	0,7	0,5	Hs=0,25, reg/irreg		
IST (Tech. Un. of Lisbon)	P	canal	5	0,3	0,2			inclinação
ISVA	DK	onda	23	12	0,6			corrente
ISVA	DK	onda	28	4	1			corrente
ISVA	DK		35	3	1			corrente
ISVA	DK	onda	28	0,6	0,8			corrente
ISVA	DK	onda	25	0,6	0,8			
ISVA	DK	onda	23	2	0,5			corrente
ISVA	DK	onda	10	0,4	0,4			
ISVA	DK	onda	10	0,3	0,3			corrente
Jaroslav ěerni	YU	bacia	50	20				
Jaroslav ěerni	YU	tanque	8,4	8	4			
Jaroslav ěerni	YU	canal	110	2	1,7			
Jaroslav ěerni	YU	canal	22,5	0,75	0,95			
Jaroslav ěerni	YU	canal	35	1	1			curso=0,4 m
LNEC	P	onda bacia	44	23	0,75	Hs=0,35 regular irregular		sem carro
LNEC	P	onda bacia	38,1	15,7	0,5	Hs=0,35 reg/irreg		sem carro
LNEC	P	onda bacia	30	19,6	0,5	Hs=0,35 reg/irreg		sem carro
LNEC	P	onda canal	73	3	3	Hs=1m reg/irreg		carro para modelo

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
LTNEC	P	onda canal	49,4	1,6	1	Hs=0,35, reg/irreg		sem carro
LTNEC	P	tilting canal	40,7	2	1			max. 6 mm
LTNHE	F	bacia	50	30	0,8	Hs = 0,4 irregular		56 flaps
LTNHE	F		33	28	0,45	Hs = 0,2 irregular		
LTNHE	F	bacia	20	10	1,1			
LTNHE	F	bacia	20	6	0,5			
LTNHE	F	canal	72	1,5	1,2	Hs = 0,7 irregular		
LTNHE	F	canal	33	0,6	0,6	Hs=0,35 irregular		
LTNHE	F	canal	25	6,5	1,2			
LTNHE	F	canal	25	2	1			
LTNHE	F	canal	18	2	0,5			
LTNHE	F	canal	50	0,4	0,5			
LTNHE	F	tilting canal	20	0,78	0,7			
MARIN	NL	reboq. tanque	175	10,5	5,6	Hs = 0,5 regular	T=0,25-3	irregular
MARIN	NL	reboq. tanque	196,7	4,6	1,37	regular irregular	0,5<L<15 m	Vento
MARIN	NL	tanque reboq	45	36	10,5	Hs = 0,3 irregular + ARC	max 0,45m at 2 s	vento; pit 30x5 m Corrente fundo móvel
MARIN	NL	tanque reboq	155	8	2	Hs =0,3		regular irregular

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
MARIN	NL	tanque reboq	120	8	1	Hs = 0,1	L = 8 m	regular irregular
MARIN	NL	tanque reboq	85	10,5	10	Hs = 0,9 regular/irregular	T=0,8-5	flap duplo
MARIN	NL	tanque reboq	240	18	8			pressão 2,5- 100kPa
MARIN	NL	tanque reboq	252	10,5	5,5			
University of Athens Lab Ship Marine Hydrodynamics	EL	bacia	29	24		regular irregular		
University of Athens Lab Ship and Marine Hydrodynamics	EL	tanque reboq	100	4,56	3	regular		
Océanide	F	bacia	25	16	10	Hs = 0,8		irregular
Océanide	F	bacia	27	12	0,18	Hs=0,5 irregular		mesa rotat.
Océanide	F	canal	24	1	1,8	Hs = 0,5 irregular		fundo móvel
Politec. Univ. Coruña	E	tanque onda	32	34	1,1	Hs=0,40 irregular		8 flaps, Ab. Ativo
Politec. Univ. Coruña	E	canal	70	3	3	Hs = 1,20 irregular		absor. ativo
Politec. Univ. Madrid	E	tanque onda	11		0,8	Hs=0,25 regular	Freq. 0,01-3 Hz	Flap duplo 5,5x0,75m
Politec. Univ. Madrid	E	canal onda	50	1	1,5	H = 0,40 regular	Freq. 0,01-1 Hz	Pistão
Politec. Univ. Madrid	E	tanque reboq	100	3,8	2,2	H = 0,25 regular		

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
Politec. Univ.Valencia	E	tanque onda	15	7,5	0,5	Hs=0,15 irregular		
Politec. Univ.Valencia	E	canal onda	30	1,2	1,2	Hs=0,40 irregular		Vento até 10 m/s
Politech. Univ. Barcelona	E	canal	100	3	4,5	Hs=0,8 Hs=1,5 reg/irreg	2<L<35m 15<T<95	PIV velocity
Politech. Univ. Barcelona	E	Canal	20	1	1			Área 2000m <sup>2</sup>
Politech. Univ. Barcelona	E	canal incl. var	20	0,6	0,6			Bombas autom. Até 250 l/s
Research and Design Institute Shipbuilding	RO	tanque reboq	81	7,1	0,6	irregular		
Research and Design Institute Shipbuilding	RO	tanque reboq	120	4	3	H = 0,3 regular	2<L<6m	
Research and Design Institute Shipbuilding	RO	bacia	40	40	1,5	Hs=0,35 reg/irreg	1m<L<12 m	
Research and Development National Institute Environment	RO	onda canal	65	7	4	H = 0,50 regular	0,7<T<4	
Research and Development National Institute Environment	RO	onda canal	60	2	0,8	H = 0,25 regular	0,5<T<3	Vento até 20 m/s
Schifbautechnische Versuchsanstalt	A	reboq. tanque	180	10	6	regular	0,5<L<6m	fundo móvel
SINTEF	NO	bacia	80	50	10	Hs = 0,9 reg/irreg	T>0.8	Ondas 3-D; Vento
SINTEF	NO	bacia	27	18,5	0,7			Irregular ondas
SINTEF	NO	canal	40	5	1	Hs = 0,3		Irregular ondas

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
SINTEF	NO	canal	13,5	0,6	1			PIV
SINTEF	NO	tanque reboq	200	4	4	Hs = 0,4 reg/irreg	0,3<T<5	carro não trip.
SINTEF	NO	tanque reboq	148	4,97	3	Hs=0,6 reg/irreg	0,5<T<5	
SINTEF	NO	tanque reboq	96	6,8	2,75	H = 0,5		
Sogreah	F	bacia	30	24	1,6	Hs=0,22 aleatória		Geração Gedap
Sogreah	F	bacia onda	22,5	30	1	Hs=0,25 3-D	3-D	Geração Sogreah
Sogreah	F	bacias	32	20	0,8	Hs=0,25 irregular	3 bacias	Maré, corrente, rotativo
Sogreah	F	canal	41	2,4	1,6	Hs=0,55 aleatória		Geração Gedap
Sogreah	F	canal	41	1	1,4	Hs=0,3 aleatória		Geração Gedap
Sogreah	F	canal	18	0,5	0,6			
Southampton Institute; Maritime research Centre	UK	tanque reboq	25	2,8	1	Hs=0,3 reg/irreg	T=0,25-3	flap simples
SVA	D	tanque reboq	280	9	4,5	regular	2<L<12m	
Swedish Maritime Research Center Maritime Consulting	S	bacia	88	39	3,2	Hs = 0,3 regular irregular	0,7<T<3	pit 9x5x8; Vento <10m/s
Swedish Maritime Research Center Maritime Consulting	S	tanque reboq	188	2,4	1,2	regular/ir regular	0,6<L<4,6 m	Vento
T.G. Masaryk Agua Reasearch Institute	CZ	bacia	57,6	21				

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
T.G. Masaryk Água Reasearch Institute	CZ	bacia	20	5	0,7			
T.G. Masaryk Água Reasearch Institute	CZ	bacia	7,6	17,1				
T.G. Masaryk Água Reasearch Institute	CZ	canal	19	0,5	0,75			
T.G. Masaryk Água Reasearch Institute	CZ	canal	200	2,5	2,13			
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	bacia	26	19	0,5	H=0,15 Hs=0,1 reg/irreg		
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	onda canal	80	2	0,75	H= 0,25 Hs= 0,18 reg/irreg		
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	onda canal	80	1	0,75			
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	canal	25	0,6	0,7			
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	canal	20	0,9	0,55			
Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute	D	tanque reboq	30	2	0,7			
Technical University München, Oskar von Miller-Institute	D	tanque reboq	250	2,5				
Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik	D	bacia reboq	200	16	6,5	Hs = 0,1 - 0,4 irregular	1<L<12m	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
U. Bergen	NO		6	1,5	0,5			
U. Oslo	NO	canal	25	0,5	0,8	Hs = 0,2 reg/irreg		2.5-D PIV
UCL	UK	canal	14	0,5	0,5	Hs=0,15 irregular		ondas 2D
UCL	UK	canal	4,5	0,5	0,5	regular		ondas e correntes
Univ. of Bristol	UK	tanque	1,8	1,8	3			
Univ. of Bristol	UK	canal	20	1,5	1,1	Hs = 0,2 reg/irreg		
Univ. of Bristol	UK	canal	14	0,75	1			
Univ. of Bristol	UK	canal	7,2	2,4	0,6	H = 0,1 regular		
Univ. of Bristol	UK	canal	10	2	0,25			
Université de Caen	F	canal	23	0,8	1	Hs = 0,4 irregular		VDL/VDU
Université de caen	F	canal ondas	18	0,5	0,5	H = 0,2 regular		VDL/VDU corrente
University College Cork	IRL	bacia	18	18	1	Hs=0,2m	Tz = 2.5	real+sim, 3-D
University College Cork	IRL	canal	26	3	1	Hs=0,25	Tz = 2.5s	real+sim, unidir,
University College Cork	IRL	tanque reboq	25	18	1	regular irregular		
University Dresden, Hubert-Engels Labor	D	onda canal	30	0,8	0,7	H=0,35 Hs=0,15		reg/irreg
University Hannover, Franzius-Institute	D	bacia	45	24	0,7	H=0,4, Hs=0,3		regular irreg
University Hannover, Franzius-Institute	D	onda canal	107	2,2	1,2	H= 0,5 Hs= 0,4		regular irreg

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
University Hannover, Franzius-Institute	D	canal	28	1	0,9			
University Hannover, Franzius-Institute	D	tanque reboq	54	3,75	0,3			PMM equipment
University Karlsruhe	D	canal	6	0,5	0,9			
University Karlsruhe	D	canal	13	0,6	0,75			
University Karlsruhe	D	canal	12	1	0,65			
University Karlsruhe	D	canal	20	1,8	0,55			
University Karlsruhe	D	canal	3,5	0,25	0,55			
University Karlsruhe	D	canal	12	0,3	0,25			
University of Genova	I	tanque reboq	60	2,9	1,5			
University of Glasgow	UK	tanque reboq	60	3,7	1,8	regular/irregular		
University of Liege	B	tanque reboq	270	60	5,5	Hs=0,86 reg/irreg		
University of Madrid E T S Ingenieros Navales (ETSIN)	E	tanque reboq	240	12	5,5	Hs = 0,9, irregular	0,5<T<10	
University of Newcastle Upon Tyne	UK	canal tanque	37	3,7	1,52			
University of Porto	P	bacia	30	12	1	regular		onda -
University of Southampton	UK	tanque reboq	25,2	3,7	1,78	regular irregular	0,6<L<10 m	
University of Southampton	UK	tanque reboq	30	2,4	1,2	regular irregular		
University of Strathclyde	UK	tanque reboq	53	5	3	Hs=0,04- 0,25	1<L<5m	regular
University of Strathclyde	UK	tanque reboq	85	2,75	1,25	regular irregular	0,4<L<6,5 m	
University Siegen	D	onda canal	6	0,5	0,4	H=0,2 Hs=0,15		regular irreg

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
University Siegen	D	canal	40	0,6	0,6			
University Stuttgart	D	canal	20	0,7	2			
University Stuttgart	D	canal	27	1	0,6			
University Stuttgart	D	canal	11	0,5	0,6			
University Stuttgart	D	canal	8	0,25	0,3			
University Stuttgart	D	tanque reboq	79	2				
University Wuppertal	D	onda canal	24	0,3	0,4	H=0,1 Hs=0,06		regular irreg
Versuchsanstalt für Binnen-schiffbau e.V. Duisburg	D	tanque reboq	190	9,8	1	regular	0,3<L<5m	
Versuchsanstalt für Binnen-schiffbau e.V. Duisburg	D	tanque reboq	135	3	1,1			
Versuchsanstalt für Binnen-schiffbau e.V. Duisburg	D	tanque reboq	73	3	2,8			
VITUKI	HU	Canal	120	40				
VITUKI	HU	Tanque	50	16	0,6			
VITUKI	HU	Tanque	35	10	0,6			
VITUKI	HU	Tanque	7	1	2,7			
VITUKI	HU	Tanque	60	2	2			
VITUKI	HU	canal	17	1	1			
VWS/Berlin Model Bacia	D	Canal	60	2,4	1,3	Hs=0,25	T < 1s	regular irreg
VWS/Berlin Model Bacia	D	Tanque reboq	300	18	6	Hs=0,85 reg/irreg	L = 10 m	
VWS/Berlin Model Bacia	D	Tanque reboq	220	15,8	1,15	Hs=0,25 reg/irreg	0,5<T<3	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
WL Delft Hydraulics	NL	bacia	60	26,4	0,7	Hs=0,15 irregular		+ ARC
WL Delft Hydraulics	NL	bacia	50	13,3	1	Hs = 0,3		irregular
WL Delft Hydraulics	NL	bacia	30	14	1	Hs=0,25		irregular
WL Delft Hydraulics	NL	bacia	45	33	0,6			água sal. gelada, lama
WL Delft Hydraulics	NL	canal	235	5	5,5	Hs=2,5m Hs=1,7m reg/ irreg		prod. Max 9.0 m
WL Delft Hydraulics	NL	canal	55	1	1,2	Hs =0,3 irregular		gerador 2ª ordem, ab. Ativo
WL Delft Hydraulics	NL	canal	35	5	1	Hs =0,2 irregular		+ ARC
WL Delft Hydraulics	NL	canal	24,5	0,5	0,6	Hs = 0,1		
WL Delft Hydraulics	NL	canal	50	5,5 + 3,5	2,5			
WL Delft Hydraulics	NL	canal	98,5	1,5	0,8			
WL Delft Hydraulics	NL	Canal	130	1	0,8			água sal; gelada; lama; corrente
WL Delft Hydraulics	NL	Canal	14	0,5	0,5	H = 0,2 regular		água óleo
WL Delft Hydraulics	NL	Tunel água	14	0,3	1,1	Irregular		vel.orbit. 2 m/s

## GLOSSÁRIO

Absorção - efeito de dissipação de energia por fatores internos ao sistema;

Aferição – ato de determinar-se os erros de um medidor;

Amortecimento - diminuição da energia em função do tempo;

Arrebentação - região onde as ondas quebram, *surf zone*.

Atenuação - decréscimo da energia de um sistema em função da distância;

Batimetria - medidas do relevo do fundo de uma massa d'água;

Calibração – ato de manejar o medidor para fazê-lo indicar corretamente a medida, dentro dos erros admissíveis.

Colapsível - Modo de quebrar de uma onda quando esta quebra a crista sobre si, quase não formando espuma, *colapsive*;

Derrame - Modo de quebrar de uma onda na qual a crista apresenta uma curvatura pequena quebrando suavemente sobre a parte superior, apresentando bastante espuma, *spilling*;

Encapelar - processo de transformação de uma onda quando aproxima-se da praia, tornado a crista mais aguda e estreita do que o cavado, enquanto aumenta de altura, *shoal*.

Escala - proporção, Fator de escala.

Escala distorcida - Escala variável conforme a direção ou dimensão;

Espiral - Modo de quebrar de uma onda, formando um tubo, com a crista quebrando sobre o cavado, *plunging*;

Fator de escala - proporção entre modelo e protótipo. Fator de escala grande 1:5 (0,2) resulta modelo maior; fator de escala pequeno 1:100 (0,01), modelo menor.

Inviscido - Não viscoso;

Jusante - Local para qual o fluxo de água dirige-se;

Marulho - Onda de grande comprimento, formada muito longe da praia, *swell*

Montante - Local do qual o fluxo de água provem;

Onda - fenômeno físico de propagação de energia;

Vagalhão - Modo de quebrar de uma onda no qual a crista desfaz-se em movimento de vai e vem, formando alguma espuma, *surging*.

