

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

ficha catalográfica

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, pelos contínuos debates e questionamentos sobre o mundo que nos cerca;

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, que propiciou 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

O trabalho apresentado procura investigar a qualidade das ondas, 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. Nos ensaios foram geradas ondas nas formas monocromática e varredura em frequência, durante os quais foram medidas, principalmente, a posição e força do atuador, o sinal de controle e as alturas de ondas em quatro posições.

A análise comparativa entre os resultados experimentais, a teoria e resultados de outros autores conduziu a conclusões que permitiram a proposição de uma metodologia para análise de ondas em tanque de dimensões reduzidas, com vistas a validação de ensaios em Engenharia Oceânica.

ABSTRACT

This thesis deals with short testing tank for Offshore Engineering purposes. Some tests have been conducted in distinct tank configuration mostly related to wave energy absorber. The main question was to investigate wave quality from generation, propagation and reflection point of view keeping in mind the tank application for model testing.

The existing passive wave absorber was rebuilt lowering the angles and rising the beach. The space below the beach was filled with vertical plastic screen tensioned in transverse position, orthogonal to wave propagation direction.

The experimental data was analysed and then compared against theory, mainly arrival time, attenuation, generator transfer function and reflection coefficient. The experiment agreed well with prediction, generally speaking and showed consistency. Some deviation was found but into the range of instruments and data scatter leading to inconclusive thoughts about other phenomena.

Finally, a methodology for wave data analysis is proposed and also the use of plastic screen as wave dampener for short testing tank is recommended in order to save space and keep the reflection at low level. Some subject to future research is proposed in the pursuit of short testing tank development, specially active second order wave generator and active wave energy absorber.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

1.2. Justificativa

1.3. Motivação

1.4. Revisão Bibliográfica

2. ONDAS OCEÂNICAS EM LABORATÓRIO

2.1. Teoria Linear de Ondas

2.1.1. Solução de Airy

2.2. Alguns Modelos Numéricos

2.3. Tanques de Ondas

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

3.1. Tanque de Ondas do LENO

3.2. Equipamentos e Instrumentos Utilizados

3.2.1. Sensor de Onda

3.3. Metodologia

3.4. Medidas Experimentais

3.4.1. Configurações dos Ensaios

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Incertezas nas Medidas

4.2. Medidas de Ondas

4.2.1. Velocidade de Propagação

4.2.2. Freqüência e Amplitude

4.3. Funções de Transferência

4.3.1. Força e Posição

4.3.2. Ondas

4.4. Dissipação de Ondas

4.4.1. Atenuação

4.4.1. Absorção

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Definição das Faixas de Utilização

5.2. Proposta de Metodologia

5.3. Recomendações para Futuras Pesquisas

ANEXOS

LISTA DE REFERÊNCIAS

APÊNDICE

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

FNCOM - 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

NASA - National Aerospace 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 de onda, $(H/2)$;
- A - área, superfície;
- B - constante
- c - velocidade de propagação de onda, (L/T) ;
- C - constante
- d - profundidade;
- D - derivada total;
- E - energia
- f - frequência;
- F – força,
- g - aceleração da gravidade $(9,8 \text{ m/s}^2)$;
- H - altura de onda
- k - número de onda $(2\pi/L)$
- K - tensão superficial
- L - comprimento de onda;
- m - massa;
- M - massa total, (ρV) ;
- O – centro de referência de coordenadas
- p - pressão, (F/A) ;
- S - curso
- t - tempo;
- T - período;
- u - velocidade na direção x;
- U -
- v - velocidade na direção y;
- V - volume;
- V - campo de velocidades (vetor);
- w - velocidade na direção z;

W - desvio de medida;

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

α - ângulo de inclinação da praia;

β -; declividade da onda, H/L ;

ϕ - potencial de velocidades;

η - elevação da onda;

λ - comprimento de onda em águas profundas

μ - viscosidade dinâmica;

ν - viscosidade cinemática (μ/ρ);

θ - ângulo;

ρ - densidade;

σ - tensão mecânica, (F/A) ;

τ - operador das tensões;

ω - frequência angular ($2\pi f$)

ξ - deslocamento máximo

Δ - operador delta, diferença;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

"Terra, planeta água."

Sabedoria popular (internacional)

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 três 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 numérica, 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*, editado e publicado em 2001, pelo Serviço de Biblioteca da Escola Politécnica da USP, 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).

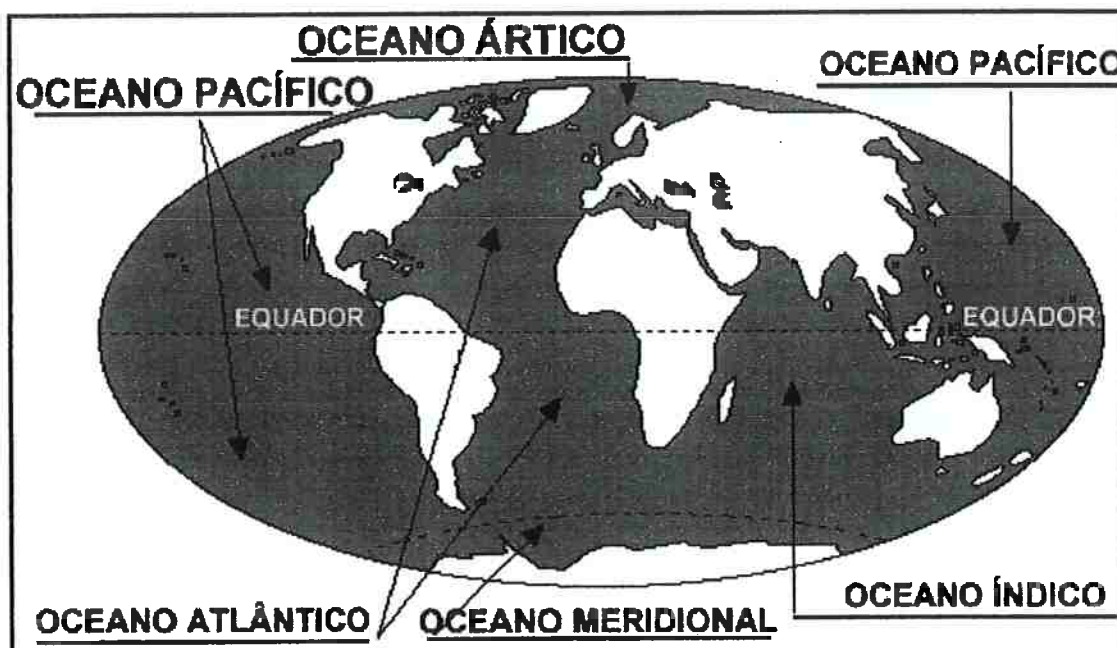


Figura 1.1 - Desenho esquemático da Terra, com a divisão atual dos oceanos (IHO, 2000).

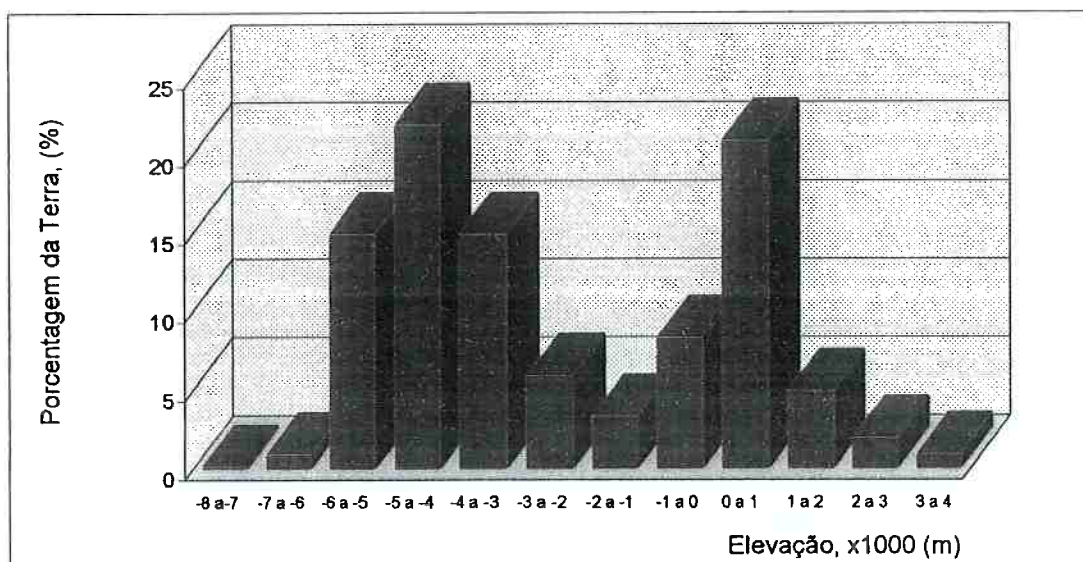


Figura 1.2 – Histograma das freqüências de ocorrências das elevações na superfície do planeta (adaptado de Randall, 1997).

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, serve 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, vive 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 vivem a menos de 80 km da costa, incluindo-se os Grandes Lagos, e 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 km². 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, onde tres são insulares (Florianópolis, Vitória e São Luis).

Tres 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.

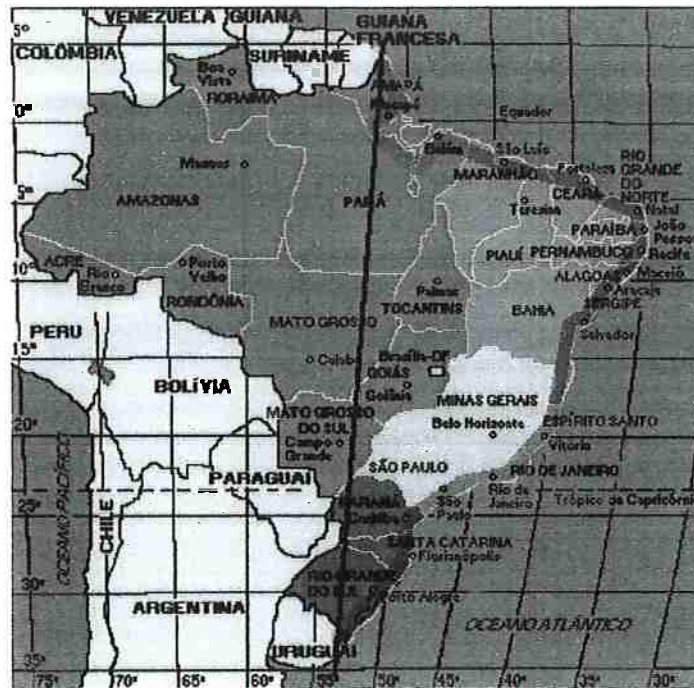


Figura 1.3 - Mapa destacando a faixa sombreada equivalente a 100 km da costa e a linha meridional próxima a longitude 52° Oeste.

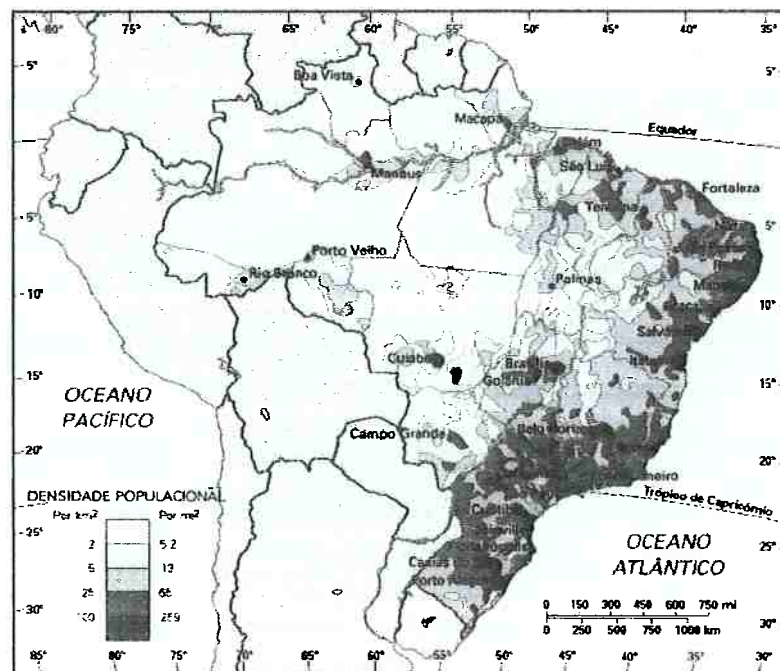


Figura 1.4 - Mapa da densidade demográfica brasileira (IBGE, 2000)

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 (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 m³ 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 uma 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 arrebentação 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.

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 consagrados 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 consagrados no meio técnico, tais como, Wiegell (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. (1959), 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 as precisão, confiabilidade e 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 (1976), 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 as 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 apresenta 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 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 se que 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 de características físicas e classificação de ondas pode ser encontrado 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 o deslocamento 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.

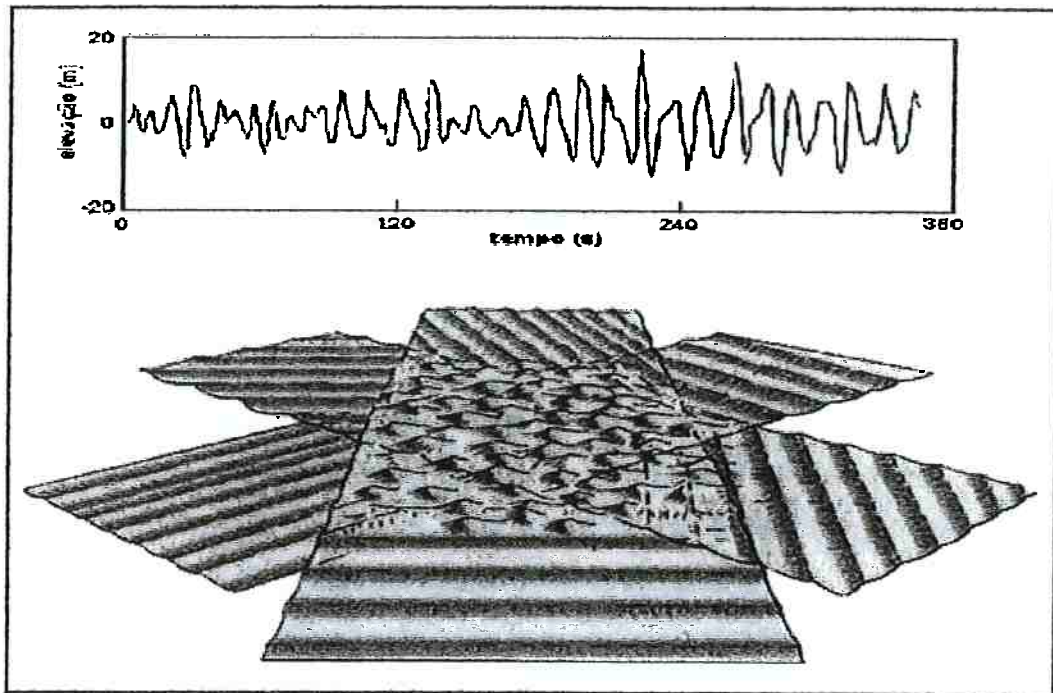


Figura 2.1 - Onda observada em uma certa região, como resultado dos processos de propagação e múltiplas interações.

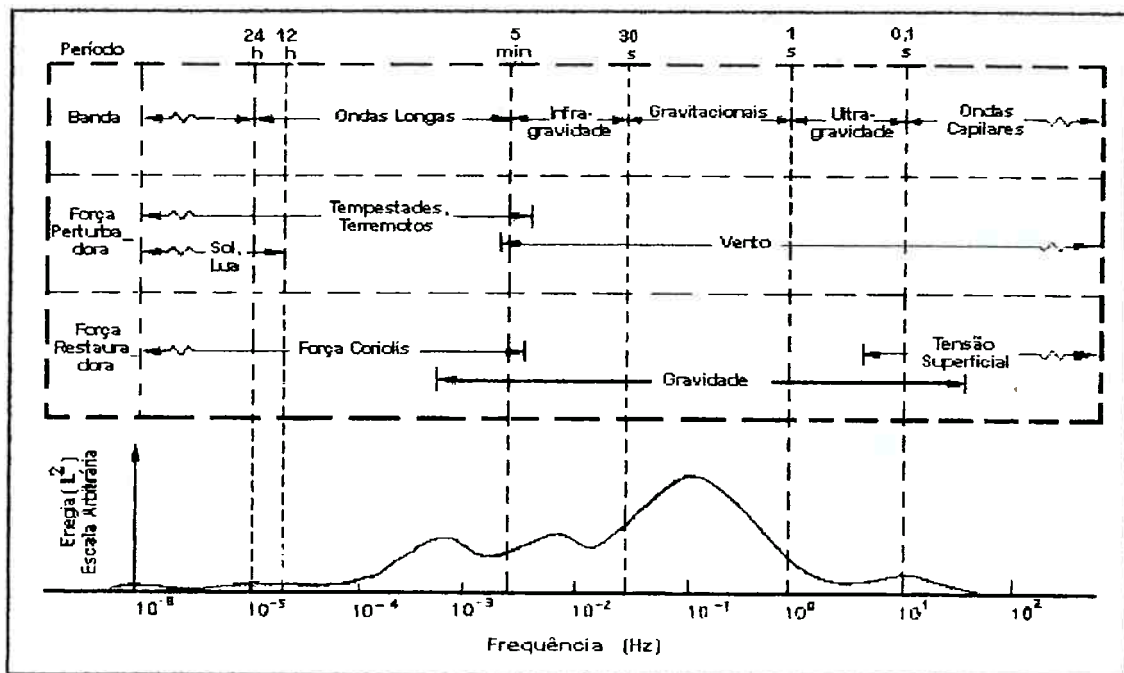


Figura 2.2 - Distribuição da energia da agitação marítima genérica, por período e fenômenos atuantes.

2.1. Teoria Linear 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.

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

Desta forma, dependendo das condicionantes físicas, encontram-se diferentes teorias para o mesmo problema e teorias específicas para partes do problema da onda. O campo de conhecimentos a que pertence este assunto é do fluxo não estacionário em superfície livre sujeito a ação da força gravitacional.

Adiante será sintetizada a formulação mais difundida sobre as ondas oceânicas, que é a teoria linear. Como regra geral, aderida ao caráter experimental deste trabalho, serão privilegiadas a proposição e a interpretação física do fenômeno, em detrimento do rigor das demonstrações matemáticas.

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.

Retomando as equações que representam o problema da onda, como foi demonstrado no Anexo 2, e considerando-se as condicionantes para o caso linear e bi-dimensional, têm-se:

Laplace

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

Integral de Euler Linearizada

$$p = \rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - gy \right), \quad (2)$$

Fundo Impermeável

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{onde } y = -h, \quad (3)$$

Condição Cinemática da Superfície Livre

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{onde } y = 0, \quad (4)$$

Condição dinâmica da superfície livre linear sem tensão superficial

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{onde } y = 0, \quad (5)$$

Condições de superfície livre linear combinadas

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{onde } y = 0, \quad (6)$$

Periodicidade em x .

$$\phi(x, y, t) = \phi(x + nL, y, t); \eta(x, t) = \eta(x + nL, t), \quad (7)$$

onde n é um número inteiro

Condição Harmônica do Tempo

$$\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t + nT); \eta(x, t) = \eta(x, t + nT), \quad (8)$$

onde n é um número inteiro

Separação das Variáveis

$$\phi(x, y, t) \equiv X(x)Y(y)T(t) \quad (9)$$

Substituindo a equação Laplace e dividindo por XYT , podemos obter

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = 0 \quad (10)$$

Uma vez que X é somente função de x e Y somente de y, com x e y sendo variáveis independentes, temos:

$$\frac{1}{x} \frac{d^2 X}{dx^2} = -m^2 \quad (11)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = +m^2, \quad (12)$$

$$X = Ax + B \quad (13)$$

$$Y = Cy + D, \quad (14)$$

No caso em que m é um número imaginário, a equação diferencial para X e Y torna-se

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = +|m|^2 \quad (15)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -|m|^2, \quad (16)$$

onde $|m|$ é o módulo de m. A solução para a equação diferencial acima é dada por

$$X = Ae^{|m|x} + Be^{-|m|x} \quad (17)$$

$$Y = C \sin(|m|y) + D \cos(|m|y) \quad (18)$$

Finalmente, para o m real a solução da Eqn. (11) é dada por

$$X = A \operatorname{sen}(mx) + B \operatorname{cos}(mx) \quad (19)$$

$$Y = C e^{my} + D e^{-my} \quad (20)$$

Conforme a separação (Eqn. 9), ϕ resulta em

$$\phi = \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} (C e^{ky} + D e^{-ky}) T(t). \quad (21)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } y = -h \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} (C k e^{-kh} - D k e^{kh}) T(t) &= 0 \\ \Rightarrow C &= D e^{2kh} \end{aligned}$$

Substituindo esta expressão por ϕ na condição combinada de superfície livre na equação (6), obteremos

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{onde } y = 0 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} D e^{kh} 2 \left[\operatorname{Cosh} kh \frac{d^2 T}{dt^2} + g k \operatorname{Sinh}(kh) T \right] \\ = 0 \quad \Rightarrow \frac{d^2 T}{dt^2} = -g k \operatorname{Tanh} kh T. \end{aligned}$$

A solução para $\frac{d^2 T}{dt^2} = -g k \operatorname{Tanh} kh T$ é dada por

$$T = E \operatorname{sen}(\omega t) + F \operatorname{cos}(\omega t), \quad (25)$$

onde E e F são constantes de integração

$$\omega^2 = gk \operatorname{Tanh}kh \quad (26)$$

A solução para ϕ

$$\phi = \{A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx)\} e^{kh/2} \operatorname{Cosh}k(h+y) \{E \operatorname{sen}(\omega t) + F \operatorname{cos}(\omega t)\} \quad (27)$$

Soluções para Ondas Estacionárias

$$\phi = A_1 \operatorname{Cosh}k(h+y) \operatorname{sen}(kx) \operatorname{sen}(\omega t) \quad (29)$$

Usando a condição dinâmica da superfície livre em (5), pode-se determinar o deslocamento da superfície livre correspondente ao potencial acima:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{onde } y = 0 \\ &= \frac{1}{g} A_1 \omega \operatorname{Cosh}kh \operatorname{sen}(kx) \operatorname{cos}(\omega t) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \operatorname{sen}(kx) \operatorname{cos}(\omega t) \quad (31)$$

nós achamos A_1 para ser

$$A_1 = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega \operatorname{Cosh}kh} \operatorname{sen}(kx) \operatorname{cos}(\omega t) \quad (32)$$

A expressão para velocidade potencial é portanto

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g \operatorname{Cosh}k(h+y)}{\omega \operatorname{Cosh}kh} \operatorname{sen}(kx) \operatorname{sen}(\omega t) \quad (33)$$

Conforme o princípio da superposição válido para problemas lineares, qualquer combinação linear para estas soluções,

Soluções para Ondas Progressivas

$$\phi = -\frac{H g \operatorname{Cosh}k(h+y)}{2 \omega \operatorname{Cosh}kh} \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

o qual, com k e ω sendo positivo, representa o trajeto da onda na direção positiva x .

Como fase de velocidade, simbolizada por C_p , queremos dizer que a velocidade do quadro?disposição?moldura? de referência naquela onda progressiva parece estacionária. Por exemplo, considerando uma onda progressiva com função de fase (normalmente simbolizada por θ) na forma $(kx - \omega t)$. Para a fase ser constante,

$$\begin{aligned} d\theta &= d(kx - \omega t) \\ &= kd\omega dt = 0 \quad \text{onde } k \text{ e } \omega \text{ são constantes.} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} \equiv C_p$$

Em virtude da relação de dispersão, Eqn. (26), a fase de velocidade pode ser expressa como,

$$C_p = \sqrt{\frac{g}{k} \operatorname{Tanh}kh} \quad (34)$$

Podemos observar desta maneira que a velocidade da água das ondas depende não somente do número de ondas, mas também da profundidade da água. Nós podemos discutir esta e outras propriedades mais adiante, nos capítulos seguintes.

Velocidade de grupo

$$\eta = \underbrace{\frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)}_{\eta_1} + \underbrace{\frac{H}{2} \cos(k_1 x - \omega_1 t)}_{\eta_2}$$

onde, k_1 e ω_1 são pequenas variações de k e ω .

$$\eta = H \cos \left[\frac{1}{2}(k + k')x - \frac{1}{2}(\omega + \omega')t \right] \cos \left[\frac{1}{2}(k - k')x - \frac{1}{2}(\omega - \omega')t \right]$$

Considerando o 1º termo

$$\cos \left[\frac{1}{2}(k - k_1)x - \frac{1}{2}(\omega + \omega_1)t \right]$$

Como $k \approx k_1$ e $\omega \approx \omega_1$ isto é a mesma onda e período como origina η_1 .

Considerando a 2ª forma de onda

$$\cos \left[\frac{1}{2}(k - k_1)x - \frac{1}{2}(\omega - \omega_1)t \right]$$

Assim tem o comprimento da onda

$$\frac{4\pi}{k - k_1} \quad \frac{4\pi}{\omega - \omega_1} \quad \frac{L}{T} = \frac{\omega - \omega'}{k - k'} = \frac{\delta\omega}{\delta k}$$

Conseqüentemente, no limite,

$$C_g = \frac{dk}{d\omega} = \frac{d}{dk}(kC) = C + k \frac{dc}{dk}$$

C_g é a velocidade de propagação de grupo

$$C_g = C + K \frac{d}{dk} \left[\frac{g}{k} (\tanh kh)^{1/2} \right]$$

$$C_g = \frac{1}{2} \underbrace{\left[1 + \frac{4\pi h/L}{\text{sen} 4\pi h/L} \right]}_n C$$

$$\text{Em águas profundas} \quad n = \frac{1}{2} \quad C_g = \frac{1}{2} C$$

$$\text{Em águas rasas} \quad n = 1$$

Para ondas capilares necessita-se adicionar a tensão superficial como força atuante no sistema.

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

onde K é a tensão de superfície. Considerando $\eta = a \cos(kx - \sigma t)$, é facilmente visto que o η satisfaz a equação $\partial^2\eta/\partial x^2 = -k^2\eta$. Baseado nesta relação, pode-se escrever:

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

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

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

$$L_m = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\rho g}}, \quad c_m = \sqrt{\frac{4\pi K}{\rho L_m}} = \sqrt[4]{\frac{4gK}{\rho}}$$

Introduzindo um valor de superfície de tensão para $K = 73,5$ dyne/cm à 15°C determina-se $L_m = 0,0172$ m e $C = 23,2$ cm/seg. Isto vale dizer que uma onda com velocidade menor que 23,2 cm/seg não existe na natureza.

A atenuação implica em um decréscimo de amplitude dado por:

$$H = H_0 e^{-\alpha x}$$

onde H_0 é a altura de algum ponto de referência e α é um fator de amortecimento que pode ser definido explicitamente como

$$\alpha = -\frac{1}{H} \frac{dH}{dx}$$

$$a = \alpha d = -\frac{d}{H} \frac{dH}{dx}$$

$$\alpha = \frac{k\delta}{b} \left[\frac{kb + \sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \right]$$

Este fator é constituído de componentes devido ao atrito com o fundo e da parede lateral. Portanto:

$$a = a_b + \left(\frac{2d}{b} \right) a_w$$

$$a_b = \frac{k\delta}{2} \left[\frac{2kd}{2kd + \sinh(2kd)} \right]$$

$$a_w = \frac{k\delta}{2} \left[\frac{\sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \right]$$

$$\alpha = 4k^2 \nu \left(\frac{k}{g} \right)^{1/2} = 2k(k\delta)^2$$

A velocidade potencial $\phi(x,y,t)$ para ondas de pequena amplitude geradas por uma placa basculante é determinado pela equação de Laplace, onde (x,y) são coordenadas de um ponto em um espaço bidimensional e t é tempo:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad 0 \leq y \leq d$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{para } y = 0$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{para condições de superfície (y=d)}$$

$$\omega^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

e

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega \xi(y) \cos \omega t$$

A última equação representa a condição limite do movimento da placa ($x = 0$), onde $\xi(y)$ denota o máximo deslocamento. A solução para a velocidade potencial, ϕ , pode ser:

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

onde $k = 2\pi/L$ é o número de ondas que satisfaz a relação de dispersão

$$\omega^2 = gk \tanh kd$$

e k_n é a raiz positiva e real de

$$\omega^2 = -gk_n \tan k_n d$$

Conseqüentemente, teremos

$$A = \frac{2k \int_0^d \xi(y) \cos h ky dy}{\text{sen } h kd \cos h kd + kd}$$

$$A_n = \frac{2k_n \int_0^d \xi(y) \cos k_n y dy}{\text{sen } k_n d \cos k_n d + k_n d}$$

Por meio da velocidade potencial $\phi(x, y, t)$, os deslocamentos em x e y são obtidos usando-se:

$$\Delta_x = A \cos h ky \text{sen}(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos k_n y \exp[-k_n x] \text{sen } \omega t$$

$$\Delta_y = A \text{sen } h ky \cos(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{sen } k_n y \exp[-k_n x] \text{sen } \omega t$$

O transitório decai exponencialmente e aproxima-se de zero quando $x > 3d$. Então, para $x > 3d$,

$$\Delta y = A \text{sen } h ky \cos(\omega t - kx)$$

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

onde a é a amplitude da onda = $A \text{sen } h kd = H/2$

Pela a equação de Bernoulli

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho g(d - y)$$

$$= p_w p_i + \rho g(d - y)$$

onde

$$p_w = \rho g a \frac{\cosh ky}{\cosh kd} \cos(\omega t - kx)$$

e

$$p_i = \sum_{n=1}^{\infty} \rho g A_n \tan k_n d \cos k_n y \exp[-k_n x] \sin \omega t$$

para $x=0$.

$$p_w = \rho g a \frac{\cosh ky}{\cosh kd} \cos \omega t = C_1 \cos \omega t$$

e

$$p_i = \sum_{n=1}^{\infty} \rho g A_n \tan k_n d \cos k_n y \sin \omega t = C_2 \sin \omega t$$

Note que P_w e P_i estão 90° defasados entre si. Portanto, o valor máximo para $C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t$ é $\sqrt{C_1^2 + C_2^2}$

considerando que sua fase é $\tan^{-1} \frac{C_1}{C_2}$.

Para um gerador de ondas tipo-flap, o deslocamento do batedor de ondas pode ser escrito em termos de seu curso no nível de água estático, S , como

$$\xi(y) = \frac{S}{D}(y - \delta d), \quad \text{para } \delta d \leq y \leq d$$

$$\xi(y) = 0, \quad \text{para } y < \xi d$$

$$A = 2S \frac{kD \text{sen } h kd - \cos h kd + \cos h k\delta d}{kD(\text{sen } h kd \cos h kd + kd)}$$

$$A = 2S \frac{k_n D \text{sen } h k_n d + \cos k_n d - \cos h k_n \delta d}{k_n D(\text{sen } k_n d \cos k_n d + k_n d)}$$

$$\frac{S}{H} = \frac{kD[\text{sen } h kd \cos h kd + kd]}{4 \text{sen } h kd [kD \text{sen } h kd - \cos h kd + \cos h k\delta d]}$$

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 Vôo 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., 1997), 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 um sítio na Rede Mundial de Computadores do qual o programa fonte 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 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 Naval e 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 a possibilidades de gerar-se corrente e vento, nas faixas compatíveis com as solicitações ambientais reais.

Ressalte-se que, a reprodução do fenômeno físico associado a ondas gravitacionais é limitada em freqüência. Assim, fica estabelecido que o menor período é de 0,33 s, correspondente a uma freqüência de 3 Hz, para um desvio da ordem de 1% na velocidade da onda.

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, do tipo mencionado 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 muitos outros bons 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, preenchendo 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 de ondas com alturas constantes no ponto de ensaios.

Para definir, inequivocamente, o espectro de ondas realmente utilizável neste tanque, 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.

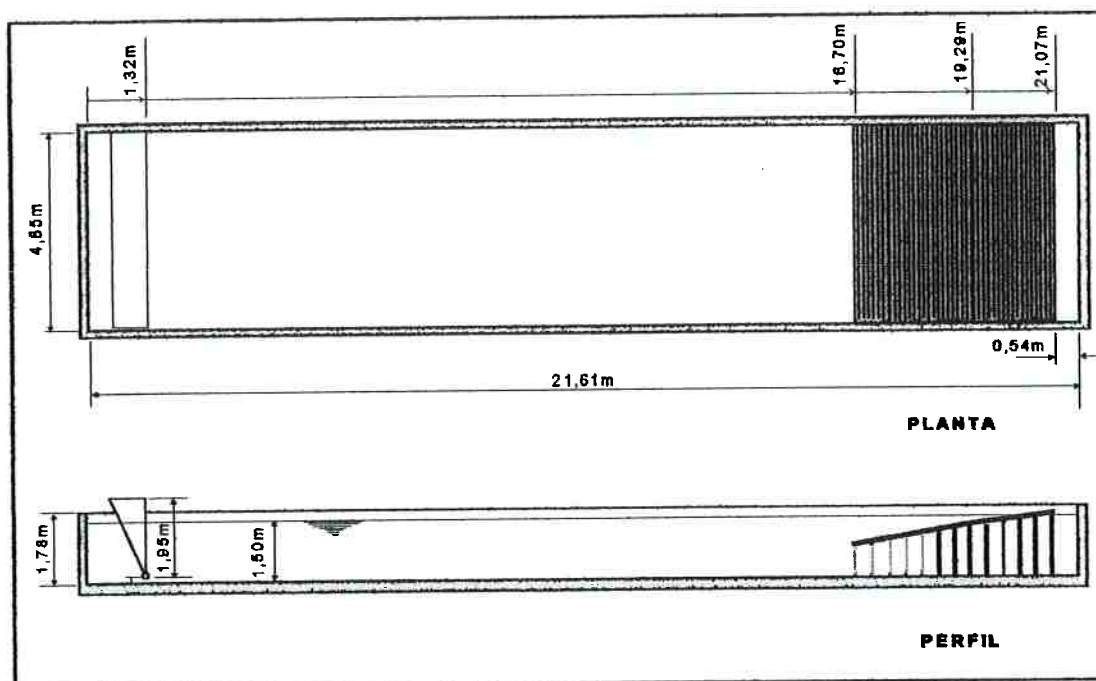


Figura 3.1 - Esquema simplificado do tanque de ensaios do LENO.

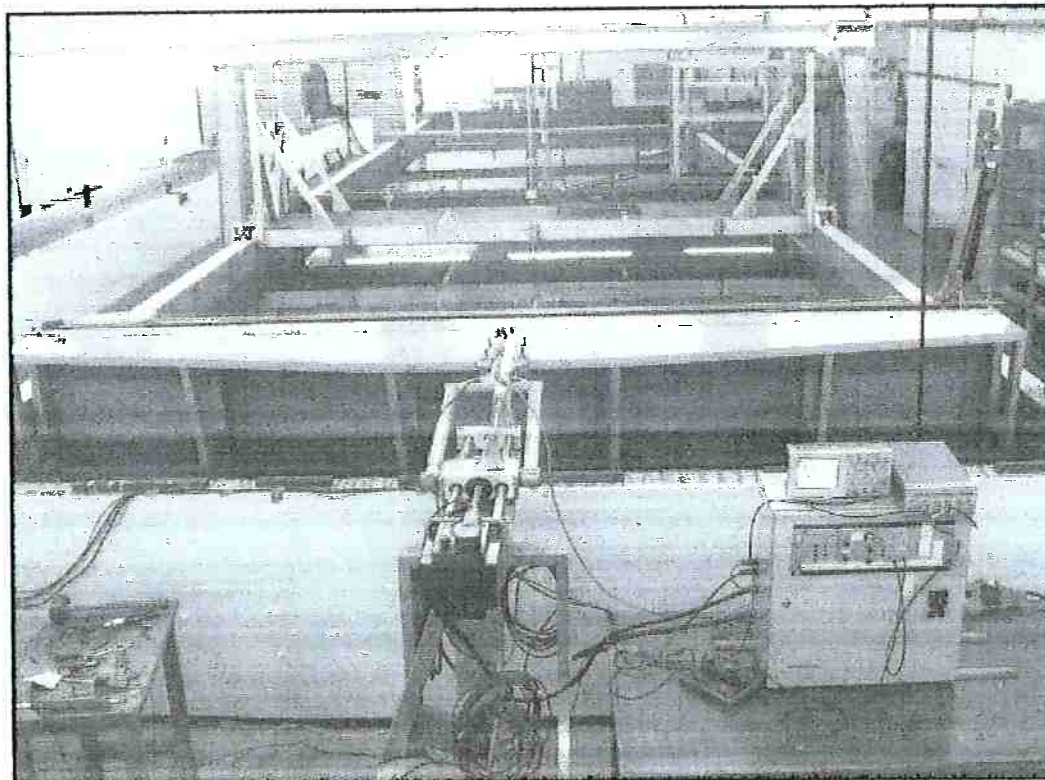


Figura 3.2 - Vista geral do tanque, de montante para jusante. Em primeiro plano os sistemas de controle e de acionamento do atuador.

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 frequência e amplitude das ondas geradas, através do gerador de sinais.

Para cada um dos pares de frequências e amplitudes, e para uma varredura em cada situação, do sinal de excitação deve-se obter a resposta do tanque. As frequências a serem usadas não deverão coincidir com frequências 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 frequências a gerar.

Assim que definidas as frequências, 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 frequências mínima e máxima, com a menor amplitude possível.

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 a 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.

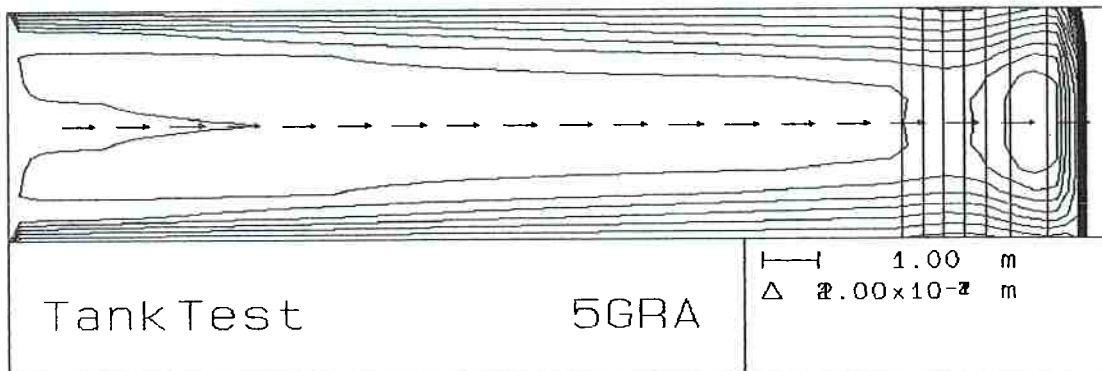
A análise dos dados obtidos com esta técnica deverá fornecer indicações de causa e efeito entre as modificações feitas e a qualidade da

onda, ou o desempenho do tanque. Para tanto, os sinais das variáveis físicas medidas deverão ser analisados no tempo e em frequência.

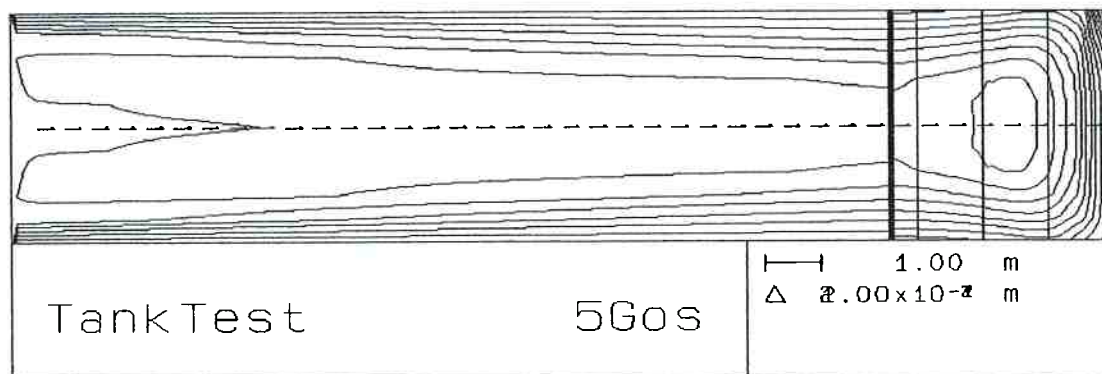
Uma tentativa de melhor definir a metodologia de ensaio e o posicionamento dos ondômetros, fez-se algumas simulações numéricas com o programa SWAN, descrito anteriormente. O programa instalado em um computador tipo PC, Pentium III, 650 MHz, 128 Mb de Ram e disco de 12 Gb, não pode ser usado em sua plenitude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

Os resultados das simulações foram obtido sob fortes limitações de parâmetros, inclusive de 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.

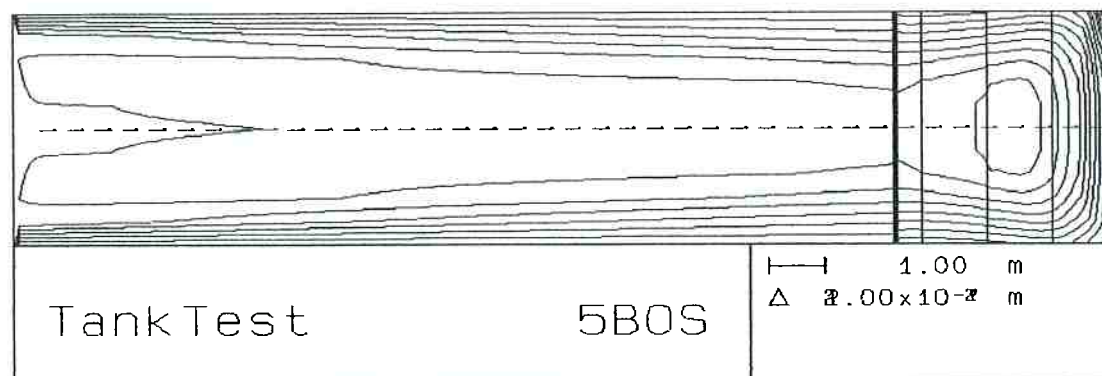
Entretanto, notou-se que a faixa de variação das alturas de ondas no tanque, informada pelo SWAN, não afetariam o posicionamento dos ondômetros, para os propósitos deste trabalho. Resultados típicos fornecidos pelo programa podem ser vistos na figura 3.3, e detalhes de alguns resultados das simulações 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 gráficos de iguais alturas de ondas para diferentes absorvedores.

3.2.1. Configurações dos Ensaio

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 gerador e na figura 3.5, para o tanque. Estas 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.

Na 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.

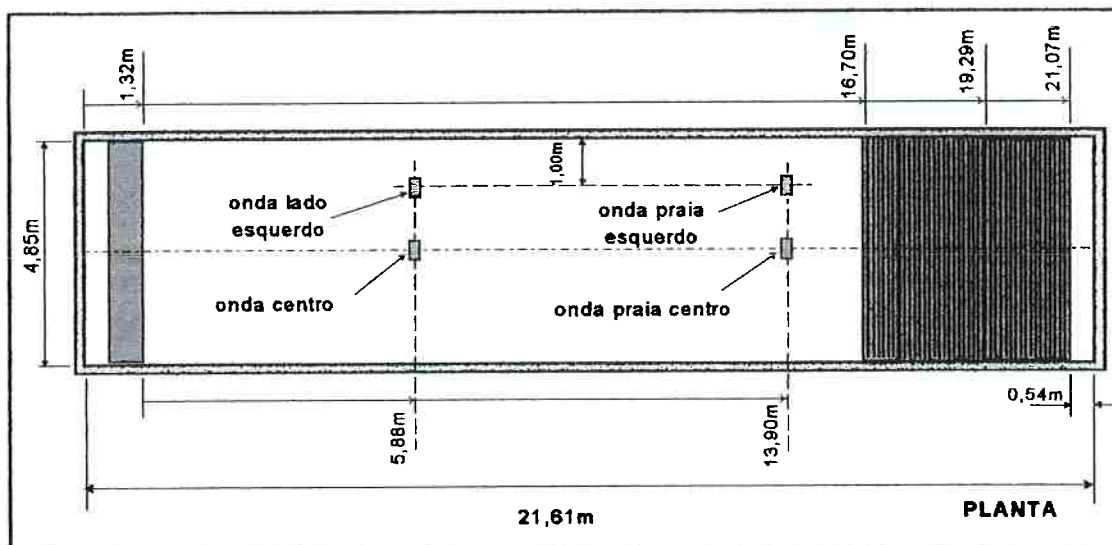


Figura 3.4 - Croquis do tanque com a localização dos ondômetros.

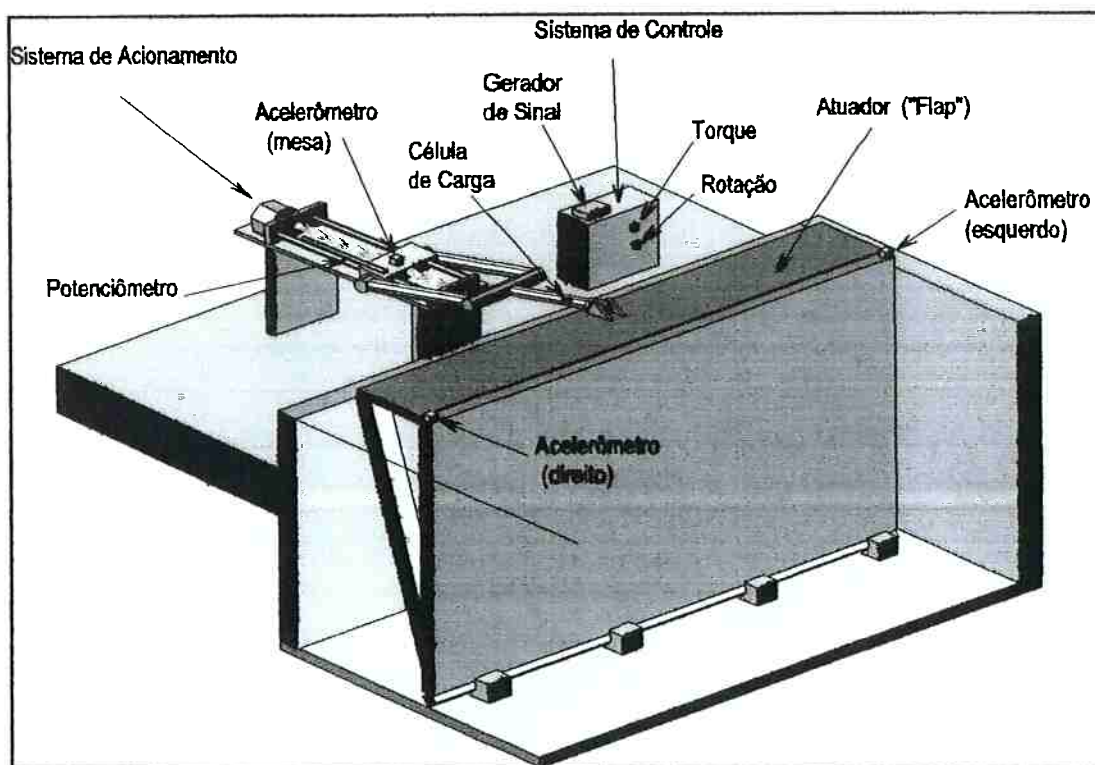


Figura 3.5 - Ilustração da posição dos sensores no sistema de geração de ondas.

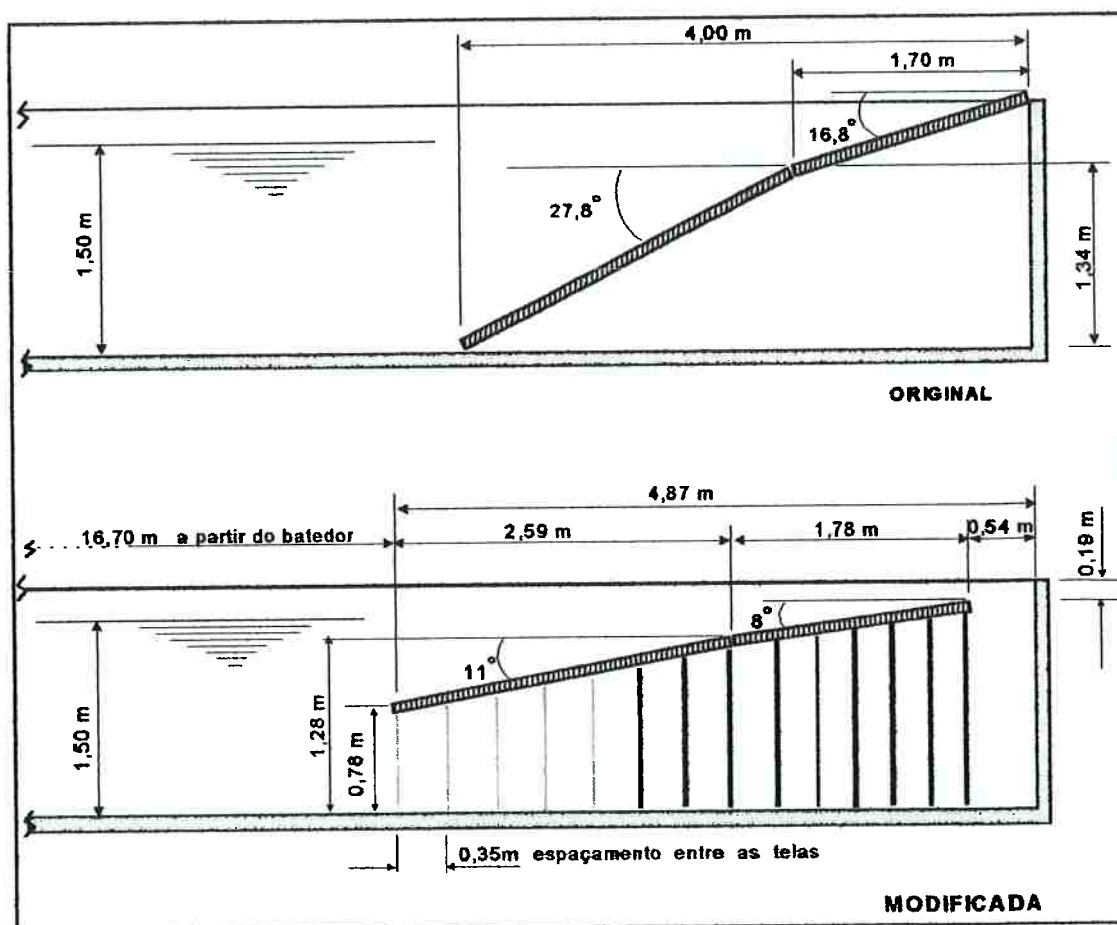


Figura 3.6 - Configuração do absorvedor na situação original e na situação modificada.

Tabela 3.1 - Resumo das configurações dos ensaios.

	Nível D'água Estático (m)	Declividade Pequena	Declividade Grande	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 trans
	1,5	Sim	Sim	+ Tela later

A segunda série de ensaios contemplará uma situação na qual estará presente o absorvedor modificado, uma segunda situação com uma tela esticada 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 para diminuir a onda gerada no pequeno espaço.

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 e 3.8.

- 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-230;
- 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.

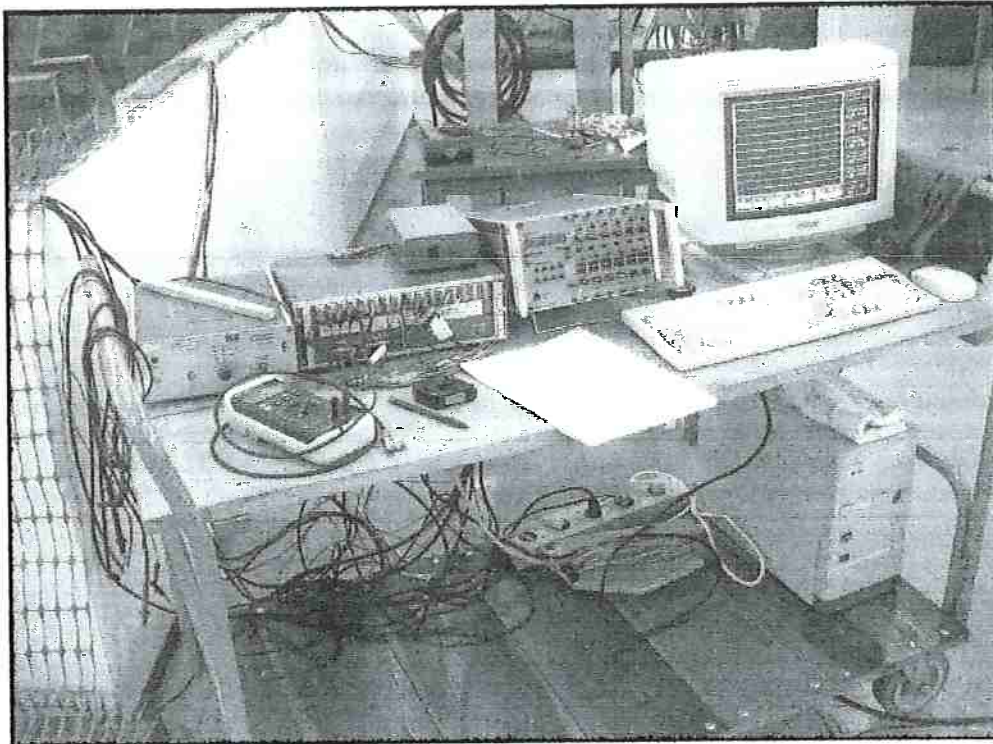


Figura 3.7 - Vista geral da bancada de instrumentação

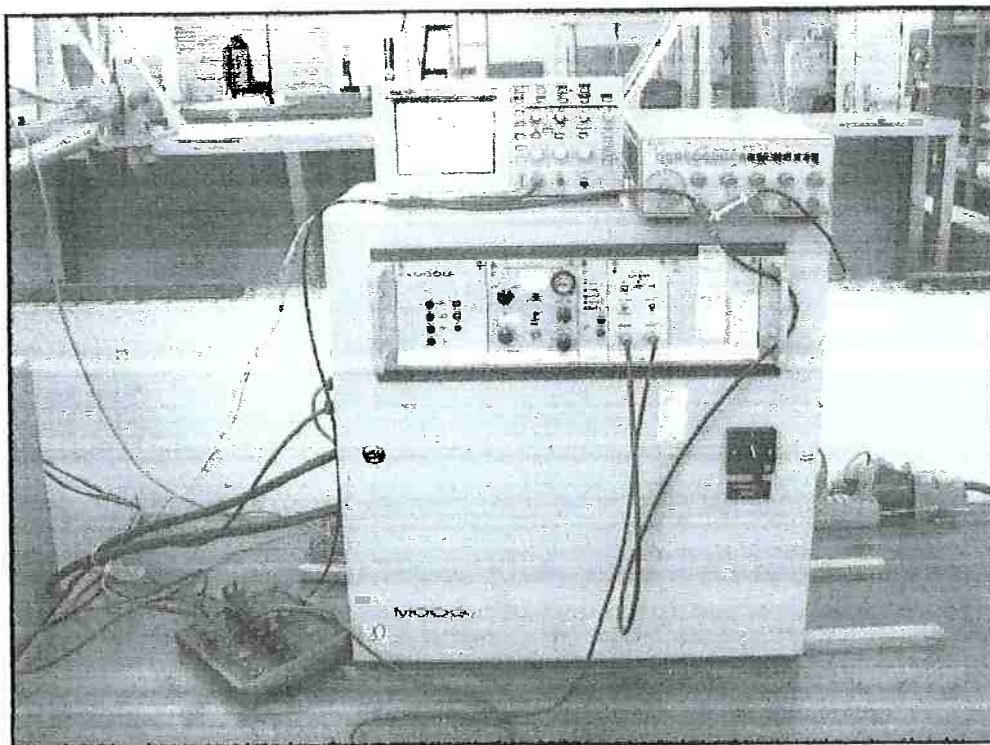


Figura 3.8 - Detalhe do sistema de controle eletrônico.

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 físico. Os tipos mais comuns são o resistivo e o capacitivo, sendo o resistivo um pouco mais utilizado nas instituições européias (ITTC, 1999).

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, facilidade de construção e manutenção e resolução infinita, pelo 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 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 considera-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) e altura de onda na região próxima do absorvedor (jusante), estas 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 uma verificação com 10 pontos de medida, sendo quatro positivos e quatro negativos, dois deles no fundo de escala e dois na referência.

Além disso, efetuou-se uma aferição especial, com variação da frequência do deslocamento de entrada, permitindo assim uma observação detalhada do comportamento dinâmico do sensor. Para tanto empregou-se um sistema excitador, que usualmente é o gerador de ondas de um canal de ensaios, 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 3.9, 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 tres 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 3.10.

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. (1959). 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 3.11 a 3.XX, para algumas frequências e algumas variáveis.

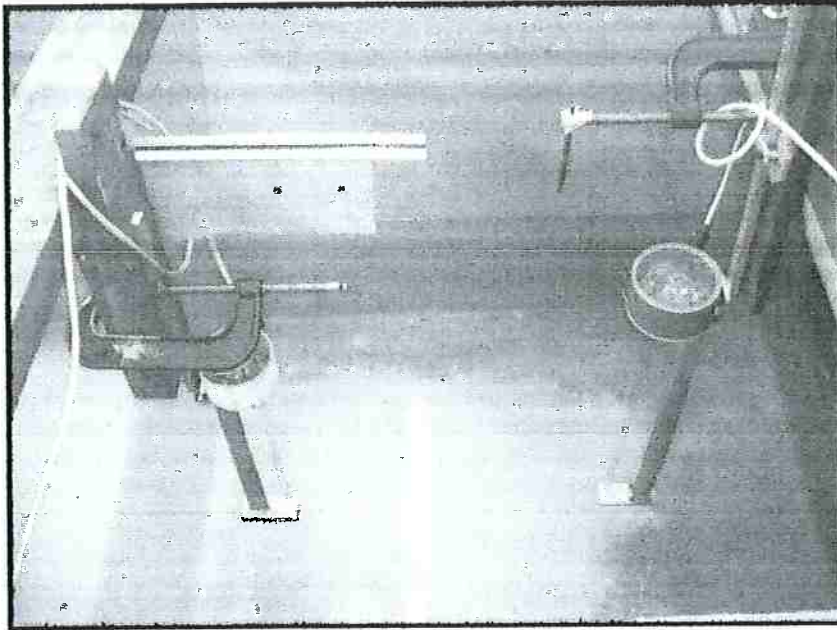


Figura 3.9 - Ilustração do arranjo para aferição dinâmica do ondômetro (direita) e o ondômetro testemunha (esquerda).

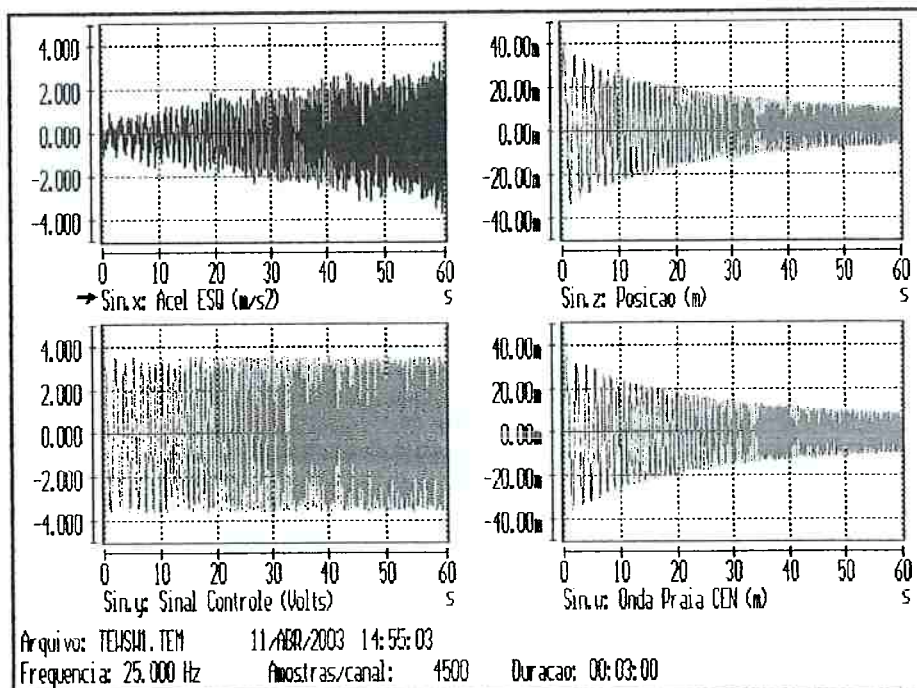


Figura 3.10 - Exemplo de sinais obtidos durante a aferição dinâmica do ondômetro.

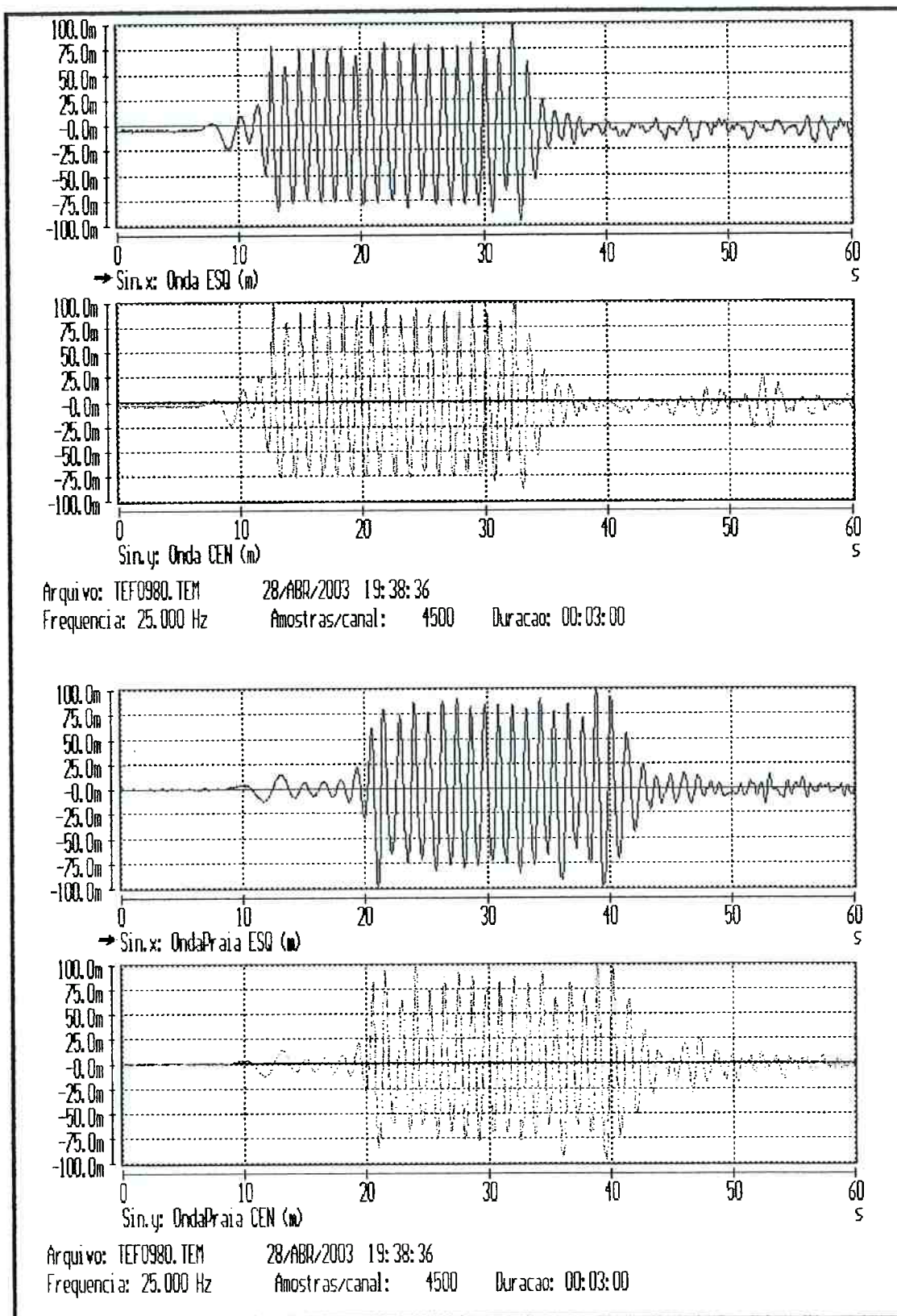


Figura 3.11 - Exemplo dos sinais obtidos de altura de onda, para 0,9 Hz.

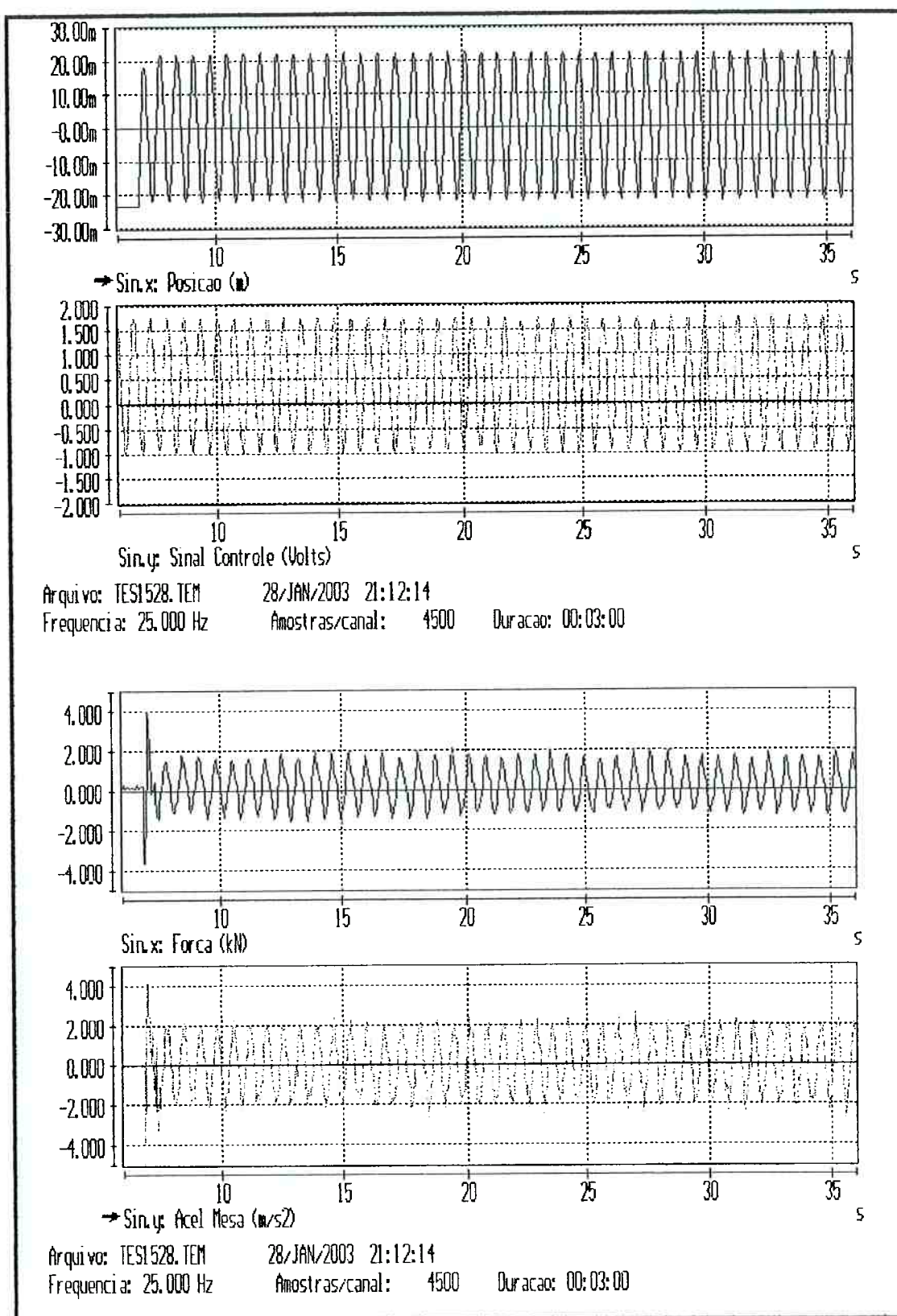


Figura 3.12 - Exemplos de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 1,5 Hz.

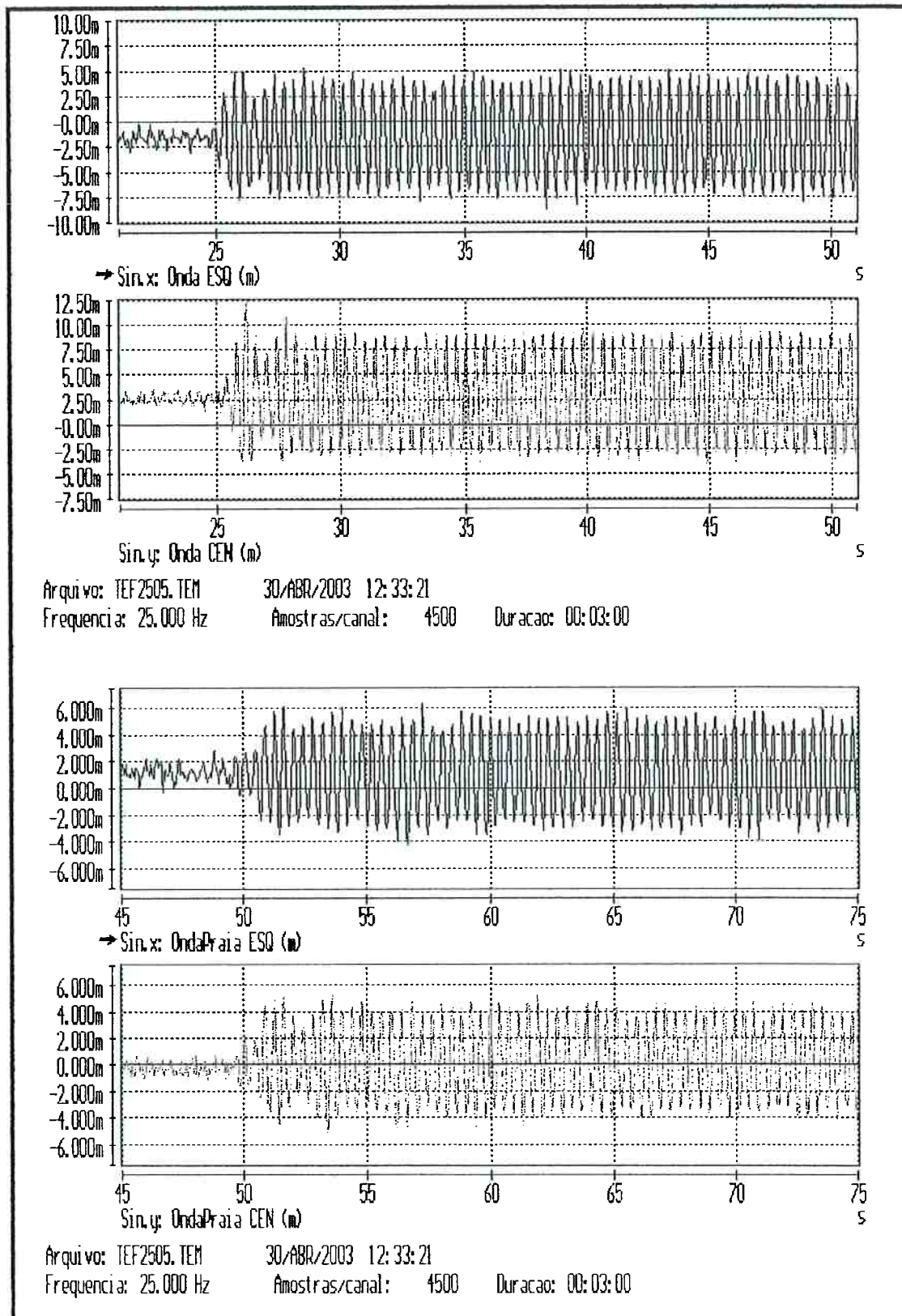


Figura 3.13 - Exemplo de sinais de altura de onda obtidos, para 2,5 Hz.

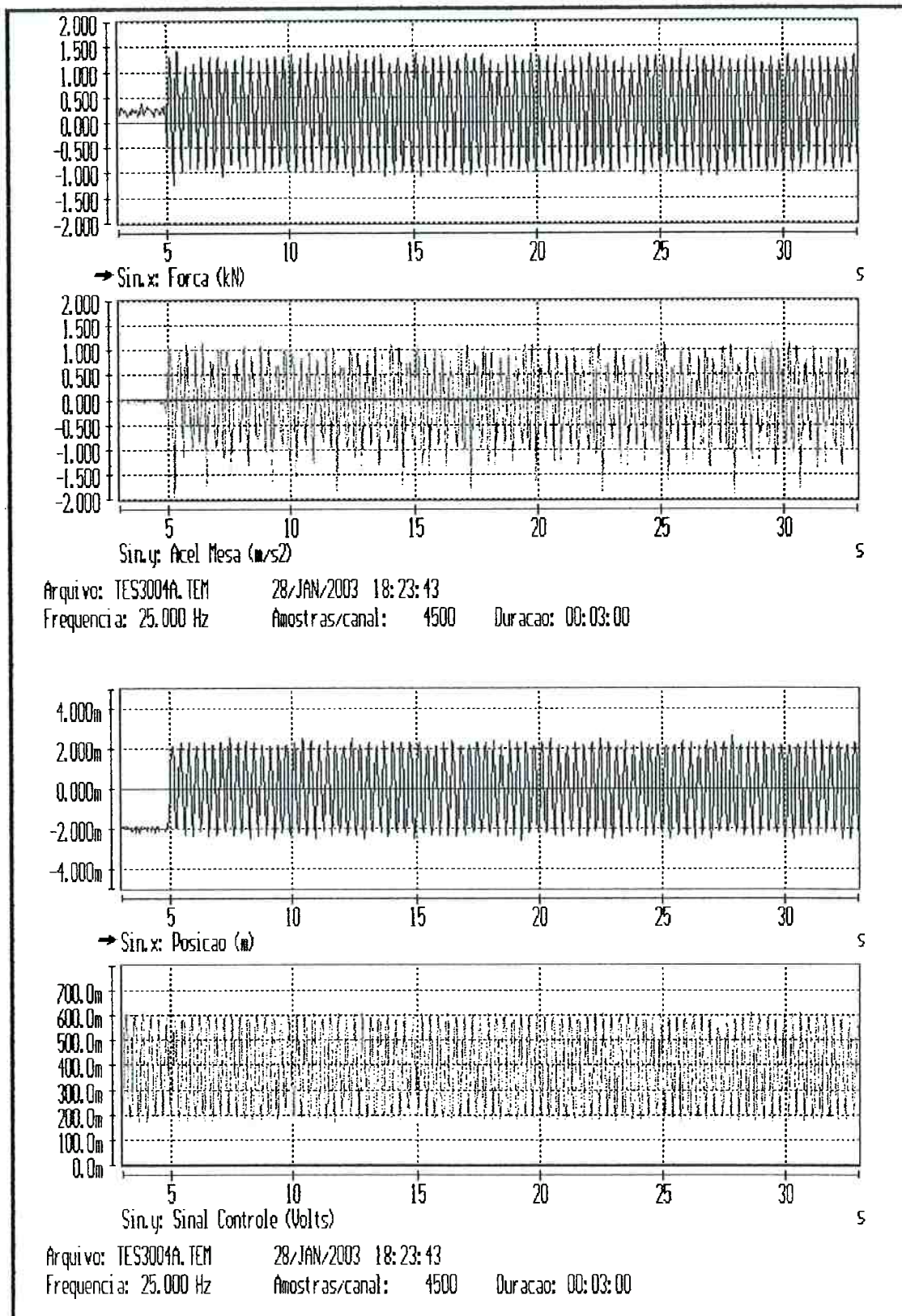


Figura 3.14 - Exemplo de sinais dos sensores obtidos no sistema de geração de ondas, para 3,0 Hz.

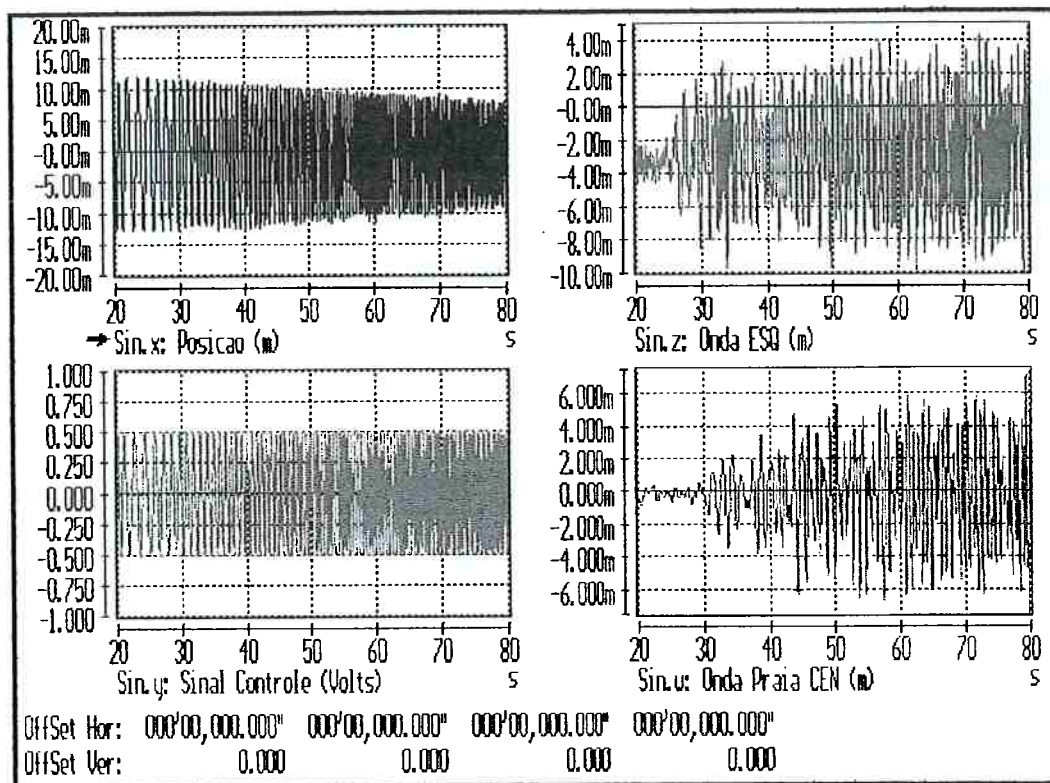


Figura 3.15 - Exemplo de alguns sinais obtidos , para uma excitação por varredura, de 0,4 Hz a 3,4 Hz.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

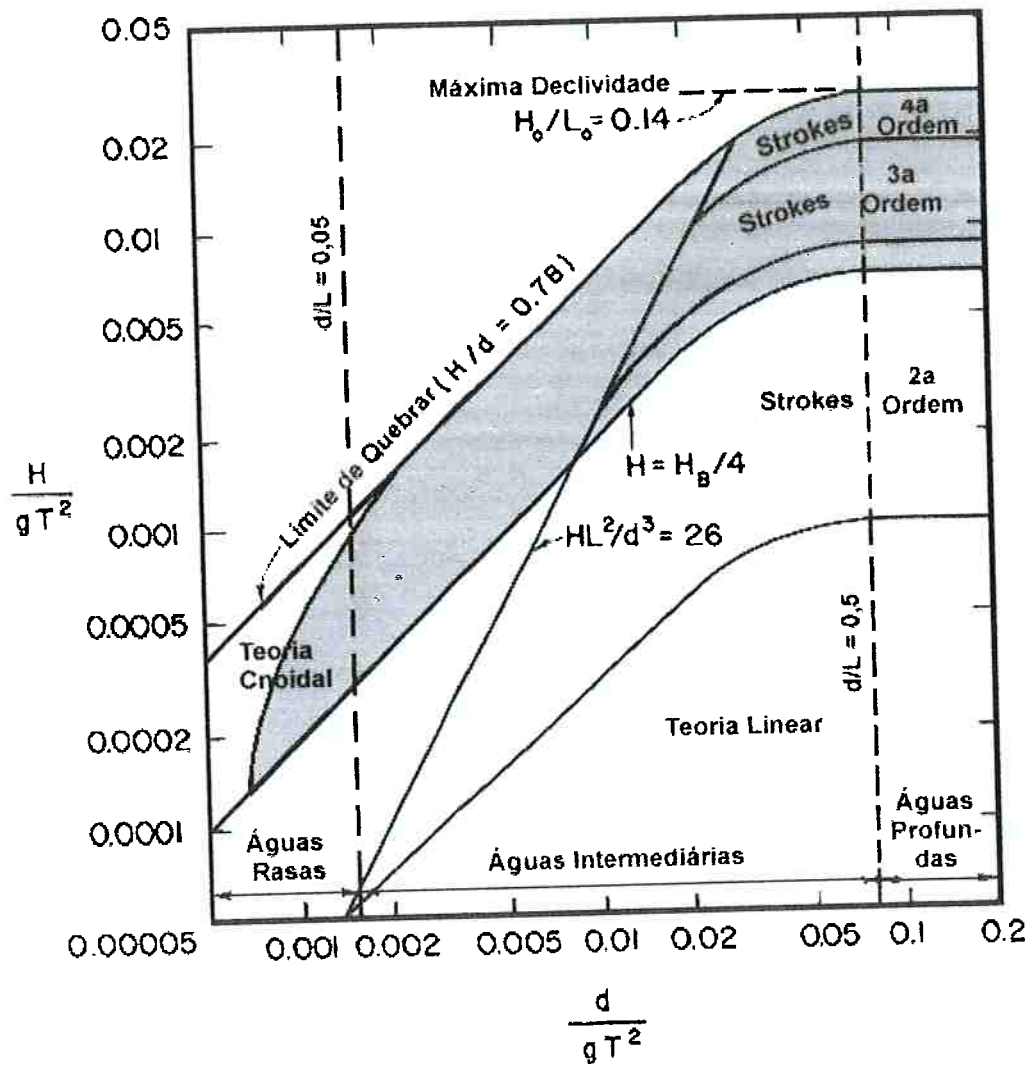
*"Nessuna humana investigação
si pio dimandara vera scienza
s'essa non passa per le
matematiche dimonstrazione."*

Leonardo da Vinci.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após as séries de medidas serem feitas procedeu-se à redução 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 do ensaio.

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



4.1. Incertezas nas Medidas

As calibrações e aferições foram feitas regularmente, no mínimo a cada semana de trabalho, e sempre, ao início de cada dia de ensaios, era feita uma aferição com 10 pontos de referências. As aferições estáticas foram executadas movendo-se o sensor na vertical, para baixo e para cima, registrando-se o deslocamento referenciado a uma escala e o correspondente sinal elétrico de saída.

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. Os desvios 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.

Ressalta-se ainda que, as variações deveram-se às diferentes condições da água e do ambiente do tanque, nos dias nos quais foram feitas as aferições, refletindo assim a necessidade imperiosa de aferições periódicas dos ondômetros. Em uma das aferições notou-se também que, uma pequena e fina camada de sujeira da água do tanque impregnou o filamento metálico, e alterou em cerca de 10% a aferição, comparando-se com a situação após limpeza 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.

Tabela 4.1 – Constantes de calibração médias dos ondômetros

Ondômetro	A	B	C	R ²	Desvio %	Não Linear
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

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 de ondas, ao lado do tanque de ensaios mostrou-se apto a cumprir os requisitos para tal.

O resultado obtido é mostrado na figura 4.1, como o espectro de energia RMS dos sinais de deslocamento, aceleração, controle e do ondômetro. Na figura 4.2 destaca-se a função de transferência entre onda e deslocamento, sendo notada a boa linearidade da amplitude entre 0,2 Hz e 3,0 Hz, mas cuja fase varia continuamente e linearmente na mesma faixa de frequência. A amplitude varia em torno de $\pm 10\%$ do valor médio dentro da faixa ensaiada.

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

Finalmente, quanto às incertezas das medidas, causadas pelas resoluções dos instrumentos empregados, usou-se a formulação diferencial tradicional. Arbitrando-se uma resolução de 0,0005 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 para os deslocamentos e alturas de onda e 5 V para os sinais elétricos, mostra-se que a incerteza na altura de onda é:

$$\Delta w = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta w_n\right)^2}$$

com f sendo a função, w o desvio e x as variáveis;

$$S(O) = \frac{d(\text{pos})}{S(\text{cal})} S(\text{med})$$

onde $S(O)$ é o sinal elétrico da altura de onda, $d(\text{pos})$ o deslocamento físico do sensor, $S(\text{cal})$ sinal elétrico da calibração e $S(\text{med})$ o sinal elétrico medido.

Operando-se com os valores reais chega-se a uma incerteza nas medidas de $\pm 0,4\%$, com relação ao fundo de escala.

Considerando-se a propagação de erros em operações matemáticas, para cálculo de variáveis que dependem de valores medidos, os erros serão função da dependência entre as variáveis.

Um exemplo trabalhado por Le Mehaute (1976, p. 295) ilustra bem os desvios que ocorrem nos resultados de ensaios com modelos em escala e, nesse caso, mostra o efeito do uso de água doce no tanque de ondas. 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.

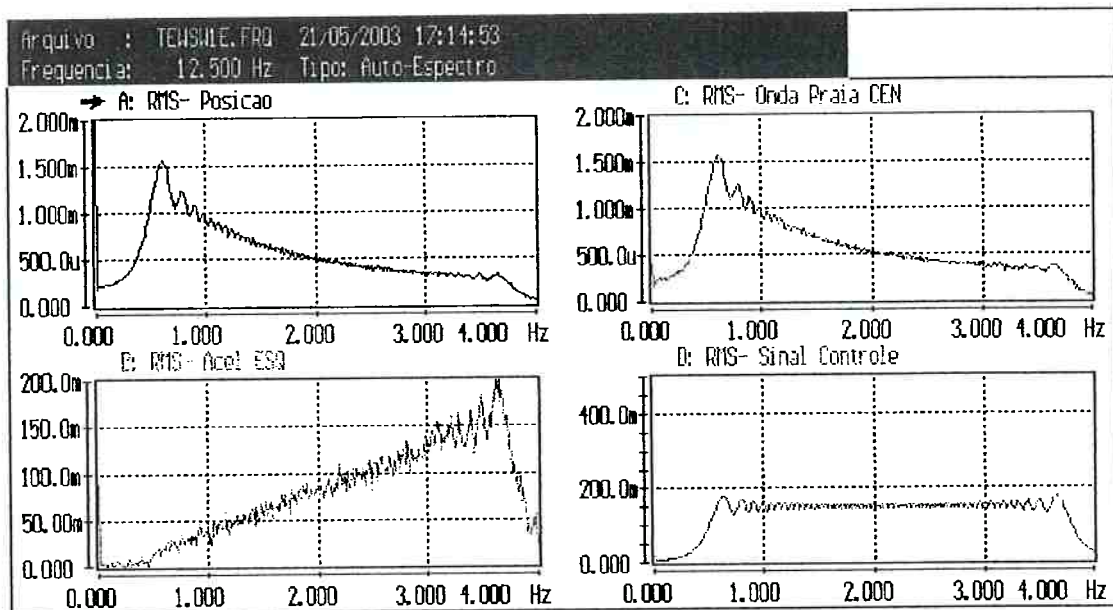


Figura 4.1 – Espectro dos sinais medidos na aferição dinâmica do ondômetro WPraiaCEN.

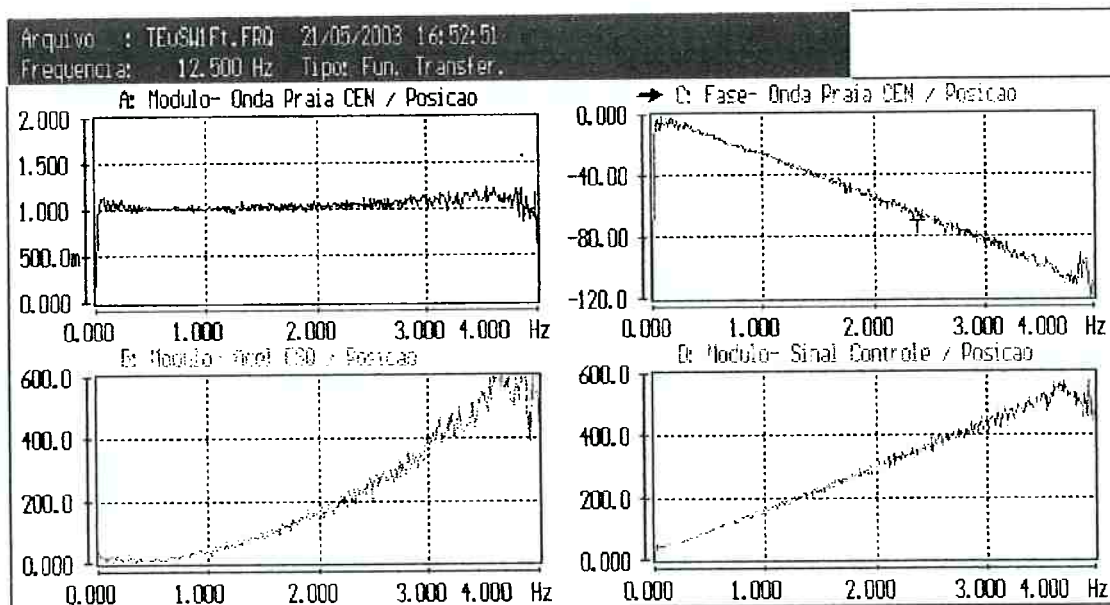


Figura 4.2 – Função de Transferência entre os sinais do ondômetro e do deslocamento imposto dinamicamente.

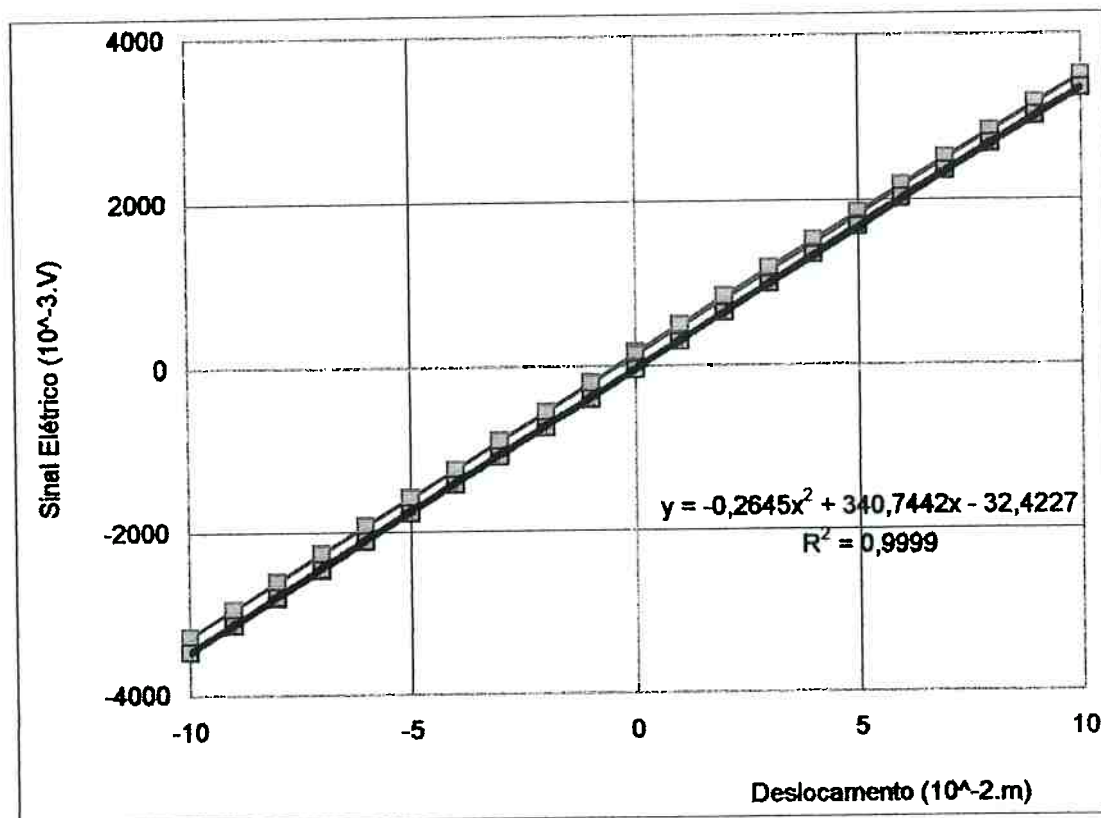


Figura 4.3 – Exemplo de curva de calibração do ondômetro WPraiaCEN.

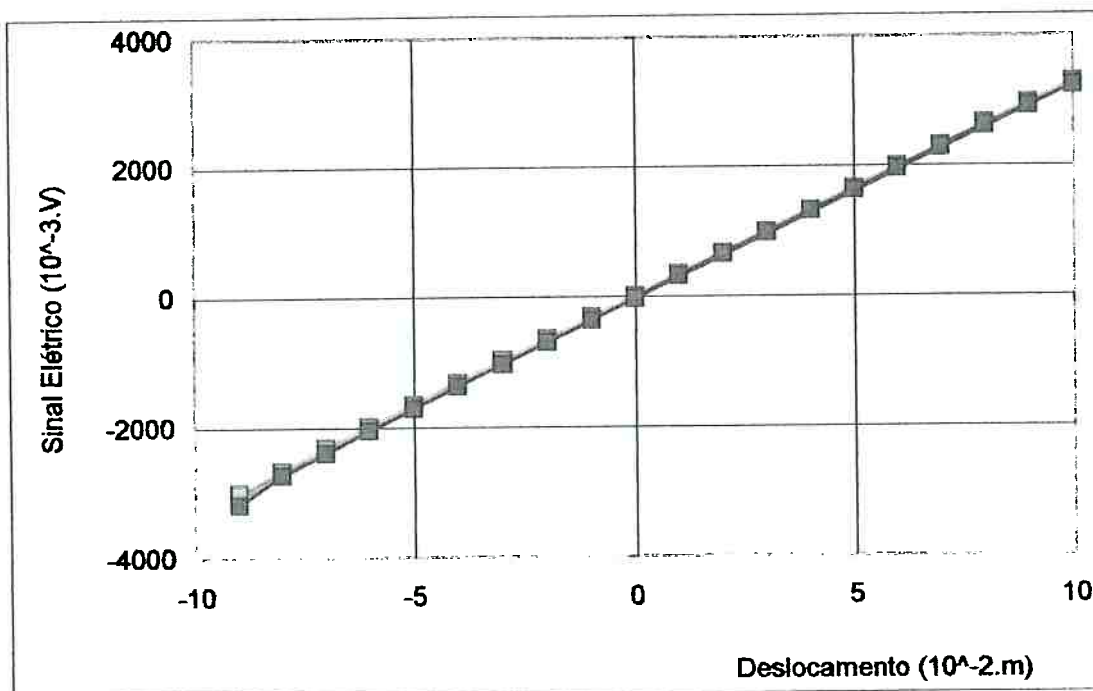


Figura 4.4 – Exemplo de curva de calibração do ondômetro WPraiaESQ.

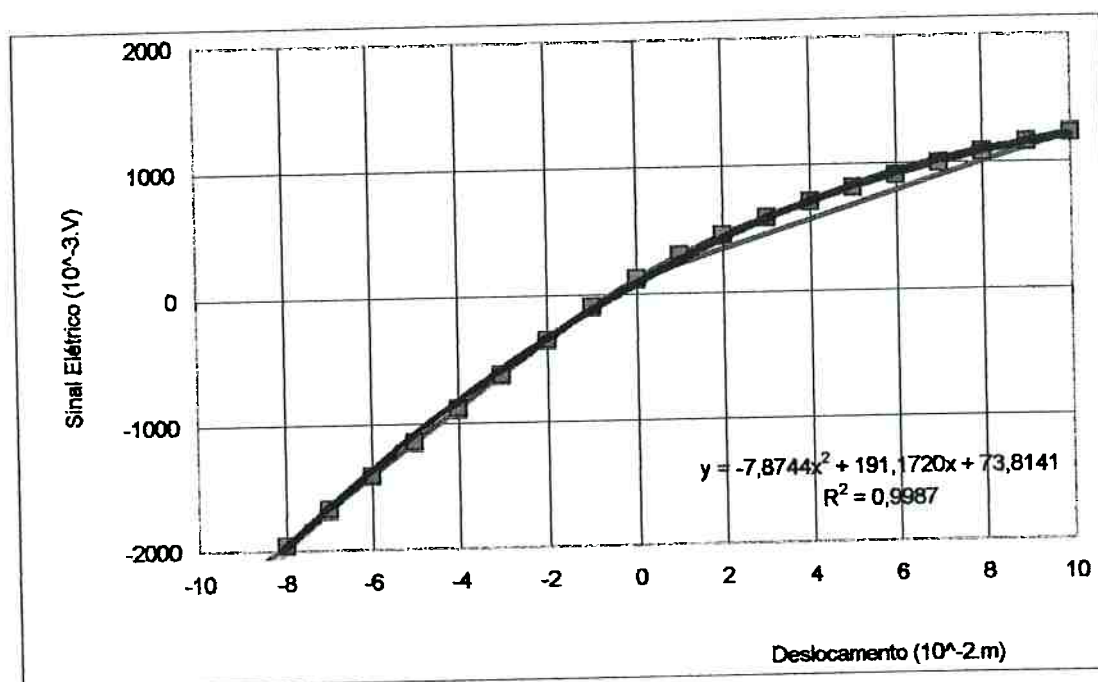


Figura 4.5 – Exemplo da não linearidade de um ondômetro com o nível d'água muito próximo de uma das extremidades do sensor.

4.2. Medidas de Ondas

Ao longo do trabalho a questão da adequação da teoria linear era recorrente e portanto tornou-se necessária uma comparação entre a forma de onda medida e aquela preconizada pela teoria das pequenas amplitudes. Para tanto algumas comparações foram feitas entre uma função cosseno e pontos realmente obtidos nos ensaios.

Os gráficos apresentados nas figuras de 4.6 a 4.10, mostram uma boa concordância, ao menos em uma avaliação visual, mesmo considerando-se que para a frequência de 0,5 Hz os pontos sofreram influência da reflexão.

A frequência de 3 Hz apresenta um desacordo com a forma de onda teoria, presumivelmente, muito mais em função de ruídos elétricos nas medidas do que não linearidades. A presença de não linearidade deveria acentuar e estreitar a crista e abater e alargar o cavado, fato que não é perceptível nos sinais coletados.

Portanto, se houve alguma não linearidade nos experimentos, este pode ser considerado pouco pronunciado e, portanto, satisfatoriamente representado pela teoria linear.

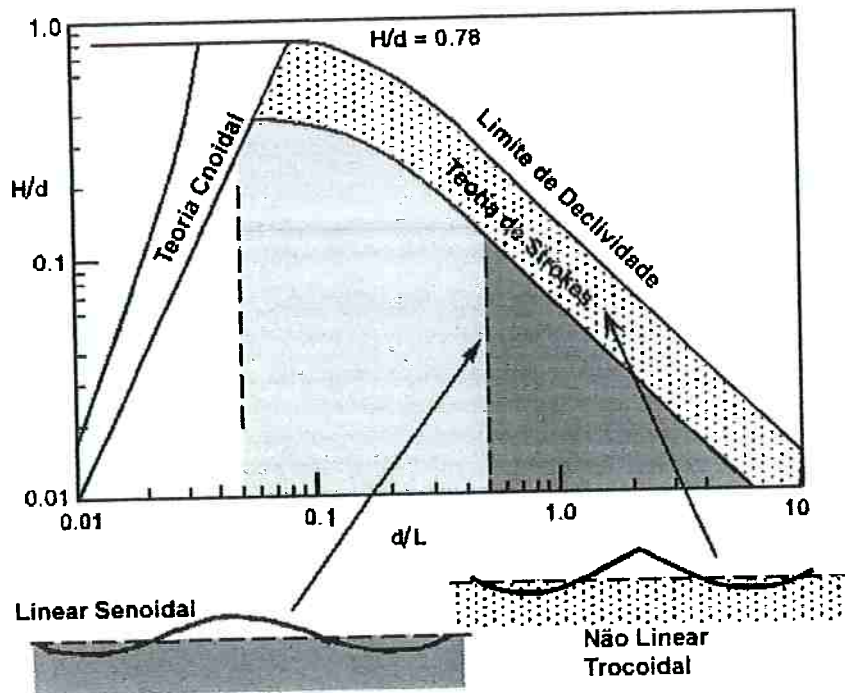


Figura 4.6 - Formas de ondas associadas às teorias aplicáveis.

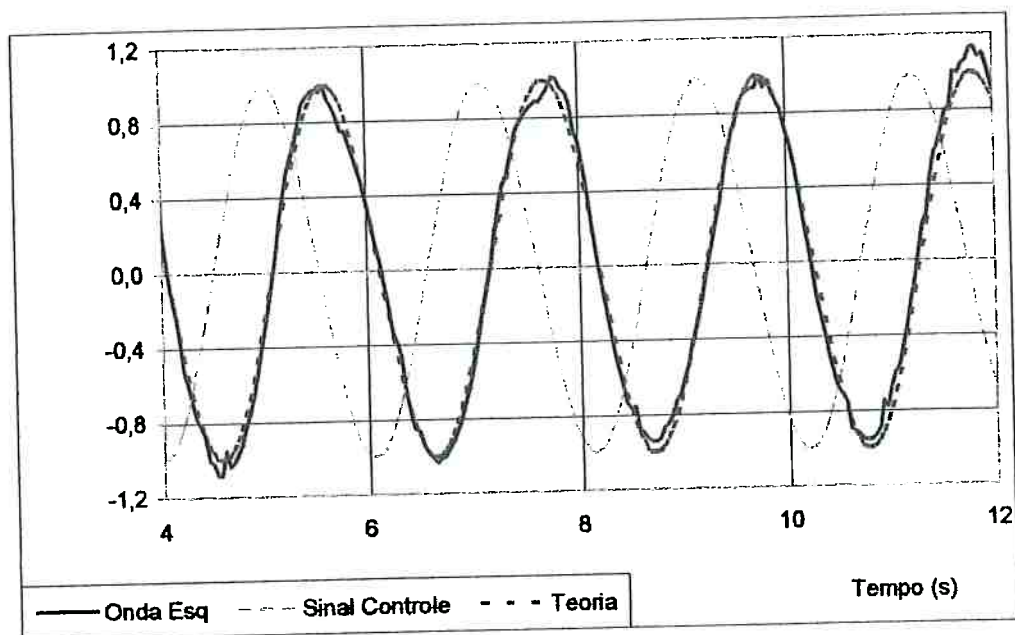


Figura 4.7 – Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WESQ.

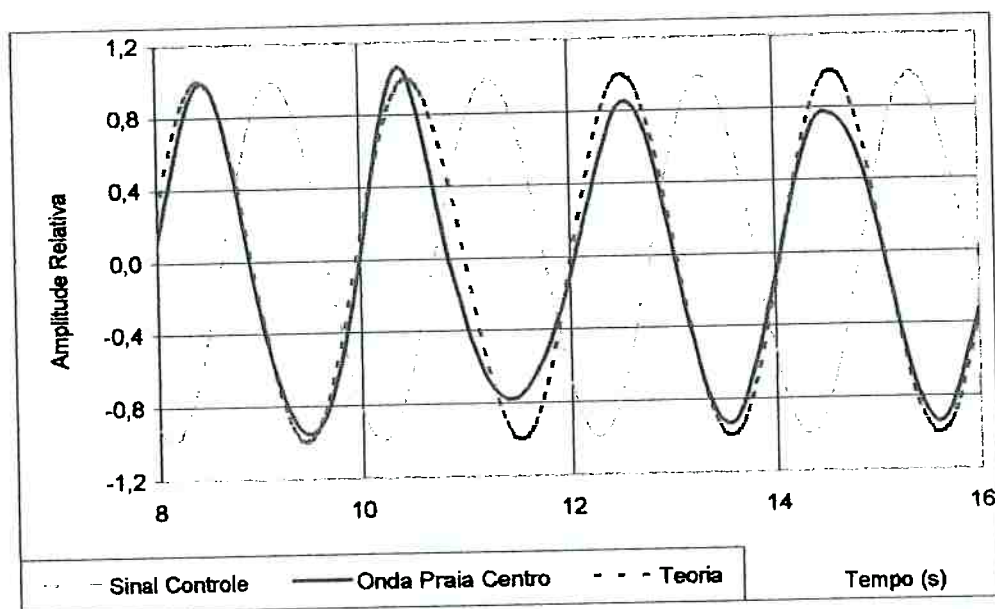


Figura 4.8 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de onda, para 0,5 Hz, ondômetro WPraiaCEN.

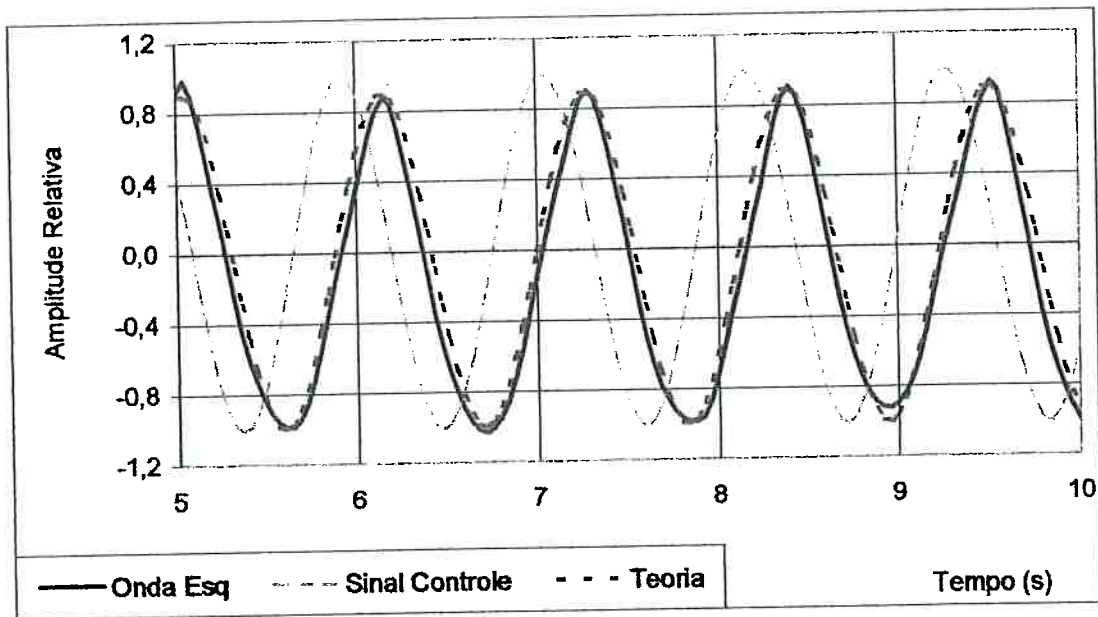


Figura 4.9 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WESQ

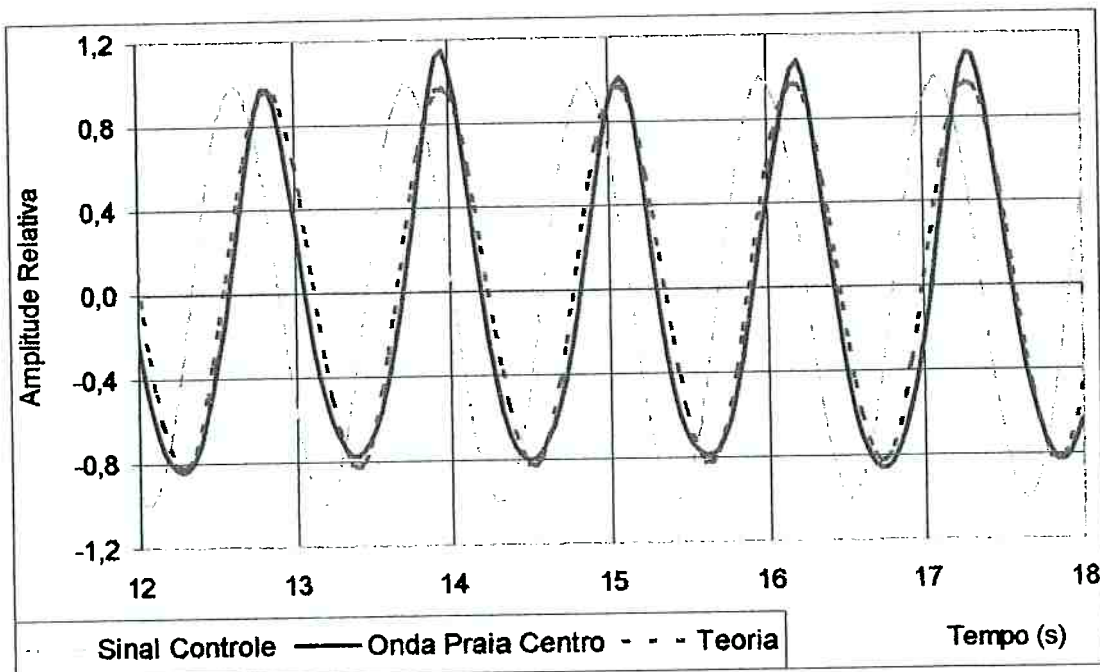


Figura 4.10 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de onda, para 0,9 Hz, ondômetro WPraiaCEN.

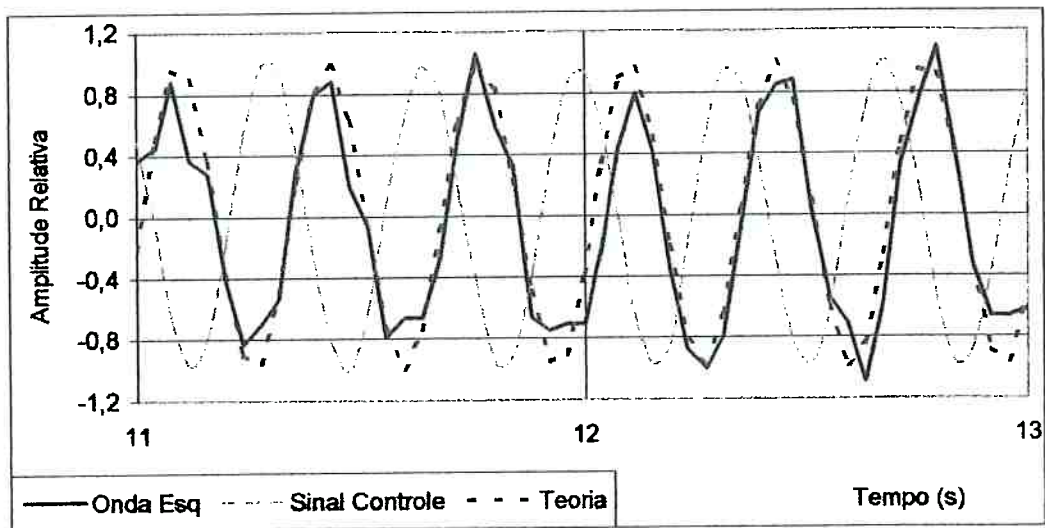


Figura 4.11 - Comparação entre cosseno teórico e pontos experimentais de onda, para 3,0 Hz, ondômetro WESQ

4.2.1. Velocidade de Propagação

Tomando-se os históricos no 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 a faixa de tempos de chegada das ondas nos ondômetros, possibilitando identificar as irregularidades dos sinais causadas pelas reflexões.

Assim, fez-se as medidas dos tempos de chegada das ondas, associados a velocidade de grupo C_g , para que não houvesse propagação de erros ao processar o dado obtido diretamente. Os resultados, confrontados com a previsão teórica, são apresentados na figura 4.11.

De modo geral, as medidas comparam-se bem com a teoria, apresentando diferenças que podem ser devido às incertezas ou a algum fenômeno das ondas, ainda não suficientemente definido pelas medidas. Observa-se que, há uma tendência dos tempos medidos serem ligeiramente maiores do que os previstos para comprimentos de onda menores e distâncias maiores.

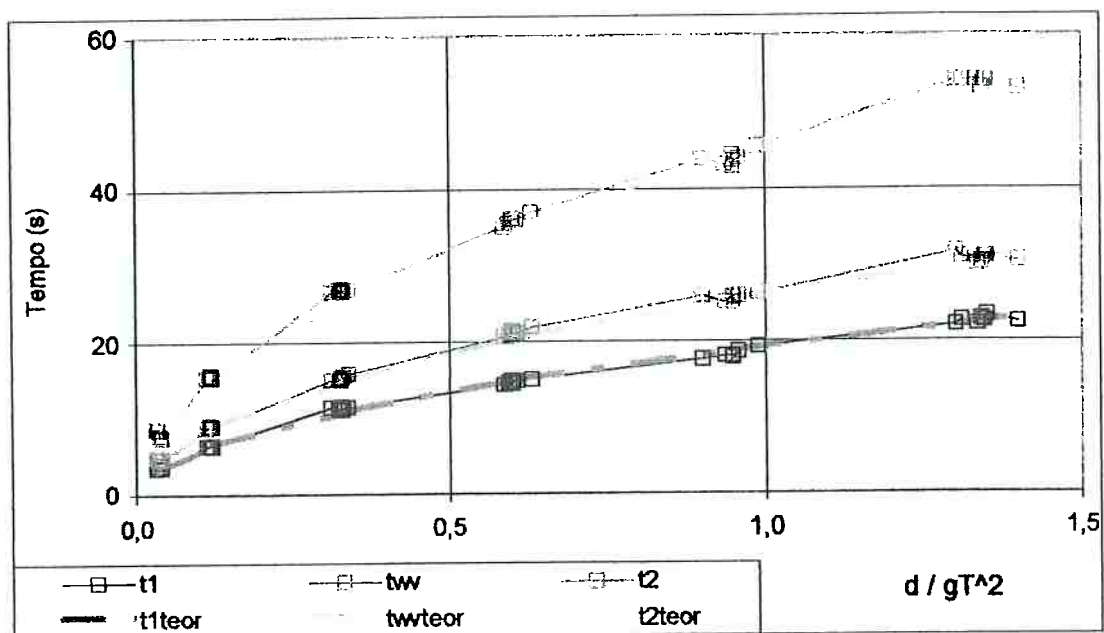


Figura 4.12 – Gráfico comparativo entre o tempo de percurso medido e o teórico, .

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 0,02 Hz. Exceções ocorreram quando houve surgimento de oscilações transversais no tanque, tipicamente metade da freqüência excitadora.

Para auxiliar na identificação das freqüências transversais do tanque que aparecem nas medidas, realizaram-se algumas medidas de alturas de onda remanescente no tanque, ou seja, o denominado “ruído de fundo”. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores calculados e medidos, para efeitos de comparação.

As freqüências fundamentais calculadas, para as direções longitudinal e transversal do tanque, e longitudinal da parte traseira do atuador, comparam-se muito bem com as medidas, sendo que nas medidas aparecem ainda múltiplos inteiros dessas fundamentais.

As alturas de ondas medidas, quando confrontadas com o deslocamento do atuador, apresentam o comportamento ilustrado na figura 4.12

Tabela 4.2 – Comparação entre os autovalores calculados do tanque e as frequências determinadas no ruído de fundo.

Modo	Long	Transv	Atrás do atuador		Medidas	Obs.
			n	f _n		
1	0,098	0,347	1	0,806	0,0977	
2	0,138	0,491	2	1,140	0,390	4 x f ₁
3	0,169	0,601	3	1,396	0,488	5 x f ₁
4	0,195	0,694	4	1,612	0,561	
5	0,218	0,776	5	1,802	0,757	
6	0,239	0,850	6	1,974	0,806	
7	0,258	0,918	7	2,132		
8	0,276	0,982	8	2,279		
9	0,293	1,041	9	2,418		
10	0,309	1,098	10	2,548	1,123	2 x f ₄
11	0,324	1,151	11	2,673	1,196	
12	0,338	1,203	12	2,792		
13	0,352	1,252	13	2,905	1,270	13 x f ₁
14	0,365	1,299	14	3,015		
15	0,378	1,344	15	3,121	1,331	
16	0,390	1,389	16	3,223		
17	0,402	1,431	17	3,323	1,440	
18	0,414	1,473	18	3,419		
19	0,425	1,513	19	3,513	1,502	
20	0,437	1,552	20	3,604	1,550	

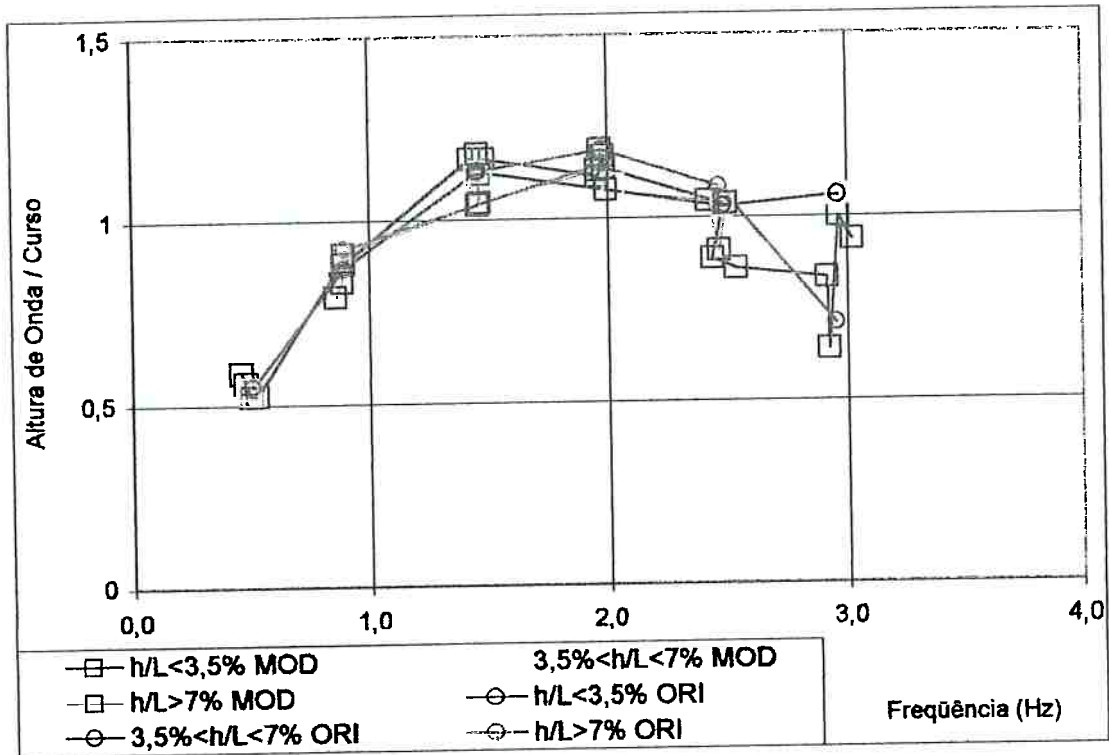


Figura 4.13 – Relação entre altura de onda e deslocamento do atuador, em função da frequência.

4.3. Funções de Transferência

Além do processamento das medidas na forma de histórico no tempo e de espectro de energia, fez-se também análises de correlação entre variáveis. Essas correlações, as funções de transferência, podem fornecer importantes subsídios para a otimização de um sistema, quando convenientemente analisadas.

Os dados foram obtidos pela geração de ondas variáveis em frequência e amplitude constante, controlada pelo gerador de sinais no modo varredura. A amplitude máxima foi definida pelo máximo valor na máxima frequência, para preservação da integridade do atuador. A faixa de frequências definida foi de 0,5 Hz a 3,2 Hz, variadas continuamente com 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.

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 4.13 e 4.14 são apresentadas as curvas referentes ao módulo e fase da função

Notem-se as significativas alterações nas curvas das funções, após as modificações, com a maior sendo a resposta em fase, que mostra um atraso progressivo a partir de 2,5 Hz.

Também são mostradas as curvas da função de transferência entre onda e posição, ressaltando-se que na figura 4.13 o sinal da onda está atenuado em metade do valor. Novamente o ponto de destaque ocorre a 2,5 Hz, quando ocorre um decréscimo no módulo da função.

Esses gráficos comparam-se bem com aquele apresentado na figura 4.12, que foi obtido a partir de dados obtidos pela geração de ondas monocromáticas e calculado ponto a ponto.

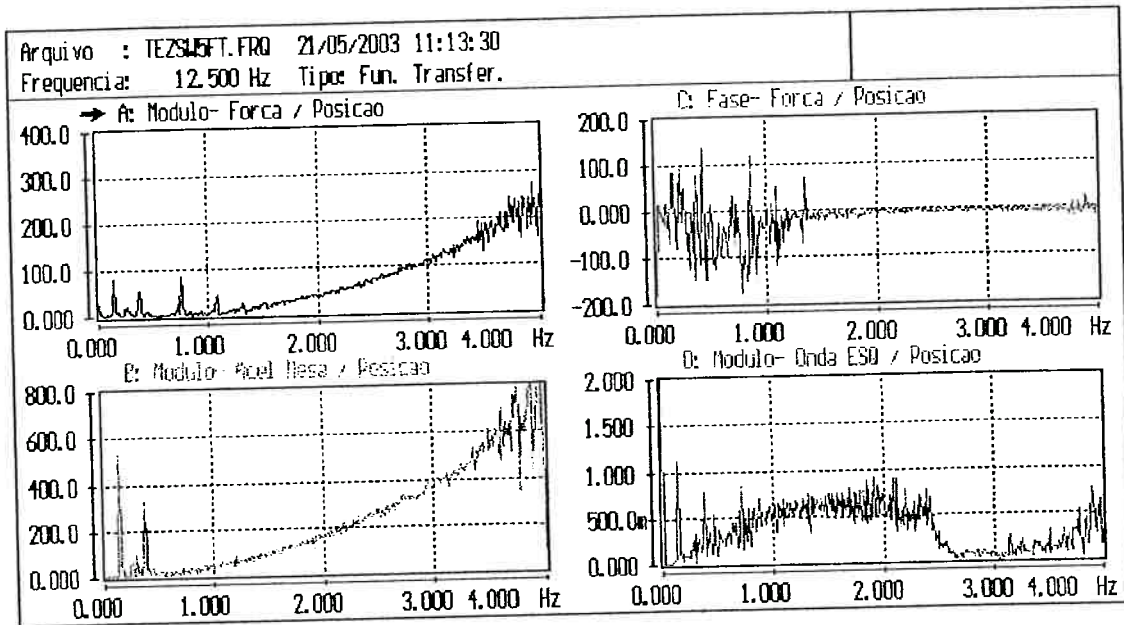


Figura 4.14 – Função de Transferência mostrando as ressonâncias na parte atrás do atuador

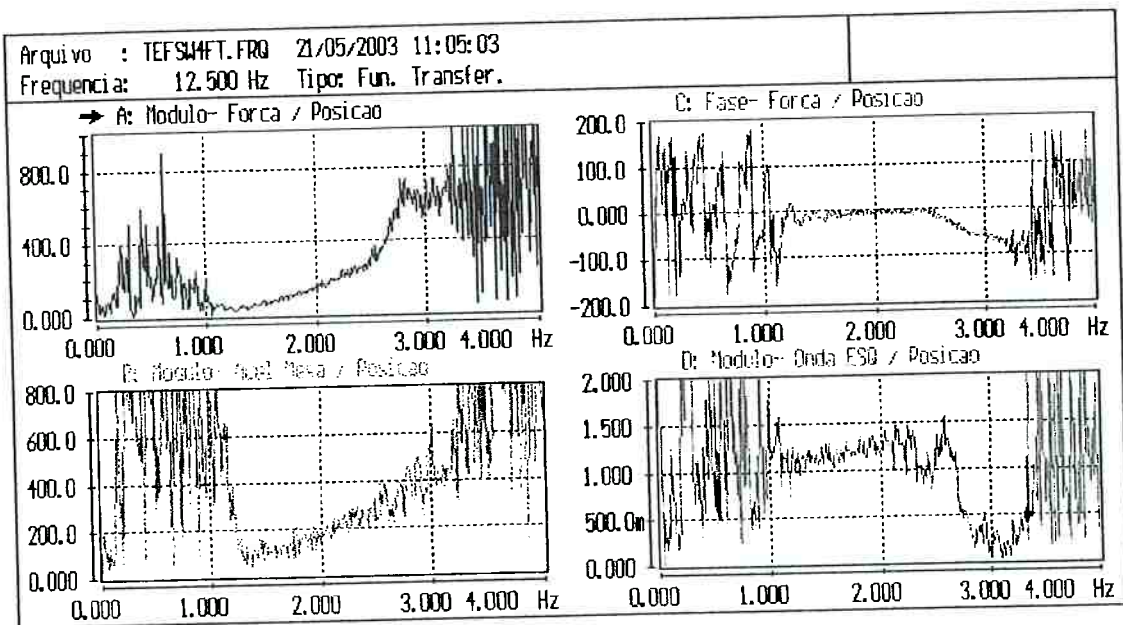


Figura 4.15 – Função de Transferência mostrando as ressonâncias na parte atrás do atuador, após modificações.

4.3.2. Ondas

Uma forma direta de examinar-se a qualidade da onda é comparar 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, são muito úteis para comprovar se as alturas de onda são homogêneas e se a frente de onda é uniforme, retilínea e ortogonal as paredes.

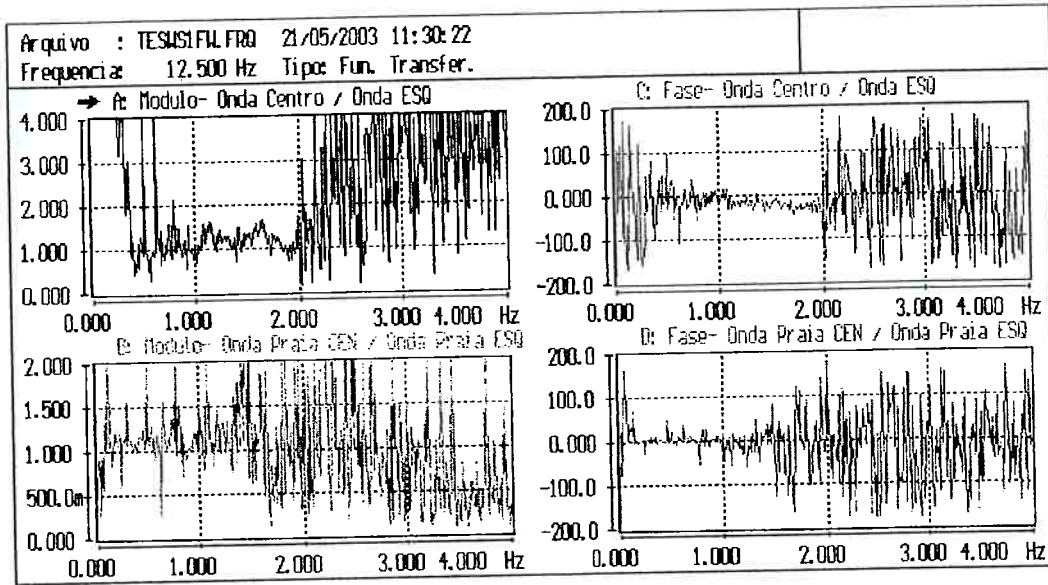


Figura 4.16 – Comparações entre as funções de transferência das ondas medidas nos vários pontos do tanque.

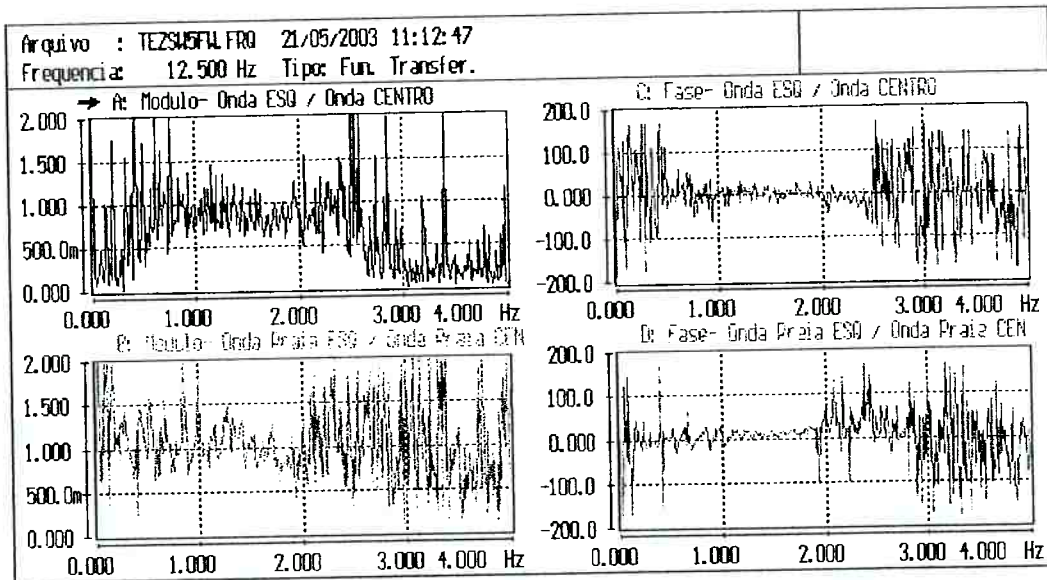


Figura 4.17 - Comparações entre as funções de transferência das ondas, após as modificações.

4.4. Dissipação de Ondas

Um fator muito importante para a avaliação da qualidade da onda é a constância da forma, amplitude e frequência. Deve-se garantir que a energia propaga-se de forma constante ao longo do tanque, mas isso nem sempre acontece mesmo em um tanque de ondas. A dissipação da energia da onda pode ocorrer pela atenuação ou pela absorção.

A atenuação é a diminuição da altura em função da distância percorrida, enquanto a absorção é a diminuição da altura por fenômenos físicos que consomem parte dessa energia, por exemplo a quebra da onda. Adiante, serão mostrados os gráficos referentes à dissipação de energia pelos efeitos citados, em função dos fenômenos mencionados.

4.4.1. Atenuação

As alturas de ondas, dos ondômetros a montante e a jusante, foram usadas no cálculo da atenuação e posteriormente em análises em frequência, que resultaram nas funções de transferência.

O resultado obtido é apresentado graficamente na figura 4.17

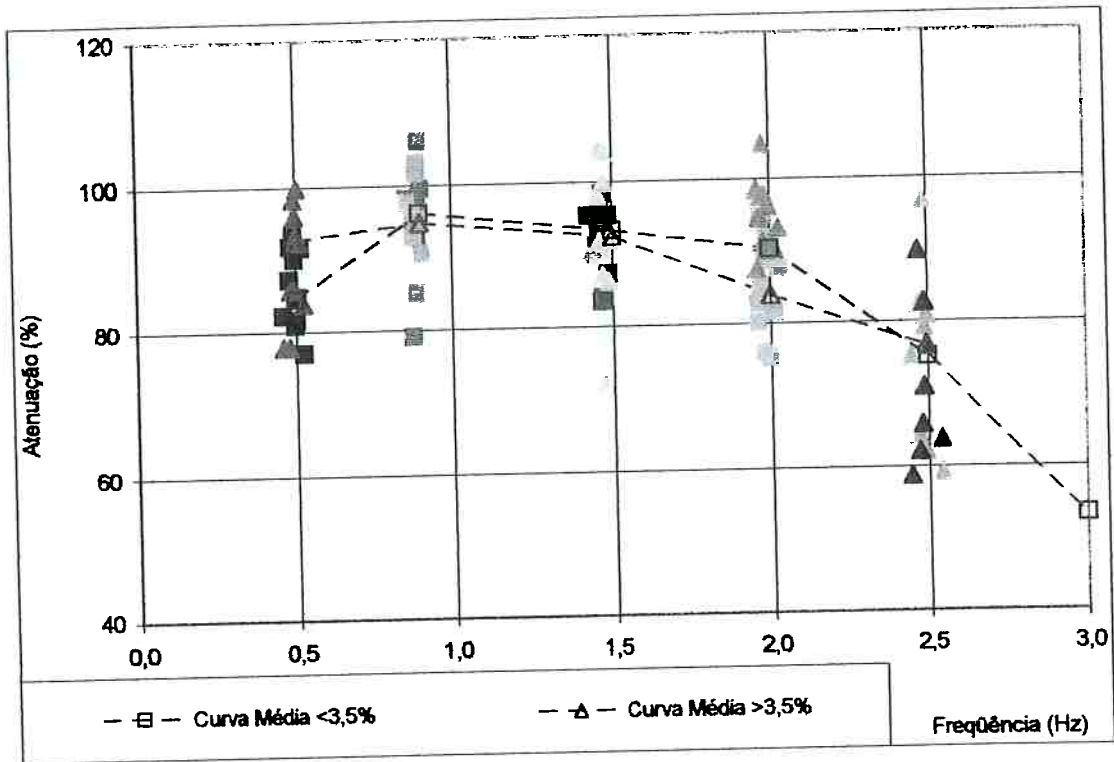


Figura 4.18 – Curvas de atenuação da altura de onda.

4.4.2. Absorção

O fenômeno da absorção dá-se preferencialmente nas estruturas absorvedoras, as praias artificiais, construídas nos tanques para impedir 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 é o coeficiente de reflexão, que é a relação entre as alturas da onda incidente e da onda refletida. 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, algumas delas experimentais. Ao longo desta pesquisa, tentou-se empregar pelo menos dois dos métodos experimentais mais conhecidos, mas após várias tentativas infrutíferas, recorreu-se à formulação de Miche.

Os dois métodos experimentais para medida do coeficiente de reflexão utilizados implicam na determinação freqüência e da fase da onda. Com a resolução temporal empregada neste trabalho, função da freqüência de amostragem, as resoluções de freqüência e de fase medidas implicaram em uma variação inaceitável do coeficiente de reflexão.

Como exemplo da variabilidade do resultado calculado, pelo método de xxxx, em função dos valores medidos, construiu-se a tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exemplo da variação da amplitude da onda refletida em função das resoluções em frequência e fase.

Freq	Onda	t1	amp t1	t2	amp t2	Fase	Onda reflet.	Coef. Reflex	Desvio (%)
0,51	80	9,7	84	10,185	0	1,5335	28,805	0,360	0
0,51	80	9,7	84	10,180	0	1,5205	30,093	0,376	4,44
0,51	80	9,7	84	10,220	0	1,6719	19,958	0,249	-30,8
0,50	80	9,7	84	10,220	0	1,1848	70,002	0,875	143,1

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 4.18. Alternativamente, empregou-se uma formulação totalmente empírica, também em conjunto com valores medidos, resultando este procedimento no gráfico da figura 4.19.

Nota-se que, a forma geral, a tendência do coeficiente de reflexão, é semelhante nos dois casos, mesmo um sendo teórico e outro empírico. 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.

Conclui-se que, as modificações feitas no tanque atingiram o objetivo de diminuir a reflexão, resultando em um coeficiente médio da ordem de 5%, em toda a faixa de freqüência definida como de interesse para este trabalho.

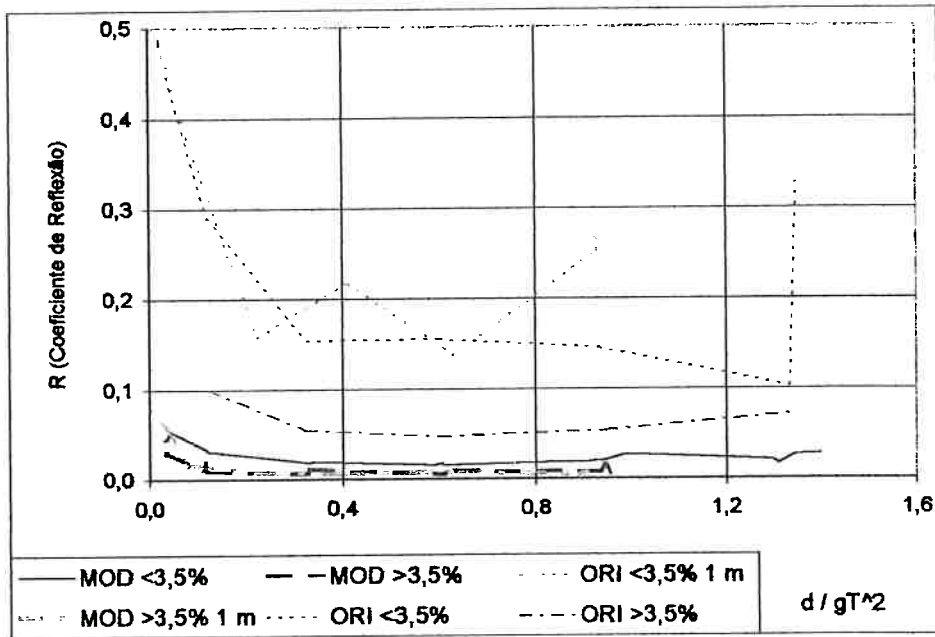


Figura 4.19 – Coeficiente de Reflexão determinado pela fórmula de Miche e valores medidos.

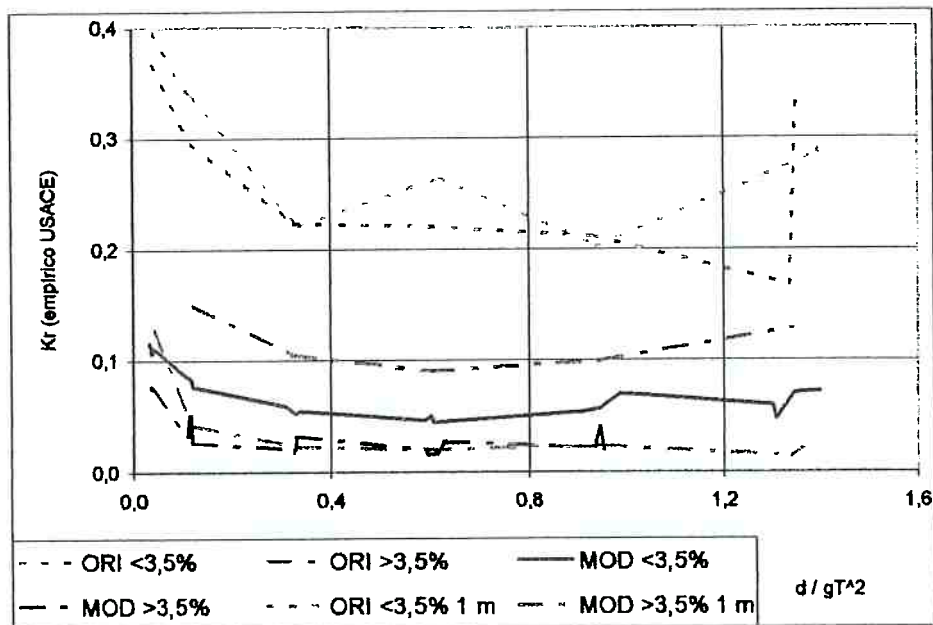


Figura 4.20 – Coeficiente de Reflexão determinado pela formulação empírica usada pelo USACE.

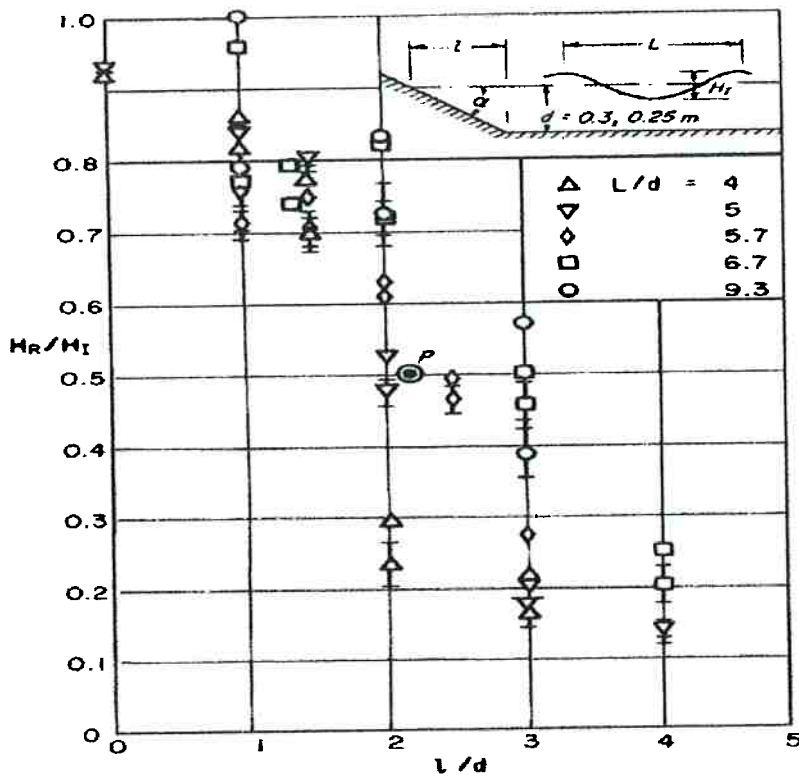


Figura 4.21 - Coeficientes de reflexão em absorvedor potencial, conforme Wiegel (1964)

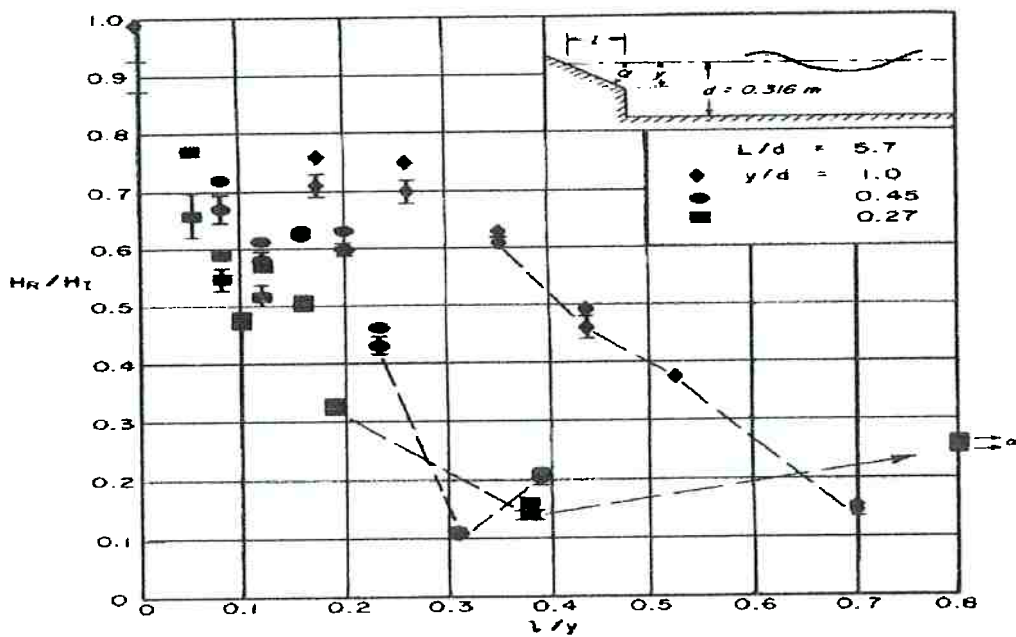


Figura 4.22 - Coeficiente de Reflexão em prais com ressalto, conforme Wiegel (1964)

Pelas análises elaboradas, com base nas variáveis medidas, nota-se que as modificações introduzidas foram efetivas na redução das reflexões das ondas, notadamente para frequências acima de 0,9 Hz.

Também o método de análise empregado mostrou-se importante para a coerência dos resultados.

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 um tanque de ondas de dimensões reduzidas pode ser utilizado para ensaios com vistas a Engenharia Oceânica.

No entanto, diferentemente de tanques com centenas de metros de extensão, a interpretação dos dados de ensaio é muito mais sensível ao operador e sujeita a dispersão. Portanto, uma atenção especial deve ser dada a redução dos dados, e o pessoal a cargo dessa missão deve ser experiente no assunto ou muito bem treinado para a tarefa.

Constatou-se que, variações dentro do limite da resolução da frequência de amostragem pode produzir erros inadmissíveis no cálculo de coeficiente de reflexão. Isso pode ocorrer em ensaios com modelos, visto que a escolha do ponto a ser determinado no histórico no tempo de uma onda depende do operador.

Uma redução de dados automatizada está descartada pois existem um número muito grande de variáveis a serem consideradas e algumas delas são subjetivas. Portanto, a qualidade da onda e a redução de dados deve ser feita manualmente por pessoa especializada.

O processamento dos dados colhidos deve obedecer critérios mínimos que garantam a sua fidelidade e principalmente que sejam reprodutíveis. Análises de variáveis no tempo não têm sido suficientes para determinar a qualidade de ensaios 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 a geração da onda. Em especial, o sistema de geração de onda pode ser devidamente investigado através de funções de transferências.

5.1. Definição das Faixas de Utilização

A definição do intervalo de frequências que podem ser úteis para os ensaios no tanque é feita a partir das análises dos dados obtidos. Considerando-se que, já na frequência de 0,5 Hz ocorrem reflexões e um máximo de três ciclos podem ser conseguidos, livres das influências e que para frequências mais baixas a tendência é ter menos ciclos sem reflexões, pode-se concluir que esta será a menor frequência útil para ensaios no tanque.

No outro extremo, teoricamente mostrou-se que devido a ocorrência de ondas capilares, e estas representam um fenômeno diferente das ondas gravitacionais, o limite máximo está nas vizinhanças de 3 Hz. Por outro lado, examinando-se os registros gráficos, evidencia-se que acima de 2,5 Hz ocorrem várias dispersões dos valores experimentais em relação a teoria.

Seria prudente afirmar então que o limite superior das frequências úteis para ensaios no tanque fica em torno de 2,5 Hz. Assim, evita-se também uma faixa de frequências onde ocorrem muitas ressonâncias, distorcendo a onda gerada.

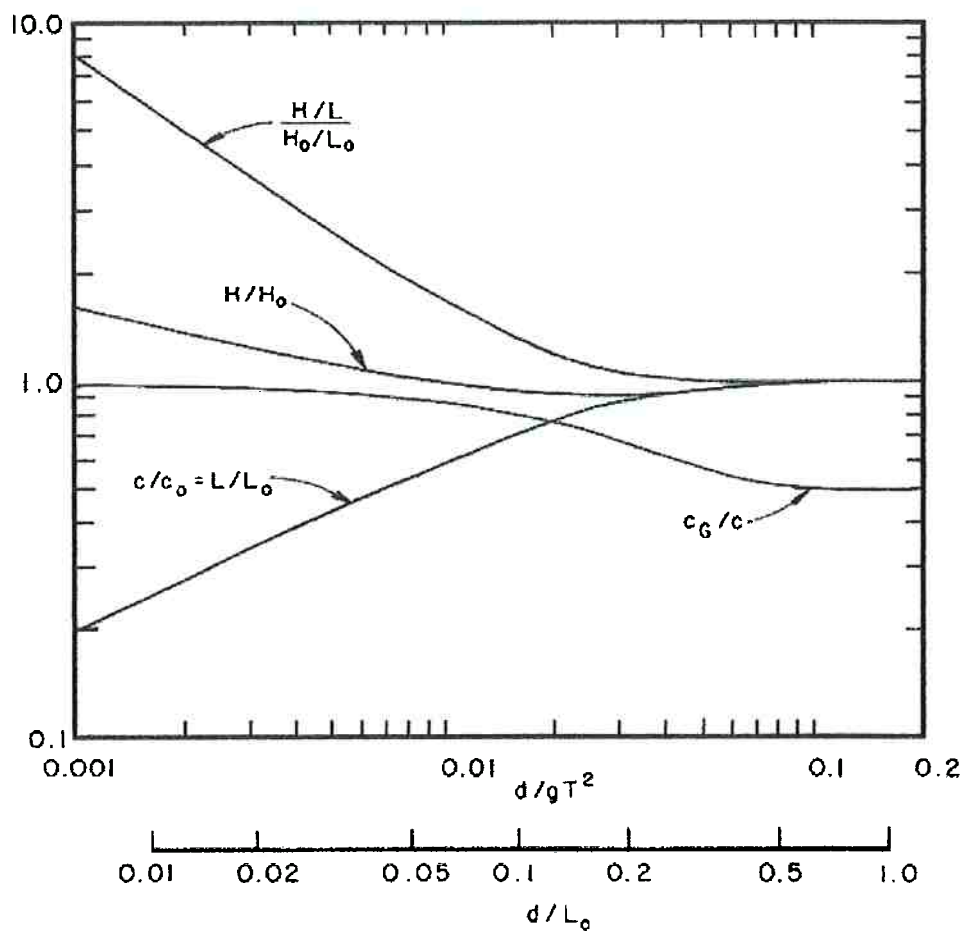


Figura 5.1 - Variação de parâmetros de ondas em função da profundidade relativa

5.2. Proposta de Metodologia

No início da redução de dados ficou claro que um procedimento usual de análise e interpretação dos registros seria inadequado, visto que o tanque de dimensões reduzidas produz ondas refletidas que interferem com as ondas geradas.

Esta interferência não poderia ocorrer antes de 10 ciclos, conforme sugerido pela ITTC, que também limita o máximo de ciclos em cerca de 40 a 50, após os quais a onda pode sofrer instabilidades.

Entretanto, mesmo não seguindo as recomendação, uma onda que sofreu reflexão pode ser convenientemente empregada para ensaios. Para tanto é preciso uma metodologia específica, nos moldes da metodologia empregada nesta pesquisa.

O princípio da boa análise é a garantia de uma boa aquisição de dados, que por sua vez só é possível com instrumentos adequadamente calibrados e instalados. Calibrações e aferições, estáticas e dinâmicas, devem ser executadas no início dos trabalhos, em todos os instrumentos.

Ao longo da execução dos ensaios é recomendável que os instrumentos sejam aferidos periodicamente. Particularmente o ondômetro deve ser aferido todos os dias de ensaios e mantido sempre nas mesmas condições. A parte sensora, no caso o filamento metálico deve estar sempre limpo e conservado, devendo ser tirado da água sempre que não estiver em uso.

As propriedades fisico-químicas da água do tanque devem ser mantidas constantes, visto que esta interfere sobremaneira nos parâmetros do ondômetro resistivo.

A forma de análise do histórico no tempo deve considerar as eventuais interferências, no caso de ondas o absorvedor, e mapear os tempos de chegada da onda para criar um critério de escolha do ciclo de onda a ser medido.

Também é importante uma interpretação das funções de transferência para que seja garantida a qualidade do resultado final.

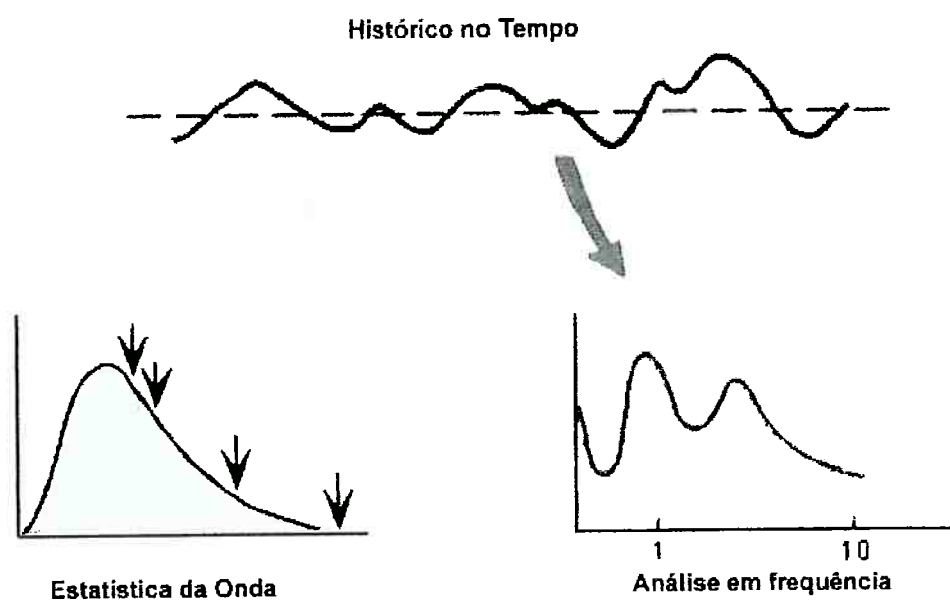


Figura 5. - Esquema ilustrativo das análises efetuadas.

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 comentou-se neste trabalho os geradores de ondas com termos de segunda ordem e nem os absorvedores ativos.

Os absorvedores ativos, geradores de onda trabalhando ao inverso, são particularmente interessantes para serem instalados em tanques de dimensões reduzidas por promoverem a dissipação da energia da onda sem necessidade de espaço físico.

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 :

- investigar as limitações de uso de tanques, em função das dimensões e dispositivos de ensaio;
- estudar absorvedores viscosos, telas, e o uso em tanques de dimensões reduzidas;
- desenvolver técnicas de ensaios para determinação de coeficiente de reflexão, de modo mais realista e mais prático;
- estudar formas de acionamento e geração de ondas que eliminem ou minimizem os transientes e sinais espúrios;
- aperfeiçoar técnicas e metodologias de ensaio e análise de dados, para aplicação em tanques de dimensões reduzidas; e
- avaliar o custo benefício do uso de gerador e absorvedor dinâmico em tanques de dimensões reduzidas.

Finalmente, espera-se ter contribuído para o tema aqui desenvolvido, não só pela parcela de conhecimento concretizado ao longo desta pesquisa, mas também pelo questionamento das idéias 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 exibe 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.

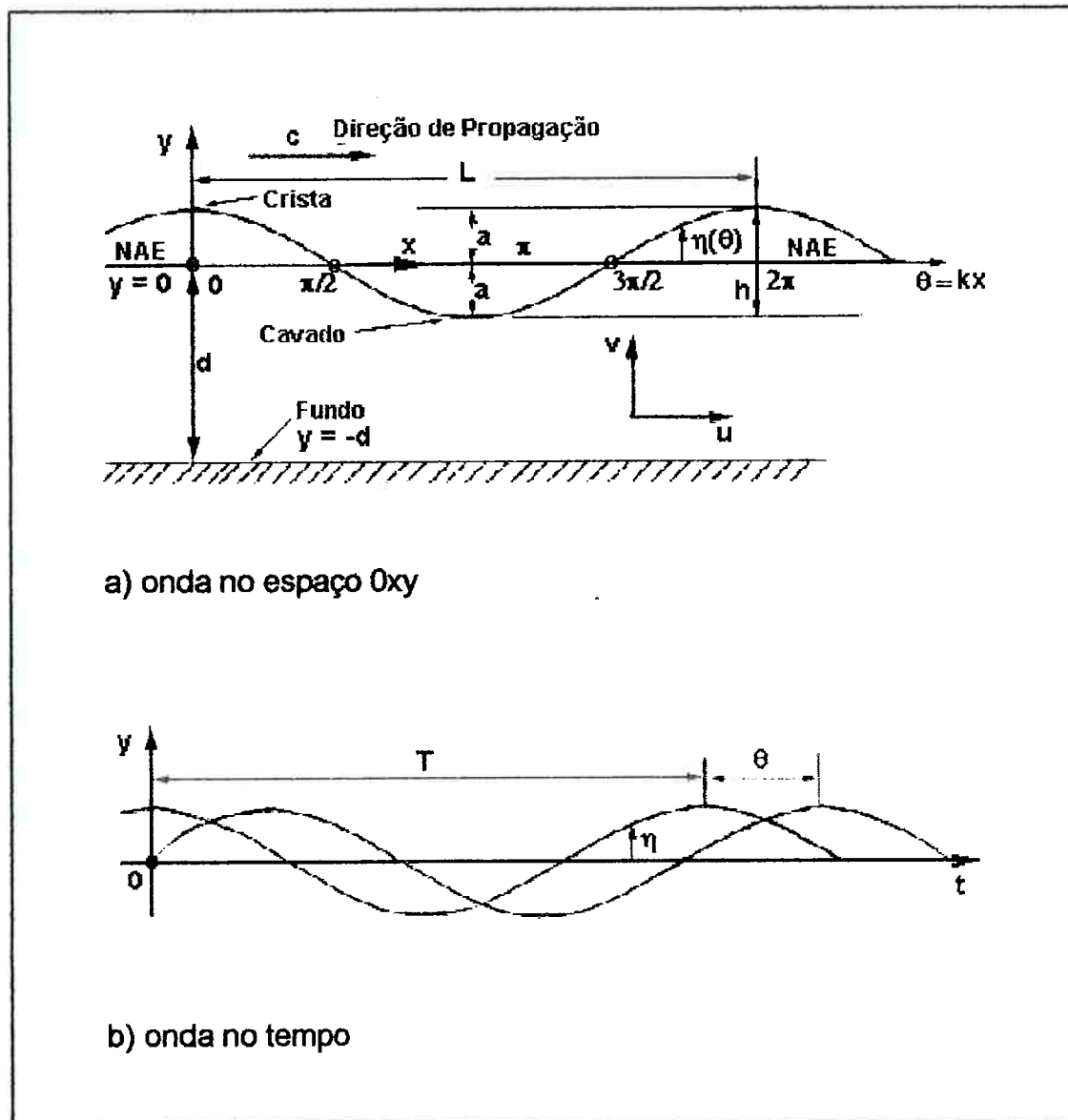


Figura A.1.1 - Ilustração dos parâmetros de uma onda.

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 2.3, 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, forçadas, do tipo que propaga apenas a energia.

A.1.2 - Fenômenos de Propagação

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 o atrito com o fundo, causando uma transformação na onda. Diz-se que, a onda começa a "sentir" o fundo e, assim, ocorre o fenômeno da refração. Essas e outras afirmações a seguir são corroboradas por vários autores, tais como Horikawa (1978), Stewart (2002) e Wiegel (1965)

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 uma região onde o fundo é 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 e tende a curvar-se em direção a praia. Seria como se a região do fundo mais elevada e mais próxima da praia servisse como um apoio que pivota a frente de onda redirecionando-a para uma situação paralela à linha da 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. Como contra exemplo, em um quebra-ondas feito de pedras justapostas, permeável, parte da onda é refletida, parte é dissipada ao passar por entre as pedras e parte dela 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 atrito 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.

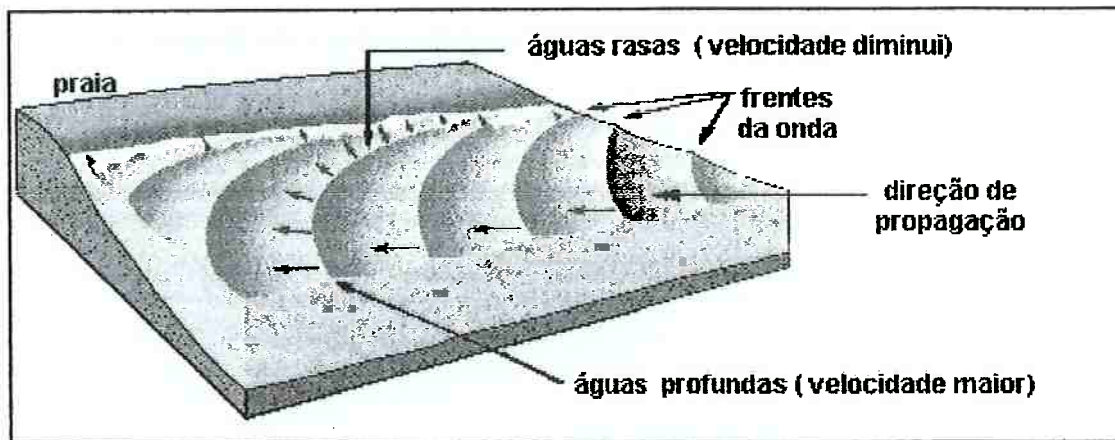


Figura A .1.2 - Ilustração da refração de ondas chegando em águas rasas, com as frentes de ondas alinhando-se paralelas à costa.

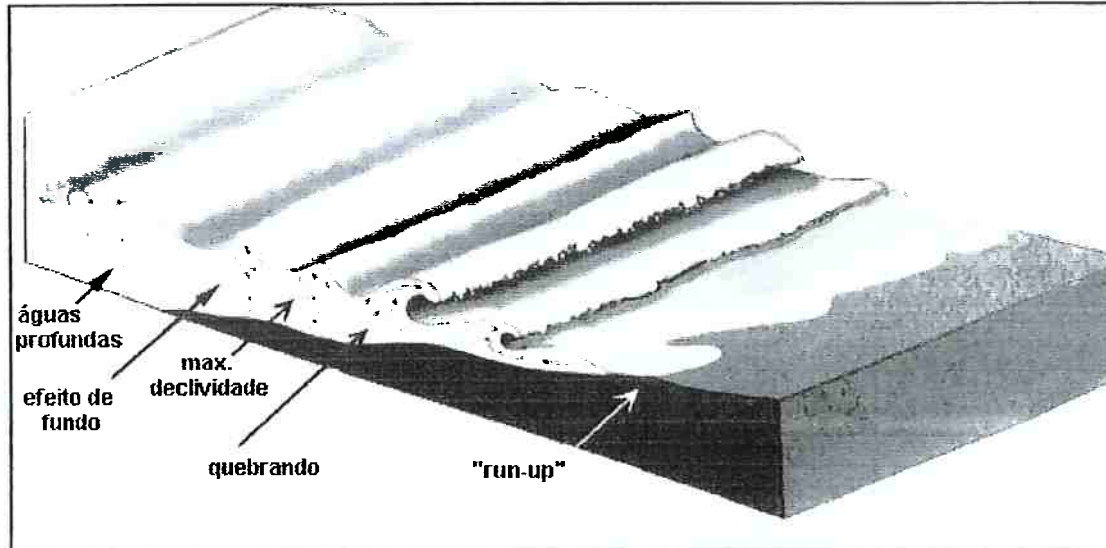


Figura A .1.3. - Evolução das ondas do mar aberto para a praia, destacando-se o movimento das partículas submersas.

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.

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. Após estas considerações fenomenológicas, onde pretendeu-se destacar a Física das ondas oceânicas, serão apresentadas as bases matemáticas correspondentes aos casos de interesse.

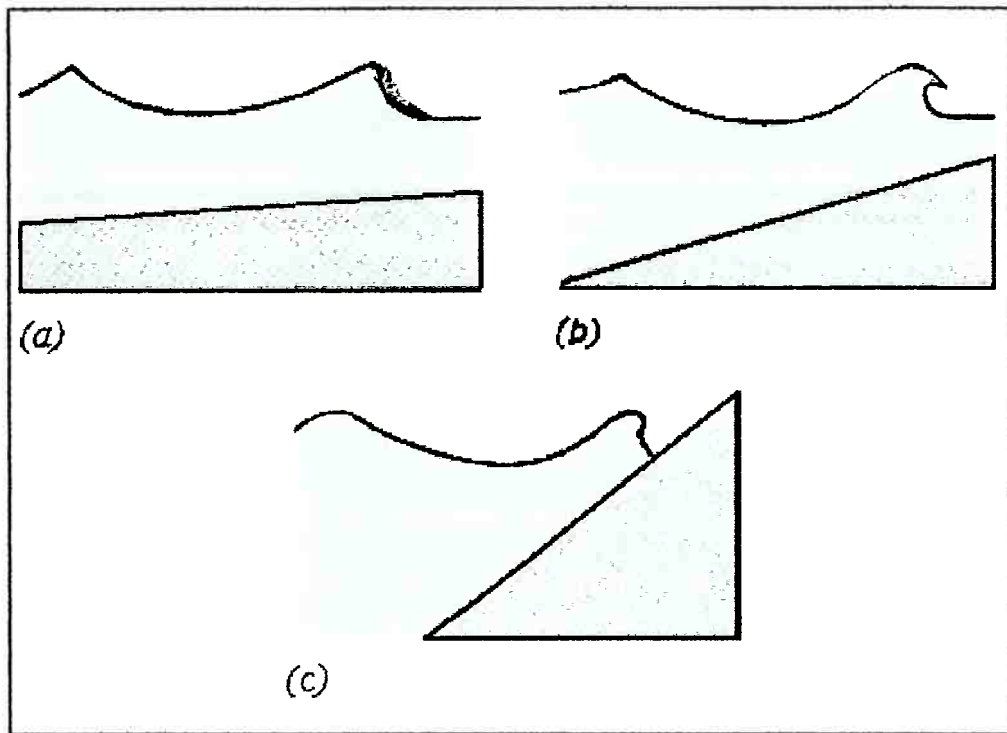


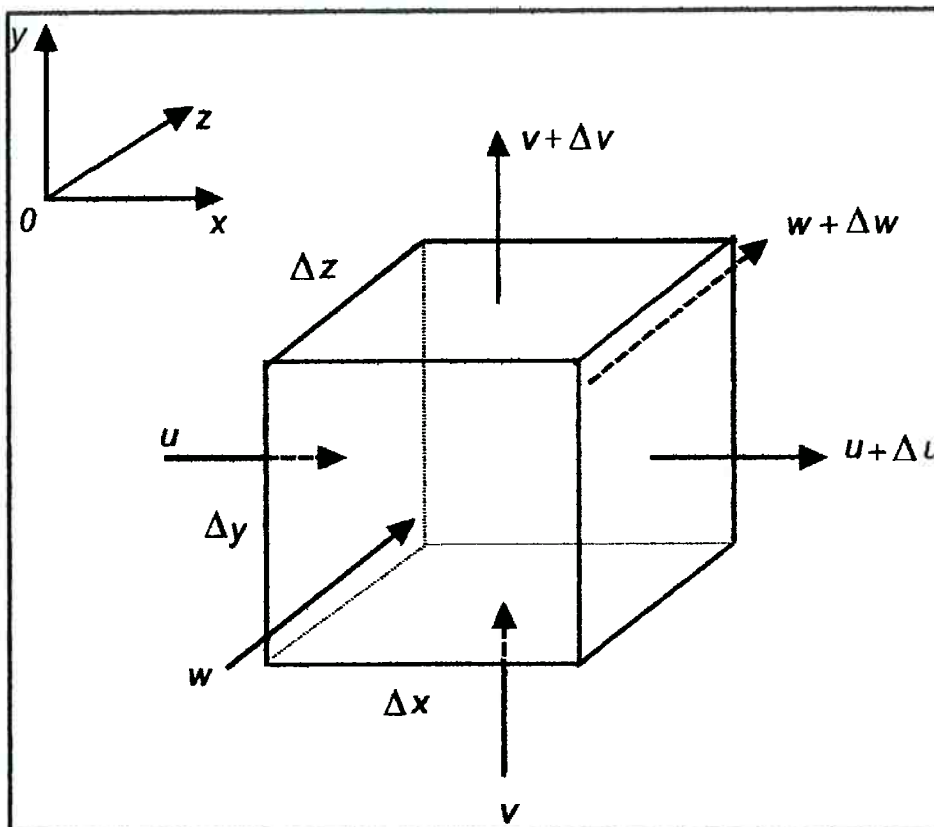
Figura A.1.4 - Modos como uma onda quebra na praia:
a) derrame, b) espiral e c) vagalhão.

ANEXO 2

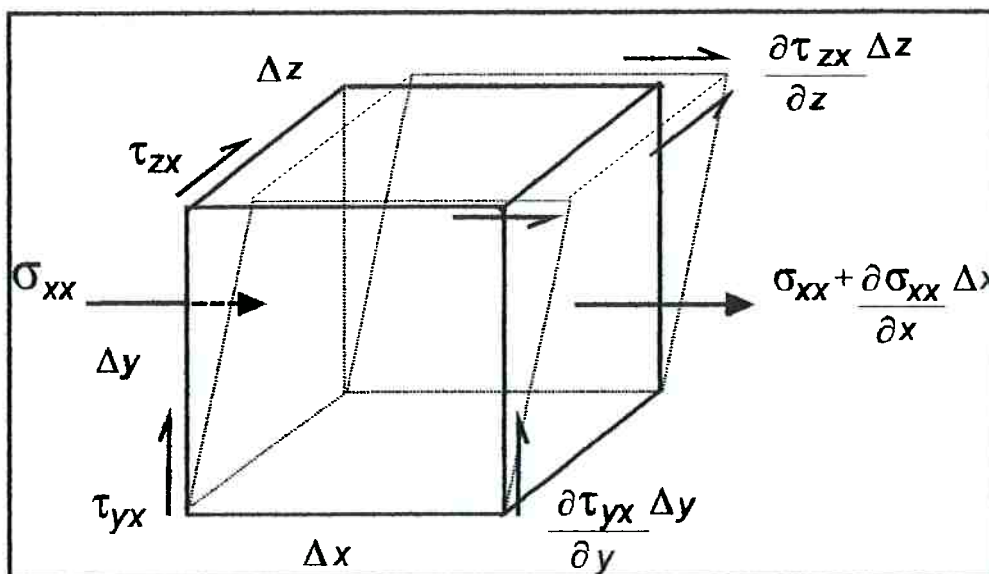
A .2. - BREVE SÍNTESE DA FORMULAÇÃO DA TEORIA DE ONDAS

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 Δx , Δy , Δz , 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.

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



a) Velocidades



b) Tensões

Figura A.2.1 - Representação da porção elementar de um fluido sujeito a um fluxo com velocidade V e correspondentes esforços.

Na face Oyz , na direção positiva de x :

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} (\Delta y \Delta z) = \rho u (\Delta y \Delta z) \quad (1)$$

Homologamente, para y e z resulta $\rho v (\Delta x \Delta z)$ e $\rho w (\Delta x \Delta y)$, respectivamente.

Na face $Oyz+dx$, na direção positiva de x :

$$\frac{\Delta m_4}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(u + \Delta u) \Delta y \Delta z \quad (2)$$

$$\frac{\Delta m_5}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(v + \Delta v) \Delta x \Delta z \quad (2.a)$$

$$\frac{\Delta m_6}{\Delta t} = (\rho + \Delta \rho)(w + \Delta w) \Delta x \Delta y$$

Conservação da massa total M em $Oxyz$, sabendo-se que $M = \rho V$:

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = [(\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3) - (\Delta m_4 + \Delta m_5 + \Delta m_6)] \frac{1}{\Delta t} \quad (3)$$

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

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

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

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

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Equação da Continuidade

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla V = 0 \quad (5)$$

$$\text{Conservação da Quantidade de Movimento} \quad \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_u = \frac{\Delta(\rho v)}{\Delta t} \cdot u \quad (6)$$

Início em x :

$$x : \quad \rho u(\Delta y \Delta z)u \\ \rho v(\Delta x \Delta z)u \quad \text{e} \quad \rho w(\Delta x \Delta y)u \quad (7)$$

Final em x :

$$x : \quad \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x\right)(\Delta y \Delta z)u \Rightarrow \left(\partial uu + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial t} \Delta x\right)\Delta y \Delta z \quad (8)$$

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

$$\text{Em } x: \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \Delta V = \rho uu \Delta y \Delta z - \left(\rho uu + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} \Delta x\right)\Delta y \Delta z +$$

$$+ \rho v u \Delta x \Delta z - \left(\rho v u + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \Delta y\right)\Delta x \Delta z +$$

$$+ \rho w u \Delta x \Delta y - \left(\rho w u + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y + F_x \quad (9)$$

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

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

$$\left(\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_x \quad (10)$$

$$\left(\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_y \quad (10.a)$$

$$\left(\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = F_z \quad (10.b)$$

ou sinteticamente:-

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = F \quad \text{ou} \quad \rho \frac{dV}{dt} = F \quad (11)$$

CONSERVAÇÃO DAS FORÇAS

• SUPERFÍCIE

$$\text{Em } x: -\sigma_{xx} \Delta y \Delta z + \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (12)$$

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

cisalhamento: $\left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} \Delta y\right) \Delta x \Delta z$ e $\left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \Delta z\right) \Delta x \Delta y$ (13)

$\sigma_{xx} = -p + \tau_{xx}; \sigma_{yx} = \tau_{yx};$ e $\sigma_{zx} = \tau_{zx}$ (14)

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

$$\left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) \Delta x \Delta y \Delta z$$
 (15)

Fluido Newtoniano $\tau \approx \frac{du}{dy}$ viscoso; $\mu =$ viscosidade dinâmica

$$\tau_{xx} = \mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$
 (16)

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

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

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

Em y e z :

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

$$\left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right) \right] \Delta V \quad (17)$$

• VOLUME

Inercial

$$F_i(x) = m g(x) = 0 \quad (18)$$

$$F_i(z) = m g(z) = 0 \quad (18.b)$$

$$F_i(y) = m g(y) = (\rho \Delta x \Delta y \Delta z) g(y) \quad F_i(y) = \rho g(y) \Delta V \quad (18.a)$$

$$F_y = F_y + F_i(y) \quad (19)$$

$$F_y = \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} \right) + \rho g(y) \right] \Delta V \quad (20)$$

Retornando (10.a) e usando (20):

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

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

Em x:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right) \right] \quad (21)$$

y:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) \right] + \rho g(y) \quad (21.a)$$

z:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \right) \right] \quad (21.b)$$

ou

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\rho g(y) - \nabla p + \mu \nabla \zeta_{ijk} \quad (22)$$

EQUAÇÃO NAVIER – STOKES PARA FLUÍDO NEWTONIANO

$$F = F_{\text{sup}} + F_{\text{vol}} = \begin{matrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{matrix} \quad \text{não considerando tensão superficial} \quad (19)$$

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right) \right] \nabla V \quad (20)$$

Retomando (10) e usando (20), em x fica:

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

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \Delta u \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\nabla^2 u + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right) \quad (21)$$

em y e z:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \Delta v \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\nabla^2 v + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} \right) + \rho \cdot g(y) \quad (21.a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + w \Delta w \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\nabla^2 w + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \right) \quad (21.b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p - \rho g(y) + \mu \nabla \zeta_{ijk} \quad (22)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p - \rho g(y) + \mu \nabla \zeta_{ijk} \quad (23)$$

As equações (5) e (23) formam a base matemática para tratar um fluxo não estacionário em superfície livre sujeito à gravidade.

Simplificações por hipóteses:

a) fluido incompressível $\Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

b) homogêneo $\Rightarrow \rho = \text{cte} \therefore \frac{D\rho}{Dt} = 0$

para $\rho = \text{cte}$ a equação (5) reduz a:

$$\nabla V = 0 \quad (24)$$

e também o termo gravitacional transforma-se em:

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

que combinando com o termo da pressão

$$-\nabla p - \rho g(y) = -\nabla p - \nabla \rho g y = -\nabla(p + \rho g y) \quad (25)$$

que denomina-se pressão dinâmica.

Reescrevendo-se (23) para $\rho = \text{cte}$ e usando (25):

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla(p + \rho g y) + \mu \nabla^2 V \quad (26)$$

Aplicando-se a hipótese de fluido invíscido, $\mu = 0$, e expandindo o termo à esquerda vem:-

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

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

Pelo teorema de Kelvin, em fluídos invíscidos o rotacional é nulo; portanto,

$$\rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |V|^2 \right) = -\nabla(p + \rho g y) \quad (27)$$

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

$$\nabla \times V \Leftrightarrow V = \nabla \mathfrak{S} \quad (28)$$

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:

$$\mathbf{V} = \nabla\vartheta \Leftrightarrow u = \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \quad ; \quad v = \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \quad ; \quad w = \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \quad (28.a)$$

Retomando a equação (24)

$$\nabla\mathbf{V} = 0 \quad ; \quad \rightarrow \nabla\nabla\vartheta = 0 \quad \therefore \nabla^2\vartheta = 0 \quad (29)$$

$$\text{ou} \quad \frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} = 0 \quad (29.a)$$

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

Aplicando-se a equação (28) na equação (27):

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

$$\nabla \frac{\partial\vartheta}{\partial t} + \nabla \frac{|\nabla\vartheta|^2}{2} + \nabla \left(\frac{p}{\rho} + gy \right) = 0$$

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial t} + \frac{|\nabla\vartheta|^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gy = C \quad (30)$$

Integral de Euler ou Equação de Bernoulli para fluxo ideal.

Outras teorias, 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.

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.

As variáveis mais sensíveis à limitação de recursos são as discretizações ou resoluções das: malha do fundo no sentido longitudinal, propriedades do fundo, espalhamento direcional, frequência, entre outras. Portanto, tornou-se imperativo caracterizar a influência ou os limites dessas resoluções 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. Modelos de folhas de dados são mostrados nas tabelas A.3.1 e A.3.2 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 de algumas das variáveis de controle do programa nas saídas. A geração de ondas foi de dois tipos, espectro gaussiano, definindo-se uma frequência central e um desvio padrão, e monocromática, especificando-se a frequência desejada, para ambos os regimes estacionário e não estacionário.

Usou-se um espalhamento direcional de ± 1 grau, devido ao campo espacial de 360 graus necessário para que haja cômputo da reflexão. A discretização do fundo foi fixada em 100 elementos, variando-se a grade transversal, desde unidimensional até 30 elementos.

Os principais resultados, desta parte prospectiva da utilização do programa implantado, são apresentados em forma gráfica nas figuras de A.3.1 até A.3.

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 &
  'PINT' 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' SPECID '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 – Exemplo de arquivos de entrada de dados para o fundo (batimetria) e coordenadas dos locais para saída de resultados.

Arquivo da batimetria do Tanque

Estudo Original

Codigo de formato : 5

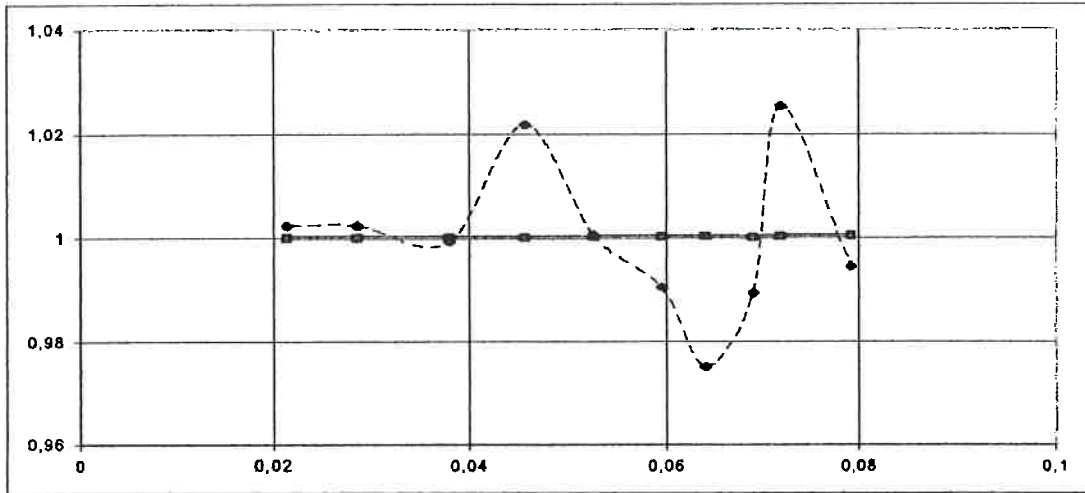
cada linha do arquivo eh uma secao do tanque

1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.5	1.5
1.0	1.0
0.5	0.5
0.002	0.002
-0.5	-0.5

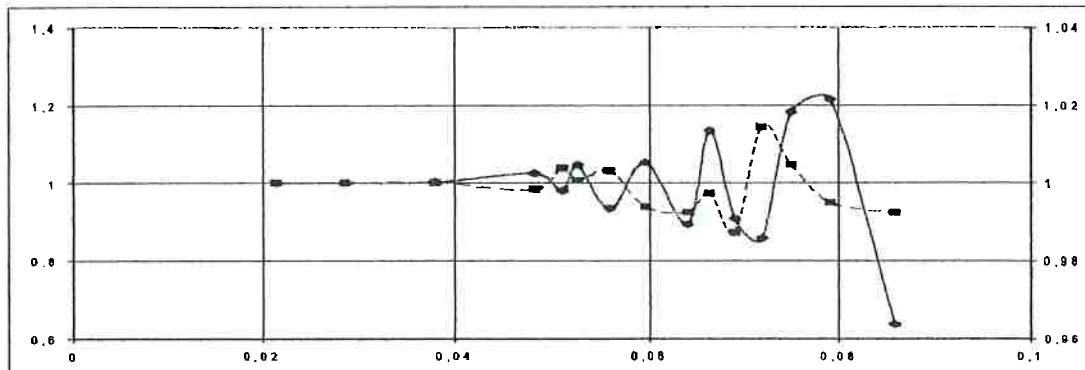
Arquivo de especificação de locais

Coordenadas dos pontos para saída de resultados

0.0	2.5
5.5	2.5
10	2.5
15	2.5
16	2.5
17	2.5
18	2.5
18.5	2.5
19	2.5

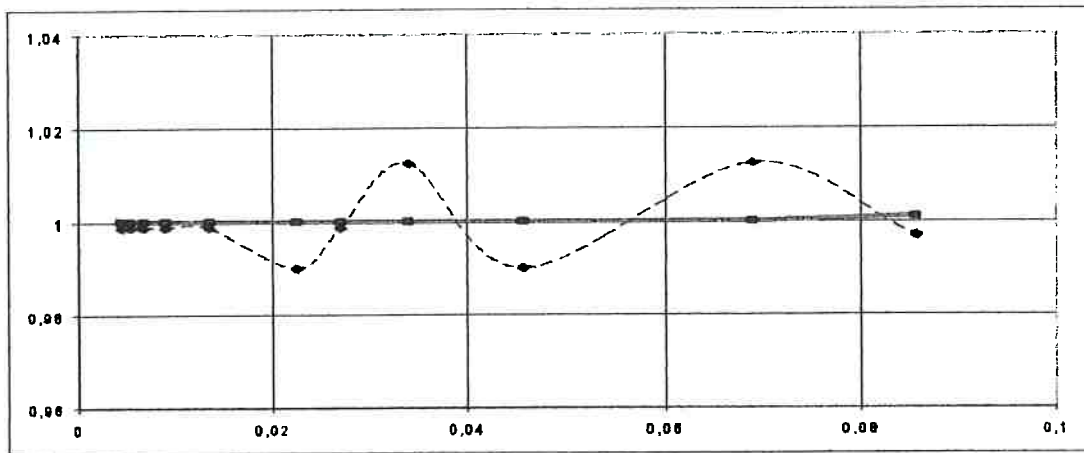


a) Variação da amplitude

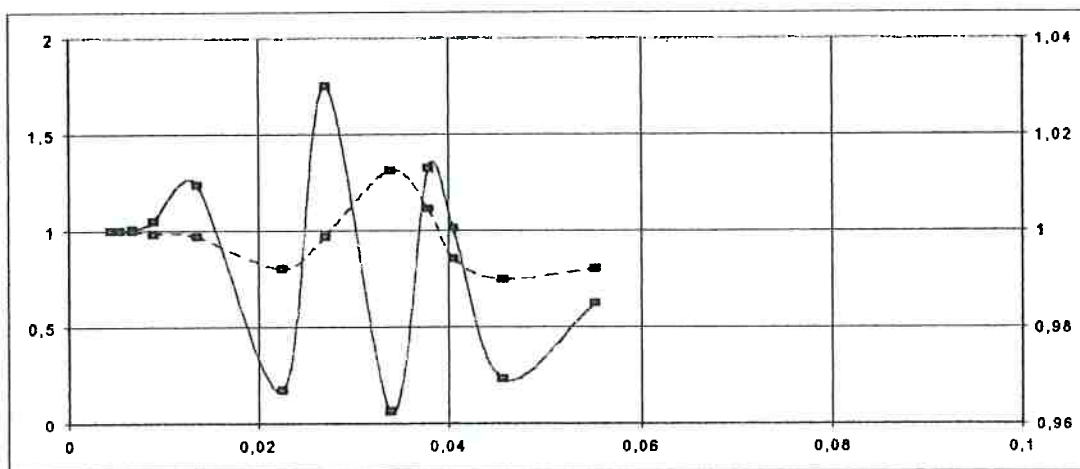


b) Variação do período

Figura A.3.1 - Influência da resolução em frequência, geração Gauss



Varição da amplitude



Varição da amplitude

Figura A.3.2 - Influência da resolução em frequência, geração BIN

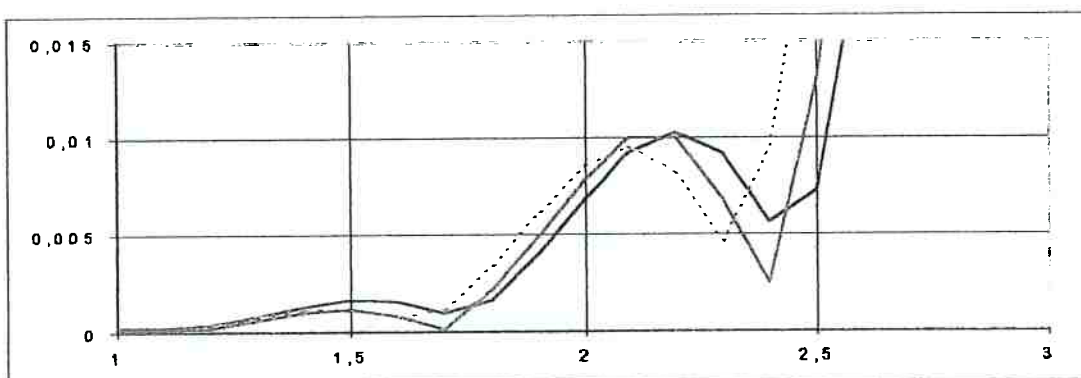
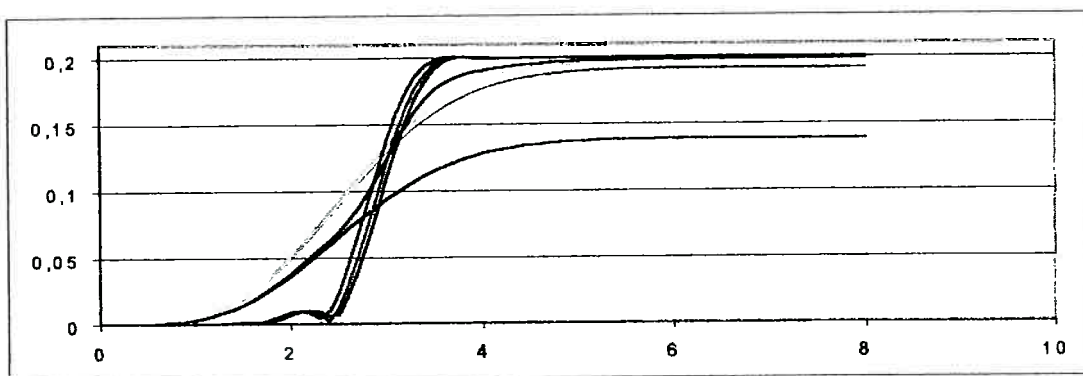
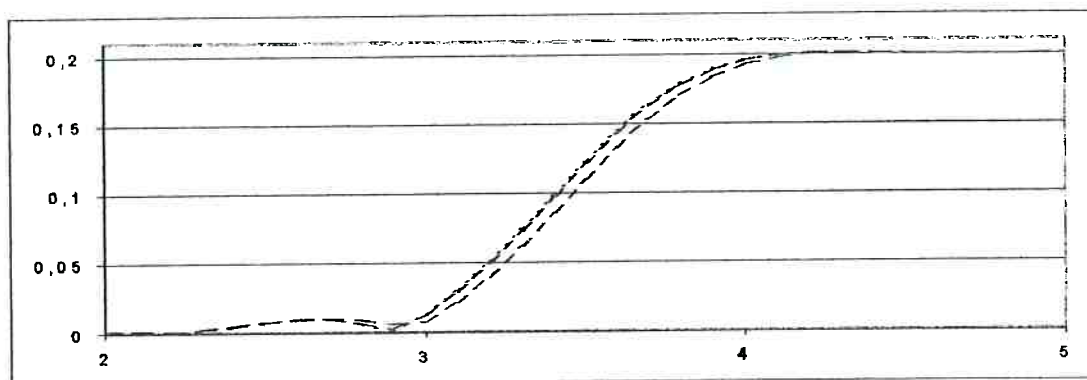


Figura A.3.3 - Influência do número de elementos, modo não estacionário, ondômetro a montante, frequência 0,5 Hz

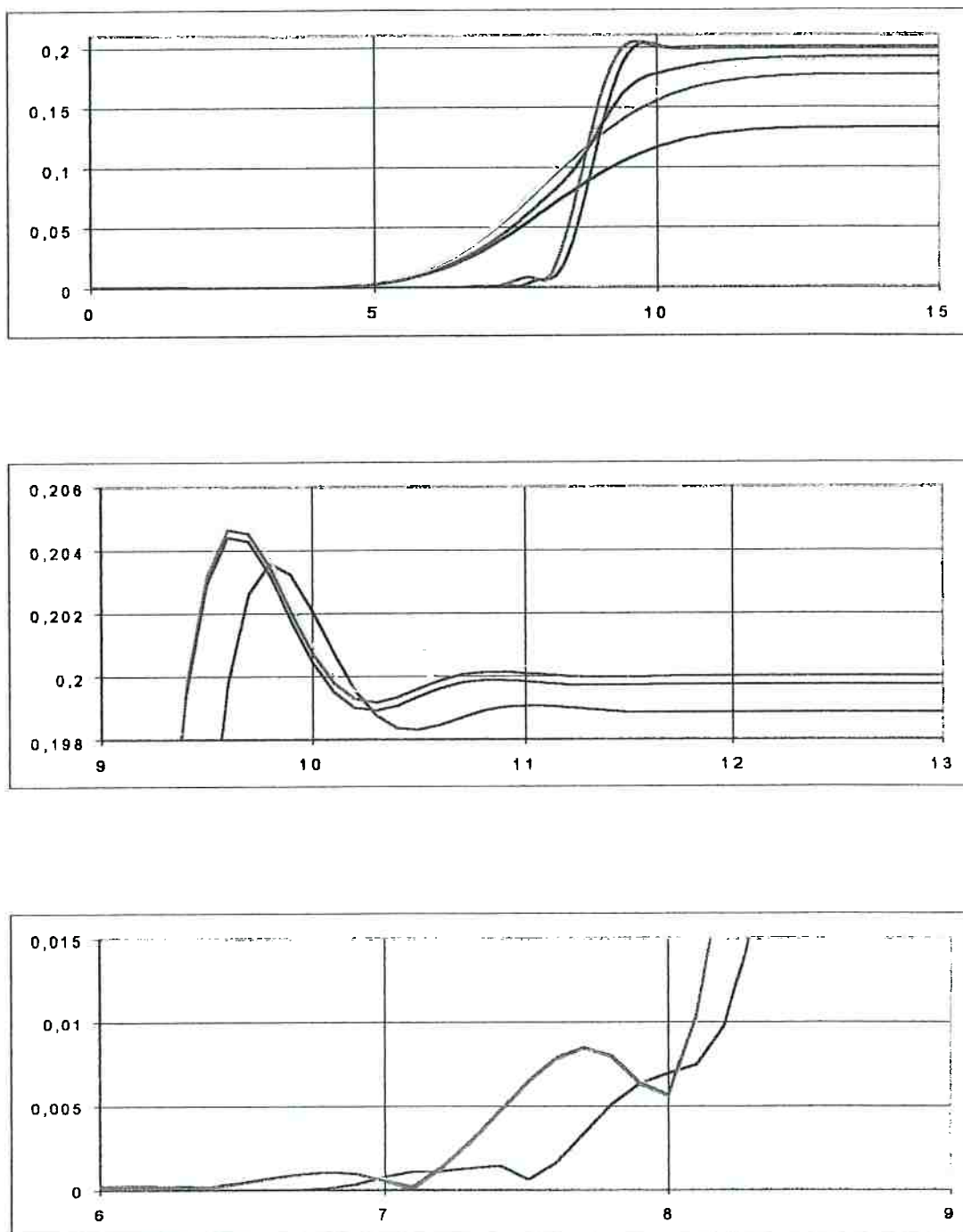


Figura A.3.4 - Influência do número de elementos, modo não estacionário, ondômetro a jusante, frequência 0,5 Hz.

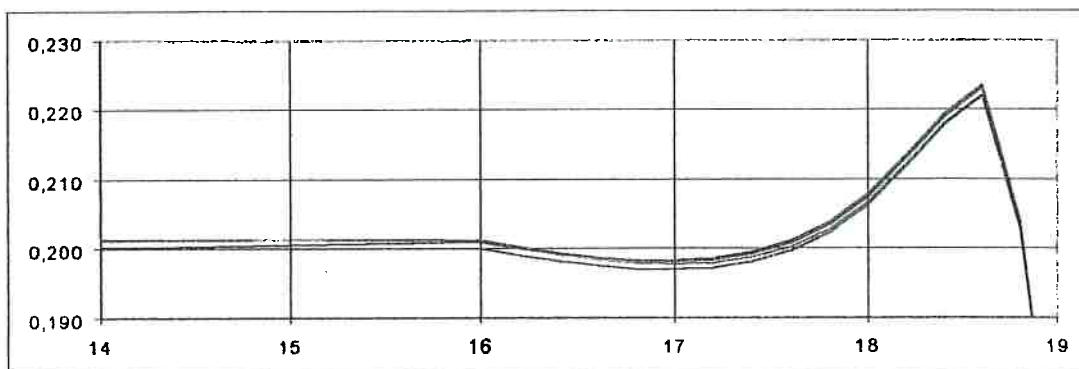
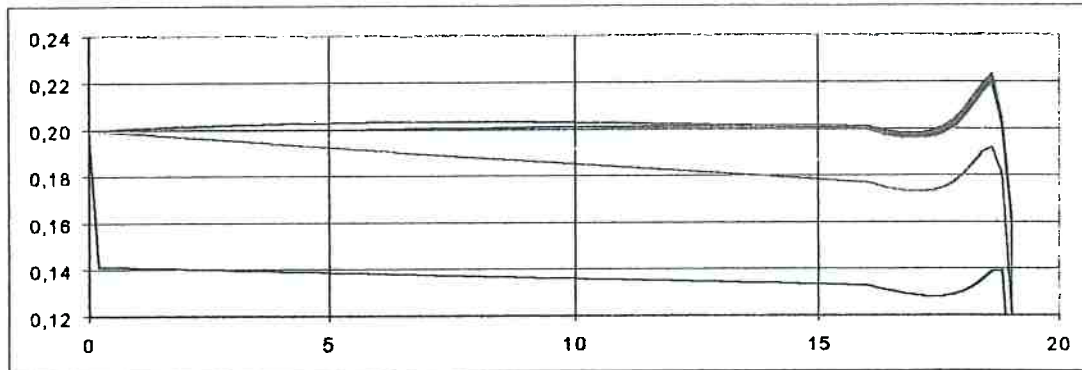


Figura A.3.5 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 0,5 Hz

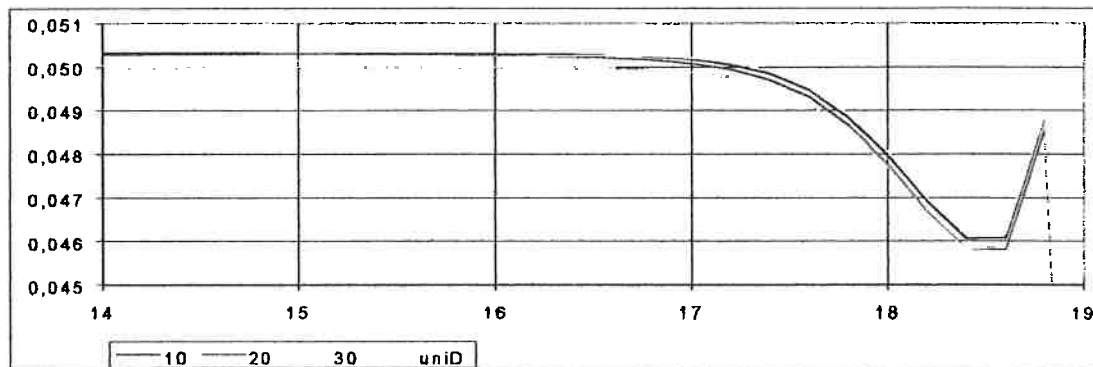
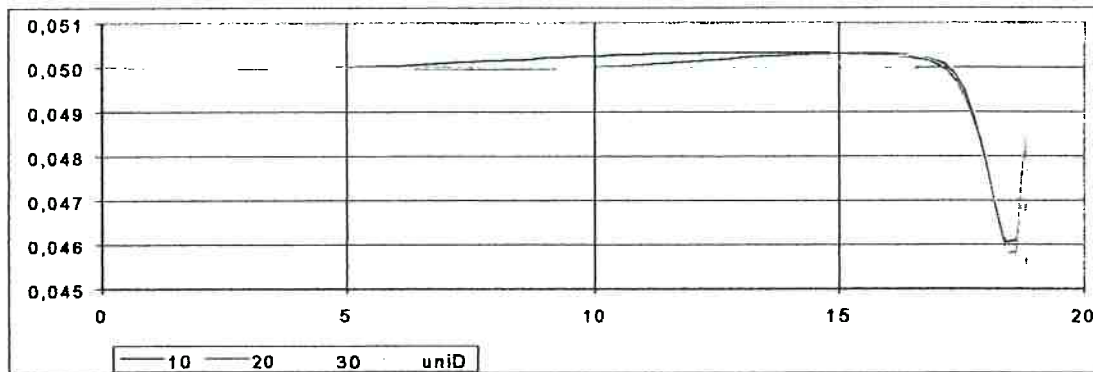


Figura A.3.6 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 1,0 Hz

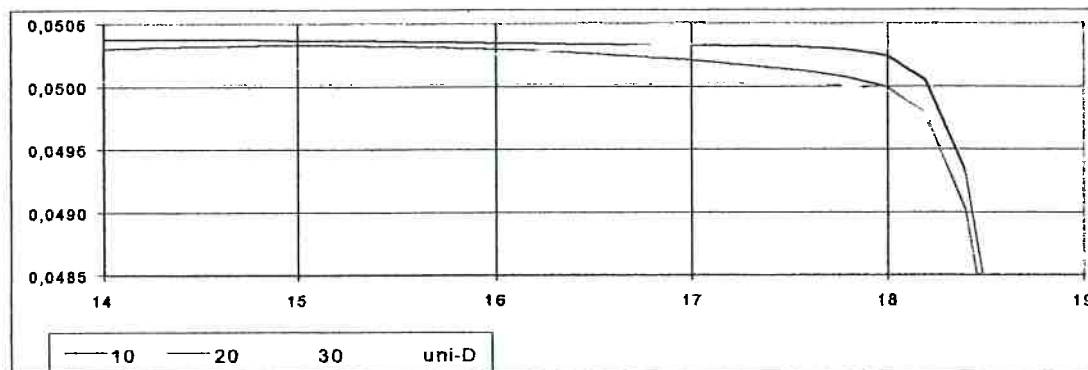
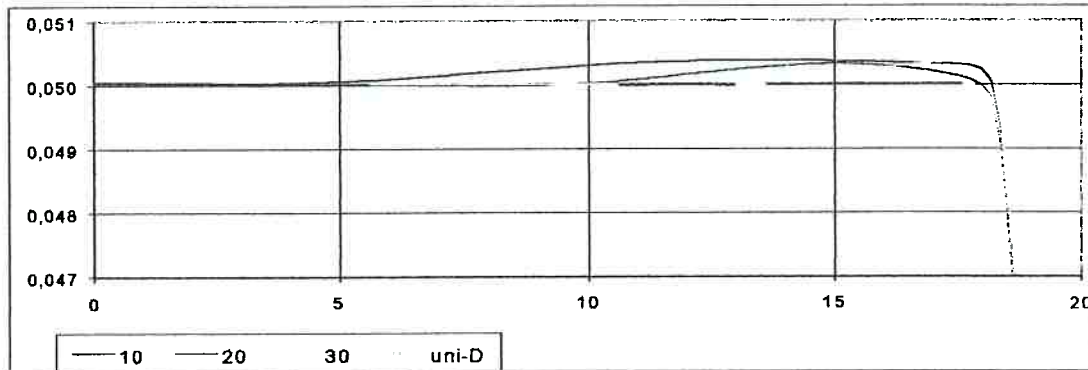


Figura A.3.7 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 1,5 Hz

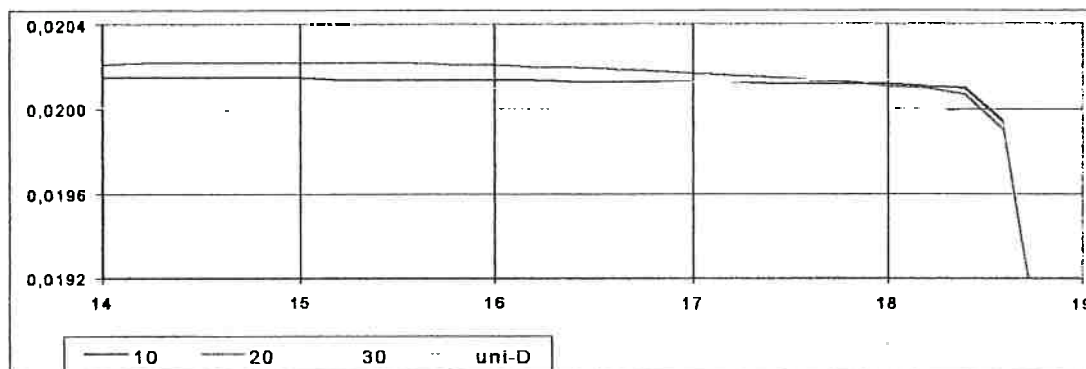
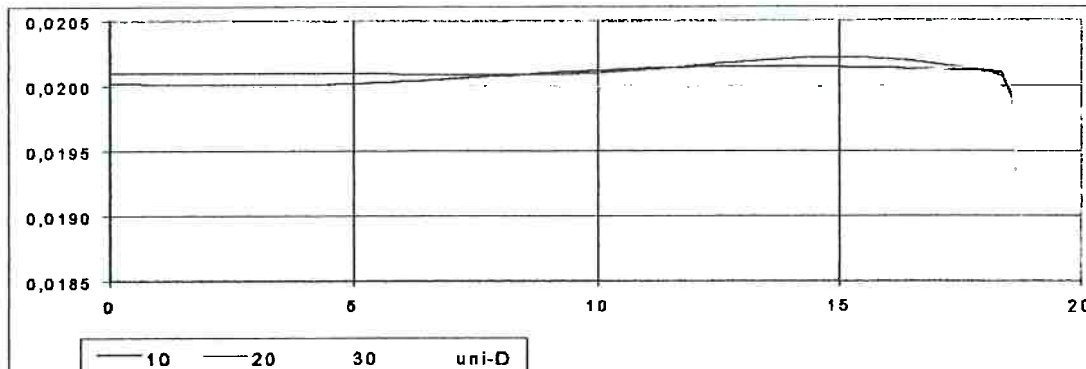


Figura A.3.8 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 0,5 Hz

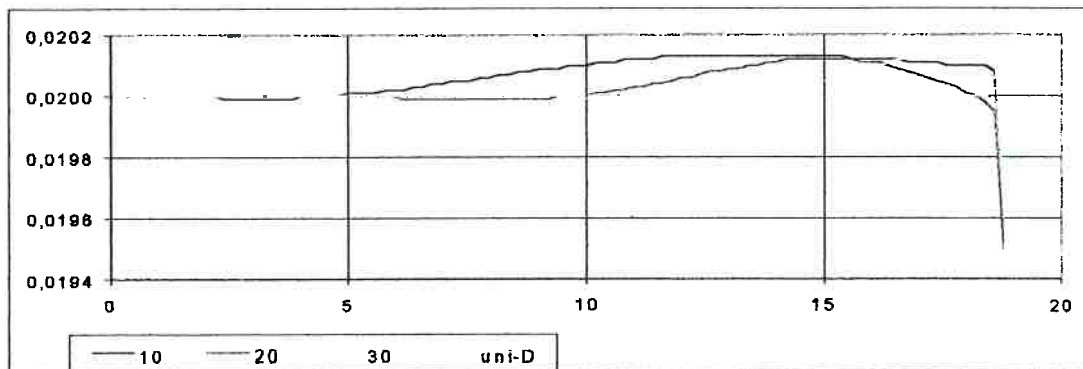
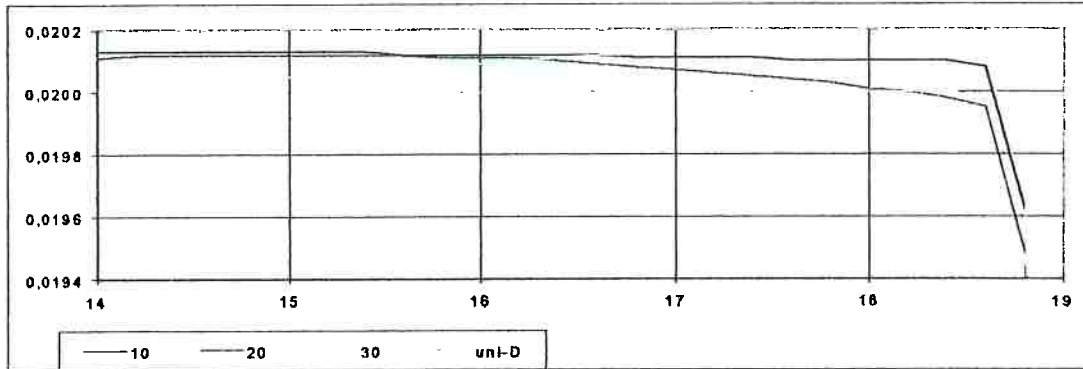


Figura A.3.9 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 2,5 Hz

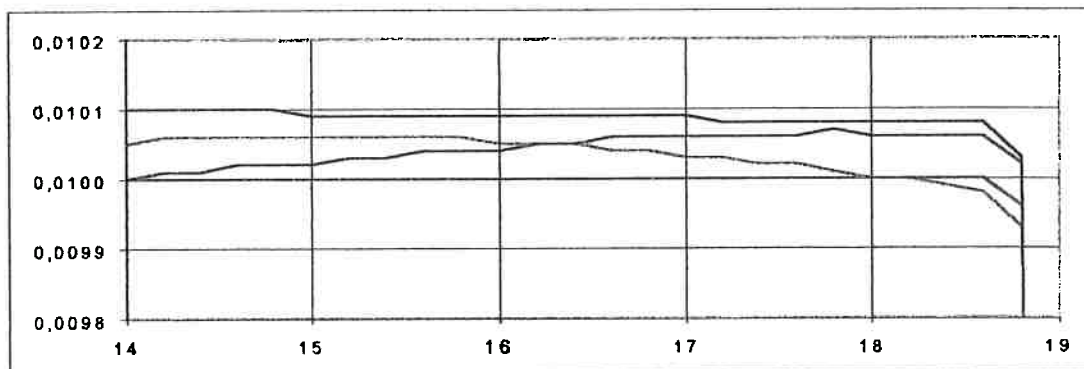
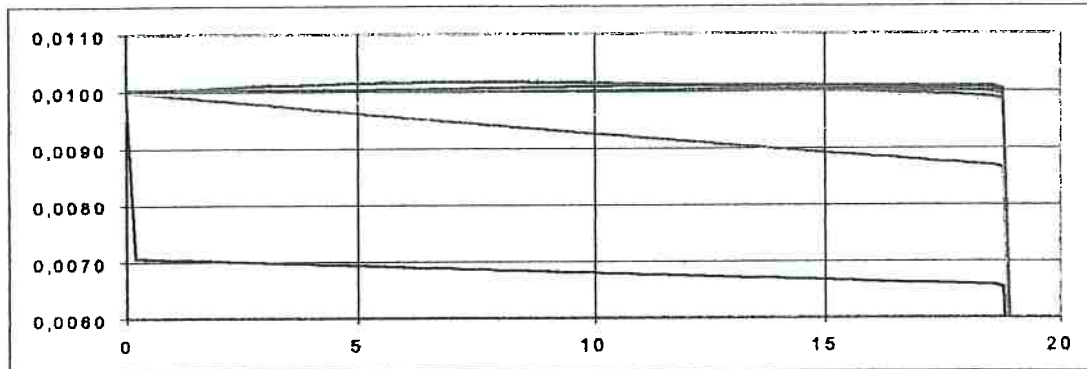
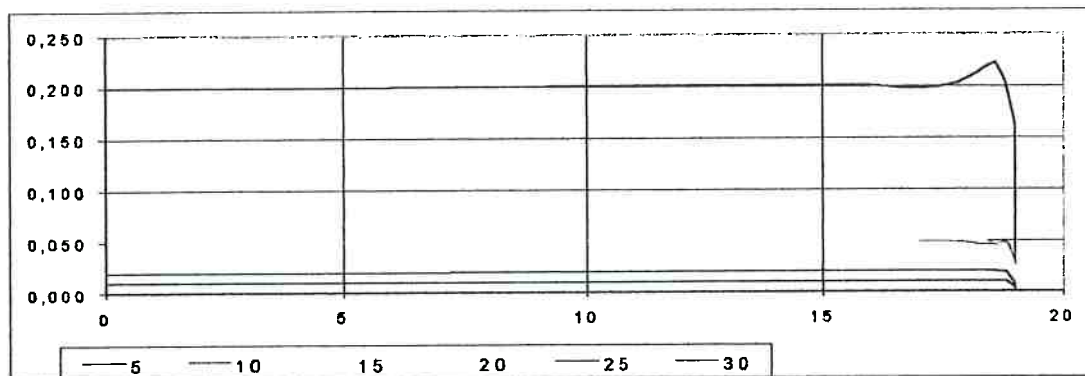
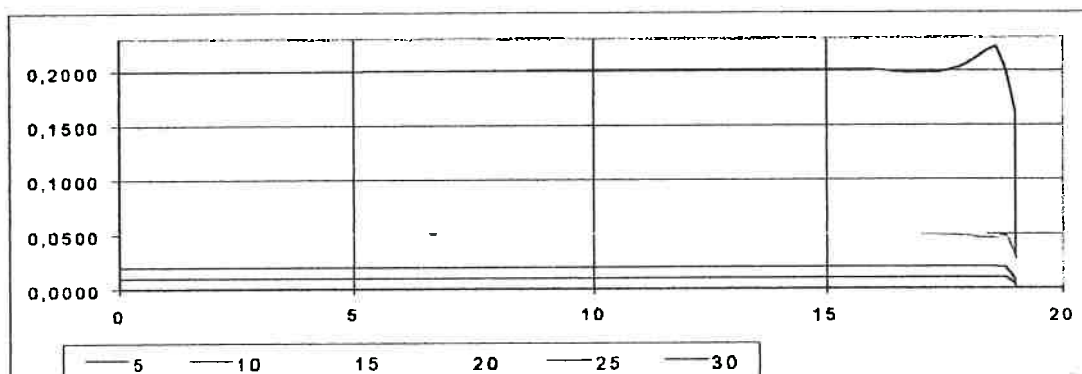


Figura A.3.10 - Influência do número de elementos, modo estacionário, frequência 3,0 Hz



Gaussiano



Monocromático

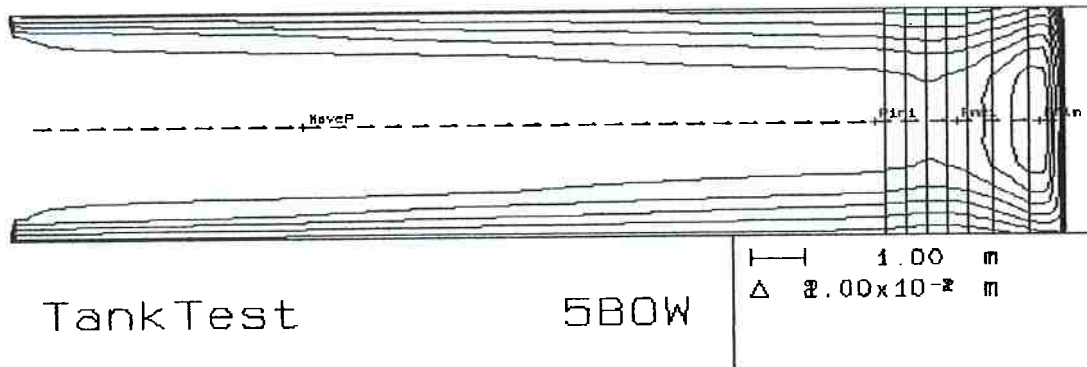
Figura A.3.11 - Comparação entre os modos de geração para todas frequências

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, proporcionou o melhor compromisso entre a precisão dos resultados e os recursos computacionais disponíveis, notadamente, memória e tempo de processamento

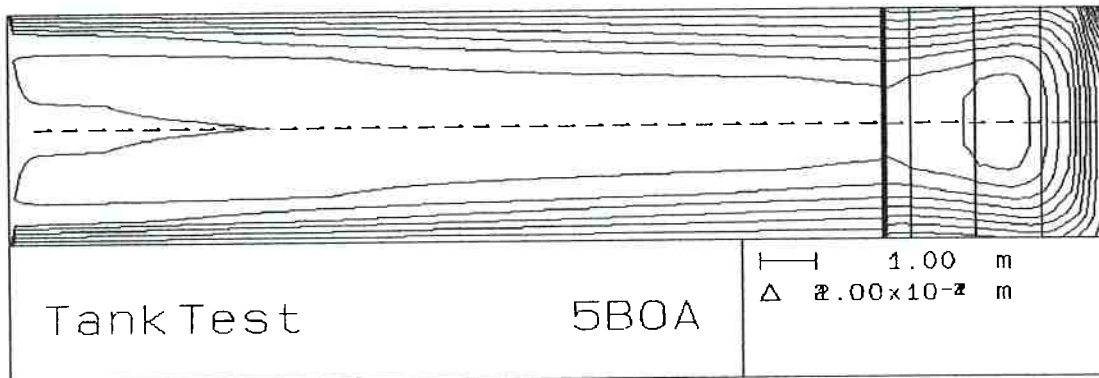
Tabela A.3.3 – Perfis idealizados das praias empregados nas simulações numéricas.

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

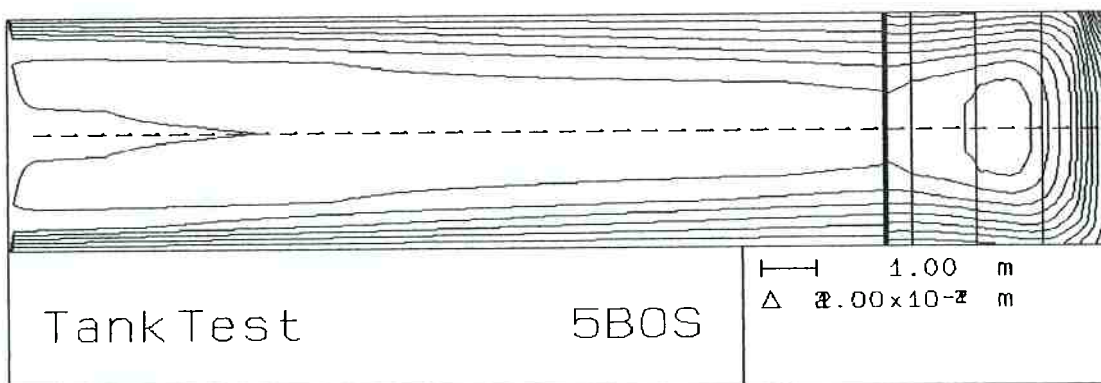
OBS.: A praia Projetada 12 é a mesma praia Projetada 1, mas com 200 elementos na matriz do fundo.



a) praia original, com atrito

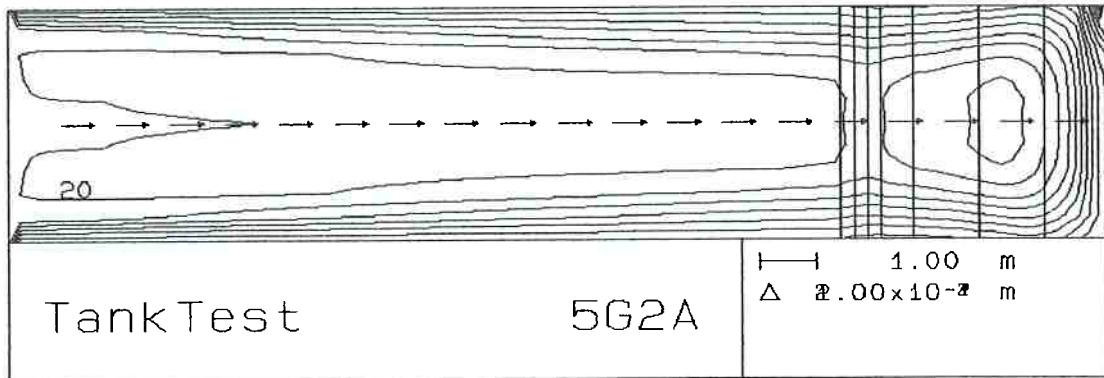


b) praia projetada 12, atrito, ressalto $h=0,84$ m, $Cr=1$

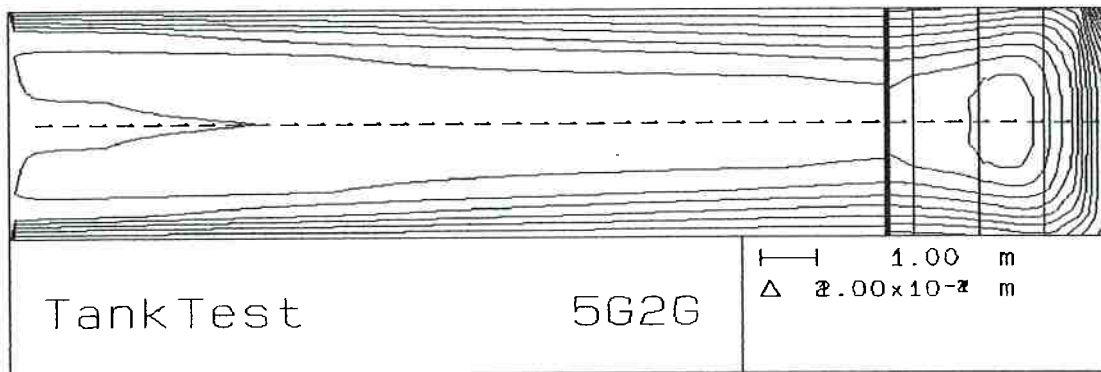


c) praia projetada 12, atrito, ressalto $h=0,84$ m, $Cr=0,5$

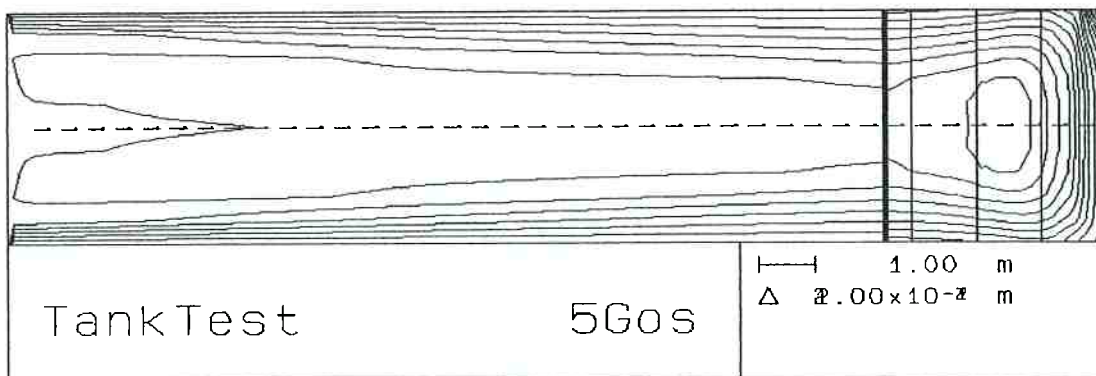
Figura A.3.12 - Curvas de iguais alturas de onda, Frequência 0,5 Hz,



a) praia projetada 1a, matriz fundo 200x10

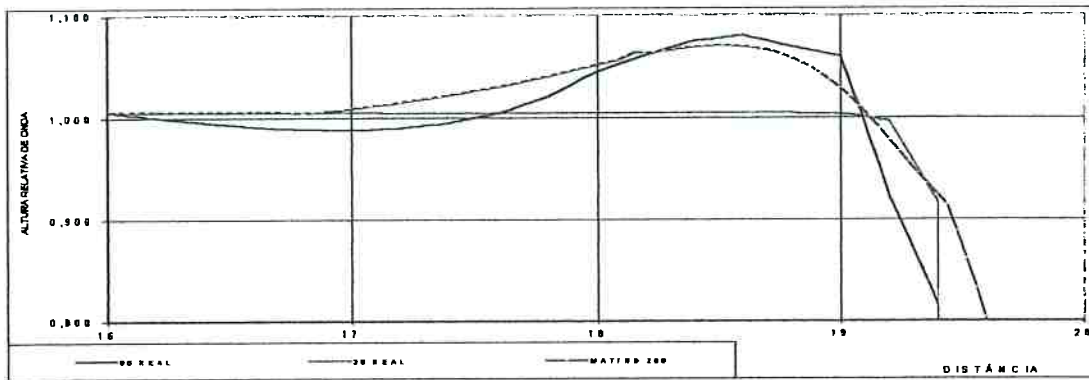


b) praia projetada 12, atrito, unidimensional, matriz fundo 200x1

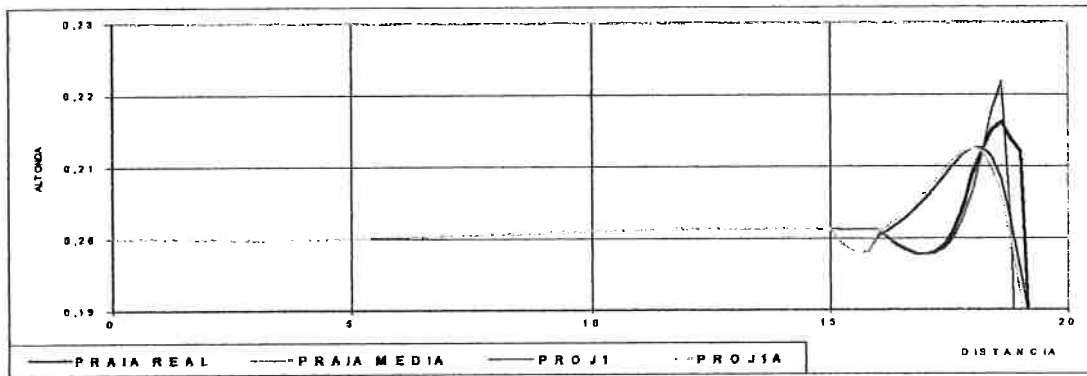


c) praia projetada 12, atrito, matriz fundo 200x10, ressalto $H=0,84$ m, $Cr=0,5$

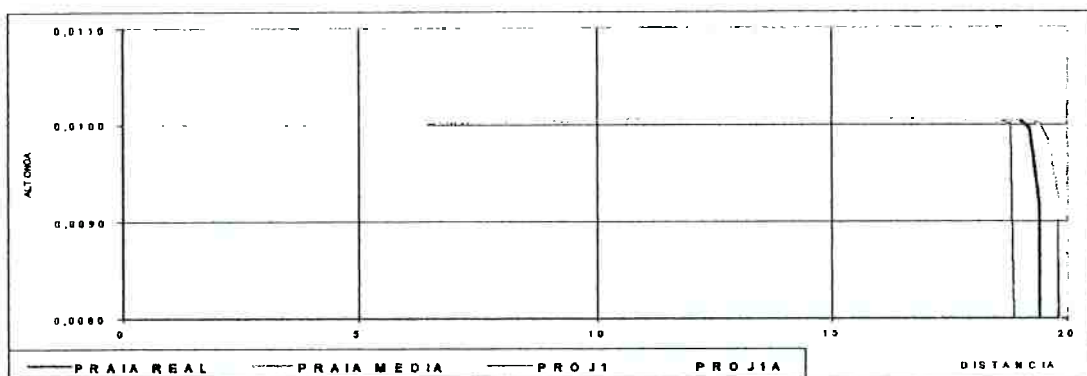
Figura A.3.13 - Curvas de iguais alturas de ondas, Frequência 0,5 Hz



a) Perfis de alturas de onda na praia original, $f=0,5$ Hz e $f=3,0$ Hz

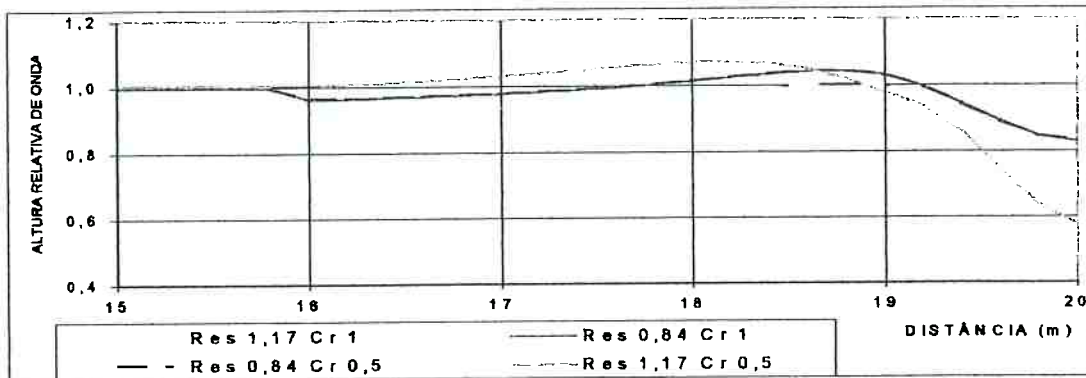


b) Perfis de alturas de onda nas diferentes praias, $f=0,5$ Hz

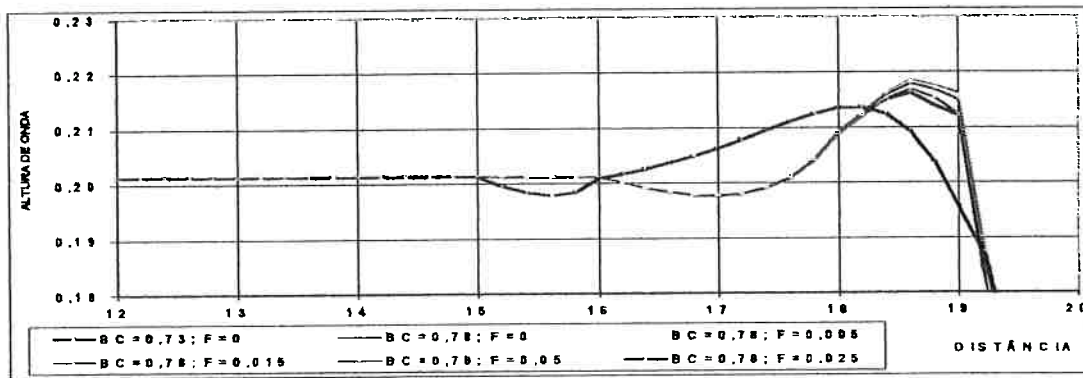


c) Perfis de alturas de onda nas diferentes praias, $f=3,0$ Hz

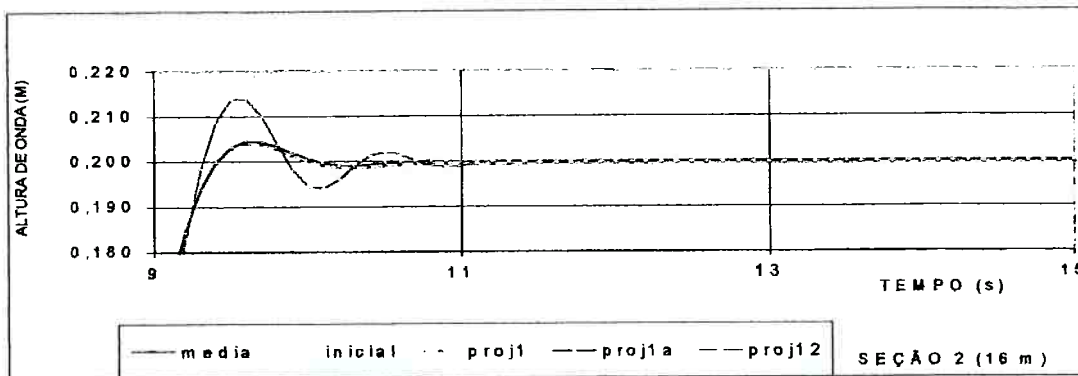
Figura A.3.14 - Respostas da onda para diferentes praias, modo estacionário.



a) Perfis de alturas de onda, praia projetada, $f=0,5$ Hz

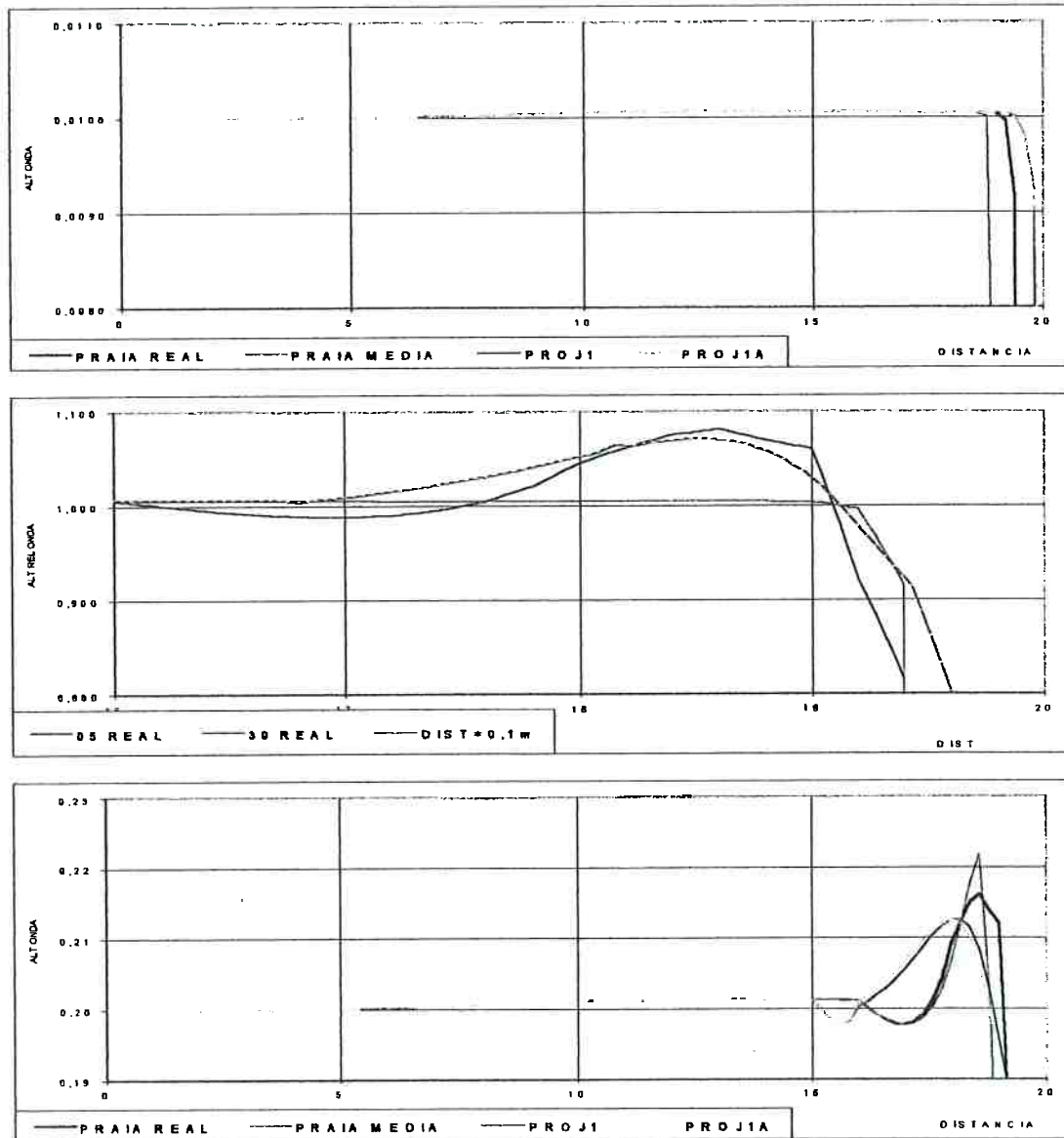


b) Perfis de alturas de onda, variando constante de quebrar e atrito, $f=0,5$ Hz



c) perfis de onda, modo não estacionário, diferentes praias, $f=0,5$ Hz

Figura A.3.15 - Comparação entre perfis de alturas de ondas nas diferentes praias, $f=0,5$ Hz



Praias diferentes, freq. 0,5 e 3 Hz, Estacionario

Figura A.3.16 - Comparação de perfis de alturas de ondas para as diferentes praias.

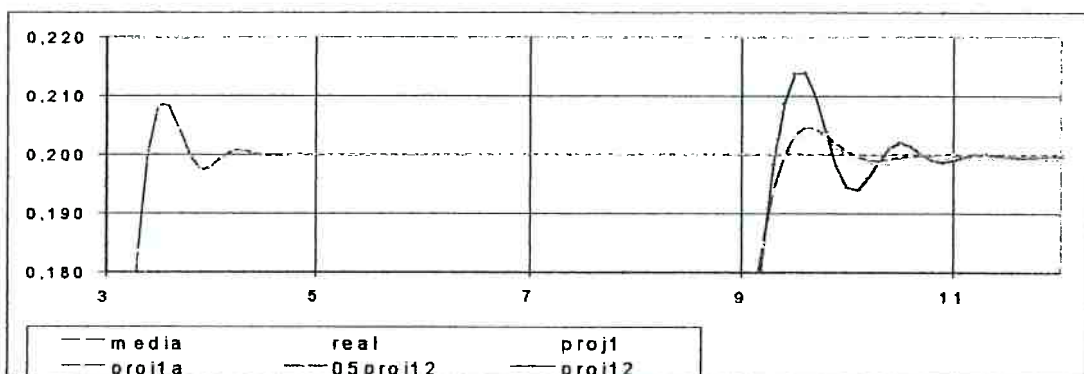
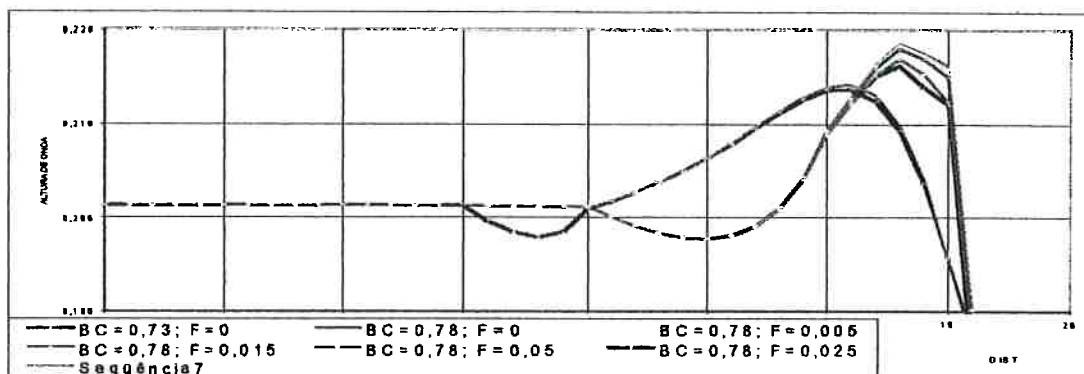
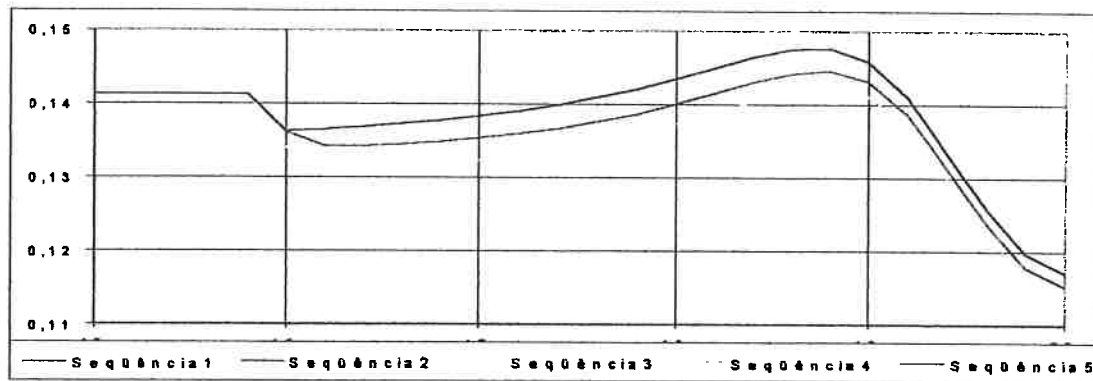


Figura A.3.17 - Comparação entre as diferentes praias, atrito, para 0,5 Hz

LISTA DE REFERÊNCIAS

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

Sir Francis Bacon

LISTA DE REFERÊNCIAS

ABOHADIMA, S. and ISOBE, M. Linear and nonlinear wave diffraction using the nonlinear time dependent mild slope equations. **Coastal Engineering** **37**, p. 175–192, 1999

ABOHADIMA, S. and ISOBE, M. Limiting criteria of permanent progressive waves. **Coastal Engineering** **44**, p. 231-237, 2002

ABUL-AZM, A. G. Wave Diffraction by Double Flexible Breakwaters. **Applied Ocean Research** **16**, p.87-99, 1994

ALLEN, C.T.; SHI, K. and PLUMB, R.G. Characterization of a cooperative target for ground-penetrating radar. **Radar Systems and Remote Sensing Laboratory**. The University of Kansas. Lawrence KS, USA.

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

Applied Ocean Research **18**, p. 293-302, 1996

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

BAQUERIZO, A. and LOSADA, M.A. Transfer function between wave height and wave pressure for progressive waves, by Y.-Y.KUO and J.-F. Chiu: comments. Short communication. **Coastal Engineering** **24**, p. 351-353, 1995

BAQUERIZO, A., LOSADA, M.A. and LOSADA, I.J. Edge wave scattering by a coastal structure. **Fluid Dynamics Research** 31, p. 275–287, 2002

BARREIRA, R.A, NASCIMENTO, F., ESPERANÇA, P.T., FERNANDES, A.C., LEVI, C.A . Geração de Ondas Regulares e Irregulares

BARROS, E.A.; FERREIRA, G.A.N. Test bed development for research of performance of high speed vessels. **Department of Mechanical Engineering**. University of São Paulo. São Paulo, Brazil.

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

BATTJES, J.A. and GROENENDIJK, H.W. Wave height distributions on shallow foreshores. **Coastal Engineering** 40, p. 161–182, 2000

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

BAYRAM, A. and LARSON, M. Wave transformation in the nearshore zone: comparison between a Boussinesq model and field data. **Coastal Engineering** 39, p. 149–171, 2000

BEJI, S. Note on conservation equations for nonlinear surface waves. **Ocean Engineering**, Vol. 25, nº 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** 29, p. 1569-1575, 2002

BELZONS, M., GUAZZELLI, E. and PARODI, O. Gravity waves on a rough bottom: experimental evidence of one-dimensional localization. **J. Fluid Mech.**, Vol. 186, p.539-558, 1988

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

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

BOUIJ, N., RIS R. C. e HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, 1999 **J. Geoph. Research**, C4, 104, 7649-7666

BRASIL - Ministério das Relações Exteriores. Brasília, DF. Acesso em 28/10/2002. <http://www.mre.gov.br/ndsg/textos/brinfg-p.htm>.

ENCARTA Online Encyclopedia 2002. Microsoft Corporation, xxx, 2002. Acesso em 19/11/2002. <http://encarta.msn.com/encnet/features/reference.aspx>

FEYNMAN, R.P. **Lectures on Physics**. Vol II, Chapter 40

GÜNTHER, H.; HASSELMANN, S. e JANSSEN, P.A.E.M. The WAM model cycle 4. Technical Report nº 4, Deutsches KlimarechenZentrum, Modellberatungsgruppe Hamburg, October 1992.

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

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

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

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

ITTC - International Towing Tank Conference, 23rd, Veneza, Itália, 2002. Proceedings ITTC, 2002. CD-ROM.

JACKSON, J.D. Osborne Reynolds: Scientist, Engineer and Pioneer. Manchester School of Engineering, Manchester, 2002. Acesso em 19/11/2002. <http://www.eng.man.ac.uk/historic/reynolds/oreyna.htm#OS2>

LE MÉHAUTÉ, B. **An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**. New York, Springer-Verlag, 1976. 310 p.

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, Ed. 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: XIV CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL. Anais , Sobena, Rio de Janeiro, 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: 13th PANAMERICAN CONGRESS OF NAVAL ENGINEERING, 1993, Caracas. Anais do IPEN'93. 1993.

MPI-MET - MAX PLANCK INSTITUT für METEOROLOGIE. Acesso em 29/11/2002. <http://www.mpimet.mpg.de>.

MPC - Marine Prediction Center. Acesso em 29/11/2002.

<http://www.mpc.ncep.noaa.gov>.

NASCIMENTO, E.R. Situação Fiscal dos Municípios Brasileiros após a Constituição de 1988. Banco Federativo - BNDES. Brasília, 2002. Disponível em http://federativo.bndes.gov.br/bf_bancos/estudos/e0001729.pdf.

NEUMANN, J. v. Quotations. In: O'Connor, J.J e Robertson, E.F. **The MacTutor History of Mathematics Archive**. Acesso em 11/11/2002.

http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Von_Neumann.html.

NOAA - National Ocean and Atmospheric Administration. Acesso em 29/11/2002. <http://www.noaa.gov>.

PARENTE JR., N. Clima do país favorece novas energias. Entrevista a Maura Campanili. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 25/10/2002. Disponível em <http://www.estado.com.br/editorias/2002/10/25/ger009.html>.

RANDALL, R.E. **Elements of Ocean Engineering**. New Jersey, Society of Naval and Marine Architects, 1997. 332 p.

ROUSE, H. Highlights in the History of Hydraulics. Books at Iowa, University of Iowa, Special Collections, Hydraulics Collection, 2000. Acesso em 11/11/2002. <http://www.lib.uiowa.edu/spec-coll/Bai/hydraul.htm>.

SLADE, S. Towing Tank Tests. The Naval Technical Board : Ship Design and Construction. Canada, 1998. Acesso em 11/11/2002. <http://www.warships1.com/WV-Tech/tech-010.htm>.

SOUZA, C. A. G. F. Implantação e Análise de Desempenho de um Gerador de Ondas tipo Placa Basculante. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 117 p , 2002.

SOUZA, C. A. G. F. e MARTINS, J. A. de A. Desenvolvimento de um Sistema Controlado por Micro Computador para Geração de Ondas Hidráulicas. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1993, Brasília. Anais do XII COBEM. Brasília: COBEM, 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: XVII CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 1998, Rio de Janeiro. Anais do Congresso. Rio de Janeiro: SOBENA, 1998.

STEWART, R. H. **Introduction to Physical Oceanography**. Department of Oceanography, Texas A&M University, 2002. 341 p.

TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCHIII. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 2002.133 p.

TUDELFT - Naval Architecture and Marine Technology Delft University of Technology, Netherlands, 2002. Acesso em 19/11/2002.
<http://www.froude.tudelft.nl/froude/content/froude/history.htm>.

TUDELFT - SWAN, Simulating Waves Near Shore. Delft University of Technology, Netherlands, 2002. Acesso em 19/11/2002.
<http://swan.ct.tudelft.nl/home.htm>.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Press Release No.2002-53, Paris, 2002. Acesso em 19/11/2002. <http://www.unesco.org/bpi/eng/unescopress/2002/02-57e.shtml>

UNIÃO EUROPÉIA. Our Planet Ocean : At the Edge of the Ocean. RTD Info 19, June/July 1998, Bruxelas, Bélgica. Acesso em 11/11/2002. <http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/en/world3.htm>.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Coastal Engineering Manual**. M.E 1110-2-1100. Washington, D.C, U.S. Army Corps of Engineers, 2002.

UNO - University of New Orleans. The Towing Tank and Ship-Offshore Structure Design. New Orleans, 1997. Acesso em 19/11/2002. <http://www.uno.edu/~enr/towtank/>.

VERITECH - CEDAS, Coastal Engineering Design and Analysis System. Acesso em 19/11/2002. <http://www.veritechinc.com>.

WAMIT - Acesso em 29/11/2002. <http://www.wamit.com>.

Wave Watch III . Acesso em 29/11/2002. <http://www.fnmoc.navy.mil/PUBLIC/MW3/index.html>.

WIEGEL, R. L. **Oceanographical Engineering**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1965. 535 p.

WORLD ATLAS - The List. Texas. Acesso em 22/10/2002. <http://www.worldatlas.com/geoquiz/thelist.htm>.

WU, J., WAN, Z. and FANG, Y. Wave reflection by a vertical wall with a horizontal submerged porous plate. **Ocean Engineering**, Vol. 25, nº 9, p. 767-779, 1998

WU, J.-S. and 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** 28, p. 417-438, 2001

XIA, J. and KROKSTAD, J.R. Wave forces on a body in confined waters. **14th Australasian Fluid Mechanics Conference**, Adelaide University, Adelaide, Australia, 10-14 December 2001

YEH, H. **Workshop on Research with NEES Tsunami Facility – Minutes**. Oregon State University, Corvallis, Oregon April 6-7, 2001

YONG, D.H. and KEVORKIAN, J. Initial boundary-value problems for a pair of conservation laws. California Institute of Technology University of Washington. p. 1-18, March, 2001

YU, Y.X.; LIU, S.X.; LI, Y.S.; WAI, O.W.H. Refraction and diffraction of random waves through breakwater. **Ocean Engineering** 27, p. 489-509, 2000

ZHAN, J.M., LI, Y.S. and WAI, O.W.H. Numerical modeling of multi-directional irregular waves incorporating 2-D numerical wave absorber and subgrid turbulence **Ocean Engineering** 30, p. 23–46, 2002

ZHANG, J., PRISLIN, I., YANG, J. and WEN, J. Deterministic wave model for short-crested ocean waves: Part II. Comparison with laboratory and field measurements. **Applied Ocean Research** 21, p. 189-206, 1999

ZHANG, M.Y., MONBALIU, J. and YU, C.S. A Eulerian- Lagrangian method for the simulation of wave propagation. **Ocean Engineering**, Vol. 26, p.255-276. 1999

ZHANG, S. and WILLIAMS, A.N. Time-domain simulation of the generation and propagation of second-order stokes waves in a two-dimensional wave flume. Part I: monochromatic wavemaker motions. **Journal of Fluids and Structures** 10, p. 319-335, 1996

ZHU, S. Separation of regular waves by a transfer function method. **Ocean Engineering** 26, p. 1435-1446, 1999

BOSBOOM, J., KLOPMAN, G., ROELVINK, J.A. and BATTJES, J.A. Boussinesq modelling of wave-induced horizontal particle velocities. **Coastal Engineering** 32, p. 163-180, 1997

BOSMA, J., VUGTS, J.H. Wave kinematics and fluid loading in irregular waves. **International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering**. 1981.

BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**, Brasília, 153 pgs, 1999

BROSSARD, J. and CHAGDALI, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. **Coastal Engineering** 42, p. 277-290, 2001

BROSSARD, J., HÉMON, A., RIVOALEN, E. Improved analysis of regular gravity waves and coefficient of reflexion using one or two moving probes. **Coastal Engineering** 39, p. 193-212, 2000

ÇALIŞAL, S.M. and SABUNCU, T. A study of a heaving vertical cylinder in a towing tank. **Journal of Ship Research**, Vol. 33, nº 2, p. 107-114, 1989

J. Austral. Math. Soc. Ser. B 39(1998), 308-317

CHAKRABARTI, A and SAHOO, T. Reflection of waterwaves in the presence of surface tension by a nearly vertical porous wall. **J. Austral. Math. Soc. Ser. B** 39, p.308-317, 1998

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

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

CHAKRABARTI, S.K. and COTTER, D.C. Tank wall effects on broadside current forces on barge models. **Ocean Engineering** Vol. 21, nº 5, p.489-497, 1994

CHAKRABARTI, S.K. e KRIEBEL, D. Wave kinematics for simulated shallow water storm waves. Analysis and experiments. **Ocean Engineering**. Vol.24, nº 9. p. 835-865, 1997

CHAN, A.T.; SAHOO, T.; CHWANG, A.T. Reflection of water waves by sloping porous structures. **Proceedings of the Ninth International Offshore and polar Engineering Conference**. Brest, France, 1999.

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

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

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

CHAPLIN, J.R. Hydrodynamic damping of a cylinder at $\beta \approx 10$. **Journal of Fluids and Structures** 14, p. 1101 –1117, 2000

CHEN, G.-Q, KRATKA, M. Global solutions to the Navier-Stokes equations for compressible heat-conducting flow with symmetry and free boundary.

CHEN, L. and ZHANG, J. On interaction between intermediate- depth long waves and deep- water short waves. **Ocean Engineering**. Vol. 25, nº 6, p. 395-423. 1998

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

CHU, J.H. and 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** 31, p. 229–251, 2002

CHUNG, J.S., SAYED, M., KASHIWAGI, M., SETOGUCHI, T., HONG, S.W. The Proceedings of the 12th **International Offshore and Polar Engineering Conference** , VOLUME I, Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002

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

CIEŚLIKIEWICZ, W. and GUDMESTAD, O.T. Stochastic characteristics of wave kinematics in laboratory-scale random waves. **Coastal Engineering** 26, p. 35-36, 1995

CLAUSS, G.F. Task-related wave groups for seakeeping tests or simulation of design storm waves. **Applied Ocean Research** 21, p. 219-234, 1999

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

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Direct methods for calculating wavelength**. CETN-I-17 Revised 6/85

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Irregular Wave Runup on Beaches**. CETN - I-60 (3/95)

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Irregular Wave Diffraction by Goda's method.** CETN -I-18 Revised 3/88

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Pipe profile method for beach surveys.** CETN-II-9 (1/83)

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Spectral wave modeling technology.** . CETN I-58 (9/94)

USACE - Coastal Engineering Manual Coastal Engineering - Technical Note. **Computer Program: BERM.** CETN -II -25 (3/91)

USACE - Coastal Engineering Manual - Technical Note. **Computer Program: RCPWAVE.** CETN - I -42 (9/86)

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

DAOUD, B. and KOBUS, J.-M. Irregular wave generation method with given characteristics in experimental tanks. **Ocean Engineering** 22, nº 4, p. 387-410, 1995

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

DeSILVA, S.J., GUENTHER, R. B. and HUDSPETH, R. Irregular points in 2-D free surface flows with surface tension for the wavemaker boundary value problem. **Economia e Energia** nº 30: Jan/ Fev 2002 and **Applied Ocean Research** 18, p. 293-302, 1996

Di Paola, M. and PISANO, A. A. Multivariate stochastic wave generation. **Applied Ocean Research** 18, p. 361-365, 1996

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

DOERING, J.C. and BOWEN, A.J. Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. **Ocean Engineering** 26, p. 15-33, 1995

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

FEDOROV, A.V., MELVILLE, W.K. and ROZENBERG, A. An experimental and numerical study of parasitic capillary waves. **Physics of Fluids**, Vol. 10, nº 6, 1998

FERREIRA, J.A. and SOARES, C.G. Modelling distributions of significant wave height. **Coastal Engineering** 40, p. 361–374, 2000

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

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

GAUL, L. Invited Paper. The influence of damping on waves and vibrations. **Mechanical Systems and Signal Processing** 13 (1), p. 1-30, 1999

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

GONZÁLEZ, M., MEDINA, R. and LOSADA, M.A. Equilibrium beach profile model for perched beaches. **Coastal Engineering** 36, p. 343–357, 1999

GORMAN, R.M. and NEILSON, C.G. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary. **Coastal Engineering** 36, p. 197–217, 1999

GOUMILEVSKI, A., CHENG, J.-Y and CHAHINE, G.L. Wave breaking on a sloping beach: comparison between experiments and simulations. DYNAFLOW, Inc. p. 1-6.

GRAW, K.U. Comparison of wave theories with velocity measurement. **International Symposium on Waves – Physical and Numerical Modelling** August 21-24, Vancouver, BC, Canada, 1994

GRIGOROPOULOS, G.I., LOUKAKIS, T.A. and PERAKIS, A.N. Seakeeping standard series for oblique seas (a synopsis). **Ocean Engineering** 27, p. 111-126, 2000

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

GUILBAUD, M., BOIN, J.P. and BA, M. Frequency domain numerical and experimental investigation of forward speed radiation by ships. p. 1-16

GUO, J. Simple and explicit solution of wave dispersion equation. **Coastal Engineering** 45, p.71–74, 2002

HAMM, L. and PERONNARD, C. Wave parameters in the nearshore: A clarification. **Coastal Engineering** 32, p. 119-135, 1997

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

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** 47, p. 367–379, 2003

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

HUDSPETH, R.T. and SULISZ, W. Stokes drift in two-dimensional wave flumes.

HULL, P. and MÜLLER, G. An investigation of breaker heights, shapes and pressures. **Ocean Engineering** 29, p. 59-79, 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** 29, p. 1711–1724, 2002

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

JIANG, L., REN, X., WANG, K.-H. and JIN, K.-R. Generalized Boussinesq model for periodic non-linear shallows-water waves. **Ocean Engineering** 23, nº 4, p. 309-323, 1996

J. Fluid Mech, Vol. 173, 1986 p. 683-707

J. Fluid Mech, Vol. 230, 1991 p. 209-229

JOHANNESSEN, T.B. and SWAN, C. Non linear transient water waves – part I. A numerical method of computation with comparisons to 2-D laboratory data. **Applied Ocean Research** 19, p. 293-308, 1997

JOHNSON, B., CLARKE, D., PODENZANA-BONVINO, C. and HASEGAWA, K.

International Towing Tank Conference - **ITTC Symbols and Terminology List** Nearly Final Version 1999. December 12, 2001

JOO, S.W., SCHULTZ, W.W. and MESSITER, A.F. An analysis of the initial-value wavemaker problem. **J.Fluid Mech**, Vol. 214, p. 161-183, 1990

JOURNÉE, J.M.J. and PINKSTER, J. Introduction in ship hydromechanics. Lecture MT519 . Draft Edition . **Delft University of Technology**, April 2002

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

KENNEDY, A.B. and KIRBY, J.T. An unsteady wave driver for narrow-banded waves: Modeling nearshore circulation driven by wave groups. p. 1-37, June 2002.

KENNEDY, A.B., KIRBY, J.T. and GOBBI, M.F. Simplified higher-order Boussinesq equations - I. Linear simplifications. **Coastal Engineering** 44, p. 205– 229, 2002

KIM, J.W. and ERTEKIN, R.C. **A Numerical Study of Nonlinear Wave Interaction in Regular and Irregular Seas**: Irrotational Green-Naghdi

Model. University of Hawaii at Manoa - Department of Ocean and Resources Engineering. p.1-19.

KLAKA, K. Model tests on a circular cylinder with appendages. **Report CMST 2001-14. Centre for Marine Science and Technology.** Curtin University of Technology. Perth, Western Australia, 20 August 2001.

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

KROGSTAD, H.E. and ARNTSEN, A.Ø. Linear Wave Theory Part A - Regular waves. **NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY** Trondheim, Norway, p. 1-42, February 2000

KROGSTAD, H.E., WOLF, J., THOMPSON, S.P. and WYATT, L.R. Methods for intercomparison of wave measurements. **Coastal Engineering** 37, p. 235-257, 1999

KROGSTAD, H.E., BARSTOW, S.F., AASEN, S.E. and RODRIGUEZ, I. Some recent developments in wave buoy measurement technology. **Coastal Engineering** 37, p. 309-329, 1999

KROGSTAD, H.E., BARSTOW, S.F. Recent advances in wave measurement technology. **Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference.** Brest, France, 1999

KUO, Y.-Y. and 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** 24, p. 355-356, 1995

KWAY, J.H.L., LOH, Y.-S and CHAN, E.-S. Laboratory study of deep-water breaking waves. **Ocean Engineering**, Vol. 25, ° 8, p. 657-676. 1998

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

LARSON, M., KRAUS, N.C. and WISE, R. A. Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves . **Coastal Engineering** 36, p. 59–85, 1999

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

LEE, J.-F and LAN, Y.-J. A second-order solution of waves passing porous structures. **Ocean Engineering** 23, nº 2, p. 143-165, 1996

LEEUWEN, P.J. van and KLOPMAN, G. A new method for the generation of second-order random waves. **Ocean Engineering** 23, nº 2, p.167-192, 1996

LI, M. Control analysis of the wave generator in ocean engineering. **8th IEEE Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice**. Hong Kong, p. 173-175, 2001

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

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

LIU, P.L.F and LOSADA, I.J. Wave propagation modeling in coastal engineering. Modélisation de la houle en ingénierie côtière. **Journal of Hydraulic Research**, Vol, 40, nº 3, p.229-240, 2002

LONGRIDGE, J.K., RANDALL, R.E. and ZHANG, J. Comparison of experimental irregular water wave elevation and kinematic data with new hybrid wave model predictions. **Ocean Engineering** 23, nº 4, p. 277-307, 1996

LONGUET-HIGGINS, M.S. Eulerian and Lagrangian aspects of surface waves.

LOSADA, I.J., LOSADA, M.A., BAQUERIZO, A. An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers. **Applied Ocean Research** 15, p. 207-215, 1993

LYNETT, P.J. and LIU, P.L.-F. A two-dimensional, depth-integrated model for internal wave propagation over variable bathymetry. **Wave Motion** 36, p. 221-240, 2002

MA, R. and LI, G. Spectral analysis of Stokes waves. **Ocean Engineering** 29, p. 593-604, 2002

MAI, S., OHLE, N. and DAEMRICH, K.-F. Numerical simulation of wave propagation compared to physical modeling. **Proceedings of HYDRALAB-Workshop**, Hannover, Germany. p. 1-10, 1999

MANSOUR, A.M., WILLIAMS, A.N. and WANG, K. H. The diffraction of linear waves by a uniform vertical cylinder with cosine-type radial perturbations. **Ocean Engineering** 29, p. 239-259, 2002

MARSON, A.E. Laser Induced Fluorescence Experiments on Breaking Waves. **First Year Progress Report** - Department of Physics and Astronomy. May 2001

MARTIN, T.R. and SMITH, J.B. Analysis of the Performance of the Prefabricated Erosion Prevention (P.E.P.) Reef System Town of Palm Beach, Florida. **Coastal Engineering**. CETN-II-36 3/97

MASSEL, S.R. On the largest wave height in water of constant depth. **Ocean Engineering** 23, nº 7, p. 553-573, 1996

MATHEW, V., BHATTACHARYYA, S.K. and IDICHANDY, V.G. Perforated-ball velocity meter measurements of the water wave kinematics in nonlinear, long and short crested waves. **Applied Ocean Research** 23, p. 235-248, 2001

MAVRAKOS, S.A. Hydrodynamic characteristics of floating toroidal bodies. **Ocean Engineering**. Vol. 4, nº 4. p.381-399, 1997

McIVER, P. The wave field scattered by a vertical cylinder in a narrow wave tank. **Applied Ocean Research** 15, p. 25-37, 1993

MELITO, I. And MELBY, J.A. Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC®. **Coastal Engineering** 45, p. 33- 52, 2002

MILES, J. Wave reflection from a gently sloping beach. **J. Fluid Mech.**, Vol. 214, p. 59-66, 1990

MILES, J. Edge waves on a gently sloping beach. **J. Fluid Mech.**, Vol. 199, p. 125-131, 1989

MILES, J. Parametrically excited, standing cross-waves. **J. Fluid Mech.** Vol. 186, p. 119-127, 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** 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. **OMAE**, Vol. 1, Offshore Technology ASME 1993

NALLAYARASU, S., FATT, C.H. and SHANKAR, N.J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments. **Ocean Engineering**, Vol. 22, nº 1, p. 77-86, 1995

NEELAMANI, S., BHARATKUMAR, B.H., MAHADEVAN, R. and SUNDAR, V. Flume Confinement Effect on Wave-Induced Dynamic Pressures on Twin-Tandem Cylinders. **Ocean Engineering** Vol. 20, nº 3, p.313-337, 1993

NEELAMANI, S. and VEDAGIRI, M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers. Technical Note. **Ocean Engineering** 29, p. 215-238, 2002

NEELAMANI, S. and RAJENDRAN, R. Wave interaction with T-type breakwaters. **Ocean Engineering** 29, p. 151-175, 2002

NEELAMANI, S. and RAJENDRAN, R. Wave interaction with $\square\perp\square$ - type breakwaters. **Ocean Engineering** 29, p. 561-589, 2002

NEWMAN, J.N. Wave Effects on Multiple Bodies. **Hydrodynamics in Ship and Ocean Engineering**, RIAM, Kyushu University, p. 3-26, April 2001

NIEDZWECKI, J.M., van de LINDT, J.W. and SANDT, E.W. Characterizing random wave surface elevation data. **Ocean Engineering** 26, p. 401-430, 1999

NOCA, F., SHIELS, D. and JEON, D. Measuring instantaneous fluid dynamic forces on bodies, using only velocity fields and their derivatives – Special brief note. **Journal of Fluids and Structures** 11, p. 345 – 350, 1997

NOHARA, B. T Motion control application of digital signal processing. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagoya, Japan. P. 1158-1162

O'HARE, T.J. and DAVIES, A.G. A comparison of two models for surface-wave propagation over rapidly varying topography. **Applied Ocean Research** 15, p. 1-11, 1993

OZANNE, F., CHADWICK, A.J., HUNTLEY, D.A., SIMMONDS, D.J. and LAWRENCE, J. Velocity predictions for shoaling and breaking waves with a Boussinesq-type model. **Coastal Engineering** 41, p. 361–397, 2000

PAINE, M. Hydrodynamics of surfboards – final year thesis. University of Sydney. 1974

PAYNE, P.R. The response of a hydrofoil to wave orbital velocity fields. **Ocean Engineering**. Vol. 4. nº 3, p. 235-263, 1997

PELINOVSKY, E., TALIPOVA, T., KURKIN, A. and KHARIF, C. Nonlinear mechanism of tsunami wave generation by atmospheric disturbances. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, p. 243–250, 2001.

PERLIN, M. and SCHULTZ, W.W. Capillary effects on surface waves. University of Michigan, Ann Arbor, MI, p. 1-24, 15 may 1999.

RAO, S., RAO, N.B.S. and SATHYANARAYANA, V.S. Technical Note - Laboratory investigation on wave transmission through two rows of perforated hollow piles. **Ocean Engineering** 26, p. 675-699, 1999

REPETTO, R. A. Numerical towing tank: analysis of accuracy and practicability. **European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering**. ECCOMAS 2000. Barcelona, p. 11-14, September 2000

REQUEJO, S., VIDAL, C. and LOSADA, I.J. Modelling of wave loads and hydraulic performance of vertical permeable structures. **Coastal Engineering** 46, p. 249-276, 2002

RIJKEN, O.R. and NIEDZWECKI, J.M. Direct displacement measurements of submerged objects. **Ocean Engineering**, Vol. 25, nº 4-5, p. 309-321, 1998

ROGERS, D. and KING, G.B. Wave generation using ocean and wave. **Edinburgh Designs Ltd**. Version 4.0, April 1999

ROJAS, L.P. Diez Años de I+D en el canal de la Etsin. **XXXVI Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval**. Cartagena, Noviembre 1999.

ROUSSET, J-M. Study of the flow pattern in a perforated breakwater using Piv measurements.

SANTOS, J.R.S. Gás natural na matriz energética. **Petróleo Brasileiro S/A**. Rio de Janeiro, RJ

SCHÄFFER, H. A. Second-Order wavemaker theory for irregular waves. **Ocean Engineering**, Vol. 23, nº 1, p.47-88, 1996

SCULLEN, D.C. Accurate Computation of Steady Nonlinear Free-Surface Flows

Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Applied Mathematics at The University of Adelaide, February, p. 1-146, 1998

SILVA, R., SALLES, P. PALACIO, A. Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed. **Coastal Engineering** 44, p. 239– 260, 2002

SKOTNER, C. and APELT, C.J. Application of a Boussinesq model for the computation of breaking waves. Part 1: Development and Verification. **Ocean Engineering** 26, p. 905–925, 1999

SMITH, J.A. and RIEDER, K.F. Wave induced motion of flip – CORRIGENDUM. **Ocean Engineering**. Vol. 24, nº 5, p. 497, 1997

SMITH, J.A. and RIEDER, K.F. Wave induced motion of flip. **Ocean Engineering**. Vol. 24, nº 2, p. 95-110, 1997

SMITH, J.M. Modeling Nearshore Wave Transformation with STWAVE. **ERDC/CHL CHETN-I-64**, September 2001

SMITH,S.F. and SWAN, C. Extreme two-dimensional water waves: an assessment of potential design solutions. **Ocean Engineering** 29, p. 387-416, 2002

SOBEY, R.J. and HUGHES, S.A. A locally nonlinear interpretation of PUV Measurements . **Coastal Engineering** 36, p. 17–36, 1999

SONG, J.-B. and WU, Y.-H. Statistical distribution of water-particle velocity below the surface layer for finite water depth. **Coastal Engineering** 40, p. 1–19, 2000

SOUTER, K. and KRACHMAN, H.E. Measurement of local pressures resulting from hydrodynamic impact. **Technical Paper 269**. ENDEVCO TP 269

SÖYLEMEZ, M. A general method for calculating hydrodynamic forces. **Ocean Engineering** 23, nº 5, p. 423-445, 1996

SPELL, C.A., ZHANG, J. and RANDALL, R.E. Hybrid wave model for unidirectional irregular waves – part II. Comparison with laboratory measurements. **Applied Ocean Research** 18, p. 93-110, 1996

SROKOSZ, M.A. Breaking effects in standing and reflected waves. **International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering**. 1981

STANSELL, P., WOLFRAM, J. and LINFOOT, B. Effect of sampling rate on wave height statistics. **Ocean Engineering** 29, p. 1023-1047, 2002

STAZIKER, D.J., PORTER, D. and STIRLING, D.S.G. The scattering of surface waves by local bed elevations. **Applied Ocean Research** 18, p. 283-291, 1996

STERN, F., LONGO, J., ABDEL-MAKSOUUD, M. and SUZUKI, T. Evaluation of surface – Ship Resistance and Propulsion Model – Scale Database for CFD Validation. **Proceedings 1st Symposium on Marine Application of Computational Fluid Dynamics**, McLean, VA, 19-21 May 1998,

STEELE, K.E., WANG, D.W., EARLE, M.D. MICHELENA, E.D. and DAGNALL, R.J. Buoy pitch and roll computed using three angular rate sensors. **Coastal Engineering** 35, p. 123–139, 1998

SUH, H.D., CHOI, J.C., KIM, B.H., PARK, W.S. and LEE, K.S. Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. **Coastal Engineering** 44, p. 141– 151, 2001.

SUH, K.D., LEE, C., PARK, Y.H. and LEE, T.H. Experimental verification of horizontal two-dimensional modified mild-slope equation model. **Coastal Engineering** 44, p. 1-12, 2001

SUH, K.D., PARK, W.S. and PARK, B.S. Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. **Coastal Engineering** 43, p.149-159, 2001

SULISZ, W. and HUDSPETH, R.T. Complete second-order solution for water waves generated in wave flumes. **Journal of Fluids and Structures** 7, p. 253-268, 1993

SUN, Z-C., ZHU, Z-H. Wave Damping due to porous seabed effect. **Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference**, France 1999

TENG, M.H., FENG, K. and LIAO, T.I. Experimental study on long wave run-up on plane beaches. Proceeding of the tenth **International Offshore and Polar Engineering Conference**. Seattle, USA, 2000

ITTC - The Loads and Responses Committee. Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC

ITTC - 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

TRASSOUDAINE, D. and NACIRI, M. A comparison of a heuristic wave drift damping formula with experimental results. Technical note. **Applied Ocean Research** 21, p. 93-97, 1999

TROCH, P., De ROUCK, J. An active wave generating-absorbing boundary condition for VOF type numerical model. **Coastal Engineering** 38, p. 223-247, 1999

TROCH, P., De ROUCK, J. and Van DAMME, L. Instrumentation and prototype measurements at the Zeebrugge rubble mound breakwater. **Coastal Engineering** 35, p. 141-166, 1998

TSAI, C.-P., CHEN, H.-B. and HSU, J.R.-C. Calculations of wave transformation across the surf zone. **Ocean Engineering** 28, p.941-955, 2001

TSAI, W., YUE, D.K.P. and YIP, K. Resonantly excited regular and chaotic motions in a rectangular wave tank. **J. Fluid Mech.** Vol. 216, p. 343-380, 1990

TUCKER, M.J. Recommended standard for wave data sampling and near-real-time processing. **Ocean Engineering** Vol. 20, nº 5, p.459-474, 1993

TWU, S.-W, LIU, C.-C. The reflection coefficient of sloping walls. **Ocean Engineering** 26, p. 1085-1094, 1999

TWU, S.W., LIU, C.-C. The elimination of re-reflected waves by a porous medium of finite thickness. **Ocean Engineering** Vol. 21, nº 2, p. 179-194, 1994

TWU, S-W. and DUANN, J-J. An approach for eliminating re-reflected waves. **Ocean Engineering**, Vol. 22, nº 5, p. 421-437, 1995

TWU, S-W., CHIEU, C-C. A highly wave dissipation offshore breakwater. **Ocean Engineering** 27, p. 315-330, 2000

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Serviço de Bibliotecas. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. Serviço de Bibliotecas da EPUSP. 2ª ed. São Paulo, 39 p., 2001

URSELL, F., DEAN, R.G. and YU, Y.S. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment.

WAMSLEY, T., HANSON, H. and KRAUS, N.C. Wave transmission at detached breakwaters for shoreline response modeling. **ERDC/CHL CHETN-II-45** March 2002

WATTS, Philip, GRILLI, S.T. Tsunami generation by submarine mass failure- Part I: Wavemaker models.

WEHAUSEN, J. V. e LAITONE, E. V. Surface Waves. In : **Encyclopaedia of Physics**, V. IX, p. 446-778 Springer Verlag, 1960

WEI, G., KIRBY, J.T. and SINHA, A. Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. **Coastal Engineering** 36, p. 271–299, 1999

WIEGEL, R.L. A presentation of cnoidal wave theory for practical application.

WILLIAMS, A.N. Dual floating breakwaters. **Ocean Engineering**, Vol. 20, nº 3, p. 215-232, 1993

WINTERSTEIN, S.R and SWEETMAN, B. Air gap response of floating structures: statistical predictions versus observed behavior. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. ,Vol.123, p. 118-123, august 2001

WOOD, D.J., MUTTRAY, M. and OUMERACI, H. The SWAN model used to study wave evolution in a flume. **Ocean Engineering** 28, p. 805-823, 2001

WORK, P.A. and ROGERS, W.E. Wave transformation for beach nourishment projects. **Coastal Engineering** 32, p. 1-18, 1997

Workshop on Research with NEES Tsunami Facility – Minutes. Oregon State University, Corvallis, Oregon. April 6-7, 2001

APÊNDICE

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		

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
AUC	DK	canal	25	1,5	0,7	Hs=0,2 2D irregular		
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 regular irreg.	L > 0.4 m	
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 Hydrodynamics centre	BG	bacia	17	17	0,5	Hs=0,15 regular		
Bulgarian Ship Hydrodynamics centre (BSHC)	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			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
Canal de Experiências Hidrodinâmicas de el Pardo (CEHIPAR)	E	tanque	150	30	5	Hs=0,9 regular irregular	1,7<L<15 m	CPMC - 60 flaps
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 ³
Coastal Research Centre (FZK)	D	onda canal	324	5	5	H=2,5 Hs=1,5 reg, irreg		
LEGI-UJF coriolis	F	canal	36	0,55	1,3	irregular		

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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	
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	regular/ir regular	1<L<10m	
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		

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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
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 sec	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

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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		
FH Kiel	D	onda canal	12,5	0,3	0,4	H=0,23 Hs=0,15 reg/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	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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	bacia	54	27	0,8	Hs=0,2 3-D		
HR Wallingford	UK	canal	52	1,2	1,7	Hs = 0,4 reg/irreg		
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			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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			
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 Èerni	YU	bacia	50	20				
Jaroslav Èerni	YU	tanque	8,4	8	4			
Jaroslav Èerni	YU	canal	110	2	1,7			
Jaroslav Èerni	YU	canal	22,5	0,75	0,95			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observa ções
Jaroslav Èerni	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
LNEC	P	onda canal	49,4	1,6	1	Hs=0,35, reg/irreg		sem carro
LNEC	P	tilting canal	40,7	2	1			max. 6 mm
LNHE	F	bacia	50	30	0,8	Hs = 0,4 irregular		56 flaps
LNHE	F		33	28	0,45	Hs = 0,2 irregular		
LNHE	F	bacia	20	10	1,1			
LNHE	F	bacia	20	6	0,5			
LNHE	F	canal	72	1,5	1,2	Hs = 0,7 irregular		
LNHE	F	canal	33	0,6	0,6	Hs=0,35 irregular		
LNHE	F	canal	25	6,5	1,2			
LNHE	F	canal	25	2	1			
LNHE	F	canal	18	2	0,5			
LNHE	F	canal	50	0,4	0,5			
LNHE	F	tilting canal	20	0,78	0,7			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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		
MARIN	NL	tanque reboq	120	8	1	Hs =0,1 regular irregular	L = 8 m	
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.

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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		
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 ²
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	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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
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

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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/irregular	0,6<L<4,6 m	Vento
T.G. Masaryk Água Reasearch Institute	CZ	bacia	57,6	21				
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			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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	
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

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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 reg/irreg		
University Hannover, Franzius-Institute	D	onda canal	107	2,2	1,2	H= 0,5 Hs= 0,4 reg/irreg		
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	

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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 regular	1<L<5m	
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 reg/irreg		
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 reg/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			

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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 reg/irreg	T < 1s	
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	
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

Entidade	País	Tipo	comp. (m)	larg. (m)	prof. (m)	Altura Onda (m)	Período ou Comp Onda	Observações
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