



CONSULTA
FD-3249

Sao Paulo
2002

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

**IMPLANTAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM
GERADOR DE ONDAS TIPO PLACA BASCULANTE**

CARLOS ALBERTO GUEDES FREIRE DE SOUZA

CARLOS ALBERTO GUEDES FREIRE DE SOUZA

IMPLANTAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM
GERADOR DE ONDAS TIPO PLACA BASCULANTE

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

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica.

Orientador:
Prof. Dr. Helio Mitio Morishita

São Paulo
2002

Leonardo da Vinci

“Remember, when discoursing about water,
to induce first experience, then reason.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP a oportunidade concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica que colaboraram e me incentivaram para a realização deste trabalho, em especial ao João Alcino A. Martins pela grande colaboração e à Marlei Silveira de Araújo pelo capricho das ilustrações.

Agradeço ao apoio recebido durante o programa de mestrado pelos colegas Luiz Alexandre Aleixo e Rubens Ramires Sobrinho.

Agradeço as colaborações recebidas dos amigos Kazuo Hirata e Antônio Carlos Fernandes.

Agradeço em especial ao meu orientador Prof. Dr. Helio M. Morishita, pela confiança depositada na minha capacidade, pela paciência e profissionalismo na orientação desse trabalho, além da imprescindível contribuição na elaboração deste trabalho.

E aproveitando a ocasião quero deixar também a minha imensa gratidão aos meus pais Luiz e Wilma pela extrema ajuda recebida.

35	3 - PROJETO DO GERADOR DE ONDAS.....
35	3.1 - Principais Requisitos e Critérios de Projeto.....
42	3.2 - Projeto do Gerador de Ondas Tipo Placa Basculante.....
45	3.2.1 - Seleção do atuador.....
46	3.2.2 - Deslocamento e força requeridos no atuador.....
49	3.2.3 - Sistema de acionamento.....
50	3.2.3.1 - Seleção do parafuso de esferas circulares.....
52	3.2.3.2 - Seleção do servomotor.....
57	3.2.4 - Sistema de controle.....
58	3.2.5 - Atuador.....
60	3.3 - Absorvedor de Ondas.....
62	4 - MODELO MATEMÁTICO DO GERADOR DE ONDAS.....
62	4.1 - Modelo da Onda.....
63	4.1.1 - Nomenclatura da onda.....
65	4.1.2 - Equação da onda.....
65	4.1.2.1 - Equação diferencial característica.....
66	4.1.2.2 - Problema de valor de contorno para ondas planas.....
69	4.1.2.3 - Solução para o problema de valor de contorno linearizado.....
75	4.1.2.4 - Solução para a onda progressiva.....
77	4.2 - Equação do Atuador.....
77	4.2.1 - Teoria do gerador de ondas para ondas planas <i>produzidas por uma placa.....</i>
77	4.3 - Modelo do Mecanismo.....
85	4.4 - Equação Geral do Sistema.....
89	5 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GERADOR DE ONDAS.....
90	5.1 - Procedimento Experimental.....
94	5.2 - Resultados Obtidos.....
102	5.3 - Análise dos Resultados.....
110	5.4 - Análise Crítica do Critério Adotado para o Projeto.....

6 - CONCLUSÕES.....114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....116

APÊNDICE A - Preparação de uma Instrumentação para a Medida da Força.

APÊNDICE B - Equipamentos Utilizados nos Ensaios.

Lista de Símbolos

Alfabeto Romano

- a - amplitude do movimento linear do atuador ($S/2$ ou zero pico).
- A - amplitude de onda ($A = H/2$ ou zero pico).
- F - força total de acionamento.
- g - aceleração da gravidade.
- h - profundidade em relação à superfície d'água.
- H - altura de onda ($H = 2A$) (valor de crista ao cavado ou pico a pico)
- k - número de onda (número de ondas (ciclos) [em radsianos] por unidade de comprimento). ($k = 2\pi/\lambda$).
- L - comprimento de onda. ($L = L_0 \tanh kh$).
- L_0 - comprimento de onda para águas profundas ($L_0 = gT^2/2\pi$). Também representa-se por λ .
- xyz - sistema de coordenadas cartesianas, em que o plano oxy coincide com a superfície da água quando calma e o eixo z apontado para cima onde a aceleração da gravidade age no sentido negativo.
- S - curso do movimento linear horizontal do atuador na cota da lâmina d'água.
- t - tempo.
- T - período de onda.
- u - componente da velocidade das partículas fluidas na direção do eixo ox.
- \vec{v} - vetor velocidade das partículas fluidas.
- w - componente da velocidade das partículas fluidas na direção do eixo oz.

Continuação da lista de símbolos

Alfabeto Grego

- ϕ - potencial de velocidade.
- η - elevação da superfície d'água causada pela onda.
- λ - comprimento de onda (genérico; usado geralmente para águas profundas).
Também representado por L_0 . ($L_0 = gT^2/2\pi$).
- ω - frequência de onda (radianos por segundo). ($\omega = 2\pi/T$).

Lista de Figuras

16	Figura 2.1 – Conceções de geradores de ondas.....
17	Figura 2.2 – Tipos atuadores mais utilizados nos laboratórios.....
33	Figura 2.3 – Geometria de absorvedores de ondas passivos.....
43	Figura 3.1 – Desenho esquemático do tanque.....
44	Figura 3.2 – Ondas requeridas para projeto.....
45	Figura 3.3 – Função de transferência de um atuador tipo placa basculante.....
47	Figura 3.4 – Deslocamento do movimento no topo do atuador.....
48	Figura 3.5 – Gráfico com valores analíticos da força necessária para geração de ondas.....
50	Figura 3.6 – Sistema de acionamento.....
56	Figura 3.7 – Curvas de operação do servomotor G 426.404.....
57	Figura 3.8 – Diagrama do sistema de controle do gerador de ondas.....
59	Figura 3.9 – Dimensões principais do atuador placa basculante.....
60	Figura 3.10 – Esquema ilustrativo do gerador de ondas.....
61	Figura 3.11 – Absorvedor passivo com dupla rampa inclinada.....
64	Figura 4.1 – Sistema de coordenadas e nomenclatura da onda.....
67	Figura 4.2 – Ondas bidimensionais especificadas como um problema de valor de contorno.....
78	Figura 4.3 – Esquema Simplificado do gerador tipo placa basculante.....
86	Figura 4.4 -- Esquema do mecanismo do gerador de ondas.....
87	Figura 4.5 – Gráfico de resposta do mecanismo.....

88	Figura 4.6 – Diagrama de blocos da equação geral do sistema.....
91	Figura 5.1 – Diagrama esquemático do arranjo experimental.....
93	Figura 5.2 – Vista do gerador de ondas durante os ensaios.....
95	Figura 5.3 – Registro do sinal de onda, para uma frequência de 1,2 Hz.....
95	Figura 5.4 – Espectro de potência do sinal da onda.....
97	Figura 5.5 – Registro do sinal de onda, para uma frequência de 0,6 Hz.....
98	Figura 5.6 – Registro do sinal do movimento da mesa.....
98	Figura 5.7 – Espectro de potência do sinal do movimento da mesa.....
100	Figura 5.8 – Registro do sinal da força total de acionamento.....
100	Figura 5.9 – Espectro de potência do sinal da força.....
102	Figura 5.10 – Comparação das alturas de ondas, experimental e requerido.....
106	Figura 5.11 – Comparação da função de transferência teórica e experimental.....
108	Figura 5.12 – Variação da razão força de acionamento por curso da mesa.....

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Alguns principais tanques de ondas existentes no mundo.....	7
Tabela 1.2 – Tanques de ondas existentes no mundo utilizados no ensino.....	9
Tabela 1.3 – Tanques de ondas existentes no Brasil.....	11
Tabela 4.1 – Possíveis soluções para a equação de Laplace, baseado na separação de variáveis . Reproduzida de (Dean, 1991).....	71
Tabela 5.1 – Dados dos ensaios.....	101

RESUMO

Na área de engenharia naval e oceânica é bastante comum e até necessário a utilização de recursos experimentais realizados em tanques de provas com modelos reduzidos. Essa necessidade resulta da dificuldade em obter-se analiticamente os movimentos e esforços que incidem sobre estruturas e sistemas flutuantes sob os efeitos das condições ambientais encontradas no mar. Para reproduzir em escala reduzida as condições ambientais, em especial as ondas oceânicas, é imprescindível a utilização de um sistema confiável e adequado para geração de ondas em laboratório.

Neste trabalho é apresentado um procedimento para projetar um gerador de ondas do tipo placa basculante. Este procedimento foi aplicado para o gerador de ondas instalado no tanque de provas do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Inicialmente são discutidas as características dos principais tipos de geradores de ondas e posteriormente selecionou-se o do tipo placa basculante fundamentado no procedimento proposto. É apresentado o modelo matemático do sistema e para avaliar seu desempenho foram efetuados ensaios com o gerador de ondas medindo-se as principais variáveis do processo. A análise é efetuada através da comparação entre as alturas de onda medidas e a requeridas para diversas frequências e também através das funções de transferência obtidas por meio da teoria linear e por medidas experimentais. Os resultados indicaram uma boa aproximação entre os valores esperados teoricamente e os medidos.

Por fim é efetuada uma análise crítica dos procedimentos adotados no projeto com sugestões para o aperfeiçoamento do equipamento.

ABSTRACT

In the marine engineering scenario it is quite common and necessary to accomplish tests with scale model of floating units since it is difficult to obtain mathematically forces and moments on the vessels due to current, wave and wind. In order to simulate the sea environmental conditions properly in the tanks it is essential to generate waves.

In this work a procedure to design a flap type wave generator is presented. This manner of proceeding was applied to the wave generator installed in the test tank of the laboratory of the Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

First the characteristics of the main wave generators are analyzed and then a flap type wave generator was selected based on the procedure considered in this work. A mathematical model of the system was elaborated and experiments with the wave generator were performed in order to verify the applied theory.

An analysis is carried out comparing the required height of the waves and the measured heights. Furthermore the theoretical transfer function is compared with that obtained through the trial recorded signals. The results have shown a good correlation between the values obtained theoretically and experimentally.

Finally a critical analysis of the process is carried out and suggestions are made to improve the system.

1 – INTRODUÇÃO.

1.1 – Considerações Gerais.

Com uma região costeira bastante extensa e somando ainda a área respectiva das 200 milhas náuticas referente a zona de exploração econômica exclusiva, o Brasil deverá desenvolver pesquisas relacionadas a esta imensa região costeira e oceânica para conseguir utilizar os vários recursos provenientes do mar. Assim como hoje, onde a tecnologia de extração de petróleo em lâminas d'água profundas só foi conseguida através de muitas pesquisas e ensaios realizados em laboratórios, novas tecnologias para utilização dos recursos do mar também dependerão do estudo e pesquisa do comportamento desse ambiente.

Para o êxito dessas futuras pesquisas, é necessário que novos engenheiros e pesquisadores sejam formados e treinados pelas escolas de engenharia, através de uma constante evolução na didática e completando com laboratórios de ensino e pesquisa bem equipados.

Ciente desta realidade o Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sentiu a necessidade de expandir a capacitação laboratorial para a realização de experimentos didáticos e de pesquisas exploratórias no campo de estudo de

ondas e comportamento de estruturas submetidas a essas. Assim decidiu-se investir na adaptação e desenvolvimento de um tanque de testes cuja instalação civil já era existente, faltando a instalação de um gerador de ondas, um absorvedor de ondas e uma plataforma para acesso à área de testes.

Dentre estes equipamentos o gerador de ondas é o mais complexo, tanto no sentido de seu funcionamento quanto no da especificação necessária para fornecimento de componentes, fabricação e montagem. Por ser um equipamento de emprego reduzido, é notório a dificuldade de encontrar empresas fornecedoras de equipamentos dessa natureza, mesmo no âmbito internacional.

As empresas estrangeiras consultadas, enviaram propostas em que a complexidade e qualidade dos equipamentos tornavam os custos excessivamente altos para uma instalação pretendida simples. Em vista do exposto acima, foi decidido que a implantação do equipamento seria realizada pelo próprio Departamento, onde o projeto do gerador de ondas, compra de componentes, contratação de fabricação e coordenação de montagem e instalação foram realizados aproveitando alguma experiência do grupo que assumiu o trabalho.

O projeto de um gerador de ondas em tanques de provas requer o estudo da teoria de propagação de ondas oceânicas bem como dos tipos de equipamentos para a reprodução em escala da própria onda. Esses equipamentos consistem de um atuador, de um sistema de acionamento e controlador. Como os tanques são limitados, há sempre a necessidade da

1.2 – Revisão Bibliográfica.

Atualmente os recursos computacionais permitem técnicas de simulação bastante complexas e alguns estudos de comportamento de estruturas oceânicas estão sendo realizados nos chamados tanques numéricos. Mas cabe aos tanques de ondas darem suporte experimental para a validação dos modelos numéricos. Assim a utilização dos tanques de provas continuam sendo imprescindíveis e, portanto, o conhecimento e estudo dessa instalação de pesquisa e ensino torna-se também uma atividade atual.

Através de um projeto infra-estrutura de pesquisa financiado pela FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, foram instalados um gerador de ondas, um absorvedor de ondas e uma plataforma móvel para acesso à área de teste no tanque de provas do laboratório. Ainda no mesmo projeto foram adquiridos sensores e condicionadores de sinais para medição e um sistema de aquisição de dados.

instalação de absorvedor de ondas. Esses componentes serão apresentados em detalhes no próximo capítulo.

Dentre a literatura consultada destaca-se a seguir as referências que auxiliaram de modo relevante a compreensão e deram sustentação para que o trabalho fosse desenvolvido.

Nohara (1997) faz uma revisão a respeito da importância atual dos tanques de provas e o uso de geração de ondas como uma tecnologia importante para estudo de problemas de engenharia oceânica e costeiras. Também examina os geradores de ondas atuais (multidirecionais) e a metodologia de geração de ondas oceânicas nos tanques.

Chakrabarti (1994) descreve de uma forma abrangente todo o assunto referente aos ensaios experimentais com a utilização de modelos reduzidos em tanques de ondas.

Também em (Battacharya, 1978) é encontrado a descrição dos tipos de geradores de ondas com maior aceitação e utilização em vários laboratórios do mundo. Descreve os vários tipos de ensaios normalizados pelo International Towing Tank Conference (ITTC). Ainda na mesma obra o autor descreve a física básica das ondas hidráulicas ("water waves") e as várias teorias que descrevem o comportamento de propagação.

Devido a existência de vários tipos de geradores de ondas e diversas concepções de construção (Chakrabarti, 1994), lista-se a seguir alguns dos tanques de ondas existentes no mundo e no Brasil, mostrando suas características fundamentais, e principalmente o tipo de gerador de ondas empregado em cada uma dessas instalações. Na revisão destas tabelas pode-se observar a tendência para determinados tipos de arranjos.

Urseil et all. (1960) descrevem nesse trabalho um experimento bastante controlado em termos de metodologia de medição, no qual uma comparação teórico e experimental comprova a teoria para um gerador de ondas tipo pista. Além de cuidadoso experimento, fazem considerações teóricas e práticas a respeito do desempenho do gerador de ondas e demais equipamentos envolvidos, como por exemplo o absorvedor de ondas.

Dean & Dalrymple (1991) e, novamente, Chakrabarti (1994) mostram o desenvolvimento da teoria do gerador de ondas partindo da teoria linear de ondas (teoria de onda de pequena amplitude).

Na mesma linha de estudos, os autores Le Méhauté (1976), Dean & Dalrymple (1991) e Rahman (1995) abordam amplamente a teoria de ondas de superfície, desde as equações de movimento, passando pela teoria de onda linear, utilizada neste trabalho e demonstrando as várias outras teorias para fenômenos não lineares.

1.2.1 – Alguns principais tanques de ondas no mundo

As principais característica que devem ser observadas em um tanque de provas são a geometria, o tipo de acionamento, atuador e absorvedor.

A geometria do tanque depende da sua finalidade principal. Para ensaios de manobrabilidade e ensaios de comportamento em ondas (“seakeeping”) dá-se preferência para tanques quadrados e para ensaios de reboque usam-se tanques longos.

Em geral tanques com finalidades comerciais ou militares possuem dimensões maiores que os voltados para ensino e pesquisa acadêmica.

Na Tabela 1.1 são mostradas características de alguns tanque de uso comercial. Os cinco primeiros são utilizados principalmente para reboque e os quatro últimos para manobras e comportamento em ondas.

O exame da tabela permite concluir que há uma razoável dispersão nas dimensões dos tanques. As ondas geradas são regulares e irregulares e o atuador é, em geral, tipo placa basculante com acionamento hidráulico. O absorvedor de ondas é, invariavelmente, passivo.

Tabela 1.1 – Alguns principais tanques de ondas existentes no mundo

	Instituição	Tanque	Dimensões	Ondas	Atuador	Acionamento	Absorvedor
1	Danish Maritime Institute, Lyngby, Dinamarca		compr.: 240 m largura: 12 m profund.: 5,5 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,9 m, faixa de 0,14 a 2,0 Hz	Dupla placa basculante ("dual-flap")	Hidráulico	
2	Maritime Research Institute (MARIN), Holanda	High Speed Towing Tank	compr.: 220 m largura: 4 m profund.: 4 m	regulares e irregulares, faixa de 0,2 a 3,3 Hz	Placa basculante ("Single-flap")	Hidráulico, servo controlado	passivo, perfil em arco circular montado em estrutura treliçada
3	Institute of Marine Dynamics Towing Tank, St. John's, Newfoundland, Canada	Deep Water Tank	compr.: 200 m largura: 12 m profund.: 7 m.	regulares e irregulares, máxima altura 1,0 m, faixa de 0,1 a 1,8 Hz	Dupla placa basculante ("dual-flap")	Hidráulico	passivo, arco de circ. (raio de 30m) com rugosidade e compr. 20m.
4	Maritime Research Institute (MARIN), Holanda	Seakeeping Basin	compr.: 100 m largura: 24 m profund.: 2,5 m c/foso de 6m prof.	regulares e irregulares, faixa de 0,3 a 1,4 Hz			
5	Offshore Model, Escondido, California, EUA		compr.: 90 m largura: 14,6 m profund.: 4,6 m c/foso prof. 9m	regulares e irregulares, máxima altura 0,74 m,	Placa basculante ("Single-flap")	Hidráulico, servo controlado	passivo
6	Norwegian Hydrodynamics Laboratory (MARINTEK) Trondheim, Noruega	Ocean Tank	compr.: 80 m largura: 50 m profund.: 10 m	regulares, irregulares e multidirecional, máxima altura 0,9 m	Dupla placa basculante ("dual-flap"), 144 atuadores	Hidráulico	
7	David Taylor Research Center, Bethesda, Maryland, EUA	Maneuvering and Seakeeping Facilities (MASK)	compr.: 79 m largura: 73 m profund.: 6,1 m.	regulares, irregulares e multidirecional, máxima altura 0,6 m, faixa de 0,35 a 1,3 Hz	Pneumáticos, (8 de um lado e 13 do lado adjacente)		passivo.
8	Offshore Technology Research Center, Texas A&M, College Station, Texas, EUA		compr.: 45,7 m largura: 30,5 m profund.: 5,8 m c/foso piso reg. c/ 16,7 m prof.	regulares e irregulares, máxima altura 0,8 m, faixa de 0,25 a 2,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap")	Hidráulico, servo controlado	passivo, progressivo, painéis de metal
9	Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Dinamarca		compr.: 30 m largura: 20 m profund.: 3 m c/foso prof. 12m	regulares, irregulares e multidirecional, máxima altura 0,6 m, faixa de 0,25 a 2,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap"), 60 atuadores	Hidráulico, servo controlado	

1.2.2 – Outros modelos de tanques de ondas no mundo

Na Tabela 1.2 são mostradas características de alguns tanques para finalidade acadêmica. Observa-se que as dimensões são menores quando comparadas com as da tabela 1.1, embora o tipo de ondas, atuador, acionador e absorvedor são semelhantes ao do caso anterior.

As instalações listadas nas tabelas 1.1 e 1.2 são apenas um pequeno número das existentes no mundo e por causa da grande variação das dimensões dos tanques de provas, dos sistemas de geração de ondas em escala, de equipamentos construídos com características diferentes, de métodos de ensaios, de formas de extrapolar e apresentar resultados, podem ser obtidos resultados diferentes em cada laboratório. Em vista desses aspectos, a ITTC procura estabelecer e recomendar procedimentos (de ensaios, de métodos de extrapolar, de apresentar resultados, etc.), ou seja, normaliza os procedimentos através de conferências periódicas entre seus membros."

Tabela 1.2 – Tanques de ondas existentes no mundo utilizados no ensino

	Instituição	Tanque	Dimensões	Ondas	Atuador	Acionamento	Absorvedor
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT) EUA	MIT Towing Tank	compr.: 33 m largura: 2,6 m profund.: 1,4 m.	regulares e aleatórias	Placa basculante ("Flap-type"), ("Single-flap")	Hidráulico	
2	University of New Orleans (UNO) EUA	UNO Towing Tank	compr.: 38 m largura: 4,6 m profund.: 2,4 m.	regulares e irregulares	Placa basculante ("Single-flap") p/ águas profundas e tipo pistão p/ águas rasas		
3	Memorial University of Newfoundland (MUN) Canadá	Ocean Engineering Research Center Towing Tank	compr.: 58 m largura: 4,5 m profund.: 2,2 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,70 m, Faixa de 0,3 a 1,3 Hz	Pistão ("piston-type")	Hidráulico	
4	Norwegian Hydrodynamics Laboratory (MARINTEK) Trondheim, Noruega	Tank II	compr.: 25 m largura: 2,8 m profund.: 1 m	regulares e irregulares, max. altura 0,3m, faixa de 0,33 a 4,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap")		
5	Unites States Naval Academy Annapolis - EUA	120 foot Towing Tank	compr.: 36,5 m largura: 2,4 m profund.: 1,5 m.	regulares, irregulares, faixa de 0,25 a 1,25 Hz	Dupla placa basculante ("dual-flap"),	Hidráulico	Passivo, progressivo com 7 camadas
6	University of Newcastle Inglaterra		compr.: 40 m largura: 3,7 m profund.: 1,3 m	regulares e irregulares bidirecionais, max. altura de 0,15 m, faixa de 0,55 a 2,3 Hz	Placa basculante ("Single-flap")		Passivo, plano inclinado
7	Australian Maritime College Austrália		compr.: 60 m largura: 3,5 m profund.: 1,5 m	regulares e irregulares, faixa de 0,5 a 2,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap")	Hidráulico	Passivo, plano inclinado
8	Kobe University of Mercantile Marine - Japão	Shallow Water Tank	compr.: 60 m largura: 6 m profund.: 1,5 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,4 m, faixa de 0,2 a 3,3 Hz	Pistão ("piston-type")	Hidráulico	Passivo

1.2.3 – Tanques de ondas existentes no Brasil

O Brasil possui tanque de reboque ("towing tank") desde de 1956, sendo que em meados da década 70 foi preparado para ensaios em ondas. Trata-se do tanque de provas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, que desde a sua inauguração é utilizado em atividades de ensino e pesquisa, além do atendimento no âmbito comercial.

Agora o tanque objeto desse trabalho, existem ainda mais três tanques de ondas, na verdade chamados canais de ondas, devido sua seção transversal bastante estreita, usados para fins didáticos e pesquisa em universidades.

Também está para ser inaugurado em breve, no Rio de Janeiro, um tanque oceânico com 50 m de comprimento e 30 m de largura e 15 m de profundidade, provido de gerador de ondas multidirecional e sistema de geração de correntes marítimas e ventos. Em termos de profundidade esse será o maior tanque oceânico do mundo, cuja necessidade se faz devido às atividades de extração de petróleo e gás natural, em regiões da costa marítima que já ultrapassam 2000 m de lâmina d'água.

Relaciona-se na Tabela 1.3 os tanques de ondas existentes no Brasil e suas características fundamentais

Tabela 1.3 – Tanques de ondas existentes no Brasil

	Instituição	Tanque	Dimensões	Ondas	Atuador	Acionamento	Absorvedor
1	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT São Paulo	Tanque Seção Larga	compr.: 220 m largura: 6,6 m profund.: 4,5 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,40 m, faixa de 0,25 a 2,0 Hz	Cunha (Plunger-type)	Hidráulico	Passivo, plano inclinado impermeável com rugosidade
2	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT São Paulo	Tanque Seção Estreita	compr.: 60 m largura: 3,7 m profund.: 2,0 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,15 m, faixa de 0,5 a 3,3 Hz	Cunha (Plunger-type)	Hidráulico	Passivo, plano inclinado impermeável com rugosidade
3	Universidade de São Paulo - USP Departamento de Eng. Naval e Oceânica da Escola Politécnica São Paulo	Tanque I	compr.: 25 m largura: 1,0 m profund.: 1,0 m	regulares e irregulares, máxima altura 0,1 m, faixa de 0,5 a 3,0 Hz	Cunha (Plunger-type)	Elétron-mecânico	Passivo, plano inclinado impermeável com rugosidade
4	Universidade de São Paulo - USP Departamento de Eng. Naval e Oceânica da Escola Politécnica São Paulo	Tanque II	compr.: 21,5 m largura: 4,85 m profund.: 1,78 m	regulares e irregulares, máxima altura , faixa de 0,5 a 3,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap")	Elétron-mecânico	Passivo, plano inclinado impermeável com rugosidade
5	Universidade de São Paulo - USP Departamento de Eng. Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica São Paulo	Canal de Ondas	compr. 50 m largura: 1,0 m profund.: 1,4 m	Regulares. Faixa de 0,3 a 1,3 Hz	Pistão ("Piston-type")	Elétron-mecânico	Passivo, plano inclinado impermeável com rugosidade
6	Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ Rio de Janeiro	Canal de Ondas	compr. 30 m largura: 1,0 m profund.: 1,0 m	Regulares. Faixa de 0,33 a 4,0 Hz	Placa basculante ("Single-flap") e Pistão (reversível)	Hidráulico	Passivo, plano inclinado impermeável regulável

1.3 – Objetivo do Trabalho.

Os objetivos deste trabalho são:

a-) Explicitar um procedimento para o projeto de um gerador de ondas do tipo placa basculante (“tap type”);

b-) Analisar o desempenho do gerador de ondas implantado no tanque de provas II do laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por meio da comparação dos resultados teóricos com dados experimentais obtidos por meio de ensaios;

c-) Analisar criticamente o procedimento adotado para o projeto do gerador de ondas.

A função do gerador de ondas é de reproduzir as ondas encontradas no meio ambiente marítimo. Os valores de altura e os período das ondas encontradas na região do mar em que se está interessado em reproduzir num tanque de ondas deverão ser convertidos numa escala apropriada. Quando essa onda gerada no tanque é a fonte de excitação nos testes com modelos de embarcações ou de outro tipo de estrutura, o fator de escala para a onda deve ser o mesmo do modelo. Assim o gerador de ondas deve ser capaz de alcançar as alturas de ondas e frequências requeridas. Além disso a direção das ondas em relação ao posicionamento do modelo deve ser controlada. Portanto um gerador de ondas deve basicamente reproduzir no tanque a altura, o período (ou frequência) e a direção da onda de

2.1 – Principais requisitos hidrodinâmicos de geradores de ondas.

São descritos e comentados a seguir aspectos sobre diferentes tipos de geradores de ondas e seus componentes. Essas informações compõe a relação de dados necessários para a construção de subsídios para o projeto. A nomenclatura utilizada para definição de uma onda é apresentada detalhadamente no capítulo 4.

2 – ARRANJOS DE GERADORES DE ONDAS

A seguir são mostrados os diferentes tipos de atuadores, sistemas de acionamento, controle e absorvedores, que combinados convenientemente formam os vários tipos de geradores de ondas.

transfêrencia do gerador de ondas.

pela agitação da água. Geralmente essa relação é chamada de função de gerada no tanque e o curso ("stroke") do elemento mecânico responsável um gerador de ondas pode ser medida pela razão entre a altura de onda ajustam as diversas condições de utilização. A eficiência hidrodinâmica de eficiência hidrodinâmica bastante satisfatória e arranjos mecânicos que se e frequências desejadas. Atualmente existem concepções de projetos com desenvolvidos e otimizados em relação a capacidade de atingir as alturas Em razão desses fatos diversos tipos de geradores de ondas foram

exemplo, mudança na altura e no comprimento da onda.

tanque, podem mudar o comportamento do perfil da onda, como por indesejadas nas ondas geradas. Reflexão nas paredes e efeitos do fundo do que a geometria do tanque também pode provocar perturbações ondas, não garantem a perfeita reprodução das ondas no tanque, uma vez Essas exigências, unicamente cumpridas pelo dispositivo gerador de

proveniente do gerador.

interesse, sem que nenhum outro tipo de perturbação apareça na água

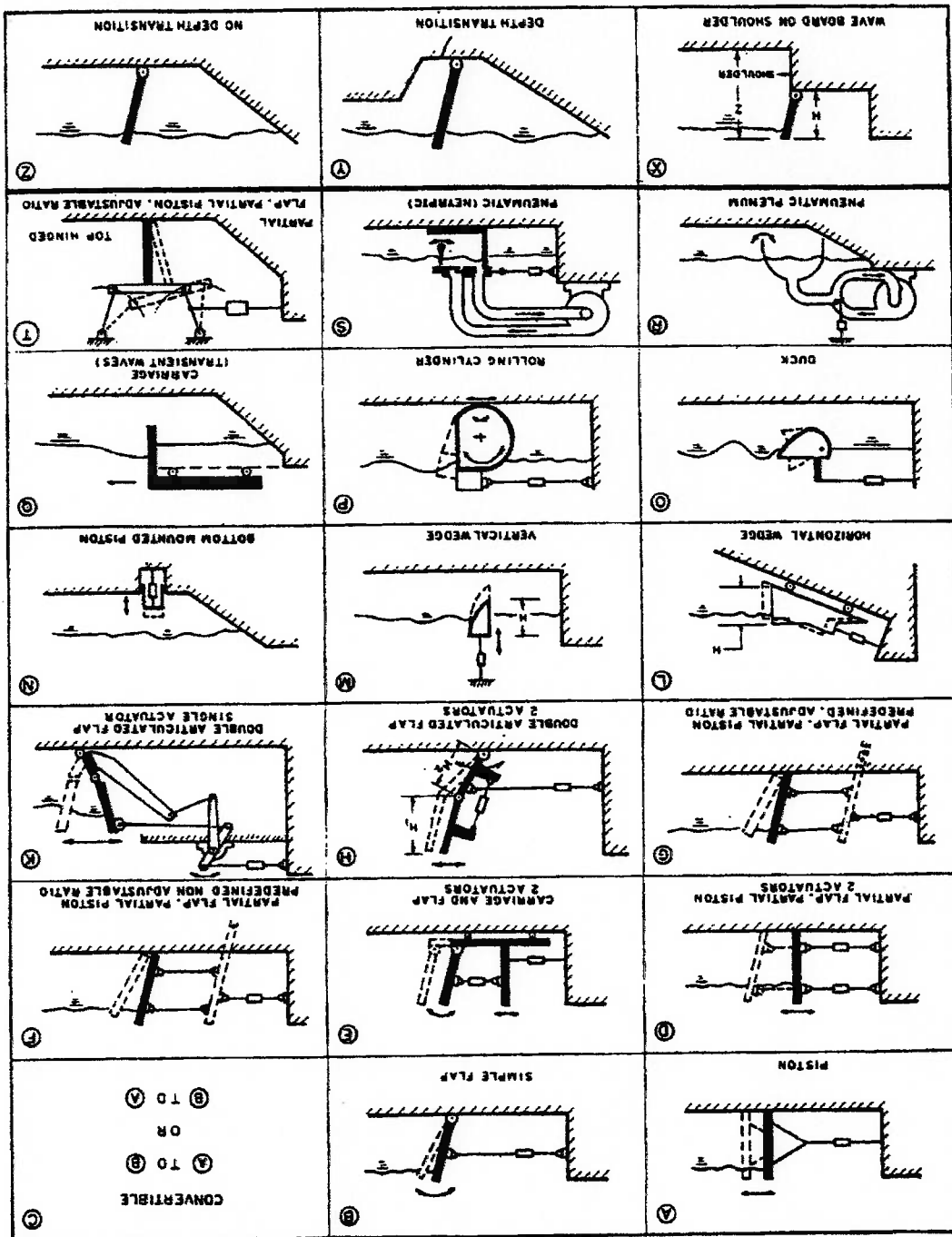
2.2 – Tipos de geradores de ondas.

As ondas são geradas por meio de uma perturbação controlada da água do tanque de provas. Para provocar essa perturbação existem diversas propostas com diferentes princípios de funcionamento para o gerador. Na Figura 2.1 extraída de (Chakrabarti, 1994), são mostradas várias concepções de geradores de ondas.

Esses equipamentos podem ser classificados em duas categorias principais: ativos e passivos (Chakrabarti, 1994). Os geradores ativos consistem de dispositivos mecânicos de variados tamanhos colocados em contato direto com a água e pelo controle do movimento desse dispositivo as ondas desejadas são criadas no tanque. Ao elemento mecânico em contato direto com a água dá-se o nome de atuador. Por outro lado os geradores passivos não têm partes móveis em contato com a água. Neste caso ar comprimido é usado para provocar oscilações da água.

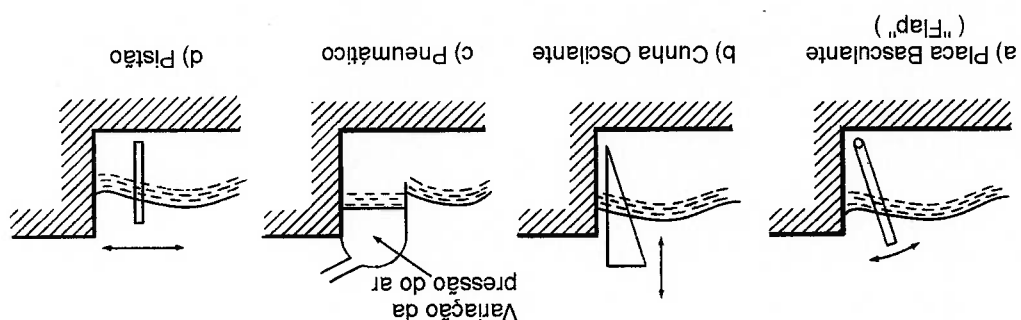
Os vários modelos de geradores ativos têm suas denominações relacionadas com o tipo do atuador utilizado. Em geral, apenas quatro tipos de atuadores são comumente usados nos laboratórios (Bhattacharyya, 1978):

Figura 2.1 – Concepções de geradores de ondas extraída de (Chakrabarti, 1994)



O uso desses atuadores pode ser simples, ou seja, um único atuador colocado no tanque gerando ondas em uma única direção, ou o uso múltiplo, em que vários deles são dispostos lado a lado e que controlados de maneira adequada produzem ondas oblíquas em relação a frente do gerador. Esses últimos são chamados de geradores tipo segmentado ("snake-type").

Figura. 2.2 – Tipos atuadores mais utilizados nos laboratórios extraída de (Bhattacharya, 1978)



Os tipos de atuadores mencionados acima, são mostrados na Figura 2.2 extraída de (Bhattacharya, 1978). No item 2.3 estes tipos de atuadores são descritos com mais detalhes.

- a) – Placa basculante ("flap type").
- b) – Cunha ("plunger type").
- c) – Pneumático.
- d) - Pistão ("piston type").

Os primeiros projetos de geradores segmentados datados de mais de

30 anos produziam apenas ondas monocromáticas, mas com a possibilidade

de variação do ângulo. Esse controle da direção de propagação da onda,

facilita a reprodução das várias condições de aprornamento do sistema

ensaiado. O limite dessa variação é estabelecido pela geometria do gerador

e do tanque (exemplo: número de segmentos do gerador e largura do

tanque). Muitos tanques, mais especificamente os chamados tanques

oceânicos, possuem geradores de ondas segmentados em paredes

adjacentes para cobrir a maior faixa de ângulos de aprornamento possível sem

alterar a montagem original do sistema a ser ensaiado.

Com o advento de controles eletrônicos mais rápidos e de custo

reduzido, além do uso da tecnologia digital, foi possível movimentar

individualmente cada atuador, produzindo-se assim a simulação das ondas

oceânicas multidirecionais. Os geradores de ondas desse tipo passam a ser

chamados de multidirecionais.

2.3 – Tipos de atuadores.

Conforme visto anteriormente, atuador é a parte do gerador de

ondas que está em contato com a água e que efetivamente gera as ondas

valendo-se de seu movimento.

Quando for realizada a seleção do tipo de atuador a ser utilizado em

uma implantação de gerador de ondas, deve-se conduzir o processo

Esse tipo de atuador tem uma boa resposta ao sinal de entrada, sendo que sua capacidade de geração de ondas e melhor para frequências altas. Formam ondas com menos excitação na massa de água perto do

da placa descrita pelo movimento.

Nota-se o movimento de giro e a trajetória em arco de circunferência no topo. A Figura 2.2 (a) mostra a concepção esquemática da placa basculante. Ondas dá-se pela oscilação dessa placa em torno do ponto de pivotamento. no fundo ou a uma profundidade convenientemente adotada. A geração de movimento de basculação do atuador. A placa basculante pode ser instalada Essa placa é apoiada em mancal ou outro dispositivo que permita o estruturalmente rígida, colocada dentro do tanque em contato com a água. consiste de uma estrutura na forma de um chapa lisa e plana, O atuador mecânico tipo placa basculante, ou placa articulada,

2.3.1 - Atuador tipo placa basculante ("flap type")

Descreve-se a seguir os tipos de atuadores mais utilizados, citados em 2.2.

outros geradores já instalados.

fundos reguláveis, sistema de geração de correntezas e ventos e até mesmo disposição dos outro equipamentos no tanque, tais como: carro de reboque, frequência) e também ao arranjo geral do projeto, como por exemplo a criteriosamente em relação aos requisitos hidrodinâmicos (altura e

O emprego da placa basculante com mancal instalado no fundo ou em alguma outra cota de profundidade fixa, pode não ser apropriado para instalações de teste em ondas nas quais a espessura da lâmina d'água sofre uma variação grande, em virtude das condições impostas para os ensaios, como por exemplo nos ensaios em águas rasas. A menos que o tanque possua um sistema de fundo ajustável, existe neste caso a desvantagem do

mais baixas.

Em razão de sua baixa inércia (comparada com o atuador tipo pistão) e ao fato de não ser adicionado ao seu peso próprio ou de uma estrutura de suporte, a potência de acionamento a ser instalada é uma das

tipo de atuador, já que todo o peso é apoiado no mancal.

Sua construção e especialmente a instalação é bastante simples quando comparadas com os outros dois tipos de atuadores mecânicos (pistão e cunha). Nenhuma estrutura de sustentação é necessária para este

água profundas.

fundo do que na superfície, assim são mais indicados para geração de ondas em águas profundas (Battacharya, 1978). Dean e Dalryple (1991) associam o movimento descrito pela placa basculante com as trajetórias das partículas fluidas sob as ondas em águas profundas, ou seja movimentos circulares, daí a sua maior eficiência na geração de ondas em

uso da placa basculante, uma vez que sua eficiência em águas rasas é

bastante baixa.

Variações do nível d'água do tanque para cima do nível de projeto, não acarretam perdas na eficiência, mas consumirá maior potência, muitas vezes não instalada e, portanto, não disponível. Para pequenas variações abaixo do nível de projeto, a perda da eficiência hidrodinâmica será proporcional a altura da placa.

Existem dois tipos de montagem no tanque em relação a existência ou não de água na face posterior do atuador. Os dois sistemas possuem vantagens e desvantagens que devem ser ponderadas durante o projeto. A montagem e operação do gerador de ondas com água na face posterior do atuador ("Wetback design"), requer maior potência de acionamento (Chakrabarti, 1994) e um segundo sistema de absorção de ondas, por causa da formação e reflexão das ondas que se formam atrás do atuador.

Por outro lado, a operação com a parte posterior do atuador seca ("Dryback design") é considerada geralmente melhor em termos da qualidade na geração de ondas, além de exigir uma potência menor para acionamento. Entretanto, a montagem e manutenção desse sistema é mais complexa, uma vez que será preciso instalar uma vedação entre o atuador e as paredes laterais e o fundo. Esta vedação deve garantir a estanqueidade sem contudo comprometer o movimento do atuador (por exemplo: atrito

A placa do pistão pode ter altura suficiente para alcançar o fundo ou outra altura conveniente. Com a altura da placa abrangendo desde a superfície da lâmina d'água de projeto até o fundo, esse atuador poderá ser utilizado em qualquer que seja a profundidade sem perder muito a eficiência. Battacharya (1978) comenta que a utilização deste tipo de atuador não é adequada para ondas de águas profundas, um vez que o

Tem o princípio de funcionamento análogo do ao atuador de placa basculante, sendo a diferença o movimento horizontal puro dado pela placa do atuador tipo pistão na geração de ondas. A Figura 2.2 (d) mostra a concepção esquemática de um atuador tipo pistão.

2.3.2 - Atuador tipo pistão ("Piston Type")

do sistema de acionamento pode ser bastante reduzida. pode ser utilizado para neutralizar a pressão estática. Com isso a potência gerada (Chakrabarti, 1994). Um sistema a parte do acionamento principal água e quase constante, pois não varia muito com o tipo e tamanho da onda mantida só de um lado da placa. Esta força é função da profundidade da a respeito da força causada pela pressão hidrostática da água que agora é causado após muitos ciclos de movimento do atuador. Outra consideração é ser considerado o desgaste e deformação do sistema de vedação a ser excessivo). Também para efeito de manutenção, incluindo o seu custo, deve

A onda é gerada pela imersão de um corpo na superfície da água por um movimento oscilatório vertical (Figura 2.2 b). Geralmente esse corpo tem a forma de uma cunha (daí o nome como é conhecido no Brasil), cujo perfil define sua eficiência. Os perfis mais utilizados são os prismáticos e parabólicos, sendo estes últimos mais eficientes. A resposta ao sinal de

2.3.3 - Atuador tipo cunha ("plunger type")

As mesmas considerações a respeito da montagem e operação sem água atrás da placa, feitas para o atuador tipo placa basculante servem para o tipo pistão.

tanque. sistema de guia para a placa desse atuador, pois a placa fica suspensa no desvantagem causada pela necessidade de uma estrutura de suporte com razão do maior deslocamento de massa fluida. Existe no caso do pistão a entretanto a força hidrodinâmica necessária é bem maior que a daquele, em atuador de placa basculante, notadamente em frequências baixas, onda gerada e o deslocamento de oscilação do pistão, é melhor que o A resposta ao sinal de entrada, ou seja a razão entre a altura da deslocamento horizontal uniforme sobre toda a profundidade do tanque não representa o movimento real das partículas fluidas nessa condição de onda.

Ainda no projeto de um gerador tipo cunha, é necessário a prevenção de movimentos horizontais da cunha causados pela mudança do centro de flutuação (baricentro) durante o movimento de imersão. Essa prevenção é muitas vezes realizada pela aplicação de rolamentos e guias na parte posterior da cunha. Mesmo o perfil detrás da cunha sendo reto, pode ser gerado ondas na parte posterior por qualquer imperfeição na construção ou movimento espúrio, ondas essas que podem passar para a frente do atuador pelas frestas laterais. Portanto as folgas entra paredes e a cunha devem ser pequenas.

Pelo fato do movimento ser realizado na vertical, diferente dos outros dois casos já comentados, na montagem, a menos de instalações bastante pequenas, necessita-se de um grande espaço acima da parede do tanque para a estrutura de suporte e do sistema de acionamento. Esse avanço para muito acima da superfície da linha d'água de um tanque, pode prejudicar outras operações, como por exemplo a passagem de um carro de reboque, principalmente quando da instalação de geradores de ondas nas laterais do tanque.

de potências maiores (Battacharrya, 1978).
razoável faixa de escalas. A elevada inércia desse atuador leva a instalação dessa maneira gerar os espectros de alturas de ondas requeridos para uma melhora a resposta nas faixas de frequências mais baixas, conseguindo entrada tem maior amplificação em altas frequências. O perfil parabólico

Diferentemente do atuadores descritos anteriormente, este tipo não possui partes mecânicas móveis em contato direto com a água, portanto os problemas mecânicos, estruturais e de inércia são menores. A onda é formada pela variação alternada da pressão do ar dentro de Uma câmara na forma de um domo, que é apenas parcialmente imerso na água. A

2.3.4 - Atuador tipo pneumático

Dependendo do perfil utilizado na confecção da cunha, o calado (posicionamento da cunha em relação a linha d'água) terá influência na determinação da função de transferência (curva de resposta). A não observação da condição inicial (calado da cunha) pode alterar futuros procedimentos, como por exemplo a geração de mares, cujo sinal de controle (referência) é calculado com base nos dados da curva de resposta do gerador.

Outra desvantagem é a dificuldade de realizar ensaios em outras lâminas d'água. O atuador tipo cunha tem bom desempenho em águas rasas, mas um projeto que permita grandes mudanças de posição do gerador tenha condições de ser deslocado para trabalhar em outras lâminas d'água, muitas vezes a complexidade dessa operação não tem vantagens em relação à construção de um fundo falso.

O atuador pneumático é bastante silencioso e utiliza menos potência quando comparado com os outros tipos, mas existem duas significativas desvantagens, além da limitação da faixa de frequência de atuação. A primeira é que devido a compressibilidade do ar, a coluna d'água dentro da câmara não responde suficientemente rápido para geração de ondas irregulares, especialmente nas faixas de maiores frequências. A outra desvantagem é um problema maior para tanques de pequeno comprimento, pois é necessário alguns ciclos de ondas até que a forma de onda desejada se estabeleça. Isso se deve ao fato de que a coluna d'água dentro da câmara move-se verticalmente para gerar ondas que tem direção de

O gerador pneumático não é adequado para frequências altas. A válvula que controla a passagem do ar, não tem capacidade para grandes volumes de ar em frequências acima de 1 Hz.

Em instalações grandes deve-se ter cuidado na distribuição uniforme dentro da câmara, para não gerar ondas transversais.

A variação da pressão é conseguida por meio de um insuflador e de uma válvula que regula a passagem do ar para a câmara. A frequência da onda é controlada pelo período de abertura dessa válvula, deixa o ar passar, criando um pressão diferencial na câmara, empurrando a coluna de água. A amplitude é controlada pela velocidade do ventilador insuflador.

movimento horizontal. Essa inversão de direção é que ocasiona a demora na estabilização da propagação da onda (Bhattacharyya, 1978, p. 317)

2.4 – Tipos de sistemas de acionamento.

Existem vários tipos de acionadores que combinados com mecanismos de movimento podem gerar várias soluções de acionamento. Os mais conhecidos e utilizados são os sistemas hidráulicos e os eletromecânicos.

2.4.1 - Sistema de acionamento hidráulico.

Consiste no acionamento através de servoválvulas, que comandam pistões hidráulicos, controlando os fluxos de fluido que são bombeados por um sistema composto de motor, bomba, reservatório de óleo e outros componentes necessários a essa instalação.

O acionamento hidráulico é considerado a melhor escolha pelos motivos de baixo custo, confiável e tem uma melhor resposta em frequência (Chakrabarti, 1994). A relação entre potência disponível por custo é uma

das mais econômicas, sendo sua utilização preferível em grandes instalações.

O curso disponível nos cilindros hidráulicos pode ser aplicado diretamente no atuador, dispensando a intermediação de outros mecanismos transformadores de movimento. Os cilindros hidráulicos são encontrados em vários tamanhos permitindo atingir os cursos de movimento necessário para geração de grandes alturas de ondas.

Para operar um sistema de acionamento por meio de cilindros hidráulico, é necessário todo um equipamento de suporte. Como já descrito anteriormente, esse equipamento é constituído de motor, bomba, reservatório, manguelras de alta pressão e outros instrumentos. Todo esse conjunto ocupa um certo espaço que deve ser considerado durante a fase de projeto de implantação. Essa é uma das desvantagens do acionamento hidráulico, além do seu nível de ruído relativamente alto quando comparado com outros sistemas. Outros problemas podem aparecer quando do uso do sistema hidráulico, como aquecimento excessivo do sistema. Nasce daí a necessidade de instalação de trocadores de calor, que demanda de mais um sistema (o de arrefecimento) e portanto mais espaço a ser utilizado com equipamento de suporte. O aumento de manutenção periódica e o aumento da complexidade de operação podem ser restrições consideráveis.

Os motores elétricos de corrente contínua e os servomotores de corrente alternada ou contínua comandados eletronicamente são bastante difundidos e sua utilização pode ser econômica em termos de custo de implantação especialmente na movimentação de atuadores de pequena dimensão, como é o caso dos geradores de ondas segmentadas. Isso porque a força solicitada por unidade é pequena (Chakrabarti, 1994). Mas atualmente os motores servo controlados tem sido fabricados para fornecimento de potências maiores, permitindo seu uso em instalações que necessitam de maior torque.

É composto por um motor elétrico acionando um mecanismo, que converte o movimento de rotação do eixo do motor no movimento necessário ao tipo de atuador utilizado.

2.4.2 - Sistema de acionamento eletromecânico.

O aquecimento excessivo leva a outros problemas, sendo um deles a própria eficiência em relação a resposta do sistema e dependendo da qualidade da instalação podem aparecer vazamentos do óleo hidráulico através das conexões. Esses vazamentos podem manchar e comprometer as qualidades físicas da água do tanque.

acrescenta-se um controle de malha fechada na posição do atuador, para confiabilidade melhores, a um custo e complexidade maior. Geralmente já o controle com malha fechada tem características de precisão e sujeita a alguma imprecisão e confiabilidade inferior.

no caso do uso de cilindro hidráulico. Essa configuração entretanto, esta e controle no caso do motor elétrico ou ao próprio controle da servo válvula custo, por não exigir nenhum dispositivo adicional aos módulos de potência Quanto ao tipo de controle, o de malha aberta é simples e de menor

2.5 – Sistemas de controle.

fabricantes.
de 90% a zona morta ("backlash") menor que 0,05 mm, segundo os transmissão. A eficiência mecânica do fuso de esferas circulantes é de mais criteriosamente dentro das normas de utilização deste elemento de altos torques e velocidades, desde que a seleção do modelo seja feita circulante), tem menos restrições e seu uso é bastante simples. Suporta qualidade pelo mal uso da correia. Já o segundo sistema (fuso de esferas inversões bruscas. Esse movimento pode ser comprometido em sua específica uma vez que o movimento a ser empregado é alternado com parafuso de esferas circulantes. O primeiro requer um montagem bastante transmissão é utilizado os sistemas de polias e correias dentadas ou o Geralmente na transformação do movimento de rotação em

tanto um sensor de posição, ou outra variável de interesse, conectado ao respectivo amplificador condicionador e um controlador que compare o sinal de comando com o sinal do sensor e forneça uma realimentação para a eletrônica de controle do motor ou servo-válvula. Esta malha garante uma grande confiabilidade, já que a realimentação está no ponto final do sistema de acionamento.

2.6 – Absorvedores de ondas .

No tanque de ondas é importante que as condições de mar aberto sejam simuladas tão exatas quanto possível. A reflexão das ondas incidentes que vem das paredes para a área de teste é um dos fatores que perturbam as ondas geradas e incidem no modelo ensaiado. Mesmo quando o tanque é comprido, o modelo pode vir a experimentar reflexões vindas das paredes, principalmente da parede oposta ao gerador de ondas.

Para que a energia das ondas sejam dissipadas e o problema de reflexão minimizado, absorvedores de ondas são instalados na extremidade oposta à do gerador de ondas.

Os absorvedores de ondas mais utilizados são planos inclinados com declividade constante que se estendem desde perto do fundo do tanque até um pouco mais da lâmina d'água. São construídos de concreto, areia,

Outro tipo de praia artificial para uso em laboratório são os chamados absorvedores de ondas progressivos segundo Le Méhauté, apud (Chakrabarti, 1994). A ideia de um absorvedor progressivo também chamado de absorvedor de ondas vertical por Jamieson & Mansard, apud (Chakrabarti, 1994), consiste de material cuja porosidade decresce na direção posterior do absorvedor de ondas. A sua construção se dá por meio de painéis construídos com chapas perfuradas entrelaçados com a variação da porosidade e espaçamento. Este tipo de absorvedor é também utilizado nas laterais do tanque para absorver ondas refletidas nos modelos ensaiados.

2.3 extraída de (Chakrabarti, 1994).

Para as inclinações recomendadas acima, o comprimento dos absorvedores tornam-se bastante grandes em função da profundidade do tanque. Para reduzir o comprimento total requerido, pode-se utilizar praias com inclinação variável ou mesmo com perfil parabólico. Essas praias com declividades variáveis, de perfil parabólico ou algumas em arco de circunferência são algumas vezes utilizadas com superfície rugosa ou porosa. A geometria e a variedade de absorvedores de ondas existentes podem ser vistas na Figura

Esse tipo de estrutura é limitado pelo espaço disponível no tanque. Para as inclinações recomendadas acima, o comprimento dos absorvedores tornam-se bastante grandes em função da profundidade do tanque. Para reduzir o comprimento total requerido, pode-se utilizar praias com inclinação variável ou mesmo com perfil parabólico. Essas praias com declividades variáveis, de perfil parabólico ou algumas em arco de circunferência são algumas vezes utilizadas com superfície rugosa ou porosa. A geometria e a variedade de absorvedores de ondas existentes podem ser vistas na Figura

Os absorvedores descritos anteriormente são chamados passivos, pois compõe um sistema de malha aberta, onde um gerador de ondas está instalado num lado do tanque e o absorvedor no lado oposto. Existe também um sistema de malha fechada, onde um gerador de ondas pode ser usado

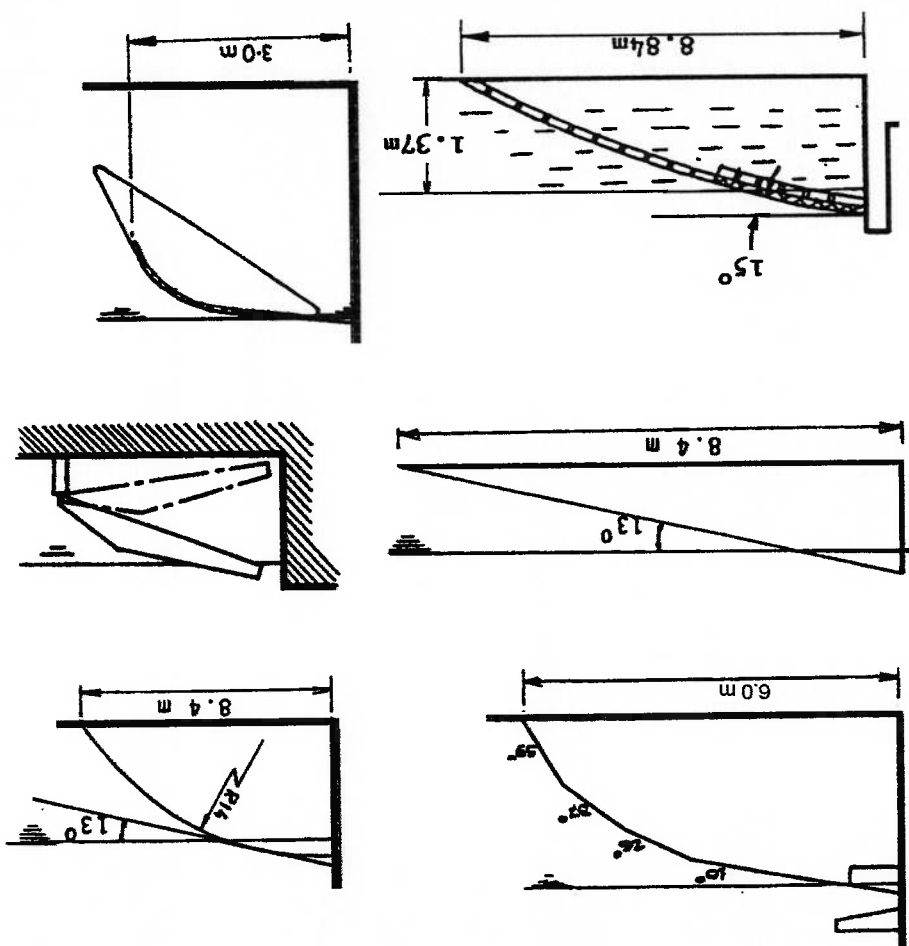


Figura 2.3 – Geometria de absorvedores de ondas passivos. extraída de (Chakrabarti, 1994).

tanto para gerar ondas como para absorver a energia das ondas refletidas. O sistema de malha fechada gera apenas a série de ondas requerida, enquanto que ao mesmo tempo amortecendo as reflexões indesejadas que estão retornando ao gerador após a reflexão na praia ou no próprio modelo ensaiado. Este modo de operação requer um sofisticado sistema de controle e mecanismo de atuação. A esse sistema dá-se o nome de absorvedor ativo (Chakrabarti, 1994).

Mesmo com o uso de absorvedor de ondas no final do tanque, o coeficiente de reflexão nunca é zero. Uma correção para a onda medida em um ponto do tanque pode ser feita através de uma teoria de reflexão desenvolvida por Ursell, et alii. (1960). O coeficiente de reflexão é definido como a razão da altura da onda refletida pela altura da onda incidente, geralmente expresso em porcentagem. Para uma parede sólida impermeável o coeficiente de reflexão é 100%, ou seja a magnitude da onda refletida é igual da onda que incidiu na parede. Para uma praia eficiente, o coeficiente de reflexão deveria ser consistentemente menor que 10 % e de preferência menor que 5% em toda a faixa de alturas e períodos que o tanque produz segundo Jamieson & Mansard, apud (Chakrabarti, 1994).

3 – PROJETO DO GERADOR DE ONDAS

3.1 – Principais requisitos e critérios de projeto.

Exatamente como em outros tipos de projetos, o de um gerador de ondas também inicia-se pela coleta de informações sobre os requisitos e restrições ao projeto. Essas informações devem orientar as diversas fases do projeto.

O primeiro requisito é a forma da onda a ser gerada. Normalmente admite-se que a onda do mar é uma combinação de funções harmônicas. Desta forma a onda é simplesmente uma senoidal ou cossenoidal.

Portanto a função objetiva do sistema é a geração de ondas senoidais de forma controlada, permitindo a geração em diferentes frequências e alturas e ainda garantir a repetibilidade dessas condições.

No mar, quando em estado natural, a faixa de período do espectro de potência de ondas com considerável energia varia em torno de 5 s a 25 s. Se a maior razão recomendada para a escala de modelos para testes em um tanque é 1:100, então o menor período da onda requerida no tanque é de 0,5 s (2 Hz) (Chakrabarti, 1994) e, por conseguinte, o maior é 2,5s (0,4 Hz). Assim, de uma maneira geral, já estaria definida uma faixa de

frequências a ser gerada. Esta seria uma das formas para determinar as frequências das ondas que deverão ser geradas. Se a razão de escala aumenta a faixa de frequências a ser modelada também é ampliada no sentido das maiores frequências. Já no caso de razões menores essa faixa diminui, mas serão solicitadas ondas de menores frequências. Atualmente, devido ao avanço tecnológico dos sistemas de acionamento, uma ampla faixa de frequências é facilmente atingível.

O fator de escala utilizado na conversão do período e altura real da onda definirá também o tamanho do modelo, e as dimensões do modelo devem ser compatíveis com as do tanque. Deve-se, portanto, considerar também as dimensões do tanque a ser utilizado para os testes e implantação do gerador. Os resultados dos experimentos são afetados por efeitos de interação das paredes. Outra consequência é em relação à profundidade do tanque, já que ondas de períodos longos são afetadas pelo fundo (Le Méhauté, 1976). Nota-se que os parâmetros faixa de frequência, fator de escala e tamanho do tanque estão interrelacionados e a definição de cada um deles deve sempre ser ponderada em relação aos demais.

Cabe ressaltar que o uso de fatores de escala de valores altos, como 1:100 sugerido acima, leva em algumas conversões à dimensões bastante reduzidas do modelo, dificultando ou induzindo maiores erros de medição durante o ensaio.

As funções do sistema a ser projetado devem ser bem definidas. A função objetiva do sistema é gerar ondas, de onde se conclui que sua função principal é impor um movimento adequado à massa fluida contida no tanque. Para poder realizar essa função principal, o sistema deve cumprir as seguintes funções secundárias: variar os parâmetros do movimento, enviar sinais que indiquem seu estado, receber e atender as sinais de controle e correção, etc.

As considerações relativas a faixa de frequências e altura da onda são peculiares ao projeto de um gerador de ondas. Os demais requisitos e restrições de projeto são de aspecto mais geral. Descreve-se a seguir alguns desses requisitos já aplicados ao projeto do gerador.

As alturas das ondas a serem modeladas, geralmente são retiradas diretamente do espectro de ondas do local de interesse (ex.: Baía de Campos - RJ). De uma maneira geral, pode-se definir as alturas a serem alcançadas pelo gerador de ondas, utilizando o critério de declividade da onda, onde um valor máximo da altura corresponderia a uma declividade de 10 %, ou seja a altura da onda corresponde a $1/10$ de seu comprimento (Le Méhauté, 1976, p.247). Para fins de ensaios em ondas regulares, é prática recomendável o uso da declividade em torno de 5%.

Quando a geometria, o sistema deve adequar-se ao tanque e ao local onde for instalado, permitindo sua montagem, operação e manutenção. Não deve obstruir passagens e não deve exigir reformas de grande vulto.

Deve-se realizar a análise cinemática para garantir que os movimentos requeridos serão realmente atingidos a partir do mecanismo proposto. Vários tipos de movimentos podem gerar ondas, de forma que é necessário se conhecer a concepção do gerador de ondas antes de definir a características do movimento.

Outros aspectos que devem ser analisados são:

Rigidez: a deformação que ocorrer no sistema não pode prejudicar a geração de ondas.

Inércia: o seu valor deve ser tal que não impeça o sistema de responder adequadamente aos sinais de controle. Uma inércia pequena resulta em menores problemas mecânicos e facilitam o controle dos movimentos do gerador de ondas.

Estabilidade: o sistema deve ser estável em qualquer regime de operação; as frequências naturais do sistema não podem coincidir com a faixa de frequência do movimento e de quaisquer outras fontes de vibração.

Resistência: em qualquer situação de carga ou de falha prevista a estrutura

do sistema não pode colapsar.

Outra restrição de um projeto é a fonte de energia disponível, pois o

subsistema motor deve ser compatível com essa disponibilidade. Pode-se também exigir limites mínimos de rendimento, que incide diretamente nos

custos operacionais.

As condições de trabalho também devem ser analisadas. Aqui

definem-se aspectos importantes que irão refletir na especificações de material e de tratamentos térmico e superficial. No caso do gerador de ondas

deve-se definir o ambiente atmosférico e as condições da água. Além disso deve-se especificar as condições de operação, como regime de cargas,

tempo de funcionamento e frequência de utilização. As condições de trabalho representam fatores importantes para a determinação de um plano

de manutenção preventivo.

O projeto deve também levar em consideração os meios de fabricação disponíveis. A própria concepção de uma peça deve ser selecionada considerando-se o processo de fabricação utilizado, disponibilidade no mercado e custo.

definem a viabilidade financeira do projeto

Os aspectos econômicos devem ser bastante ponderados, pois

ser analisado a realização de ensaios em diferentes lâminas d'água.

possíveis variações das condições de ensaio. No caso em particular deve controle das condições de ensaio. Também deve ser considerada as de confiabilidade, precisão e reprodução, para permitir adequado Como um sistema de laboratório, o projeto deve atender a requisitos

facilitar eventuais reparos.

corrosão e incrustação. Além de observar uma construção modular, para pontos críticos de acúmulo de poeira e sujeira, lubrificação, desgaste, o aspecto do projeto, é importante pensar na facilidade de acesso, verificar também tem função de segurança, pois visam evitar falhas e acidentes. Sob Devem ser elaborados planos de manutenção preventiva, que

considerar o nível de ruído emitido, temperaturas extremas e segurança.

de pessoas no ambiente de ensaio. Isto significa que é necessário No item segurança e ergonomia, é preciso considerar a existência

passagens e o espaço disponível no local de montagem.

equipamentos de montagem e transporte disponíveis, dimensões de Deve existir ainda a preocupação com as restrições impostas pelos

O projeto deve ser feito levando-se em consideração antigos projetos, ou seja, utilizar de experiências anteriores para evitar a repetição de erros. O estudo de sistemas semelhantes utilizados por outras instituições também pode fornecer dados que auxiliam no projeto. Deve-se planejar também a sua utilização de maneira compatível com futuros projetos ou dispositivos que vierem a ser implantados.

Também são importantes as leis de proteção no trabalho, direitos de patentes e normas técnicas.

3.2 – Projeto do gerador de ondas tipo placa basculante .

Descreve-se a seguir as etapas do projeto do gerador de ondas desenvolvido para a implantação do tanque de ondas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Algumas restrições listadas abaixo limitaram ou determinaram soluções particulares para esta implantação.

a-) Dimensões do tanque; o tanque de estrutura em alvenaria já existia e, portanto, suas dimensões (comprimento, largura e profundidade) já estavam definidas.

b) Localização do tanque; ele está localizado em um ambiente restrito, próximo a salas de aula. Portanto o equipamento deve ter níveis ruído compatíveis com o ambiente e dimensões adequadas ao espaço disponível.

c) Robustez e simplicidade do sistema; muitos usuários são pessoas em formação, sem domínio completo das técnicas de operação, por isso o equipamento deve ser robusto e simples de operar.

d) Restrição orçamentária; o auxílio recebido da FAPESP (processo n.º 1995/5723-0 “Implementação de Sistemas para Ensaios em Ondas no Tanque de Provas N.º 2 do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica da

EPUSP") foi de R\$ 95.000,00 (noventa e cinco mil reais) para todos os itens requisitados. O custo total do gerador de ondas foi de R\$ 41.000,00 (quarenta e um mil reais). Portanto o projeto contemplou o uso de componentes de preço reduzido e soluções simples de construção visando a redução do custo global.

Com base nessas restrições e nas considerações da seção 3.1 foram determinados os requisitos do projeto, descritos a seguir.

O projeto e a implantação do sistema de geração de ondas foi realizado para um tanque, cujas dimensões principais estão mostradas na

Figura 3.1.

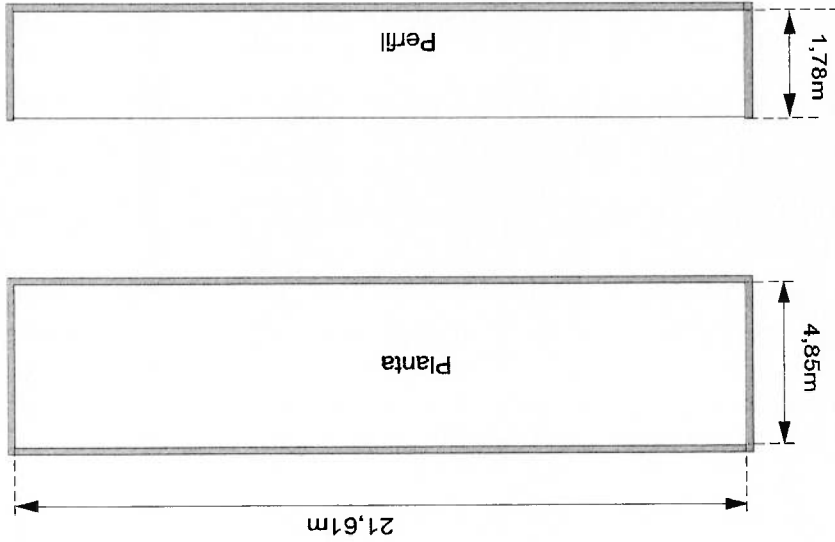


Figura 3.1 – Desenho esquemático do tanque mostrando as dimensões principais

Com as dimensões do tanque e pela análise das atividades experimentais requeridas pelo Departamento, chegou-se a uma relação de altura de onda em função da frequência mostrada pelo gráfico na Figura 3.2. Nessa análise também foram considerado os fatores de escala e os tipos de mares a serem reproduzidos no tanque, conforme estabelecidos em (Conti et al., 1989).

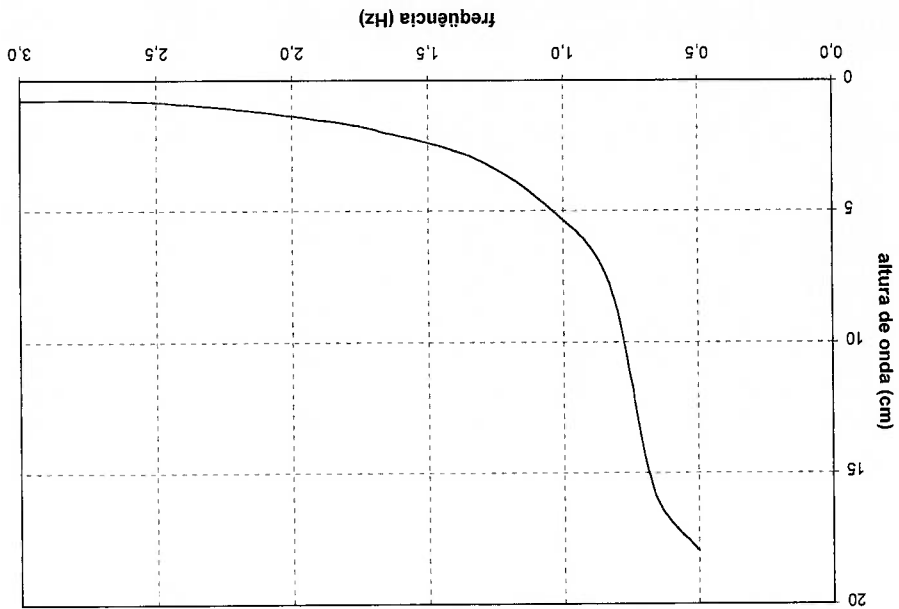


Figura 3.2 – Ondas requeridas para projeto

A faixa de frequências requerida para o projeto do gerador ficou estabelecida entre 0,5 Hz e 3,0 Hz, com alturas de 18 cm a 0,8 cm respectivamente.

3.2.1 – Seleção do atuador.

Dentre as opções de tipos de atuadores visto anteriormente (capítulo

2), o tipo passivo (pneumático) foi prontamente descartado porque não

atende a faixa de frequências requerida. Do meio dos atuadores ativos, foi

selecionado o tipo placa basculante (“flap-type”). Essa escolha deve-se a

sua função de transferência que atende de maneira satisfatória a faixa de

frequências requerida. Também o fato de não ser preciso a construção de

uma estrutura de suporte determinou a sua escolha. Na época do projeto,

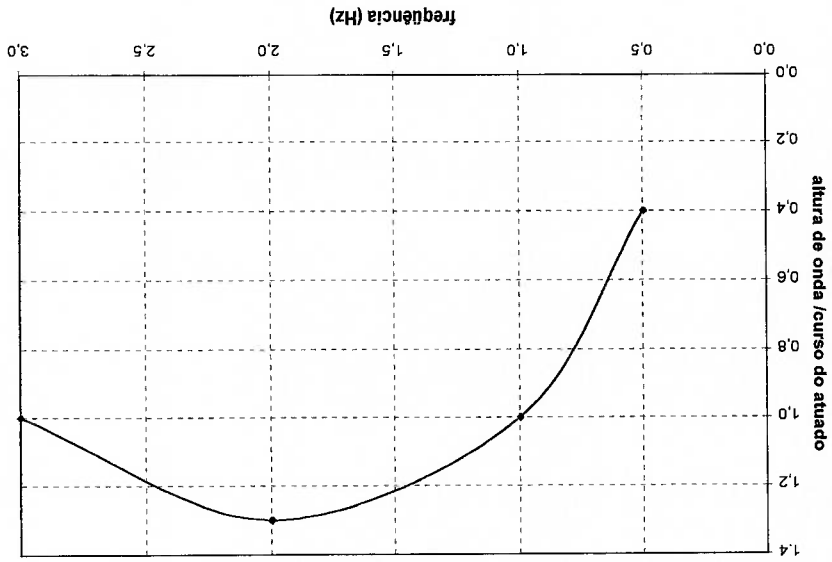
utilizou-se a função de transferência de um atuador semelhante (Dias, 1981),

cujas dimensões eram adequadas à geometria do tanque e lâmina d'água de

projeto ($h = 1,5$ m). A função de transferência desse atuador é mostrado na

Figura 3.3.

Figura 3.3 – Função de transferência de um atuador tipo placa basculante de dimensões semelhantes ao do projeto



Outras análises realizadas que selecionaram o tipo do atuador, foram a baixa potência a ser instalada e os custos baixos de construção, instalação e manutenção.

Considerando-se aspectos como; ambiente corrosivo, inércia, facilidade de transporte e o uso de perfis comerciais, selecionou-se o alumínio para o material da placa basculante (atuador).

3.2.2 – Deslocamento e força requeridos no atuador.

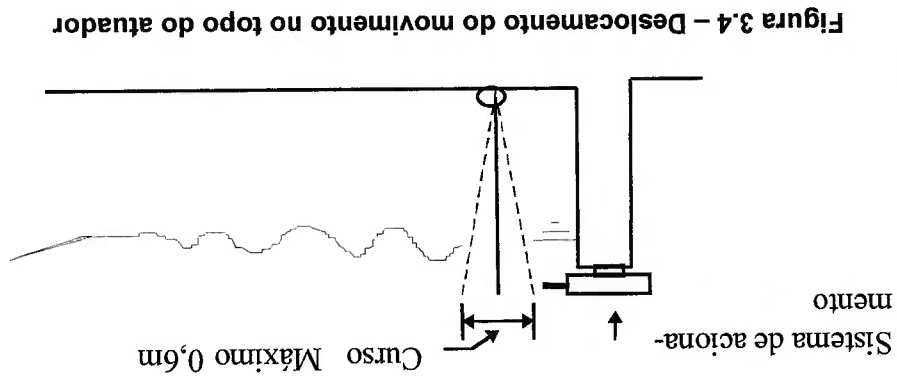
Em função das ondas a serem geradas no tanque (Figura 3.2) e a curva da função de transferência do atuador selecionado (Figura 3.3) estabeleceu-se o curso (deslocamento) do movimento linear no topo do atuador. Os valores desses deslocamentos para a faixa de frequências, são dados pela envolvente determinada pelos seguintes pontos:

Curso máximo do atuador = 0,600 m para a frequência de 0,5 Hz;
 Curso máximo do atuador = 0,100 m para a frequência de 1,0 Hz;
 Curso máximo do atuador = 0,030 m para a frequência de 2,0 Hz;
 Curso máximo do atuador = 0,010 m para a frequência de 3,0 Hz.

A Figura 3.4 mostra a localização do deslocamento do movimento do atuador.

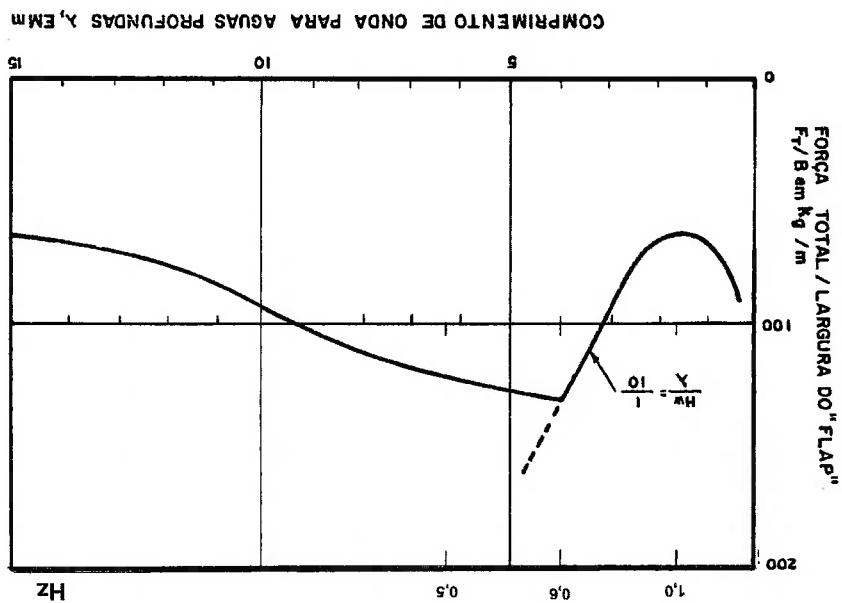
O maior valor da força total encontrado dentro da faixa de frequência requerida para o projeto do gerador, foi de 1.300 N para a frequência de 0,6 Hz. Esse valor é lido em unidades de largura do atuador (metro), deste modo multiplicando pela largura do atuador projetado obtve-se a força máxima de acionamento F , cujo valor adotado para as próximas etapas do projeto é de 6600 N. Nota-se que a curva do gráfico utilizado para obtenção desse valor, corresponde à geração de ondas com parâmetro de declividade $H/\lambda = 1/10$, o que significa que as alturas são maiores que as requeridas no projeto e que portanto o valor adotado estaria maior do que o realmente necessário.

A força requerida foi determinada através de resultados analíticos de um atuador semelhante. Esses resultados estão no gráfico mostrado na Figura 3.5 extraído de (Dias, 1981).



Além da consideração de um fator de segurança na estimativa do valor da força máxima, foi considerado o tempo de duração dessa força no processo de geração de ondas. Como o movimento do atuador deve ser harmônico, a duração da força máxima, também conhecida como força de pico, é de aproximadamente 1/8 do período de cada ciclo e como o tanque tem comprimento restrito, o número de ciclos a ser gerado para cada um dos ensaios deve ser pequeno. Essas últimas considerações já dizem respeito ao dimensionamento e seleção do sistema de acionamento.

Figura 3.5 – Gráfico com valores analíticos da força necessária para geração de ondas de um atuador tipo placa basculante de dimensões semelhantes ao do projeto extraído de (Dias, 1981)



3.2.3 – Sistema de acionamento.

Para atender aos requisitos do projeto descritos na seção 3.2.1 e dentro das limitações comentadas no início da seção 3.2, optou-se pela utilização do sistema de acionamento denominado eletro-mecânico, conforme descrito e comentado no capítulo 2. O sistema de acionamento hidráulico foi desconsiderado durante a seleção, devido a complexidade de operação e, manutenção, além de necessitar local apropriado para o conjunto motor e bomba devido ao ruído inerente a este sistema.

O sistema de acionamento eletro-mecânico proposto e construído para este gerador de ondas, é composto de um servomotor que aciona um parafuso de esferas circulares (fuso) que converte o movimento de rotação do motor em translação de um bloco móvel (também chamado mesa ou quadro móvel) no qual está pivoteada uma haste (braço de força). Essa haste é conectada ao atuador através de uma cabeça de articulação (rótula). Uma ilustração desse sistema pode ser vista na Figura 3.6. Todos os componentes desse conjunto foram projetados e selecionados para atender aos requisitos de velocidade e força exigidos pelo atuador dentro da faixa de frequências solicitada no projeto.

dados:

Para a seleção do fuso levou-se em consideração os seguintes dados:

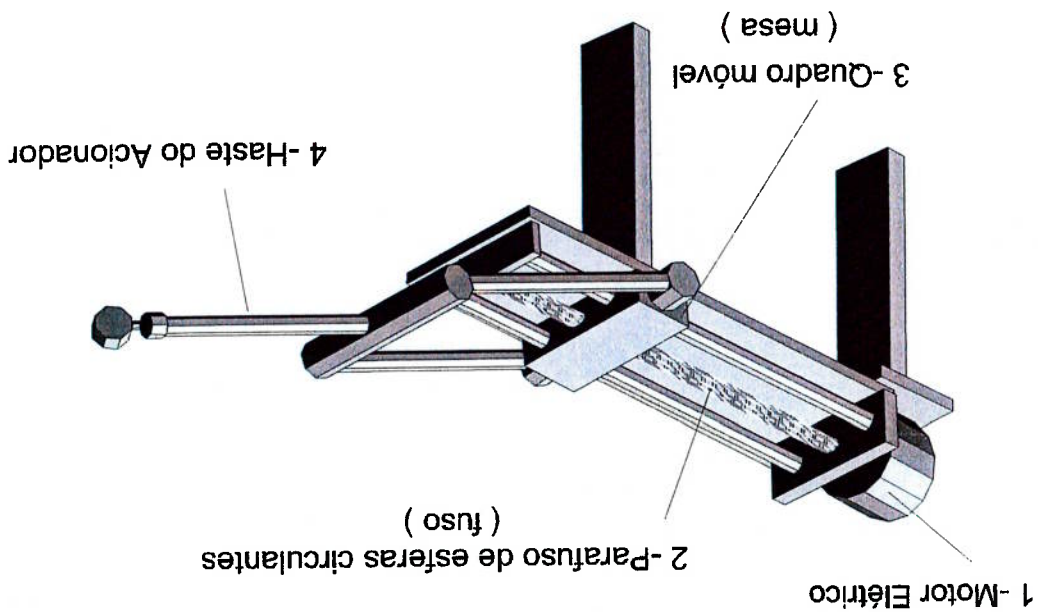
obtenção da velocidade do movimento do atuador.

parafuso de esferas circulares determina a rotação necessária para a saída. Essa relação de torque e rotação é dada pelo fabricante do motor. Essa relação de torque e rotação deve ser compatível com o torque de rotação a ser empreendida pelo motor.

movimento requerida no atuador com a rotação do motor, uma vez que a mais crítica, pois é responsável pela compatibilização da velocidade do sistema de acionamento é uma das

3.2.3.1 – Seleção do parafuso de esferas circulares.

Figura 3.6 – Sistema de acionamento



Curso máximo de operação: 0,600 m;

Força máxima (ou de pico): 6600 N;

Velocidade máxima (ou de pico): 0,942 m/s;

A velocidade máxima é obtida multiplicando-se a amplitude máxima

pela frequência. No caso em questão a velocidade máxima foi encontrada

para frequência de 0,5 Hz, onde é solicitado uma amplitude de movimento

de 0,300m. Para as frequências maiores, a amplitude do movimento

decrece consideravelmente e portanto os valores da velocidade linear no

topo do atuador não ultrapassa o alcançado na menor frequência do

espectro de onda requerido.

Em consulta ao fornecedor, conseguiu-se selecionar um fuso de linha,

ou seja de fabricação em série, o que torna o custo menor. O fuso

seleccionado tem as seguintes características:

Comprimento : 0,900 m (0,600 m de curso útil e 0,300m para

montagem);

Diâmetro externo: 24,9 mm;

Passo da rosca: 25,4 mm.

Rendimento (η): 90%

Servomotor é um motor que funciona com um sistema interno de controle em malha fechada, onde um sinal de referência é comparado com um sinal de realimentação, proveniente de um transdutor. O erro resultante é

O tipo de motor escolhido para o sistema de acionamento do gerador de ondas é um servomotor, que consiste num motor elétrico trifásico com ímãs permanentes e comutação eletrônica.

3.2.3.2 – Seleção do servomotor.

Com o fuso definido, procede-se a escolha do motor.

Quanto à velocidade radial das esferas: 3000 rpm;
Quanto à vibração do fuso, desde que adotando uma configuração de montagem com um mancal de rolamento em cada extremidade: 2720 rpm.

As limitações de rotação máxima para o fuso selecionado são:

O parafuso de esferas circulantes é um dispositivo que apresenta limitações quanto a máxima rotação em função de vibrações e em função da máxima velocidade radial das esferas, além das limitações em relação às cargas dinâmicas e estáticas que atuam no fuso.

amplificado e volta a atuar sobre o sistema para manter a variável controlada (posição, velocidade).

A escolha do servomotor foi motivada através da pesquisa bibliográfica e na experiência no uso desse tipo de equipamento. Estes tipos de motores são indicados para aplicações com regime de transição intensa onde o controle preciso da velocidade e posição são fundamentais. As dimensões reduzidas, também contribuem ao efetivo uso desse tipo de motor.

A seleção do modelo do motor foi auxiliada pelo suporte técnico do fabricante e pelas curvas operacionais que indicam o torque desenvolvido pelo motor em função da rotação do mesmo, e em função do fator de utilização, que mostram o tempo que o motor pode permanecer trabalhando em uma condição acima da máxima contínua (funcionamento intermitente).

O torque necessário para o acionamento do fuso foi definido através da seguinte formulação:

$$T = \frac{F \cdot D}{2000 \cdot \eta} \quad (3.1)$$

onde,

T = torque máximo(Nm),

F = força máxima de acionamento (N)

p = passo da rosca do fuso

η = rendimento mecânico do fuso

obtem-se $T = 29,64 \text{ Nm}$.

A rotação para essa condição (força máxima), foi calculada utilizando

o valor da velocidade máxima encontrada para o acionamento do atuador

(conforme seção 3.2.3.1). Apesar da velocidade máxima não ocorrer na

mesma frequência onde aparece a força máxima, esta velocidade foi

utilizada para garantir novamente um coeficiente de segurança no

dimensionamento do motor. Assim temos:

$$V = R \cdot p \quad (3.2)$$

onde,

V = velocidade máxima = 942 mm/s,

R = rotação máxima (rps),

P = passo do fuso = 25,4 mm,

portanto $R = 37 \text{ rps}$ ou 2220 rpm.

Pode-se comprovar aqui que a rotação máxima não excede as

rotações limites do fuso (seção 3.2.3.1), sendo que essa verificação é feita

durante a determinação do passo do fuso selecionado.

A potência máxima de acionamento foi calculada como:

Analisando as curvas de operação na Figura 3.7, nota-se que para a rotação próxima ao valor de 2220 rpm (rotação máxima calculada), o valor do torque contínuo (curva 2) é aproximadamente 20 Nm, portanto não correspondendo ao torque calculado de 29,64 Nm, mas para a mesma rotação o torque de pico (curva 1) é aproximadamente 60 Nm, condição em que poderá trabalhar em regime intermitente com 25 % do ciclo de trabalho sem sobrecarga relacionada ao aquecimento ocasionado por operações

Velocidade máxima = 4700 rpm.

Potência nominal = 4,9 kW;

Velocidade nominal = 3000 rpm;

Torque de pico = 73 Nm;

Torque contínuo (com rotor travado) = 27 Nm;

Limited, cujas características técnicas principais são:

Em função dos valores de torque e rotação, definiu-se as características do motor a ser utilizado no gerador de ondas. O servomotor selecionado é o modelo G 426.404 da série G 400 da MOOG Controls

obtendo-se $P = 6,2 \text{ kW}$.

com $F = 6600 \text{ N}$ e $V = 0,942 \text{ m/s}$

$$P = F V$$

(3.3)

envolvida no sistema de controle.
 acima das correntes máximas permitidas ao servomotor e à eletrônica

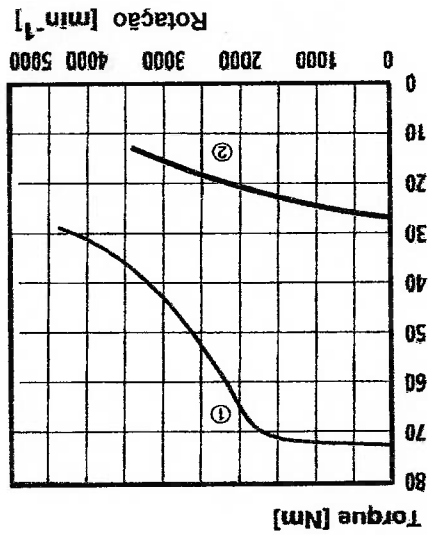


Figura 3.7 – Curvas de operação do servomotor G 426.404 extraído de(MOOG, 1996).
 Curva 1 = torque de pico. Curva 2 = torque contínuo

Nesta última faixa de operação citada (rotação = 2220 rpm e torque de pico = 60 Nm) a potência pode ser calculada como:

$$P = T \omega, \quad (3.4)$$

onde,

P = potência (W),

T = torque = 60 Nm,

ω = frequência angular = $2\pi f = 232,5$ rad/s ,

para $f = \text{frequência} = 37 \text{ Hz}$,
obtido-se $P = 13950 \text{ W}$ ($13,95 \text{ kW}$), mostrando que no regime intermitente a potência desenvolvida pelo motor é superior à requerida ($6,2 \text{ kW}$).

3.2.4 – Sistema de controle.

O sistema de controle é a terceira parte que compõe o gerador de ondas. Esse sistema é composto de equipamentos elétricos e na maior parte eletrônicos, foram instalados dentro de um gabinete de aço com proteção contra umidade e localizado junto ao sistema de acionamento.

O movimento do gerador de ondas é controlado através de um sistema de malha fechada, conforme é mostrado na Figura 3.8. Nesta malha, o sinal de realimentação e o de posição da mesa de acionamento, medido por um potenciômetro linear e este sinal é comparado com o sinal de referência proveniente de um gerador de sinais. O erro é enviado a um controlador PID que atua sobre o motor.

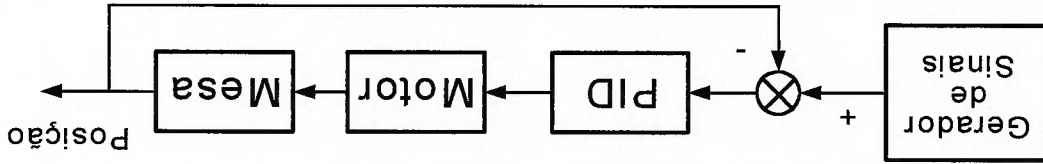


Figura 3.8 – Diagrama do sistema de controle do gerador de ondas.

Ainda no sistema de controle do gerador de ondas, encontram-se os módulos de potência, fontes, filtros, disparadores ("triggers") e outros itens normais de uma instalação elétrica para qualquer tipo de motor.

3.2.5 – Atuador.

Uma vez selecionado o tipo e o material do atuador, definiu-se as suas dimensões bem como o sistema de apoio (mancais). A definição final da geometria do atuador foi efetuada integrando-a ao sistema de acionamento. Essa integração foi efetuada considerando os movimentos e esforços requeridos para a geração das ondas.

O atuador foi então construído em alumínio e é composto de uma chapa plana e por reforços estruturais colocados na sua parte posterior, sendo que toda a estrutura é apoiada em quatro mancais constituídos de madeira e borracha. Estes mancais foram assentados e fixados no fundo do tanque. As dimensões principais do atuador são:

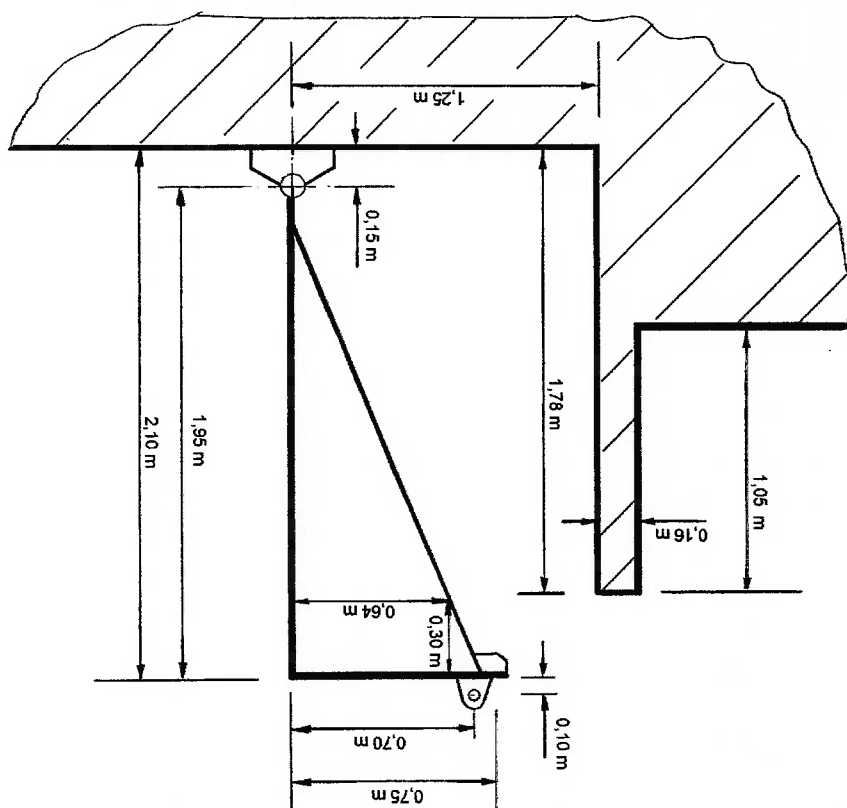
Largura = 4,80 m;

Altura = 2,00 m.

Outras dimensões e sua posição no tanque podem ser vistas na Figura 3.9.

Na Figura 3.10 mostra-se um esquema ilustrativo do gerador de ondas com os principais componentes: sistema de acionamento, atuador e controle.

Figura 3.9 – Dimensões principais do atuador placa basculante.



O absorvedor de ondas projetado e instalado na extremidade oposta ao gerador de ondas é do tipo passivo na forma de plano inclinado. Devido ao restrito comprimento do tanque e a interação com outras atividades, em especial os ensaios de reboque de modelos de embarcações, optou-se pela alteração da inclinação do absorvedor. Assim o absorvedor foi construído em madeira devidamente tratada, com duas rampas inclinadas, cujas declividades são fixas. A superfície é impermeável e rugosa. As dimensões e as declividades são mostradas na Figura 3.11.

3.3 – Absorvedor de ondas.

Figura 3.10 – Esquema ilustrativo do gerador de ondas projetado e construído

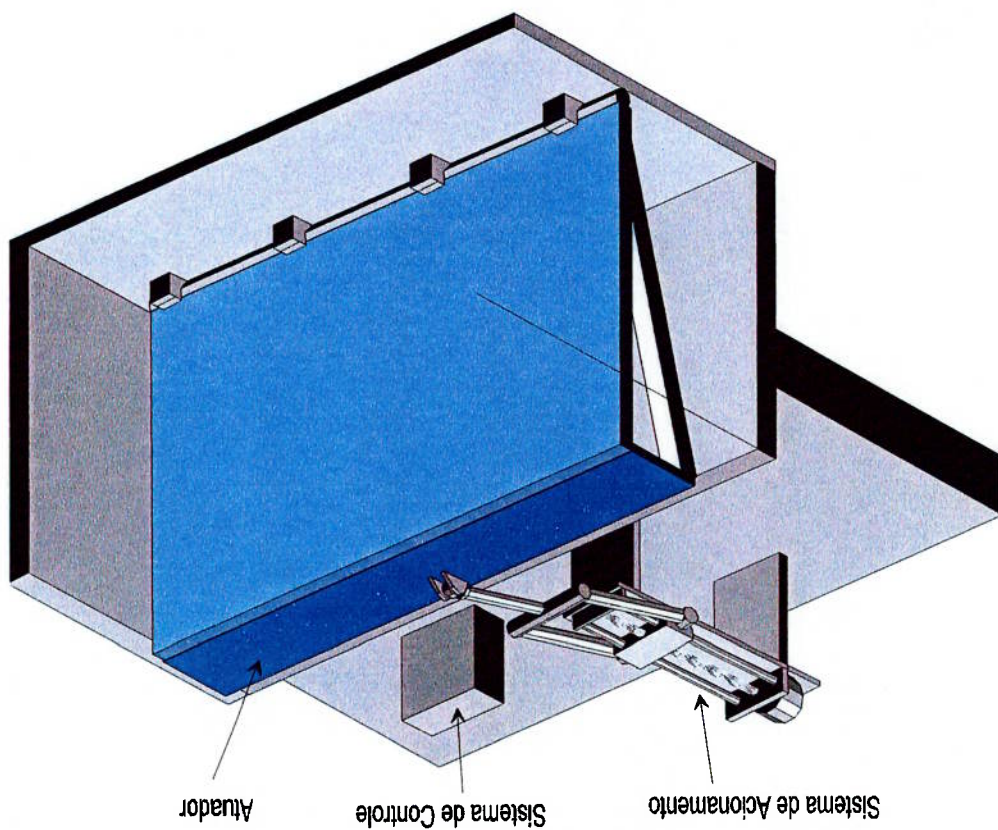
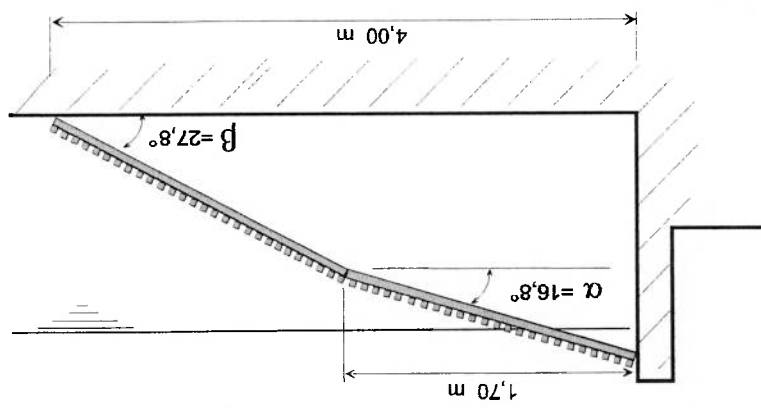


Figura 3.11 – Absorvedor passivo com dupla rampa inclinada instalado no tanque



4 - MODELO MATEMÁTICO DO GERADOR DE ONDAS

O estudo da dinâmica e controle do sistema de geração de ondas requer o seu modelo matemático. Para o sistema descrito no capítulo anterior, o modelo completo é composto dos modelos da onda, do atuador e do sistema de acionamento.

4.1 – Modelo da Onda.

As ondas encontradas na superfície do mar são irregulares na medida em que não é possível identificar uma única frequência de oscilação, altura de elevação ou mesmo direção de propagação. Entretanto, o mar real pode ser descrito pela superposição de ondas regulares, cuja característica principal é a propagação com frequência e altura constantes.

Nesse trabalho serão consideradas somente ondas de superfície, harmônicas, progressivas e planas, onde ondas superficiais são aquelas ocasionadas pelos movimentos das partículas que ocorrem em superfícies de separação de meios fluidos, devido a gravidade quando elas são deslocadas da posição de equilíbrio. Ondas progressivas são ondas do tipo oscilatórias cujo perfil da forma da onda move-se com uma certa velocidade na direção de propagação. Nas ondas oscilatórias, a trajetória de qualquer

partícula não avança em qualquer direção, apenas processa-se em torno de um ponto médio, não havendo transporte de fluido. A última definição trata-se da onda plana, que é aquela cujo movimento das partículas pode ser definido em apenas um plano, isto é, necessitando apenas de duas coordenadas espaciais (Veiga, 1979).

4.1.1 – Nomenclatura da onda.

Para obter o modelo matemático da onda adota-se, normalmente, um sistema de coordenadas cartesianas, $Oxyz$, cuja origem é no plano Oxy que coincide com a superfície indeformada da água e o eixo vertical z aponta para cima, conforme mostrado na Figura 4.1.

A elevação (deformação) provocada pela onda é dada por

$$z = \eta (x, y, t) \quad (4.1)$$

onde t é o tempo. Tratando-se de uma onda, plana, ou seja, com perfil paralelo ao eixo coordenado y , tem-se

$$z = \eta (x, t) \quad (4.2)$$

Vale ressaltar que no estudo da onda os parâmetros importantes são o seu comprimento λ , o período T , sua altura H e a profundidade h na qual ela se propaga. Essas nomenclaturas são mostradas na Figura 4.1.

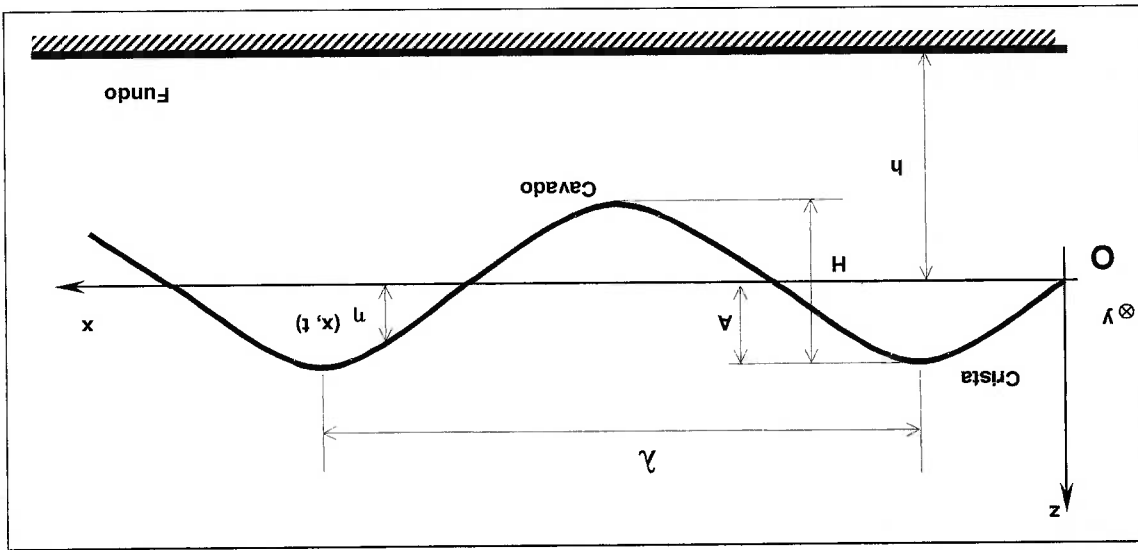


Figura 4.1 – Sistema de coordenadas e nomenclatura da onda.

Além dos parâmetros mostrados, descreve-se a seguir outros dois que são dimensões que caracterizam a frequência de oscilação:

$\omega = 2\pi/T$ = frequência angular temporal (rad/s);

$k = 2\pi/\lambda$ = número de onda (frequência angular espacial) (radianos por unidade de comprimento).

4.1.2 – Equação da onda.

A onda denominada trocoidal tem similaridade com as ondas reais, que também tem as cristas mais agudas que os cavados (Rahman, 1995). No entanto, essa onda não satisfaz a equação de Laplace, o que a torna impossível de ser usada para predições de movimentos no próprio fluido (Veiga, 1979).

Portanto a onda a ser estudada é aquela de perfil transversal cossenoidal ou senoidal.

4.1.2.1 – Equação diferencial característica

Para o desenvolvimento da teoria de onda utilizou-se aqui a metodologia apresentada por (Dean, 1991).

Admitindo-se a hipótese de fluido incompressível e movimento irrotacional, um potencial de velocidade ϕ , existe e satisfaria a equação da continuidade

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

(4.3)

onde \vec{v} é o vetor velocidade das partículas fluidas.

A condição de movimento irrotacional do fluido

$$\text{rot } \vec{v} = 0 \quad (4.4)$$

leva a

$$\vec{v} = \nabla \phi \quad (4.5)$$

(Kaplan, 1972).

substituindo a equação (4.5) em (4.3) temos

$$\nabla \cdot \nabla \phi = 0. \quad (4.6)$$

O divergente do gradiente conduz à equação de Laplace, a qual deverá ser

válida para todo o meio fluido.

$$\Delta^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (4.7)$$

No caso da onda plana (bidimensional), a equação característica fica:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (4.8)$$

4.1.2.2 – Problema de valor de contorno para ondas planas

Uma equação diferencial pode apresentar infinitas soluções. Nos

problemas físicos deve-se restringir as suas soluções de modo a atender

determinadas condições, sejam geométricas ou temporais. Essa restrição é obtida através das condições de contorno estabelecidas para uma região de interesse.

Para o estudo proposto, ou seja, o desenvolvimento da teoria linear de ondas, a figura 4.2 mostra a região de interesse, a equação característica e indica de maneira geral as condições de contorno.

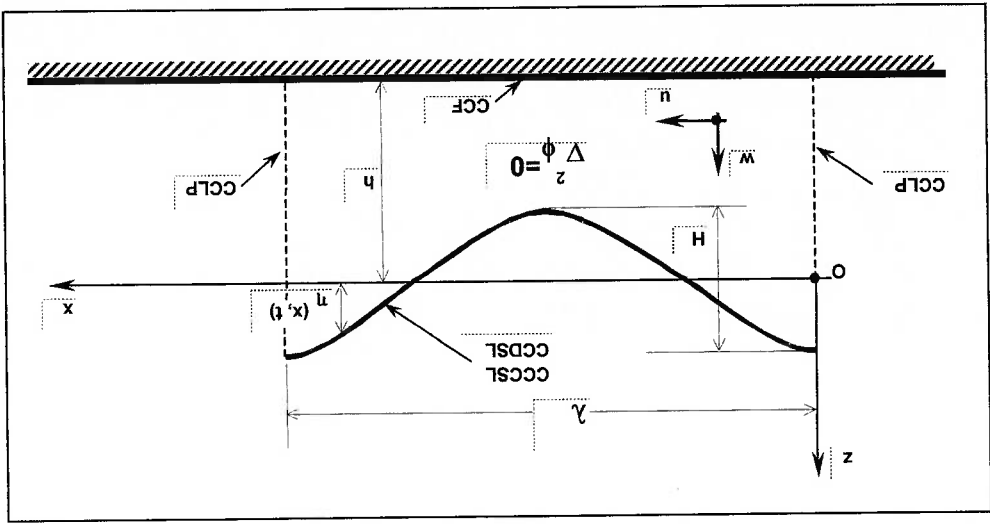


Figura 4.2 – Ondas bidimensionais especificadas como um problema de valor de contorno. Onde CCLP é a condição de contorno do fundo, CCLP é a condição de contorno lateral periódica, CCFSL é a condição de contorno dinâmica na superfície livre, CCFSL é a condição de contorno dinâmica da superfície livre e u e w são respectivamente a componente vertical e horizontal da velocidade das partículas fluidas

A equação característica e a região de interesse são dadas como

$$\Delta^2 \phi = 0, \quad 0 < x < \lambda, \quad -h < z < \eta. \quad (4.9)$$

Faz-se aqui um resumo das condições de contorno a serem utilizadas

na solução do problema de valor de contorno.

Para o fundo, considerado horizontal e impermeável aplica-se a

condição de contorno do fundo (CCF):

$$w = 0 \quad \text{em } z = -h \quad (4.10a)$$

ou

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = -h. \quad (4.10b)$$

Para a superfície livre, aplica-se duas condições: a condição de

contorno cinemática da superfície livre (CCSL), dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad \text{em } z = \eta(x,t), \quad (4.11)$$

e a condição de contorno dinâmica da superfície livre (CCDSL),

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = C(t) \quad \text{em } z = \eta(x,t). \quad (4.12)$$

Aplica-se ainda para ondas que são periódicas no espaço e tempo, a condição de contorno lateral periódica (CCLP), que em termos espaciais é

expressa como:

$$\phi(x, t) = \phi(x + \lambda, t), \quad (4.13a)$$

e em termos temporais:

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T), \quad (4.13b)$$

onde λ é o comprimento de onda e T o período de onda.

4.1.2.3 – Solução para o problema de valor de contorno linearizado

Desenvolve-se a seguir a resolução para o problema proposto (ondas periódicas no espaço e no tempo, propagando sobre um fundo horizontal) através da solução da equação característica (equação de Laplace) utilizando as equações das condições de contorno descritas no item anterior.

Pelo método chamado separação de variáveis, resolve-se a equação diferencial característica do problema expressando-a como um produto de termos, onde cada um deve ser função de uma única das variáveis independentes. No caso em questão têm-se que

$$\phi(x, z, t) = X(x)Z(z)r(t) \quad (4.14)$$

onde $X(x)$ é alguma função que depende apenas da coordenada horizontal x , $Z(z)$ depende apenas da coordenada vertical z , e $\tau(t)$ varia apenas com o tempo.

A função ϕ deve ser periódica em função da condição de contorno lateral, expressa pelas equações (4.13a) e (4.13b). Em função disso será admitido que

$$\tau(t) = \text{sen } \omega t \quad (4.15)$$

onde ω é a frequência angular da onda. Substituindo (4.15) em (4.14) tem-se

$$\phi(x, z, t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot \text{sen } \omega t \quad (4.16)$$

Substituindo na equação de Laplace, equação (4.8), obtêm-se

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} \cdot Z(z) \cdot \text{sen } \omega t + X(x) \cdot \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \cdot \text{sen } \omega t = 0$$

e dividindo por ϕ tem-se

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (4.17)$$

Para que a equação acima seja satisfeita, cada termo deve ser igual a uma mesma constante exceto pelo sinal, isto é

No entanto somente com k real e não zero pode-se satisfazer a condição de contorno lateral periódica ao longo do eixo x . Portanto as soluções encontradas na Tabela 4.1 são

Character of k , the Separation Constant	Ordinary Differential Equations	Solutions
Real $k^2 > 0$	$\frac{d^2 X}{dx^2} + k^2 X = 0$ $\frac{d^2 Z}{dz^2} - k^2 Z = 0$	$X(x) = A \cos kx + B \sin kx$ $Z(z) = C e^{kz} + D e^{-kz}$
$k = 0$	$\frac{d^2 X}{dx^2} = 0$ $\frac{d^2 Z}{dz^2} = 0$	$X(x) = Ax + B$ $Z(z) = Cz + D$
Imaginary $k^2 < 0, k = i k $ $ k = \text{magnitude of } k$	$\frac{d^2 X}{dx^2} - k ^2 X = 0$ $\frac{d^2 Z}{dz^2} + k ^2 Z = 0$	$X(x) = Ae^{ k x} + Be^{- k x}$ $Z(z) = C \cos k z + D \sin k z$

Tabela 4.1 – Possíveis soluções para a equação de Laplace, baseado na separação de variáveis. Reproduzida de (Dean, 1991)

As equações (4.18) são agora diferenciais ordinárias e portanto podem ser resolvidas separadamente. A constante k pode ser real, zero ou imaginário puro. Mostra-se na Tabela 4.1 reproduzida de (Dean, 1991), soluções que satisfazem as equações (4.18) para os três casos.

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k^2 X(x) = 0 \quad (4.18a)$$

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - k^2 Z(z) = 0 \quad (4.18b)$$

Restará agora obter os valores de A, B, C e D da equação (4.19) que podem ser determinados a partir das condições de contorno. Para facilitar a explicação do desenvolvimento, será considerado somente o termo $(A \cos kx)$. O segundo $(B \sin kx)$ será acrescido posteriormente. Essa separação é possível devido ao princípio de superposição. Portanto a equação (4.19) é reescrita apenas como

ou $k = 2\pi/\lambda$. O parâmetro k é chamado de número de onda. a qual é satisfeita para $\cos k\lambda = 1$ e $\sin k\lambda = 0$, o que significa que $k\lambda = 2\pi$

$$A \cos k(x + \lambda) + B \sin k(x + \lambda) = A(\cos kx \cos k\lambda - \sin kx \sin k\lambda) + B(\sin kx \cos k\lambda + \cos kx \sin k\lambda)$$

deve satisfazer a seguinte relação
 Para satisfazer explicitamente a condição de contorno lateral de periodicidade espacial ao longo de x , equação (4.13a), a equação (4.19a)

$$\phi(x, z, t) = (A \cos kx + B \sin kx)(C e^{kz} + D e^{-kz}) \sin \omega t \quad (4.19)$$

Substituindo essas soluções em (4.16), obtêm-se

$$Z(z) = C e^{kz} + D e^{-kz} \quad (4.19b)$$

$$X(x) = A \cos kx + B \sin kx \quad (4.19a)$$

Restas agora determinar a constante G. Para isso será utilizado a condição de contorno dinâmica da superfície livre. Esta condição pode ser

$$\text{onde } G = 2ADe^{kh}$$

$$\phi = G \cos kx \cosh k(h+z) \sin \omega t \quad (4.22)$$

ou ainda,

$$\phi = AD e^{kh} \cos kx (e^{k(h+z)} + e^{-k(h+z)}) \sin \omega t$$

ou, colocando em evidência $D e^{kh}$, tem-se

$$\phi = A \cos kx (D e^{2kh} e^{kz} + D e^{-kh}) \sin \omega t$$

O potencial de velocidade é agora indicado como

$$C = D e^{2kh}$$

parênteses devem ser identicamente zero, ou seja

Para satisfazer essa última equação para qualquer x e t, os termos entre

$$-A \cos kx (k C e^{-kh} - k D e^{kh}) \sin \omega t = 0 \quad (4.21)$$

ou

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = -A \cos kx (k C e^{kz} - k D e^{-kz}) \sin \omega t = 0 \quad \text{em } z = -h$$

(4.10b) tem-se

que substituindo na equação da condição de contorno de fundo horizontal

$$\phi(x, z, t) = A \cos kx (C e^{kz} + D e^{-kz}) \sin \omega t \quad (4.20)$$

$$G = \frac{2\omega \cosh kh}{Hg}$$

4.2. A constante G pode ser obtida de:

A última substituição veio pela comparação do termo constante com a representação analítica de η para o modelo físico, como mostrado na Figura

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx \cos \omega t \quad (4.25)$$

uma função do tempo. Portanto pode-se reescrever η como como uma constante vezes os termos periódicos no espaço e tempo mais temporal. Os termos entre os colchetes são constantes, portanto, η é dado $C(t) \equiv 0$, pois pela definição η terá uma média zero, tanto espacial como

$$\eta = \frac{G\omega \cosh kh}{g} \cos kx \cosh(h+z) \cos \omega t + \frac{C(t)}{g} \quad \text{para } z = 0 \quad (4.24)$$

Substituindo pelo potencial de velocidade dado pela equação (4.22), tem-se

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{C(t)}{g} \quad \text{para } z = 0. \quad (4.23)$$

tempo do potencial de velocidade.

do deslocamento instantâneo da superfície livre com a taxa de variação do aplicada à equação linearizada de Bernoulli que resulta no relacionamento

e aplicando as mesmas condições de contorno obtêm-se

$$\phi(x, z, t) = B \operatorname{sen} kx (C e^{kz} + D e^{-kz}) \cos \omega t$$

velocidade

solução para a equação de Laplace, temos o seguinte potencial de partir da equação característica. Tomando-se por exemplo uma outra Como comentado anteriormente, pode-se obter outras soluções a

4.1.2.4 – Solução para a onda progressiva.

direção.

mesmo valor para qualquer posição x e não há propagação em nenhuma são independentes, assim para algum instante t a forma da onda terá o de uma onda estacionária, pois os argumentos das funções trigonométricas problema proposto. A equação da elevação da onda (4.25), mostra tratar-se Essas duas últimas equações, representam uma das soluções para o

$$\phi = \frac{2a \cosh kh}{\operatorname{H}g \cosh k(h+z)} \cos kx \operatorname{sen} \omega t. \quad (4.26)$$

e o potencial de velocidade pode agora ser indicado como

(4.30)

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

dada como:

Esse novo potencial de velocidade tem uma elevação da superfície d'água,

(4.29)

$$\phi = \frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh kh} (\cos kx \sin \omega t - \sin kx \cos \omega t)$$
$$= - \frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh kh} \sin(kx - \omega t)$$

solução:

Para obter-se as equações de uma onda progressiva, pode-se usar o princípio da superposição. Subtraindo o presente potencial de velocidade equação(4.27) da solução anterior equação (4.26), gera-se uma nova

temporais são independentes.

Trata-se também de uma onda estacionária, pois os argumentos espaciais e

(4.28)

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \sin kx \sin \omega t.$$

cuja elevação da superfície da água associada é

(4.27)

$$\phi(x,z,t) = \frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh kh} \sin kx \cos \omega t,$$

que examinada, percebe-se que o perfil dessa onda move-se progredindo no espaço com a variação do tempo.

4.2 – Equação do Atuador.

Nesta seção desenvolve-se a equação que relaciona o movimento do atuador com o movimento da onda gerada no tanque. Utiliza-se para o desenvolvimento da teoria a metodologia apresentada por (Dean, 1991).

Os componentes do gerador de ondas e a geometria do tanque estão comentados no capítulo 3 onde consta a descrição do atuador, que é o elemento do gerador de ondas que está diretamente em contato com a água. No caso em estudo, trata-se de um atuador constituído de uma placa plana basculante, ou seja uma placa pivotada no fundo do tanque.

4.2.1 - Teoria do gerador de ondas para ondas planas produzidas por uma placa.

O problema de valor de contorno para o gerador num tanque segue diretamente o modelo do problema de valor de contorno para ondas bidimensionais propagando-se num meio fluido considerado incompressível e com escoamento irrotacional como desenvolvido na seção 4.1.2

Mostra-se o modelo físico do problema na Figura 4.3, para o qual a equação característica é a equação de Laplace já na forma bidimensional mostrada abaixo.

$$\Delta^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.31)$$

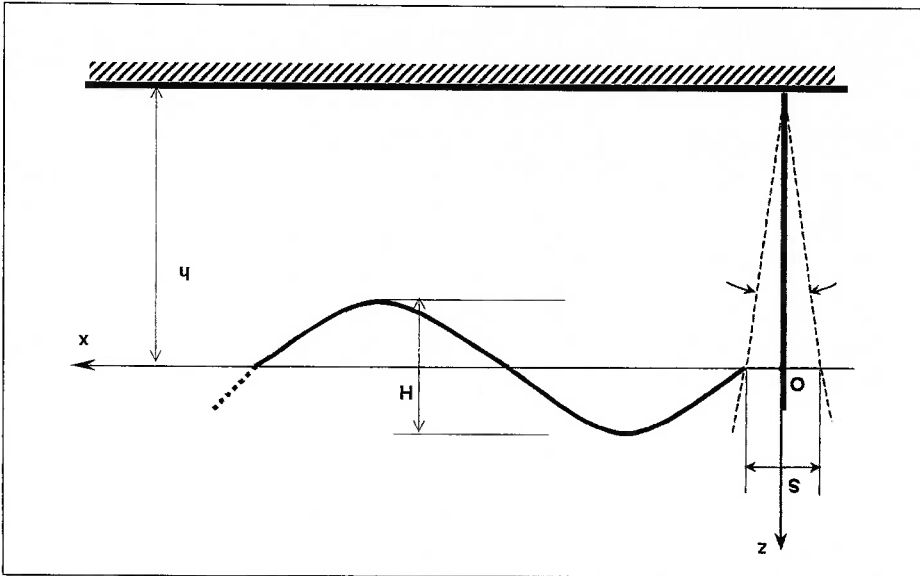


Figura 4.3 – Esquema Simplificado do gerador tipo placa basculante. (“flap type”).

As formas linearizadas das condições de contorno da superfície livre são as mesmas utilizadas anteriormente, isto é, as condições dinâmicas e cinemática que são dadas respectivamente por

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad \text{em } z = 0, \quad (4.32)$$

A condição de contorno cinemática geral é descrita como

$$F(x, z, t) = x - \frac{z}{2} \sin \omega t = 0. \quad (4.36)$$

A função que descreve a superfície do atuador é

onde ω é também a frequência de oscilação do atuador.

$$x = \frac{z}{2} \sin \omega t \quad (4.35)$$

curso do atuador, o seu movimento é descrito como:

As únicas condições que mudam são as de contorno lateral. Para a direção positiva de x , na qual deseja-se que as ondas se propaguem, impõe-se a condição de contorno de radiação e para $x = 0$, ou seja, exatamente no atuador ("flap"), uma condição cinemática deve ser satisfeita. Sendo $S(z)$ o

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = -h. \quad (4.34)$$

e a condição de contorno de fundo dada por

$$-\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = \frac{\partial z}{\partial t}, \quad \text{em } z = 0 \quad (4.33)$$

condição de contorno lateral para $x = 0$ fica
 assumidos muito pequenos e portanto são desprezados. Assim, a
 Apenas o primeiro termo na expansão é linear em u e $S(z)$ e os outros são

$$(4.39) \quad \left[u - \frac{2}{S(z)} \omega \cos \omega \right]_{x=[S(z)/2] \text{sen} \omega t} = \left[u - \frac{2}{S(z)} \omega \cos \omega \right]_{x=0} + \frac{2}{S(z)} \text{sen} \omega t \frac{\partial x}{\partial x} \left[u - \frac{2}{S(z)} \omega \cos \omega \right]_{x=0} + \dots$$

numa série de Taylor truncada
 termos de sua posição média, $x = 0$. Para isso desenvolve-se a condição
 conveniente expressar a condição de contorno de movimento lateral, em
 Assim como foi feito para as condições de contorno na superfície livre, é
 esquerdo.

Para pequenos deslocamentos de $S(z)$ e pequenas velocidades, pode-se
 linearizar essa equação com a desprezação do segundo termo do lado

$$(4.38) \quad \text{em } F(x, z, t) = 0 \quad u - \frac{2}{S(z)} \frac{dz}{dz} \text{sen} \omega t = \frac{2}{S(z)} \omega \cos \omega t$$

Substituindo para $F(x, z, t)$ temos:

$$\text{onde } \vec{u} = u\vec{i} + w\vec{k} \quad \text{e } \vec{n} = \nabla F / |\nabla F|.$$

$$(4.37) \quad \vec{u}\vec{n} = - \frac{\partial F(x, z, t) / \partial t}{|\nabla F|} \quad \text{em } F(x, z, t) = 0$$

$$u(0, z, t) = \frac{S(z)}{2} \omega \cos \omega t \quad (4.40)$$

Com o problema de valor de contorno especificado, examina-se todas as possíveis soluções para a equação de Laplace determinando qual delas satisfazem as condições de contorno. Referindo-se às soluções apresentadas na tabela 4.1, mostra-se o seguinte potencial de velocidade, o qual satisfaz a condição de contorno do fundo:

$$\phi(x, z, t) = A_p \cosh k_p (h+z) \sin(k_p x - \omega t) + (Ax + B) + C e^{-k_s x} \cos k_s (h+z) \cos \omega t \quad (4.41)$$

Os subscritos p e s em k indicam que esta parcela de ϕ está associada com uma onda progressiva ou com uma estacionária, pois os dois tipos de onda se formam a partir do movimento do atuador. Ainda em relação ao atuador, a constante A deve ser nula, pois não há escoamento através dele e B pode ser considerado zero sem afetar o campo de velocidade.

Os termos restantes devem agora satisfazer as duas condições de contorno linearizadas da superfície livre. Aplica-se uma condição combinada, obtida pela eliminação da elevação da superfície livre η das equações (4.32) e (4.33). Essa condição fica como

O primeiro termo representa uma onda progressiva gerada pelo movimento do atuador, já o segundo termo, corresponde a uma série de ondas estacionárias cujas amplitudes decaem a uma certa distância do atuador. Pela análise do primeiro termo na série que apresenta o decaimento menor em relação aos demais, chega-se a conclusão que a uma distância de três

$$\phi(x, z, t) = A_p \cosh k_p (h + z) \sin(k_p x - \omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_s(n)x} \cos[k_s(n)(h + z)] \cos \omega t \quad (4.45)$$

problema de valor de contorno é proposto como:
 exponencialmente com a distância a partir do atuador. A forma final para o números de onda para ondas estacionárias com amplitudes que decrescem enquanto a segunda, a qual relaciona k_s com a frequência, determina os A primeira equação é a relação de dispersão para ondas progressivas,

$$\omega^2 = -gk_s \tanh k_s h \quad (4.44)$$

e

$$\omega^2 = gk_p \tanh k_p h \quad (4.43)$$

(4.41) nessa condição de contorno obtém-se

Substituindo a solução adotada para o potencial de velocidade equação

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2 \phi}{g} = 0, \quad z = 0 \quad (4.42)$$

Tem-se desse modo uma função de z igual para uma série de funções trigonométricas de z a direita, similar a situação da série de Fourier. Assim, o conjunto de funções $\{ \cosh k_p (h + z), \cos [k_s (n) (h + z)] \}$, $n = 0, \infty$ } forma uma série harmônica completa de funções ortogonais e assim qualquer função contínua pode ser expandida em termos dela. Portanto, para

$$\frac{S(z)}{2} \omega = -A_p k_p \cosh k_p (h + z) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_s (n) \cos [k_s (n) (h + z)] \quad (4.46)$$

no

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_s (n) \cos [k_s (n) (h + z)] \cos \omega t$$

$$= -A_p k_p \cosh k_p (h + z) \cos \omega t +$$

$$u(0, z, t) = \frac{S(z)}{2} \omega \cos \omega t = -\frac{\partial \phi}{\partial x}(0, z, t)$$

lateral para o atuador, ou seja em $x = 0$.

determinados. Calculam-se esses valores, utilizando a condição de contorno

Para continuar a solução, os coeficientes A_p e C_n precisam ser

do tanque essa profundidade é a própria espessura da lâmina d'água. atuador até a lâmina d'água. No caso em que o atuador é pivotado no fundo profundidade aqui referida, refere-se a cota que vai do pivotamento do elevações de ondas a partir dessa distância. Deve-se observar que a 0,009, mostrando que o primeiro termo da série pode ser desprezado para vezes a profundidade o decréscimo da altura da onda estacionária é igual a

atuador como

Substituindo por A_p , encontra-se a razão da altura da onda pelo curso do

$$= \frac{H}{2} \cos(k_p x - \omega t) \quad \text{para } x \gg h \quad (4.49)$$

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{A_p}{g} \omega \cosh k_p h \cos(k_p x - \omega t)$$

estimativa de η (para $z = 0$) longe do atuador.

A amplitude da onda progressiva gerada pela atuador é determinada pela

$$S(z) = S \left(1 + \frac{z}{h} \right) \quad (4.48)$$

tipo "flap" ele pode ser expresso como:

("stroke") é o curso linear do atuador para a cota z , para o caso do atuador

O coeficiente A_p depende da forma funcional de $S(z)$. Lembrando que $S(z)$

$$A_p = \frac{-\int_0^{-h} S(z) \omega \cosh k_p (h+z) dz}{k_p \int_0^h \cosh^2 k_p (h+z) dz} \quad (4.47)$$

funções não há contribuição dos termos da série.

e integrada de $-h$ a 0 . Devido a propriedade da ortogonalidade dessas

determinar o valor de A_p , a equação acima é multiplicada por $\cosh k_p (h+z)$

4.3 – Modelo do Mecanismo

O modelo do mecanismo consiste de uma relação entre o deslocamento da mesa e o curso do atuador na lâmina d'água. Isto significa que os efeitos inerciais do sistema não serão levados em conta uma vez que o acionador é baseado em servomotor que em geral tem alto torque e controle em malha fechada que praticamente elimina o erro entre o sinal de referência e o sinal de saída.

O desenvolvimento do modelo matemático do mecanismo pode ser obtido a partir das relações geométricas do mecanismo que está mostrado esquematicamente na Figura 4.4. A partir desta figura podem ser deduzidas as seguintes relações:

$$\begin{aligned} (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 &= l^2 \\ (X_C - X_B)^2 + (Y_C - Y_B)^2 &= a^2 \\ X_B^2 + Y_B^2 &= d^2 \\ X_C^2 + Y_C^2 &= b^2 \end{aligned}$$

$$\frac{H}{S} = 4 \left(\frac{\text{senh}(k_p h)}{\text{senh}(k_p h)} \right) \left(\frac{k_p h}{\text{senh}(2k_p h) + 2k_p h} \right) \cdot \quad (4.50)$$

As incógnitas deste conjunto de equações são: X_B, Y_B, X_C, Y_C . Este sistema é um conjunto de 4 equações e 4 incógnitas e, portanto, podem ser obtidas as soluções para cada valor de X_A e Y_A . Convém ressaltar que Y_A é constante e X_A representa o curso do movimento da mesa. Assim, obtêve-se a resposta do sistema, ou seja, para cada valor de deslocamento da mesa foi calculado o deslocamento horizontal do topo do atuador (ponto C). O gráfico da Figura 4.5 mostra o comportamento do mecanismo. Posteriormente calcula-se o valor o curso horizontal do atuador na cota da lâmina d'água (S).

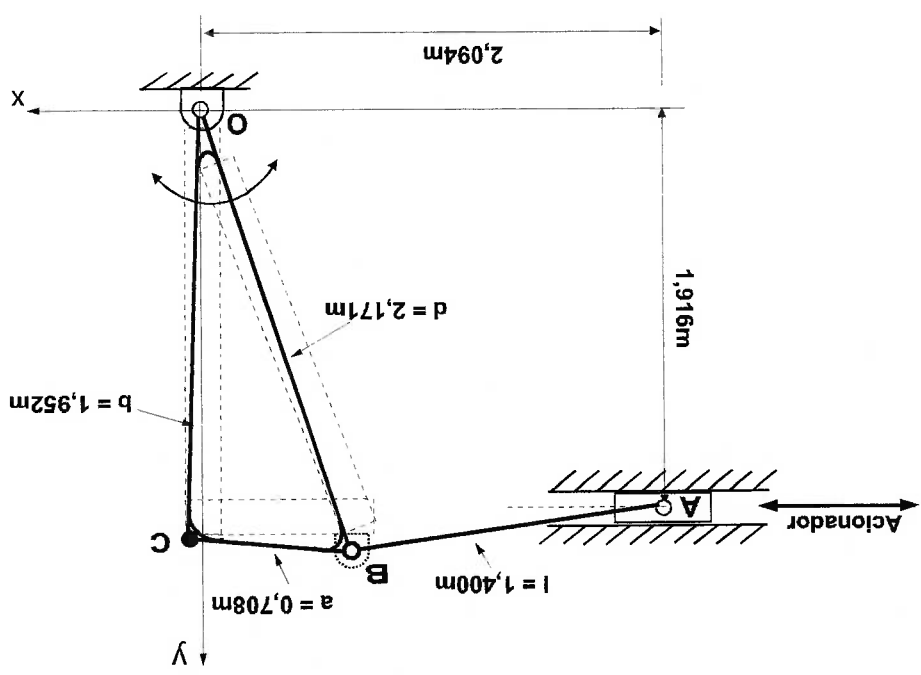


Figura 4.4 - Esquema do mecanismo do gerador de ondas

comparado com o deslocamento da mesa.

deslocamento do atuador na cota da lâmina d'água é ainda mais reduzido

deslocamento horizontal do atuador. Percebe-se então, que o valor do

Por meio de uma relação trigonométrica chega-se ao valor do

devido a geometria do mecanismo.

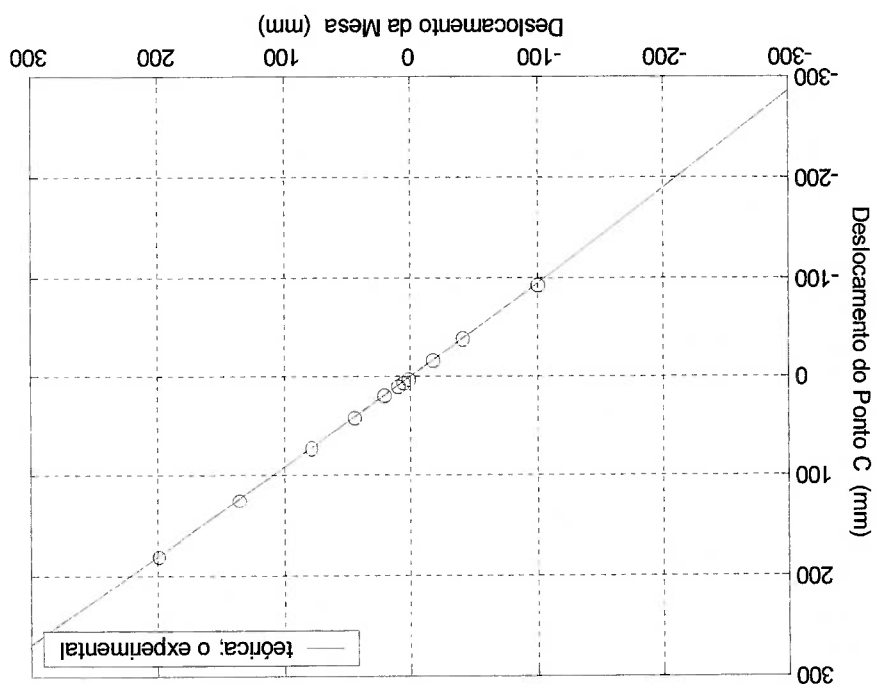
do atuador. Além disso existe uma pequena assimetria na transmissão

mecanismo não transfere totalmente o movimento da mesa para o ponto C

obtidas e comparadas com o resultado teórico. Pode-se notar também que o

Para verificar a solução do sistema, medidas experimentais foram

Figura 4.5 – Gráfico de resposta do mecanismo.



4.4 – Equação geral do sistema.

Até o presente momento foram desenvolvidos modelos matemáticos dos componentes do gerador de ondas isoladamente. Resta agora acoplar os convenientemente para reproduzir toda o modelo do sistema, isto é, da geração do sinal de referência até a elevação da onda no ponto desejado. Este modelo total do sistema pode ser representado pelo diagrama de bloco mostrado na figura 4.6.

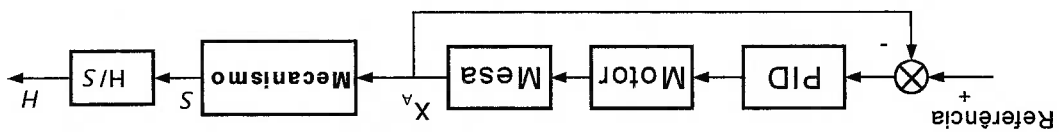


Figura 4.6 – Diagrama de blocos da equação geral do sistema.

5 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GERADOR DE ONDAS

Para verificar o desempenho do sistema de geração de ondas foram efetuadas uma série de medidas experimentais. A partir destes resultados foram efetuadas as seguintes análises:

a-) verificação do atendimento dos requisitos operacionais, mormente quanto à altura de ondas para as diversas frequências;

b-) comparação da função de transferência obtida experimentalmente com a calculada teoricamente com a verificação da influência da declividade da onda;

c-) comparação da potência obtida a partir dos dados experimentais com a prevista teoricamente;

Além dessas análises quantitativas também é efetuadas neste capítulo uma análise qualitativa do desempenho do gerador de ondas tanto mecanicamente como sua interação hidrodinâmica com o tanque.

5.1 – Procedimento experimental.

As variáveis que interessam diretamente para a análise do desempenho de um gerador de ondas são o deslocamento do atuador e a altura de onda realmente gerada em um determinado ponto para uma dada frequência e uma determinada lâmina d'água. Neste trabalho, adicionalmente foram medidas a força no braço de acionamento, o torque e a rotação do motor elétrico e a aceleração horizontal nas extremidades do atuador para averiguar a rigidez estrutural do atuador.

A altura das ondas e o deslocamento do atuador foram medidas, respectivamente, através de um ondômetro resistivo e de um potenciômetro linear. A força no braço de acionamento foi obtida através de uma instalação extensiométrica. Detalhes desta instalação são mostrados no Apêndice A. Os sinais de torque e rotação do motor já eram disponíveis no próprio sistema. As medidas das acelerações foram efetuadas através de acelerômetros. Todos os sinais foram gravados em um sistema de aquisição de dados informatizado. Especificações técnicas de todos os equipamentos utilizados durante os experimentos estão detalhadas no Apêndice B.

Para uniformizar os experimentos, foram adotados os seguintes procedimentos:

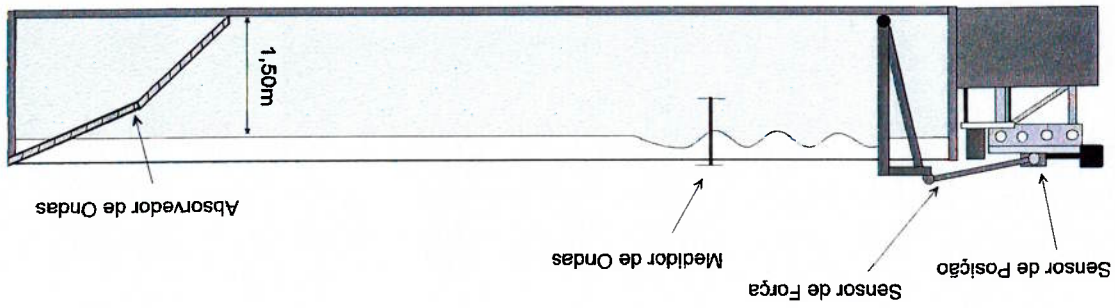


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do arranjo experimental

Um esquema geral do arranjo experimental é mostrado na Fig. 5.1.

- Entre os ensaios aguardou-se sempre o repouso d'água.
- As alturas das ondas foram medidas a uma distância de 5,72 m do atuador na sua posição inicial. Esta distância foi adotada considerando-se que a partir de 3 vezes a lâmina d'água já não haveria influência das ondas evanescentes;
- O atuador foi sempre acionado a partir da sua posição perpendicular à superfície d'água, que é considerada a sua posição inicial;
- A lâmina d'água no tanque foi mantida sempre em 1,50 m;

A sequência de operação para a realização do ensaio, era a preparação do sistema de aquisição de dados para o recebimento, processamento (digitalização dos sinais analógicos) e armazenamentos dos

sua influência na função de transferência do gerador.

freqüências foram consideradas mais de uma declividade para verificar a o curso do atuador necessário para a geração das ondas. Para algumas pelo curso do atuador (H/S) obtida a partir da equação 4.50, foi determinado declividade seja pequena e constante. Finalmente, com a relação amplitude (L). Com o comprimento de onda calcula-se a altura de onda de forma que a determinou-se, inicialmente, para cada freqüência, o comprimento de onda teoria foi desenvolvida para declividades baixas. Para garantir esta hipótese declividade da onda em toda a faixa de freqüência. Convém ressaltar que a Um aspecto importante na realização dos ensaios foi o controle da

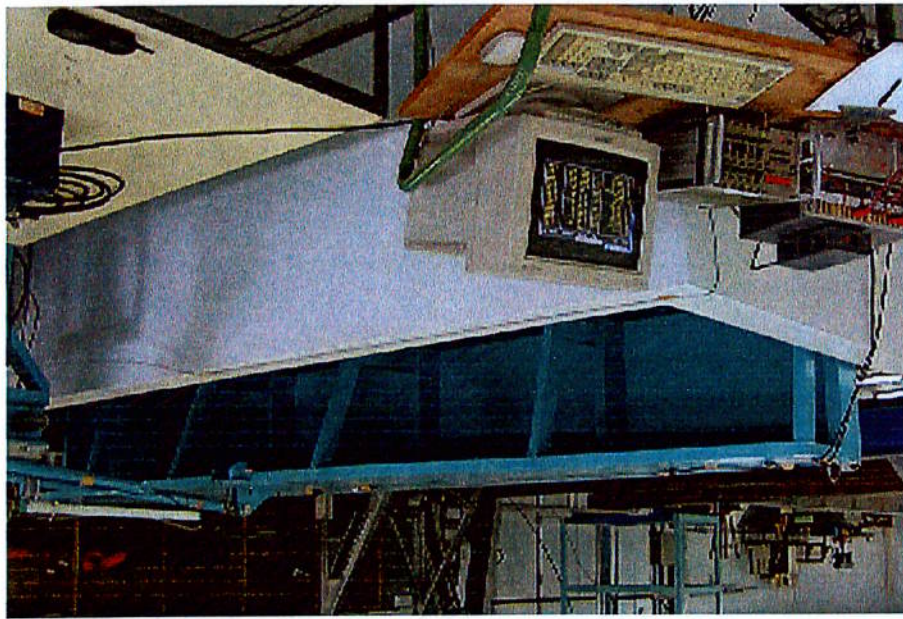
era obtido através de um gerador de funções.

Os testes foram realizados com ondas regulares para toda a faixa de freqüência de interesse, ou seja de 0,5 Hz a 3,0 Hz, com intervalos de 0,1 Hz até 1 Hz e 0,2 Hz até 3,0 Hz. O sinal de referência com estas freqüências

Após a montagem dos instrumentos e ajustes iniciais inerentes à instrumentação eletrônica, todos os sinais foram enviados ao sistema de aquisição de dados preparado com uma freqüência de aquisição de 20 Hz.

registros (variação dos sinais medidos em função do tempo) que eram gravados num formato de arquivo próprio do programa de aquisição de dados utilizado. Estes arquivos foram convertidos em formatos do tipo texto (ASCII) para poderem ser lidos através de outros programas.

A Figura 5.2 mostra o gerador de ondas e a bancada de instrumentação durante os ensaios realizados para este trabalho.



**Figura 5.2 – Vista do gerador de ondas durante os ensaios.
Primeiro plano: bancada de instrumentos.
Segundo plano: atuador e haste de acionamento**

5.2 – Resultados Obtidos.

As variáveis adquiridas durante os ensaios são apresentadas em forma de tabelas que geralmente são processadas em forma de registros gráficos. Nesses registros o sinal de cada variável é mostrado em função do tempo.

A partir desses registros (históricos no tempo) obtêm-se diretamente as amplitudes das variáveis medidas e o seu comportamento ao longo do tempo.

Para cada tipo de processamento a ser realizado após a obtenção dos dados de ensaios, existe uma técnica apropriada. As características do sinal adquirido devem ser analisadas, procurando estabelecer a correspondência entre o aspecto do sinal e o fenômeno físico ocorrido. Com essa pré análise é possível identificar algumas características do sinal gravado que correspondem aos fenômenos físicos ocorridos durante o ensaio. Muitas vezes essa pré análise evita a utilização de trechos do sinal que não correspondem à ocorrência física de interesse.

Mostra-se a seguir alguns registros de sinais adquiridos durante os ensaios e uma análise espectral de cada um dos sinais.

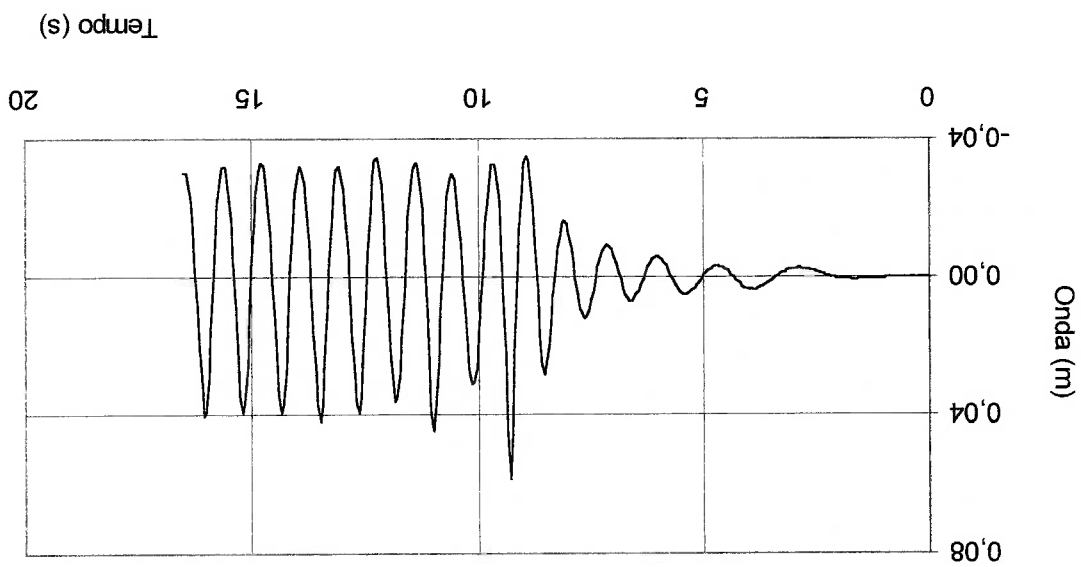


Figura 5.3 – Registro do sinal de onda, para uma frequência de 1,2 Hz imposta no gerador.

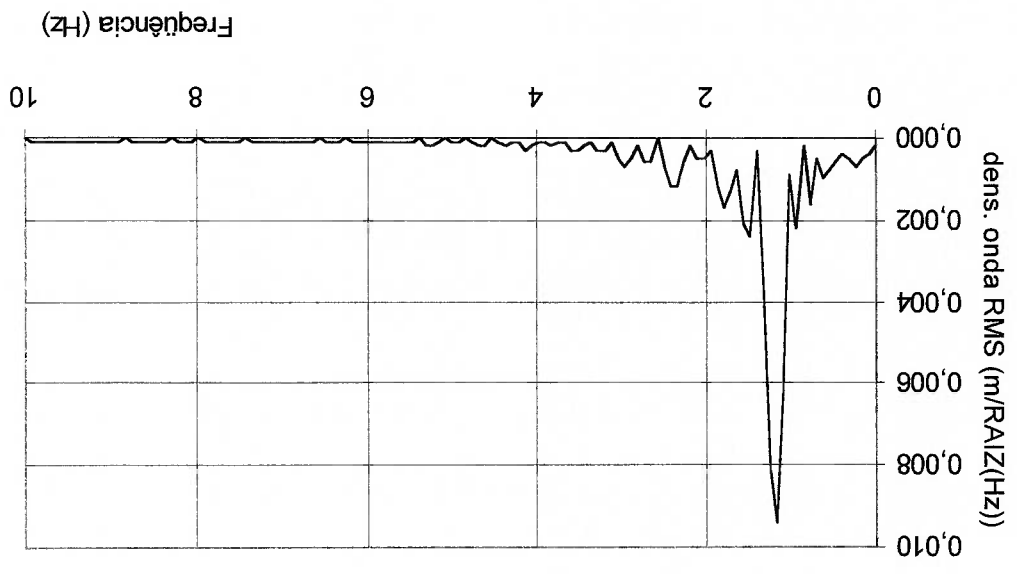


Figura 5.4 – Espectro de potência do sinal da onda mostrado na figura 5.3.

Os sinais correspondentes a variável altura de onda medida nos ensaios têm as seguintes características:

1. Existe um transitório no início, cuja forma e duração é variável em função da frequência da onda gerada.

2. Existe uma deformação do sinal a partir de um certo instante, devido à interferência da reflexão da onda vinda do absorvedor que como já comentado, não possui eficiência de absorção completa. Aqui também a característica da deformação no sinal gravado e o instante onde começa essa deformação estão em função da frequência da onda ensaiada.

Nesse caso o processamento inicial dos dados (conversão de dados) não pode ser automatizado sem alguns cuidados. Portanto, o processo adotado foi a realização de uma inspeção visual para a obtenção do trecho de registro livre das características 1 e 2 listadas acima.

Na Figura 5.3 é mostrado o histórico no tempo do sinal da onda com um transitório inicial conforme comentado acima. Nesse registro pode-se notar que o transitório começa na marca de 5 s e termina na marca de 14 s. O instante do início e duração do transitório depende do instante e da maneira como o gerador foi acionado e da velocidade da onda que é função de sua frequência. A deformação do sinal da onda causada pela reflexão no absorvedor, aparece quando ocorre o tempo necessário para permitir a gravação do retorno ao ondômetro. Na Figura 5.5 onde é mostrado um

registro de onda com frequência de 0,6 Hz, é possível observar com mais facilidade o efeito da reflexão atenuando as amplitudes após poucos ciclos depois do transítório.

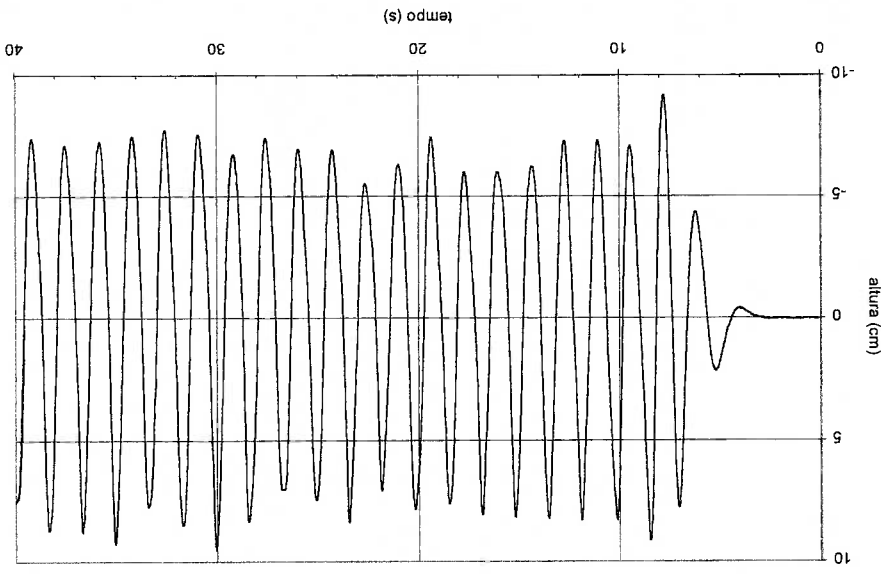


Figura 5.5 – Registro do sinal de onda, para uma frequência de 0,6 Hz imposta no gerador.

Portanto teve-se o cuidado de observar estes aspectos para poder escolher o trecho do sinal livre de influências espúrias. Assim por exemplo, no registro mostrado na Figura 5.3, utilizou-se somente o trecho entre 15 s e 20 s para a conversão de dados.

Mostra-se na Figura 5.4 uma análise espectral do sinal da onda mostrado anteriormente, onde pode-se notar que a principal frequência de oscilação ocorre em 1,2 Hz, que foi a frequência imposta através do gerador de ondas.

O outro sinal adquirido e utilizado foi o movimento da mesa, cuja amplitude total foi convertida no curso total do atuador exatamente na cota da lâmina d'água. O sinal pode ser visto na Figura 5.6 e a análise espectral na Figura 5.7.

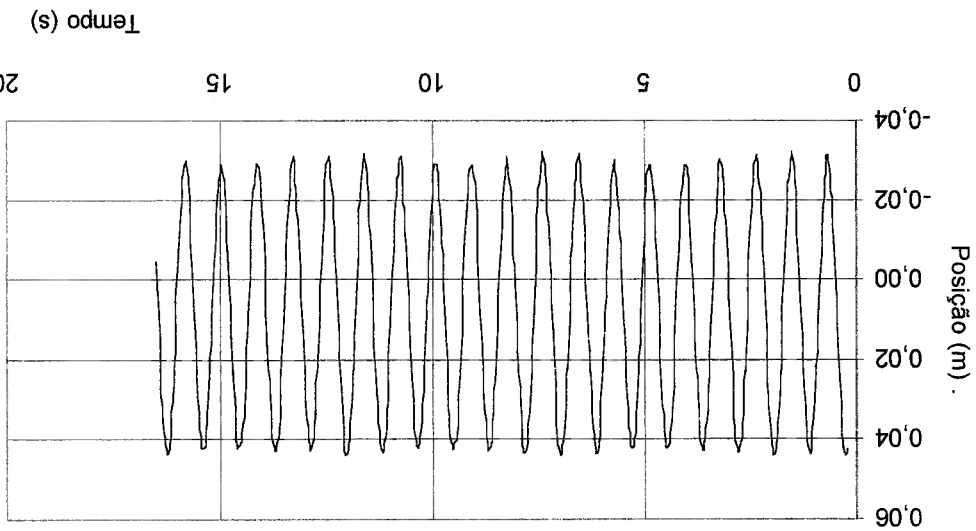


Figura 5.6 – Registro do sinal do movimento da mesa do sistema de acionamento para uma frequência nominal de 1,2 Hz imposta no gerador

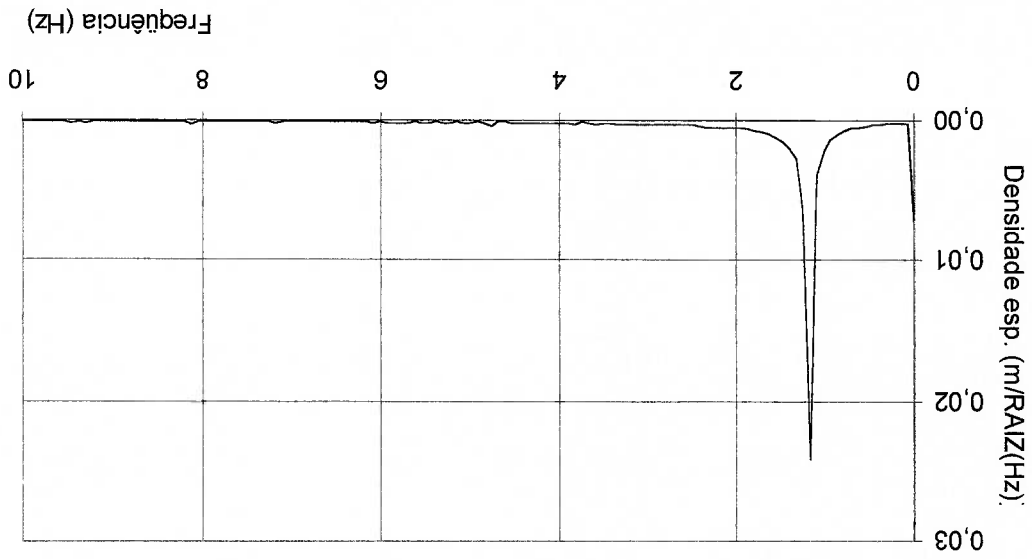


Figura 5.7 – Espectro de potência do sinal do movimento da mesa mostrado na figura 5.6.

O sinal da força total de acionamento pode ser visto na Figura 5.8, onde pode-se notar um transitório com amplitude bastante elevada em relação às amplitudes posteriores. Este comportamento é notado em todas as frequências e seu aparecimento deve-se ao fato de que o acionamento do gerador é feito manualmente através de uma chave interruptora. A chave acionadora deveria ser ligada exatamente na posição central do sinal senoidal de referência para coincidir com a posição inicial do atuador. Mas devido a característica de máxima velocidade nesta posição do sinal senoidal, é bastante difícil o acionamento exatamente nesta posição.

Também é mostrado o espectro do sinal da força na Figura 5.9 onde pode ser observado que apesar da amplitude alta transitório e outros ruídos registrados, a maior parcela de energia concentra-se na frequência imposta pelo gerador.

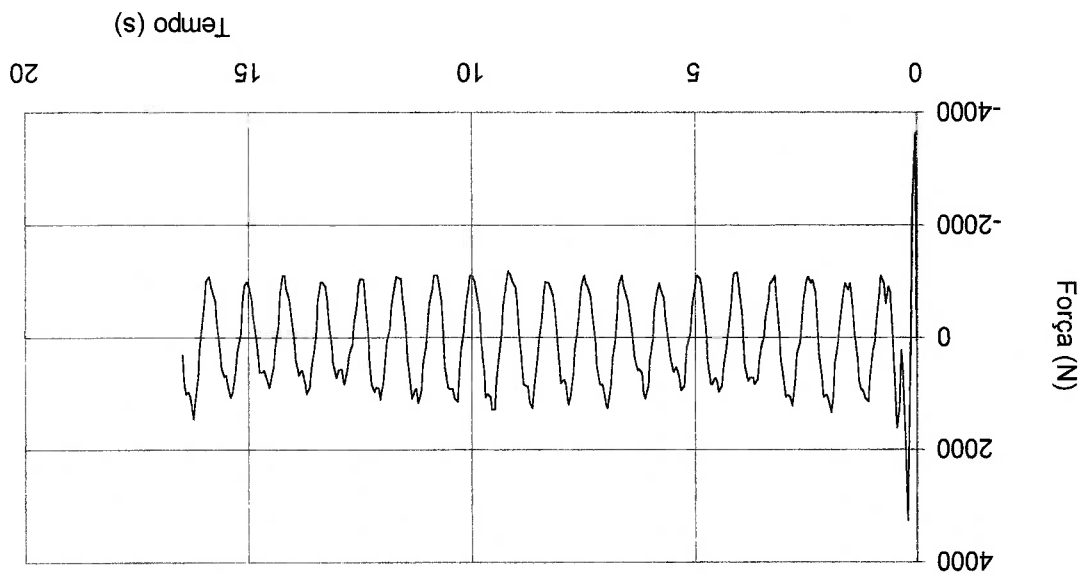


Figura 5.8 – Registro do sinal da força total de acionamento, na frequência imposta pelo gerador de 1,2 Hz

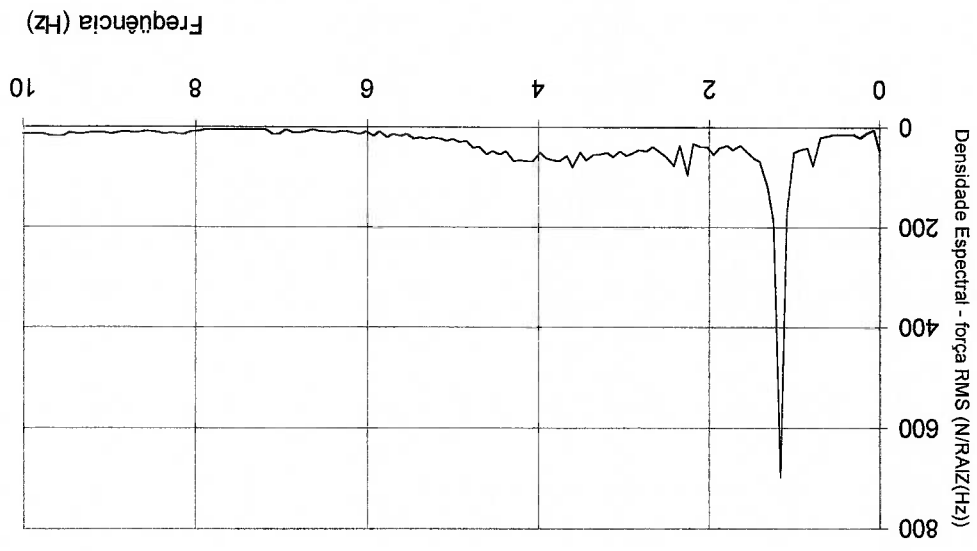


Figura 5.9 – Espectro de potência do sinal da força mostrado na figura 5.8.

Após o processamento dos registros dos ensaios, conforme os preceitos descritos anteriormente, organizou-se os valores medidos mostrados na Tabela 5.1.

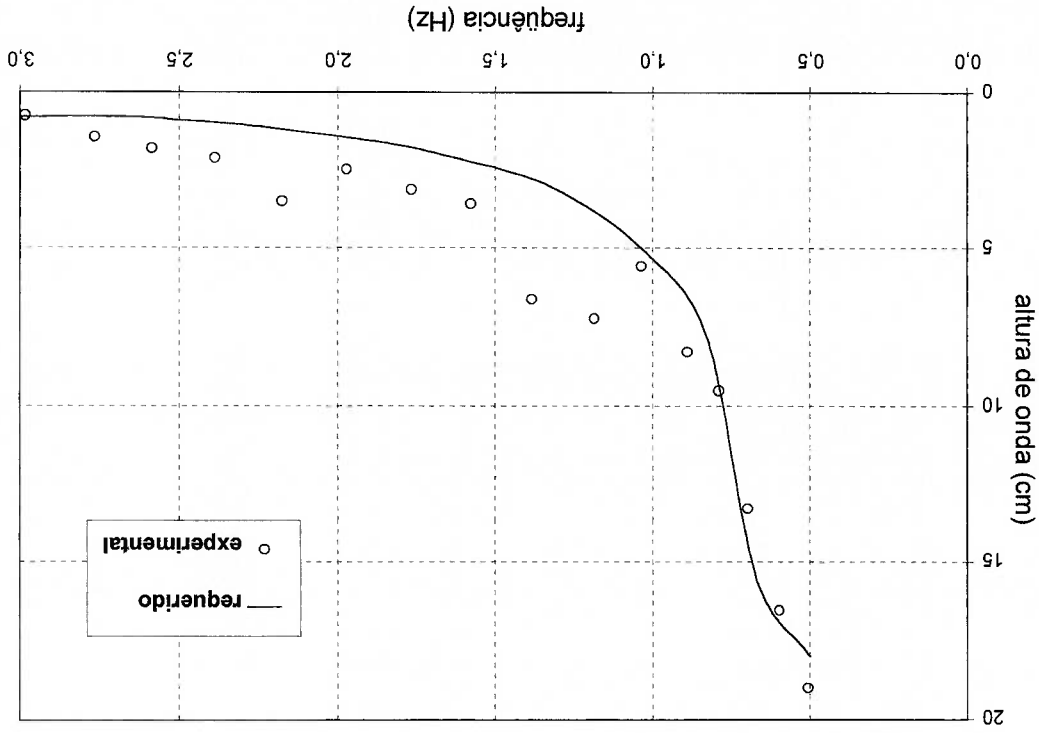
Tabela 5.1 – Dados dos ensaios

Número do ensaio	Frequência Hz	Curso do atuador (S) cm	Altura da Onda (H) cm	H/S	Declividade da onda %
1	0,41	11,0	7,2	0,65	1,0
2	0,50	10,2	8,0	0,78	1,4
3	0,49	10,1	8,0	0,79	1,4
4	0,51	22,9	19,0	0,83	3,4
5	0,60	15,5	16,5	1,07	3,9
6	0,60	7,4	8,2	1,11	1,9
7	0,60	6,3	6,9	1,09	1,6
8	0,60	6,3	6,2	1,00	1,5
9	0,69	6,5	8,3	1,28	2,6
10	0,70	10,4	13,3	1,27	4,2
11	0,79	6,0	9,5	1,59	3,8
12	0,79	5,9	7,8	1,31	3,1
13	0,80	4,8	7,5	1,56	3,1
14	0,80	4,8	7,2	1,52	3,0
15	0,89	5,3	8,3	1,56	4,2
16	1,04	3,4	5,6	1,65	3,8
17	1,04	3,3	5,5	1,66	3,8
18	1,03	2,6	4,4	1,68	3,0
19	1,19	4,6	7,2	1,55	6,5
20	1,18	4,6	7,2	1,56	6,4
21	1,21	2,1	3,7	1,75	3,4
22	1,30	0,7	1,3	1,82	1,4
23	1,39	4,3	6,6	1,54	8,1
24	1,38	2,2	3,8	1,69	4,6
25	1,39	0,9	1,7	1,87	2,1
26	1,59	4,0	6,4	1,58	10,3
27	1,58	2,1	3,6	1,70	5,7
28	1,64	0,9	1,7	1,89	3,0
29	1,72	0,9	1,9	1,95	3,5
30	1,78	2,9	4,8	1,67	9,7
31	1,77	2,0	3,1	1,58	6,2
32	1,78	0,7	1,3	1,73	2,6
33	1,97	1,4	2,5	1,69	6,1
34	1,98	2,0	2,9	1,50	7,4
35	1,95	0,7	1,2	1,73	3,0
36	2,18	1,9	3,5	1,86	10,6
37	2,19	0,6	1,1	1,68	3,3
38	2,39	1,2	2,1	1,69	7,6
39	2,36	0,5	0,7	1,62	2,7
40	2,59	1,2	1,8	1,54	7,7
41	2,58	0,4	0,5	1,44	2,3
42	2,77	0,9	1,4	1,59	6,9
43	2,80	0,4	0,4	1,04	1,9
44	2,99	0,5	0,7	1,37	4,2
45	2,99	0,3	0,2	0,57	1,0
46	3,13	0,3	0,1	0,39	0,7

5.3 – Análise dos Resultados.

Com os resultados obtidos nos ensaios, pode-se prosseguir às análises pretendidas e declaradas no início deste capítulo.

A primeira análise corresponde ao desempenho do gerador de ondas no que diz respeito ao principal requisito de projeto, ou seja a verificação do funcionamento em geral e sua capacidade de atingir as frequências e as alturas de ondas requeridas. Esta análise é mostrada na Figura 5.10, onde alguns pontos experimentais extraídos da tabela 5.1 são indicados juntamente com a relação de altura de onda em função da frequência da figura 3.2, que representa o requisito principal do gerador de ondas.



No gráfico da Figura 5.10, são mostrados somente as maiores alturas obtidas durante os ensaios. Pode-se notar que o gerador de ondas alcança as alturas de ondas requeridas em toda a faixa de frequências. A declividade média das ondas requeridas é de 3,5%.

Além da obtenção de dados para a análise de desempenho, durante os ensaios também foram observados outros aspectos relativos ao funcionamento do sistema de acionamento e de interação entre o gerador e o tanque. Comenta-se a seguir e na próxima seção alguns desses aspectos.

Devido ao curso disponível do atuador, pode-se gerar ondas com alturas maiores, porém a inexistência de um absorvedor na parte posterior do atuador impede a sua realização devido a agitação excessiva da água.

Com lâmina d'água de 1,5 m, que foi adotada para projeto, as ondas com frequências menores que 0,73 Hz não satisfazem a condição de propagação em águas profundas. Isto estabelecido pelo critério de que a profundidade deve ser maior que metade do comprimento da onda em águas profundas.

O ponto experimental com menor frequência mostrada na figura 5.10 foi de 0,5 Hz com altura de 19 cm. Se for admitido um ensaio com escala de 1:100, esta altura no tanque corresponde a 19 m de altura da onda no mar

com um período de 20 s. Isto significa que, eventualmente, condições de mar extremas podem ser ensaiadas. No entanto, para a geometria desse tanque, ondas com frequências inferiores a 0,8 Hz tornam-se problemáticas porque devido a sua velocidade de propagação há um retorno rápido das ondas refletidas no absorvedor. Assim, nesses casos, somente podem ser adquiridos sinais por um período reduzido.

A maior frequência ensaiada é a de 3 Hz com altura de 0,7 cm. A necessidade de utilização desta frequência no tanque ocorre para fatores de escala altos, que não são recomendáveis para ensaios com modelos, mas pode-se utilizar a geração dessa onda para estudos de propagação.

Para ondas com frequências maiores que 1,7 Hz foi observado interferência por ondas transversais que começam a ocorrer a partir dessa frequência.

Um outro dado que foi obtido e analisado é a função de transferência do atuador.

Neste trabalho foi mostrado o desenvolvimento matemático para calcular a função de transferência para um atuador do tipo placa basculante pivotada no fundo do tanque (Capítulo 4). Com os ensaios realizados pode-se comparar os resultados experimentais com a curva teórica calculada pela equação 4.50. A validade da teoria linear de ondas já foi testada anteriormente, conforme pode-se constatar no artigo de Ursell et al. (1960),

mas com essa verificação realizada através dos ensaios, pode-se analisar também a interação do atuador com o tanque, pois existem vários aspectos nessa interação que influem na geração e propagação das ondas. Geralmente esses aspectos contribuem para uma atenuação da elevação de ondas levando a resposta do gerador a valores abaixo do esperado teoricamente.

A figura 5.11 compara a função de transferência teórica e a obtida experimentalmente. Em torno da função teórica é delimitada uma faixa de $\pm 3\%$ de desvio para auxílio da análise dos resultados experimentais. O desvio de 3% foi adotado arbitrariamente, mas engloba os erros experimentais. Ainda para facilitar a análise os pontos experimentais foram divididos em três conjuntos em função da declividade (H/L) da onda gerada.

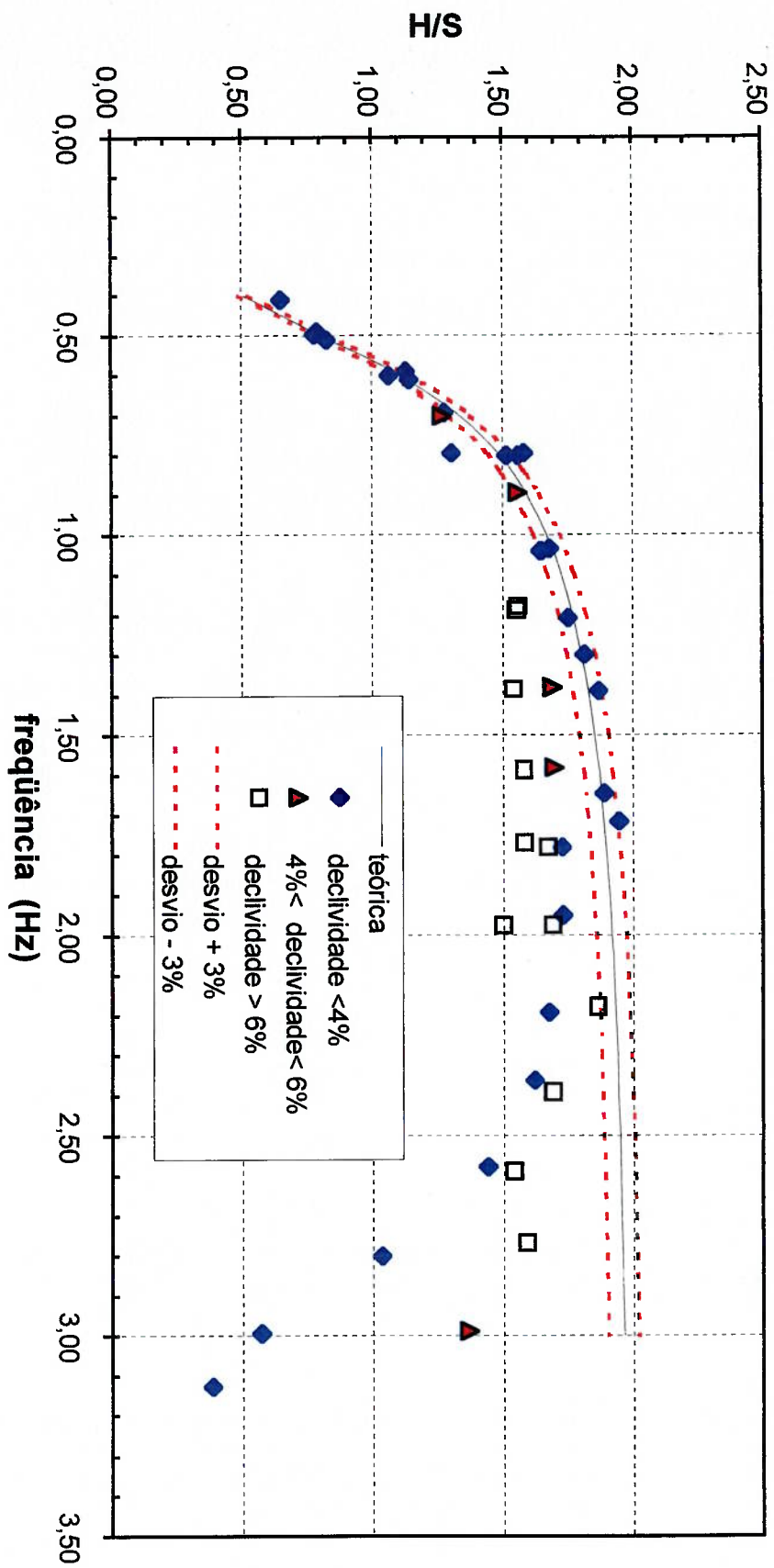


Figura 5.11 – Comparação da função de transferência teórica e experimental

Mas, constata-se ainda no gráfico da figura 5.11 que os pontos com declividade baixa situados acima da frequência de 1,7 Hz vão se afastando sistematicamente da curva teórica, chegando a valores de resposta extremamente pequenos. Ficam inclusive abaixo dos pontos com declividades maiores. A justificativa para esta ocorrência, está no fato de que a montagem do atuador no tanque é do tipo molhada, portanto com água na parte posterior do atuador. Como não existe absorvedor atrás do atuador, há a geração de ondas entre a parede e o atuador. Em algumas frequências o fenômeno de ressonância amplifica a amplitude desta onda, fazendo com que apareça um fluxo de água que atravessa a fresta existente entre as extremidades do atuador e as paredes laterais do tanque. Com isso ondas transversais são criadas na frente do atuador. As amplitudes destas ondas transversais são em algumas frequências amplificadas pela ressonância

mais da curva teórica.

Esta constatação é esperada, uma vez que a teoria linear de ondas, na qual a teoria do gerador de ondas foi baseada, assume a hipótese de pequenas amplitudes das ondas. Pode-se notar em algumas frequências que quanto maior a declividade o valor da resposta experimental afasta-se

Pode-se notar no gráfico da Figura 5.11 que os pontos com declividade menor que 4% ficam dentro da faixa até a frequência de 1,7 Hz. Já os pontos com declividade da onda acima de 4% estão afastados sistematicamente a uma média superior ao desvio adotado de 3%.

devido as paredes laterais do tanque, vindo a sobrepor às ondas longitudinais, podendo em alguns casos atenuar suas amplitudes. Assim no caso das ondas de pequena declividade acima de 1,7 Hz, onde suas amplitudes são consideravelmente pequenas, essa sobreposição e atenuação leva a resultados de valores afastados do previsto.

Nos ensaios onde foram repetidos os mesmos parâmetros de controle do gerador de ondas, notou-se um boa repetibilidade das variáveis medidas.

A terceira análise desenvolvida é a verificação da potência exigida pelo sistema. Para isso, foram utilizadas as medidas da força total de acionamento. Relacionou-se a amplitude máxima da força medida pela razão da amplitude do movimento da mesa (curso da mesa) em função da frequência, obtendo-se o gráfico mostrado na Figura 5.12.

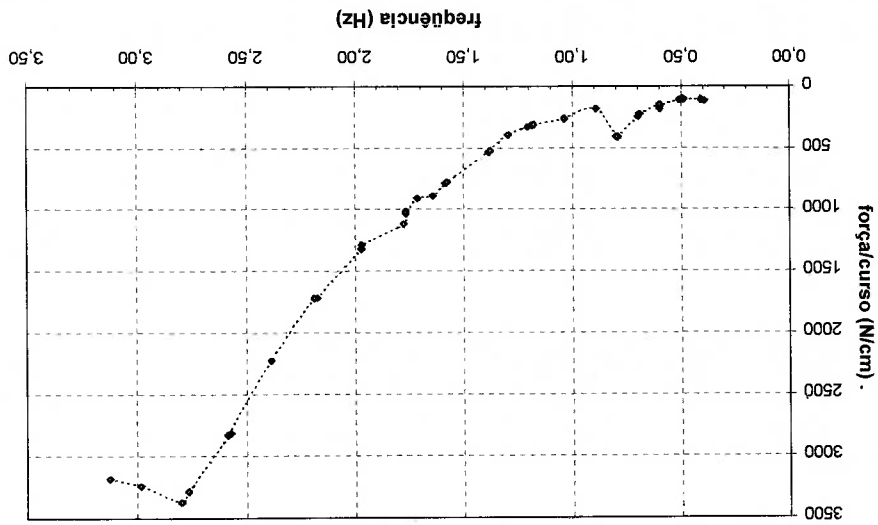


Figura 5.12 – Variação da razão força de acionamento por curso da mesa. Valores experimentais

Por meio deste gráfico (figura 5.12), pode-se obter o valor da amplitude máxima da força necessária para um dado curso da mesa em função da frequência desejada.

O valor da amplitude máxima da potência experimental foi determinada com o mesmo critério utilizado no projeto (capítulo 3), ou seja, com o valor da amplitude máxima da força determinado na frequência de 0,6Hz para um curso de 0,30 m multiplicado pelo valor da amplitude máxima da velocidade da mesa para a frequência de 0,5 Hz, obtve-se o resultado de 4,1 kW.

Comparando-se o valor da potência determinada no projeto (6,2 kW) e o experimental (4,1 kW), constata-se que realmente o valor da amplitude da força utilizado no projeto estava sobre estimado. Este fato já era reconhecido na época do projeto conforme descrito no capítulo 3.

As medidas de torque extraídas do motor durante os ensaios, também confirmam a constatação citada acima.

Pode-se justificar, ainda, o baixo valor da potência obtida experimentalmente comparada com a prevista no projeto, pelo fato de que o curso da mesa necessário para a geração das alturas de ondas requeridas é menor do que o previsto, uma vez que a função de transferência real do

atuador é mais eficiente que aquela utilizada na fase de projeto, além da força requerida também ser menor.

As medidas efetuadas com os acelerômetros instalados nas duas extremidades do atuador, mostram numa análise qualitativa, que a rigidez estrutural do atuador foi bem dimensionada e que o processo de fabricação atendeu as especificações do projeto estrutural. Esta constatação foi realizada por meio da observação da inexistência de defasagens de valores que afetassem o desempenho esperado.

Foi observado falta de rigidez do suporte de apoio do sistema de acionamento para algumas frequências.

Com as medidas da rotação do motor, esperava-se analisar de maneira mais completa o desempenho do motor, mas não foi possível obter rotações acima de 1000 rpm, por causa da conversão do sinal do sensor de rotação ultrapassar o limite de entrada na placa de aquisição.

5.4 – Análise Crítica do Critério Adotado para o Projeto.

Após as análises dos resultados obtidos e observações visuais durante os ensaios, pode-se avaliar o procedimento e os vários critérios adotados na fase de projeto. Além disso, o conhecimento adquirido com o

presente trabalho permite uma análise crítica dos critérios estabelecidos

anteriormente.

A primeira observação diz respeito ao não conhecimento da teoria dos geradores de ondas na época do projeto e a sua utilização na determinação da real função de transferência para a geometria do atuador, tanto para o deslocamento necessário, quanto para a estimativa da força. Isto ocasionou o uso de curvas de resposta não condizente com a realidade. Uma consequência imediata foi a determinação de um deslocamento excessivo do mecanismo de acionamento (curso da mesa) para as condições de ondas requeridas neste projeto. Com isso, além de aumentar a potência requerida pelo motor, aumentou o tamanho do mecanismo e, principalmente, do parafuso de esferas circulantes que também tem um custo elevado comparado com outros componentes.

Além do uso de parâmetros não adequados pela falta de um estudo mais abrangente na época do projeto, o critério adotado para determinar a potência levou a valores excessivos. A sugestão para um novo critério, é uma análise pontual para toda a faixa de frequências levando-se em conta a defasagem que existe entre as variáveis força e velocidade do movimento do atuador. Mas para isso é preciso também um estudo do comportamento das forças envolvidas, principalmente na condição molhada, ou seja a existência de água nas faces do atuador. Entretanto, mais do que o estudo das forças envolvidas na condição de ondas regulares, é preciso verificar a

potência para gerar, eventualmente, outros tipos de ondas numa futura ampliação da capacidade do gerador instalado.

A segunda observação está relacionada com a dimensão do atuador, em especial a largura. As frestas entre as bordas do atuador e as paredes laterais estão excessivamente grandes, ocasionando, um fluxo de água e passagem de ondas vindas da parte posterior do atuador. Esta condição está provocando o surgimento de ondas espúrias na frente do gerador. Também a falta de um absorvedor na parte de trás do atuador limita o uso em amplitudes de ondas superiores as geradas nos ensaios realizados. Mesmo em baixas amplitudes, o efeito da reflexão e ressonância das ondas vindas detrás do atuador intensifica o fluxo pelas frestas. Ainda sobre o problema de reflexão, foi observada a pouca eficiência do absorvedor instalado na parede oposta ao gerador. Durante a fase do projeto houve a preocupação de não imprimir os ângulos adequados (pequeno) para não estender o comprimento do absorvedor sobre o tanque. A sugestão atual, após o término deste trabalho é que se estude a viabilidade de instalar um absorvedor do tipo progressivo ou o estudo de novos ângulos para o absorvedor atual. Esse estudo do absorvedor do tipo progressivo também pode ser utilizado para a implantação do absorvedor atrás do atuador, pois a literatura consultada (Chakrabarti, 1994) indica a sua instalação. Também sugere-se a diminuição das frestas laterais do atuador.

Outro procedimento adotado e que necessitaria de um estudo é o critério de acionamento do gerador. Neste trabalho, por conveniência técnica, adotou-se como posição inicial do atuador o seu ponto médio (posição nula da mesa), isto é o atuador na posição vertical. Essa posição não é conveniente sob o ponto de vista transitório inicial porque é o ponto de máxima velocidade e isto induz torque excessivo no início do movimento.

6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um procedimento para o projeto de um gerador de ondas do tipo placa basculante . Este procedimento foi adotado na implantação do sistema de geração de ondas no tanque 2 do Laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Para avaliar o procedimento de projeto bem como o desempenho real do sistema foram efetuadas uma série de medidas experimentais no tanque de provas.

Os resultados mostraram que o gerador projetado e instalado alcançou todos os requisitos de projeto estabelecidos.

Uma comparação entre as curvas teórica e experimental da função de transferência do gerador indicou claramente que a teoria de ondas de pequenas amplitudes é válida somente para declividades baixas. Isto foi constatado para a faixa de 0,5 a 1,7 Hz. Para frequências acima de 1,7 Hz não foi possível observar essa tendência por causa de ondas espúrias que interferiram na altura da onda gerada.

A análise crítica efetuada ao término do trabalho mostrou-se extremamente útil para verificar os limites dos procedimentos adotados.

Como recomendação sugere-se a implantação da geração de ondas irregulares por meio do gerador instalado e estudos para instalação de absorvedor de ondas ativo e de gerador de ondas segmentado para a geração de ondas multidirecionais.

O estudo efetuado mostrou-se proveitoso pois o conhecimento adquirido permite agora uma maior certeza na indicação de melhorias e otimização do equipamento atual bem como no auxílio em futuros projetos de equipamentos semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BHATTACHARYA, R. **Dynamics of marine vehicles**. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- CHAKRABARTI, S. K. **Offshore structure modeling**. New Jersey: World Scientific, 1994. (Advanced series on ocean engineering, v. 9)
- CONTI, M. B. de; SOUZA, G. F. M. de; SOUZA, C. A. G. F. de. Proposta de concepção de sistema de geração de ondas para instalações laboratoriais dedicadas ao estudo do comportamento de sistemas oceânicos. In: **Seminário de instrumentação do instituto brasileiro do petróleo**, 8, Rio de Janeiro, 1989.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 1991. (Advanced series on ocean engineering, v. 2)
- DIAS, C. A. N. **On wave generator's design: introductory theory and application**. Estudo Técnico nº 280/1981, Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo, Ministério da Marinha, 1981.
- LE MEHAUTE, B. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. New York: Springer-Verlag, 1976.
- MOOG Controls Limited. **Brushless servo motors G 400 series**. 1996.
- NOHARA, B. T. A survey of generations of ocean waves in a test basin. (em CD-Rom). In: **Brazilian congress of mechanical engineering**, 14. Bauru/SP: COBEM, 1997.
- RAHMAN, M. **Water waves: relating modern theory to advanced engineering practice**. Oxford: Clarendon Press, 1995.
- SOUZA, C. A. G. F. de; MARTINS, J. A. A.; MORISHTA, H. M.; ANDRADE, B. L. R.; BRINATI, H. L. Desenvolvimento e implantação de um tanque de ondas para ensaios oceânicos. (em CD-Rom). In: **Congresso nacional de transportes marítimos, construção naval e offshore**, 17. Rio de Janeiro: SOBENA, 1998.
- RUSSELL, F. et al. Forced small amplitude water waves: a comparison of theory and experiment. **J. of Fluid Mechanics**, v. 7, parte 1, p. 33-52, 1960.
- VEIGA, J. P. C. **Hidrodinâmica aplicada ao navio**. Apostila, São Paulo, EPUSP, 1979.

Outras Bibliografias Consultadas

- ARANHA, J. A. P. **Introdução à meteo – oceanografia**. Apostila, São Paulo, EPUSP, 1995.
- CONTI, M. B. de. **Cálculo de carregamento em plataformas semi-submersíveis submetidas a excitação de mar real**. 1983. 270 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, USP, São Paulo.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. **Experimental stress analysis**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. (Engineering mechanics series).
- DATTA, I.; MURRAY, J. Calibration of towing tank wavemaking system at the Institute for Marine Dynamics. **Proceedings of the 21th American Towing Tank Conference**. Washington D.C.: National Academy Press, 1986.
- ERDMAN, A. G.; SANDOR G. N. **Mechanism design: analysis and synthesis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. (2 v)
- FRANCO, A. S. **Análise linear de ondas – teoria e prática**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1984.
- KAPLAN, W. **Cálculo avançado**. São Paulo: Edgard Blücher & Universidade de São Paulo, 1972. (v. 1)
- KINSMAN, B. **Wind Waves**. New Jersey: Prentice-Hall, 1965.
- LATORRE, R. Conception of the University of New Orleans ship offshore university laboratory. **Proceedings of the 21th American Towing Tank Conference**. Washington D.C.: National Academy Press, 1986.
- MABIE, H. H.; REINHOLTZ, C. F. **Mechanisms and dynamics of machinery**. 4th ed. New York: John Wiley, 1986.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 2.ed. Rio de Janeiro: Prentice/Hall, 1990.
- SHIGLEY, J. E., **Cinemática dos mecanismos**. São Paulo: Edgard Blücher e Edusp, 1970.
- TAMAI, E. H. **Projeto básico de um batedor de ondas**. Trabalho de formatura. EPUSP, 1987.

APÊNDICE A

A1 – Preparação de uma instrumentação para a medida da força.

Para a obtenção experimental do valor da força de acionamento, pensou-se primeiro na possibilidade de instalar uma célula de carga (dinamômetro) em algum ponto da estrutura do gerador de ondas onde ocorresse a transferência total dessa força. O local ideal para a instalação de um célula de carga seria entre o sistema de acionamento e o atuador, ou seja na extremidade da haste de acionamento (braço de força, "link force"), descrita e mostrada na figura 3.7 do capítulo 3. Essa primeira opção não foi praticada pelo motivo de alteração na dimensão na geometria do mecanismo de acionamento. Assim a segunda opção foi a instrumentação com extensômetros elétricos no próprio braço de força. O posicionamento dessa instrumentação é mostrado na Figura A.1 e A.2.

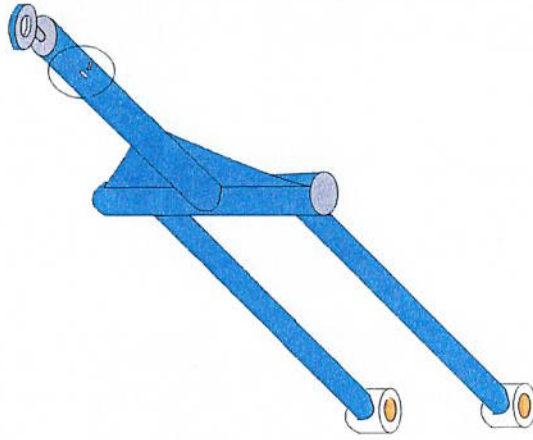


Figura A.1 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no braço de força



Figura A.2 - Detalhe dos extensômetros colados no braço de força

A1.1 – Análise da posição e configuração da instrumentação.

Para a obtenção de valores das Forças Axiais (tração e compressão, uma vez que o movimento a ser medido é cíclico), e ainda não detectar pela instalação, algum valor de deformação proveniente de flexão, foi adotada a configuração mostrada na Figura A.3.

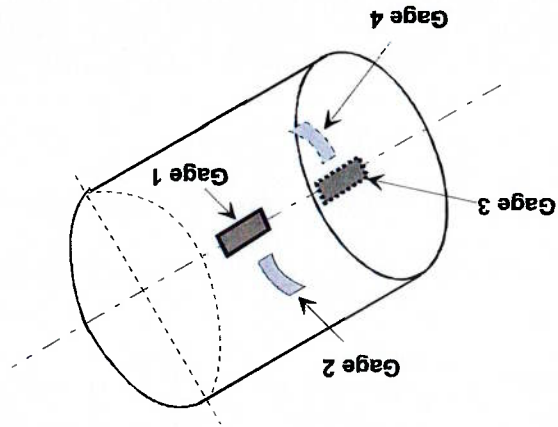


Figura A.3 - Configuração dos extensômetros da instrumentação

Os extensômetros longitudinais colados opostamente na linha neutra e também opostos na *ponte de Wheatstone* garantem uma medição das deformações devido as forças axiais e ainda anulam deformações causadas por possível flexão.

A posição para a instalação foi criteriosamente escolhida devido a sua proximidade à uma rótula e num segmento do eixo bastante curto. Esse critério foi para evitar a existência de um valor alto de deformação devido a flexão Além disso, tomou-se o cuidado de não montar o arranjo muito perto da extremidade, para não haver influência de concentração de tensões.

Os extensômetros transversais são colocados para completar a ponte, fornecendo maior sensibilidade na medida da deformação. Foram colocados opostamente, com a intenção de não somar na deformação total, uma componente devida a flexão, seja lateral ou vertical. Estes extensômetros (transversais), na presença de uma tração ou compressão do tubo instrumentado, detectam deformações devido ao efeito de Poisson. Vide configuração da ponte na figura A.4.

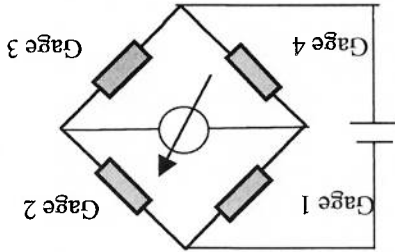


Figura A.4 - Configuração dos extensômetros na ponte de Wheatstone

A1.2 – Cálculo analítico da força através dos valores de deformação.

Como $\sigma = \varepsilon E$ e $\frac{F}{A} = \sigma$ temos que $F = \varepsilon(EA)$

Na qual:

σ = tensão (kgf/ cm²)

F = Força Atuante (kgf)

ε = Deformação (μ S)

E = Módulo de Elasticidade do material do tubo

(valor adotado para E = $2,1 \times 10^6$ kgf / cm²)

A = Área da seção do tubo instrumentado: → área de coroa circular

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad \text{onde} \quad D = \text{diâmetro externo} = 4,80 \text{ cm}$$

$$d = \text{diâmetro interno} = 4,14 \text{ cm}$$

$$A = 4,6342 \text{ cm}^2$$

Assim para uma força de 100 kgf a deformação no tubo é $\varepsilon = 10,28 \mu$ S.

Esse valor de deformação é para um único extensômetro longitudinal, mas para uma ponte completa (4 extensômetros colados e ligados entre si), deve-se somar os valores de deformação dos 4 extensômetros, sendo 2 medindo deformação longitudinal e 2 medindo deformação transversal, aos quais considera-se um coeficiente de Poisson = 0,3.

Para verificação da instalação dessa instrumentação e do valor calculado analiticamente, foi realizada uma calibração estática numa bancada de testes no Agrupamento Ferroviário da Divisão de Transportes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Esta bancada consiste em um pistão hidráulico, com o qual aplica-se

A1.3 – Calibração estática do braço de força.

$$\epsilon_p = 26,73 \mu\text{S}$$

$$\epsilon_p = 26 \cdot (10,28 \mu\text{S})$$

Então para uma força de 100 kgf a deformação a ser lida na ponte será de:

$$\nu = \text{coeficiente de Poisson (valor adotado } = 0,3)$$

ϵ_l = deformação longitudinal no tubo

Onde: ϵ_p = deformação lida na ponte

$$\epsilon_p = \epsilon_l - (-\nu \epsilon_l) + \epsilon_l - (-\nu \epsilon_l)$$

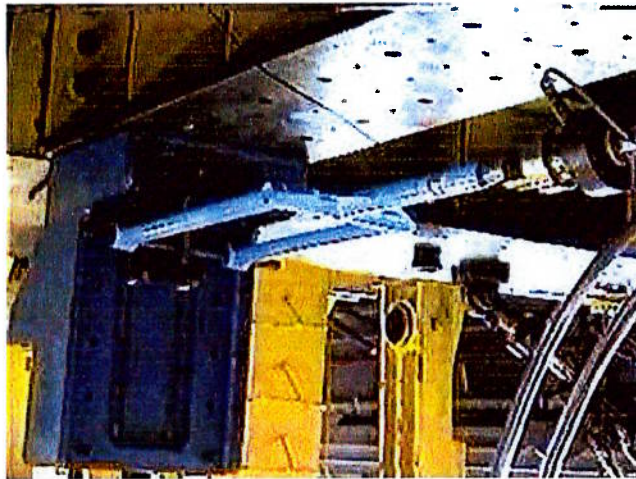
$$\epsilon_p = \epsilon_l (1 + \nu + 1 + \nu)$$

$$\epsilon_p = 26 \epsilon_l$$

Portanto:

Com uma célula de carga de capacidade até 5000 kgf e sensibilidade de 0,02% FE (do fundo de escala) acoplada junto ao pistão foram tomados os valores de deformação contra os valores obtidos na célula de carga da bancada. Os valores obtidos são mostrados na Tabelas A.1 e A.2. Nas Figuras A.6 e A.7 podem ser visto os gráficos, nos quais nota-se um bom resultado da calibração, tanto na linearidade como pela ausência de histerese.

Figura A.5 - Calibração da instrumentação do braço de força realizada na bancada de testes do IPT



carregamentos e descarregamentos em tração e compressão na peça a ser testada conforme ilustra a Figura A.5.

Tabela A.1 – Valores obtidos na calibração do braço de força. Carregamento em tração

CALIBRAÇÃO - TRACÃO		
Carga	Deformação	Deformação
Aplicada	carregamento	descarregamento
(kgf)	(u Strain)	(u Strain)
0	0	-2
50	13	11
100	26	
200	54	53
300	83	
400	110	109
500	137	
600	165	165
700	193	
800	219	219
900	246	
1000	274	274

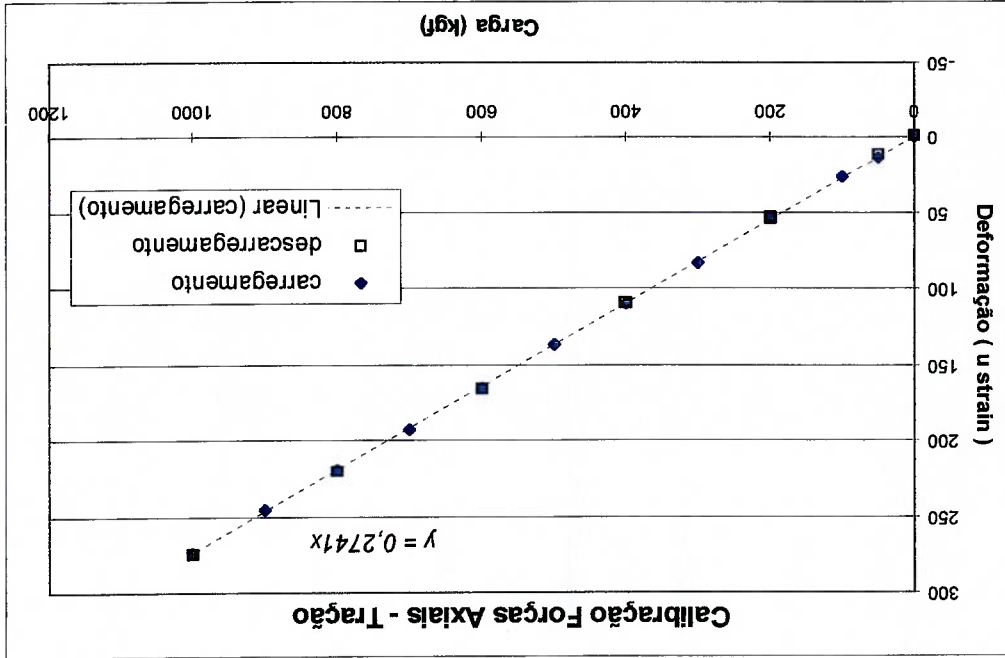
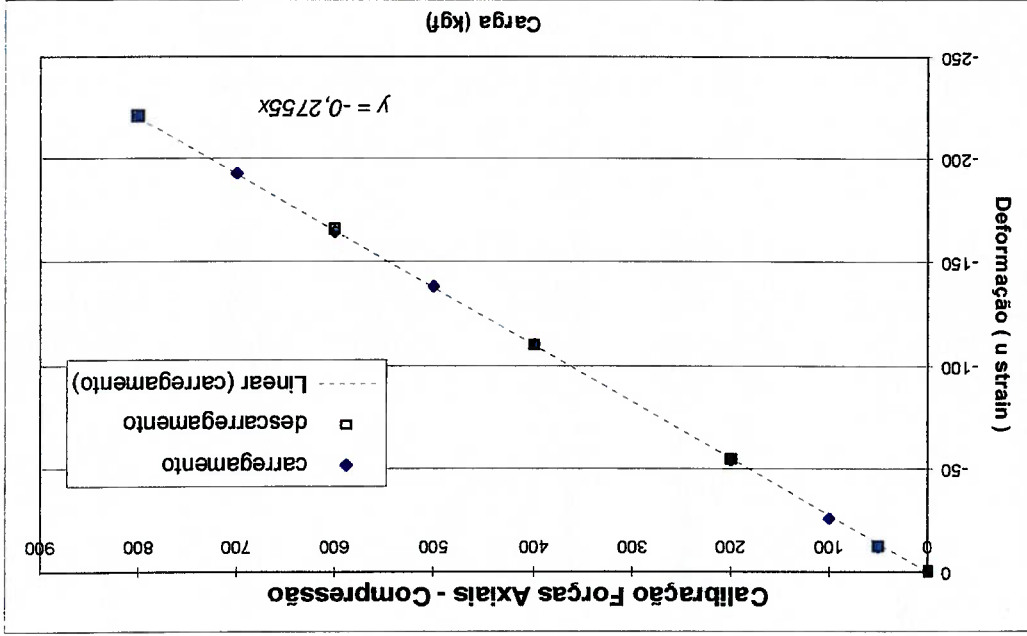


Figura A.6 – Valores obtidos na calibração do braço de força em tração.

Figura A.7 – Valores obtidos na calibração do braço de força em compressão.



CALIBRAÇÃO - COMPRESSÃO		
Carga	Deformação	
Aplicada	carregamento	
	descarregamento	
(kgf)	(u Strain)	
0	0	
50	-12	-13
100	-26	
200	-54	-55
400	-110	-110
500	-138	
600	-165	-166
700	-193	
800	-221	-221

Tabela A.2 – Valores obtidos na calibração do braço de força. Carregamento em compressão

A1.4 – Testes de flexão.

Foram realizados carregamentos radiais na extremidade do braço a ser utilizado com medidor de força axial, visando a verificação da imunidade da instalação contra a deformação proveniente da flexão. O arranjo experimental para esses testes pode ser visto nas Figuras A.8 e A.9.

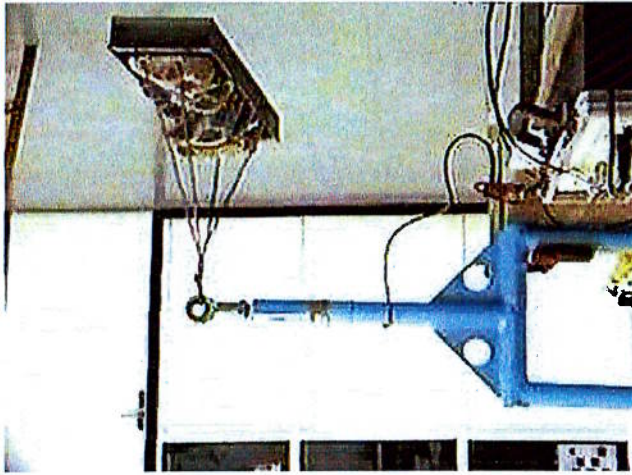


Figura A.8 - Carregamento simulando flexão horizontal no braço

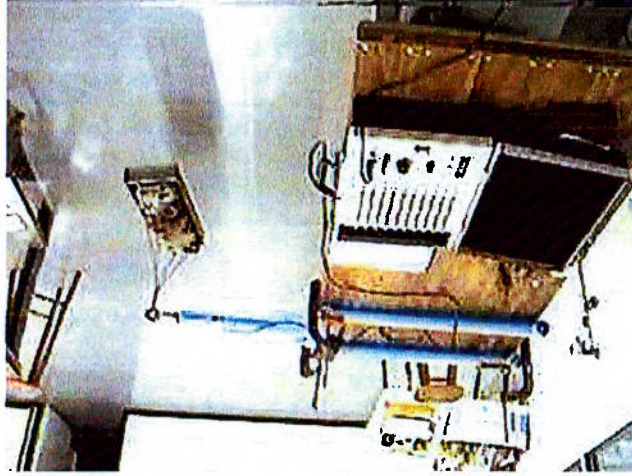


Figura A.9 - Carregamento simulando flexão vertical no braço

Pode-se observar que o resultado da calibração estática, tanto para tração, como para compressão está em consonância com os valores analíticos, mostrando que a instrumentação está correta, além de comprovar a validade da teoria e qualidade da instalação dos extensômetros. Nota-se também que o sistema está imune as deformações causadas por flexão.

Assim o braço instrumentado poderá ser utilizado sem qualquer restrição, para a determinação da força efetiva atuante no atuador do gerador de ondas.

4.1.2.5 – Análise e validação da instrumentação.

VERIFICAÇÃO SOB FLEXÃO		
Carga	Deformação	Deformação
Aplicada	flexão vertical	flexão horizontal
(kgf)	(μ Strain)	(μ Strain)
0	0	0
10	0	0
21	0	0
32	0	0
43	0	0
50,5	1	1

Tabela A.3 – Valores obtidos nos testes de flexão

Os resultados desses testes são mostrados na Tabela A.3.

APÊNDICE B

Equipamentos Utilizados nos Ensaios.

Os equipamentos utilizados no ensaio são listados a seguir, descritos juntamente com sua finalidade:

Ondômetro ("wave-probe")- Transdutor e condicionador de sinais projetado e confeccionado na DITT – IPT. Utilizado para a medida da altura da onda. O sinal de saída é analógico. O princípio de funcionamento é resistivo.

Potenciômetro – Transdutor da marca GEFTRAN ELETRONICA – Itália, modelo: LT-M-275-S. Condicionador e fonte MOOG. Utilizado para a medida de posição do atuador. Saída analógica em tensão CC .

Amplificador Condicionador Extensiométrico – KYOWA, modelo DPM-6K. Fornece alimentação em corrente contínua e condicionamento dinâmico de sinal para transdutores e instrumentações a base de extensômetros elétricos. Foi utilizado durante o ensaio para a medição da força de acionamento.

ERRATA

Na página 19 na linha 19 onde se lê “*e*” leia-se: “*ε*”.

Na página 20 na linha 12 onde se lê “*ou*” leia-se: “*o*”.

Na página 26 na linha 4 onde se lê “*deixa o ar passar*” leia-se: “*que deixa o ar passar*”.

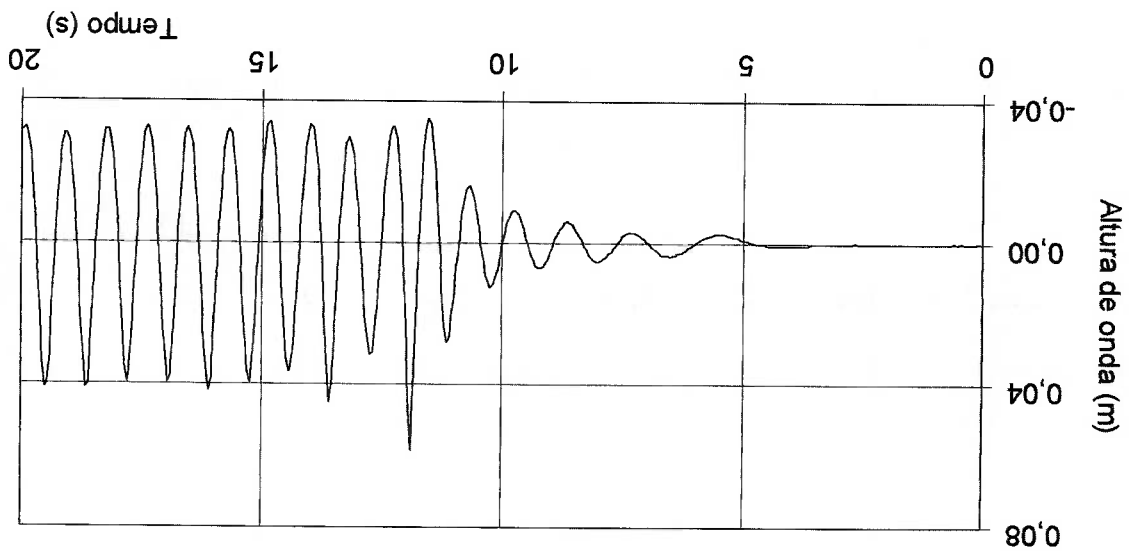
Na página 37 na linha 18 onde se lê “*atender aos sinais*” leia-se: “*atender aos sinais*”.

Na página 45 na linha 9 onde se lê “*tanque e lâmina*” leia-se: “*tanque e lâmina*”.

Na página 57 na linha 11 onde se lê “*realimentação e o*” leia-se: “*realimentação é o*”.

Na página 111 nas linhas 18 e 20 onde se lê “*força*” leia-se: “*força*”.

Na página 95, onde se vê o gráfico da figura 5.3, substitui-se pelo gráfico abaixo:



Na página A-1 (apêndice A) na linha 7 onde se lê “*figura 3.7*” leia-se: “*figura 3.6*”.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS
LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
RESUMO
“ABSTRACT”

1	1 - INTRODUÇÃO.....	1
1	1.1 - Considerações Gerais.....	1
3	1.2 - Revisão Bibliográfica.....	3
6	1.2.1 - Alguns principais tanques de ondas no mundo.....	6
8	1.2.2 - Outros modelos de tanques de ondas no mundo.....	8
10	1.2.3 - Tanques de ondas existentes no Brasil.....	10
12	1.3 - Objetivo do Trabalho.....	12
13	2 - ARRANJOS DE GERADORES DE ONDAS.....	13
13	2.1 - Principais Requisitos Hidrodinâmicos de Geradores de Ondas.....	13
15	2.2 - Tipos de Geradores de Ondas.....	15
18	2.3 - Tipos de Atuadores.....	18
19	2.3.1 - Atuador tipo placa basculante ("flap type").....	19
22	2.3.2 - Atuador tipo pistão ("piston type").....	22
23	2.3.3 - Atuador tipo cunha ("plunger type").....	23
25	2.3.4 - Atuador tipo pneumático.....	25
27	2.4 - Tipos de Sistemas de Acionamento.....	27
27	2.4.1 - Sistema de acionamento hidráulico.....	27
29	2.4.2 - Sistema de acionamento eletromecânico.....	29
30	2.5 - Sistemas de Controle.....	30
31	2.6 - Absorvedores de Ondas.....	31

Sistema de Aquisição de Dados - LYNX, composto por um módulo condicionador modelo AI2160 e módulo controlador modelo AC2120. Trata-se de placa de conversão analógico - digital, com resolução de 12 bits e 60 KHz de taxa máxima de amostragem. O segundo módulo realiza a tarefa de comunicação com o computador. Foi utilizado ainda um programa proprietário AQDADOS para a aquisição e armazenamento de dados, instalado num computador do tipo PC com processador Pentium 233MMX.

Gerador de Funções - Hewlett Packard, modelo 3312A, utilizado como gerador do sinal elétrico de referência para o sistema de controle do acionador do gerador de ondas. Também foi utilizado o modelo 3040 da CALTEC para a mesma finalidade.

Acelerômetros - KYOWA, modelo: AS - 2GA. Resistivo, uni-axial, com capacidade para +/- 2 G e resposta linear em frequência de no mínimo 60Hz. Foram utilizadas duas unidades para medida da aceleração do movimento atuador.

Ponte de Extensometria - SODMEX, modelo MDC - 10. Fornece alimentação em corrente contínua e condicionamento de sinal para instrumentação configurada de extensômetros elétricos. Foi utilizado durante a calibração do braço de força.