Paula Suemy dos Santos Michima

Estudo de um absorvedor de ondas ativo para tanque didático

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

Paula Suemy dos Santos Michima

Estudo de um absorvedor de ondas ativo para tanque didático

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

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. André Luis Condino
Fujarra

FICHA CATALOGRÁFICA

Michima, Paula Suemy dos Santos

**Estudo de um absorvedor de ondas ativo para um tanque didático / P.S.S. Michima. -- São Paulo, 2007.
109 p.**

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

1.Absorvedor de ondas ativo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Aos meus pais Toshiyuki Michima e Eliete Josefa dos Santos Michima (*in memoriam*), que dedicaram suas vidas a educar a mim e minha irmã e fizeram esta família de que e em que eu sempre terei orgulho e posso confiar.

À minha irmã Lilian Emy dos Santos Michima, com quem eu aprendi a importância da dedicação aos estudos, do esforço e a me auto-desafiar em conhecimento, no esporte e na vida.

Ao meu amado Marcelo Henrique Vidal Arruda, o brilho dos meus olhos e a minha vontade do “pra sempre”.

Agradecimentos

m r u z i s s t d d r t g d z c c (t m t H
 i a o a m i ó r e a o e i e e u a a e e r á
 n m s d p u a s s x n r s r l m n a
 h , e o e u d d m t a p t r d a t b u
 a s l r l i o. e c i o s d a. e e e a e
 e e e t u o o n e i e t s d l z
 u u â a e C o i h e m c s C a.) e a h e
 i n e o n o r o s a m ó t l u o s
 d e c m c a s g l a a p e s d
 a. s o a i l e o o s p u o r e n u e a e
 愛 t u p a e s m m r e g o o r t a d e m
 す a o i s n e g e i o. b m u i a
 事 e i g t a a ç u m m r g i r p e d g
 で p u o u o o e ó e m a u t a e a ê u
 強 a e e r r u r i a e e s s ç m e
 く r n d e i d a i r p s c g ã i
 なる t t e t c a d e p a a e i n o g u o c e
 e u ê o l a s r s r é e ã u. u i o s
 事 a t m n i t e p m n o e s d g
 。 t l o h d d e n d e i n t d a. o n u
 本 ã m d a e a e d o s t e í h e t ã e
 当 o e o c d c i s s o s f á a m e o c
 に n s a e e c u o t i c l a s e
 ど i t j r a r o o a i a c p e s t i m
 う n e g u f d s u u n a o r e u m o
 も t u d a a a o t g s ú r t s t d p s
 e e e a. r a r u e n u a c o a l
 あ n n g i p d d o e r i m g o d n i g
 り s u a a r a e e g s i c u f l a t e u
 が a o o a s u a r a d e o h s e a e
 と l a n p s m i 7 n i r a
 う d u m m d o o e r O c u p u f m a a s u
 ! a e e i e s a. s i % o m á ã a a. a s o o m

À minha família, aos professores André Luis Condino Fajarra e Kazuo Nishimoto que muito me ajudaram não só em questões envolvendo o mestrado e por quem guardo muito carinho e consideração.

Professores Doutores Tochi-ichi Tachibana, Moysés Sjanbok, Tsugukiyo Hirayama (YNU), Hélio Mitic Morishita, aos demais amigos do PNV - em especial Carlinhos, João Alcino, Marley e Lânia, aos amigos do TPN e IPT, principalmente ao querido engenheiro Dr. Carlos Daher Padovezi, à Aninha, Célia, Luíses e Zé Carlos.

Dedico este trabalho também com muito carinho a todos os meus amigos, entre eles o Henrique RPG, Lilian Yamamoto, Rogério Yugo Takimoto, Márcio Michiharu, Lázaro Moratelli Jr., Pedro Henrique Ribeiro Ferreira, Kelly Takano, André Kogishi, Bresslau, Léo Fecchio, Antônio Russo, Diandra Ancheta, Leandro Augusto Soares, Pedro Camargo, Denis Taniguchi, Kim Seung Hyun (Kimuchan), Carlos Diego, Carlos Monteiro, Raquel, Gabriel Winckler, Vinicius Coutinho, João Ovídio, Miguelito, colegas do Hirayama Lab da *Yokohama National University*, em especial Asuka Kosaki, à Sra. Iyoko Kuribayashi, Lela Nur, Claus Aranha, Ricardo

Finalmente, meus sinceros agradecimentos pela generosa colaboração das instituições sem as quais não seria possível a obtenção do equipamento para os ensaios: Agência Nacional do Petróleo, MOOG do Brasil Controles LTDA.

Muito, muito obrigada. Mesmo.

Resumo

Este projeto trata do estudo para implementação de um sistema de absorção/geração de ondas no Tanque de Provas Didático I do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo (PNV-EPUSP). As instalações já existentes incluem o tanque de provas, sensores de ondas resistivos e batedor de ondas do tipo cunha. Para a parte física do absorvedor, o sistema do servomotor foi disponibilizado pela MOOG do Brasil Controles Ltda. Dado que as propriedades desses equipamentos foram pré-definidas, os demais componentes foram escolhidos e projetados de acordo com esses parâmetros, levando-se em conta a compatibilidade com as características das instalações e a factibilidade de se adaptar e modificar os componentes para a realização de futuros ensaios com diferentes tipos de ondas. Tais componentes foram construídos com o suporte financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP). O dimensionamento da placa basculante e a geometria do suporte do pistão são apresentados, bem como as caracterizações de cada item das instalações já existentes e do novo batedor de ondas destinado à absorção. Um algoritmo preliminar de controle é proposto e testado. Como houve a impossibilidade de se encaminhar o teste empírico do controlador no tanque do PNV, este foi executado na Yokohama National University (YNU, Japão). Os resultados numéricos mostram um bom desempenho do algoritmo, porém na implementação deste em equipamento físico, a análise dos testes mostrou que algumas melhorias devem ser realizadas para utilizações futuras.

Abstract

This project presents the study for implementation of an absorbing/generating system in the Didactic Wave Tank I of the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering of the Escola Politécnica of University of São Paulo (PNV-EPUSP). The available facilities at the wave tank were resistance type sensors and a plunger-type wave maker. As the absorber's hardware, a servomotor system was applied, which was lent by MOOG do Brasil Controles Ltda., and the further components were designed and constructed with the financial support of the National Petroleum Agency (ANP). Since that equipment's properties were predefined, the constructed components' geometry was decided concerning to the compatibility with the mentioned facilities. Also some attention was addressed to the requirement of being easily adaptive to modifications for later different kinds of wave experiments. The design steps of the new actuator and the description of the piston's support are shown, as well as the characterization of each item of the available facilities and new wave maker designated to be the absorber. A preliminary control algorithm is also proposed and tested. Since there was an impossibility of carrying out the controller's empirical tests in the tank of PNV, they took place in the Yokohama National University (YNU, Japan). The numerical results showed a good performance of the algorithm, however in the empirical tests' analysis, some improvements were found necessary for future implementations.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de símbolos

Convenções

I Prefácio

1	Introdução	16
1.1	Organização	16
1.2	Apresentação do Problema	17
1.3	O uso de tanques de provas na engenharia	18

II Fundamentos teóricos **24**

2	Embasamento da pesquisa	25
2.1	Contexto da pesquisa	25
2.2	Revisão Bibliográfica	25
3	Modelo matemático	31
3.1	Hipóteses adotadas	31

III Sobre a pesquisa **33**

4	Justificativas	34
4.1	Motivação	34

4.2	Objetivo	34
5	Sobre a execução da pesquisa	36
5.1	Encaminhamento do trabalho	36
IV	Projeto e construção do absorvedor	39
6	Instalações e equipamentos	40
6.1	Tanque de Provas Didático	40
6.2	Caracterização dos equipamentos existentes	42
6.2.1	Batedor tipo cunha	42
6.2.2	Praia passiva	43
6.2.3	Sensores	44
6.3	Equipamento disponibilizado pela MOOG: servomotor	45
6.4	Premissas para o projeto do absorvedor ativo com base no servomotor	47
7	Absorvedor ativo - parte física	48
7.1	Projeto do absorvedor	48
7.1.1	Tipo de baterdor	48
7.1.2	Função de transferência da placa basculante	50
7.1.3	Dimensionamento	53
7.1.4	Equipamentos de fixação	59
7.2	Caracterização do absorvedor	60
V	Concepção e implementação do controle do absorvedor	64
8	Projeto	65
8.1	Interpretação do problema proposto	65
8.2	Algoritmo de controle	67

9	Testes e avaliação	74
9.1	Simulações	74
9.2	Experimentos	78
9.3	Análise dos resultados	82
VI	Finalização	84
10	Conclusão da pesquisa e comentários	85
10.1	Conclusão	85
10.2	Comentários e sugestões para trabalhos futuros	87
VII	Anexos	90
Anexo A	– Séries temporais: caracterização da cunha	91
Anexo B	– Séries temporais: caracterização da praia passiva	93
Anexo C	– Séries temporais: caracterização da placa basculante	96
Anexo D	– Suporte do servomotor da praia ativa	98
Anexo E	– Método dos mínimos quadrados	100
VIII	Referências bibliográficas	104
Referências		105
IX	Apêndices	108
Apêndice A	– Ortogonalidade das funções	109
Apêndice B	– Integrais do coeficiente A_p	112

Lista de Figuras

1.1	Cascos em escala reduzida de Froude e Chelston Cross Tank . . .	20
2.1	Defasagem entre as ondas em ambas as faces do atuador	29
6.1	Medidas reais do tanque de ondas - longitudinal	41
6.2	Medidas reais do tanque de ondas - transversal	41
6.3	Arranjo experimental: ensaio de eficiência da cunha	42
6.4	Resposta em frequência - cunha	42
6.5	Etapas do ensaio de reflexão com praia passiva	43
6.6	Índice de reflexão em função da frequência	44
6.7	Sensor capacitivo utilizado nos ensaios	44
6.8	Curva de calibração do sensor capacitivo	45
7.1	Tipos de atuadores	48
7.2	Ilustração dos significados das variáveis	50
7.3	Função de transferência na linha d'água com δh variante	54
7.4	Curso máximo do servo sistema e diferentes alturas de articulação, 1	55
7.5	Curso máximo do servo sistema e diferentes alturas de articulação, 2	56
7.6	Curso máximo do servo sistema e diferentes alturas de articulação, 3	56
7.7	Curso máximo do servo sistema e diferentes alturas de articulação, 4	57
7.8	Maquete do tanque com placa instalada em três posições	57
7.9	Corte longitudinal do tanque com o absorvedor de ondas	59
7.10	Arranjo experimental: eficiência da placa basculante	60
7.11	<i>Stroke</i> da cunha e da placa basculante	61
7.12	Cálculo de conversão do <i>stroke</i> da placa basculante.	62
7.13	Resposta em frequência - placa basculante	63

8.1	Etapas da geração e absorção de ondas	67
8.2	Ilustração do processo idealizado do controle	68
8.3	Diagrama ilustrativo - linearização do sinal	68
8.4	Efeitos do comprimento do trecho da série temporal	69
8.5	Esquema do processo implementado no domínio da frequência. . .	70
8.6	Método dos mínimos quadrados	71
8.7	Fluxograma do algoritmo de controle	73
9.1	Simulações numéricas da absorção, 0,5 e 0,8Hz	75
9.2	Simulações numéricas da absorção, 1,0 e 1,4Hz	76
9.3	Simulações numéricas da absorção, 1,6 e 2,0Hz	77
9.4	Séries temporais: teste empírico do algoritmo, 1,4Hz, altura 6,0cm	81
9.5	Séries temporais: teste empírico do algoritmo, 1,0Hz, altura 3,5cm	81
9.6	Séries temporais: simul. realimentação de sinal, 1,4Hz, alt. 6,0cm	83
9.7	Séries temporais: simul. realimentação de sinal, 1,0Hz, alt. 3,5cm	83
10.1	Relação entre a celeridade da onda e sua frequência	88
A.1	Séries temporais: batedor tipo cunha, 0,5Hz e 0,8Hz	92
A.2	Séries temporais: batedor tipo cunha, 1,6Hz e 2,0Hz	92
B.1	Séries temporais: índice de reflexão (praia passiva) 0,8Hz e 1,2Hz	94
B.2	Séries temporais: índice de reflexão (praia passiva) 1,6Hz e 2,0Hz	95
C.1	Séries temporais: batedor tipo placa basculante, 0,5Hz e 0,8Hz .	97
C.2	Séries temporais: batedor tipo placa basculante, 1,6Hz e 2,0Hz .	97
D.2	Suporte do absorvedor: lateral com sapatas e suporte do pistão .	98
D.3	Suporte do absorvedor: detalhe da fixação na parede	99

Lista de símbolos

símbolo	descrição	página
P_{atm}	pressão do ar	31
v	velocidade de escoamento	31
Φ	potencial de velocidades	31
A_p	amplitude das ondas progressivas	31
C_n	amplitude das ondas evanescentes	31
z	ordenada do tanque de que se quer obter informações	32
x	abscissa do tanque de que se quer obter informações	32
k_p	número de onda das ondas progressivas	32
k_s	número de onda das ondas evanescentes	32
h	espessura da lâmina d'água	32
ω	velocidade angular da onda	32
k	número de onda	32
g	aceleração da gravidade	32
λ	comprimento de onda	32
$s(z)$	deslocamento horizontal da placa basculante executado pelos pontos de altura z do tanque em torno de $x = 0$	50
S	valor máximo de $s(z)$, na linha d'água (<i>stroke</i> , ou <i>curso</i>)	50
$\delta h, dh$	distância vertical entre o fundo do tanque e o ponto de pivotamento da placa basculante	50
H	altura das ondas progressivas	32
η	perfil da linha d'água longe da placa basculante	52
D	curso horizontal no topo da placa basculante	53
$R_1(t)$	distância da articulação ao ponto de pivotamento do pistão	61
R_2	distância da articulação ao ponto de pivotamento da placa basculante	61
(x_1, z_1)	coordenadas do ponto de pivotamento do pistão	62
(x_2, z_2)	coordenadas do ponto de pivotamento da placa basculante	62

continua...

símbolo	descrição	página
(x_i, z_i)	coordenadas iniciais da articulação do pistão com a placa basculante	61
(x_f, z_f)	coordenadas finais da articulação do pistão com a placa basculante	61
ϵ	pequeno incremento em frequência	67
pt	número de pontos	72
F_s	frequência de aquisição	31
c	celeridade da onda	74

Convenções

Na descrição dos eventos e dos equipamentos, as seguintes convenções foram utilizadas:

- Batedor de ondas é o conjunto completo de peças que compõem o dispositivo físico responsável por produzir ondas;
- Gerador de ondas é o batedor quando assume o papel de produzir as ondas do início do ensaio, ou seja, aquelas que se propagam ao longo do tanque quando a superfície da água ainda se encontra parada;
- Absorvedor de ondas é o batedor quando assume o papel de absorver as ondas produzidas pelo gerador;
- Atuador é a parte do batedor que entra em contato direto com a água e cujo movimento oscilatório causa a formação das ondas;
- Onda gerada é a perturbação produzida pelo gerador de ondas, que se propaga ao longo do tanque no sentido gerador - sensor. Em ensaios com modelos é a chamada onda incidente;
- Onda refletida é a perturbação que, quando era onda gerada, atingiu a parede do tanque ou o modelo ensaiado e passou a se propagar no sentido oposto;
- Onda incidente secundária é a porção da onda refletida que atinge o absorvedor e não é absorvida, tornando assim a se propagar no sentido da onda gerada.

Parte I

Prefácio

1 Introdução

1.1 Organização

Esta dissertação contém nove partes. A primeira, é o *Prefácio*, onde a introdução do tema do trabalho é feita, juntamente com um breve histórico do uso de tanques de provas na engenharia. A segunda parte contém os *Fundamentos teóricos* nos quais a pesquisa foi baseada, em que são apresentados os modelos teóricos utilizados, uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados ao tema e que contribuíram para o embasamento ou motivação da presente pesquisa é feita, e as hipóteses simplificadoras adotadas para os modelos matemáticos envolvidos nos cálculos são destacadas.

Na parte *Sobre a pesquisa* encontram-se as justificativas para a aplicação deste projeto ao problema apresentado, ou seja, a motivação da autora ao escolher os descritos objetivos da pesquisa e a forma como o trabalho foi encaminhado. Em seguida, há a parte dos detalhes do *Projeto e construção do absorvedor*. Nessa parte, são apresentadas as caracterizações dos equipamentos já existentes no tanque, cujas propriedades devem ser conhecidas para uma definição mais precisa do problema proposto. Também são conteúdo dessa parte os dados sobre o equipamento disponibilizado pela MOOG do Brasil Controles Ltda., as premissas assumidas onde ficam definidas as condições de contorno do problema e o projeto do equipamento para absorção ativa de ondas; é feita uma revisão dos tipos de geradores de ondas mais comuns existentes, suas vantagens e desvantagens e apresenta-se a justificativa da escolha do batedor tipo placa basculante (*flap*) para o absorvedor ativo. As escolhas de posições e tamanhos dos componentes do absorvedor, bem como a sua caracterização posterior finalizam esta parte.

A parte da *Concepção e implementação do controle do absorvedor* apresenta os processos de definição do problema proposto com a descrição do problema no que diz respeito à parte de controle da atuação, escolha do algoritmo de controle e testes do mesmo através de simulação computacional e teste empírico. Consta nesta parte também a análise comparativa dos resultados desses testes.

As conclusões obtidas com esta pesquisa, comentários sobre as dificuldades e falhas encontradas e as sugestões de pesquisas e correções que podem ser feitas em trabalhos futuros estão na parte da *Finalização*. As três últimas partes, *Anexos*, *Referências* e *Apêndices* contêm, respectivamente, complementos que esclarecem mais detalhadamente o conteúdo do texto da dissertação que a eles se referenciam: ilustrações e gráficos de séries temporais, as obras consultadas durante a realização da pesquisa e finalmente explicações e ilustrações pertinentes ao tema cuja consulta não é essencial à compreensão da obra.

1.2 Apresentação do Problema

A tecnologia brasileira de exploração de petróleo vem ultrapassando barreiras a cada nova descoberta de campos em águas sempre mais profundas. Para a manutenção de uma condição em pesquisa de ponta, é necessário o contínuo aprimoramento e a busca por cálculos e modelos de resposta à excitação de ondas de unidades flutuantes mais confiáveis.

As aplicações tecnológicas oceânicas têm exigido a simulação de problemas, em geral não lineares, buscando integrar os vários fenômenos oriundos da atuação simultânea dos agentes ambientais como ondas, ventos e correntezas sob pontos de vista: teóricos e empírico.

Nas simulações empíricas, o estudo desses problemas não lineares depende de um intervalo consideravelmente grande de tempo para coleta de dados. Na maioria dos tanques de provas, a duração dessa coleta de dados é prejudicada por problemas de reflexão das ondas, que acabam retornando em direção aos modelos ensaiados.

Interferências originadas na reflexão nas paredes do tanque prejudicam a geração contínua das ondas e, além disso, ao atingirem novamente a região de coleta de dados, invalidam os resultados coletados durante o ensaio a partir de então.

As soluções utilizadas atualmente para atenuar o problema da reflexão são os dispositivos chamados de absorvedores de ondas (ou *praias*), basicamente classificados em dois tipos: passivos e ativos.

Os formatos e posições das praias passivas são diferentes para cada tanque de provas. Tais dispositivos dissipam a energia das ondas incidentes. Com essa dissipação, as componentes de uma determinada banda de frequência são eliminadas e retornam para a área de coleta de dados apenas as parcelas de frequências muito

mais altas ou muito mais baixas do que as da faixa do experimento, tornando-se mais fácil a correção posterior dessa influência no tratamento de dados.

Mais eficaz do que o emprego de praias passivas, a alternativa de absorção ativa de ondas constitui-se de batedores posicionados na extremidade do tanque oposta à dos geradores. Nesses absorvedores, são formadas ondas em antifase com relação às ondas neles incidentes e desta forma se obtém uma interferência destrutiva.

Grande parte dos ensaios hoje realizados no tanque de provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PNV - EPUSP) é voltada a medições preliminares de fenômenos observados em sistemas flutuantes. O estudo desses fenômenos requer coleta de dados com qualidade progressivamente melhor.

Para essa melhoria sugere-se a utilização de intervalos de tempo de aquisição maiores do que aqueles que os atuais equipamentos do tanque permitem, devido ao problema de baixa eficiência da praia passiva na absorção de ondas.

Desta forma, propõe-se neste trabalho o estudo para a implementação de uma praia ativa no Tanque de Provas Didático I (TPD I) do PNV.

1.3 O uso de tanques de provas na engenharia

A construção de uma embarcação é algo que envolve muita responsabilidade devido à questão da segurança e ao seu desempenho na realização das tarefas para as quais ela foi projetada.

No desenvolvimento do projeto, há muitos fatores ligados ao ambiente em que a embarcação deve operar. Tais fatores devem ser levados em conta, porém uma previsão confiável do comportamento da embarcação sob condições naturais combinadas é difícil de se fazer com base apenas na teoria. Nesses casos, é necessária uma validação experimental, feita geralmente com réplicas de tamanho reduzido em ambientes que se assemelham em alguns aspectos às características naturais do ambiente de operação (com ondas, vento e/ou correnteza).

O avanço nas pesquisas, o desenvolvimento de teorias e a criação de equipamentos que permitam descrever e simular situações mais complexas e próximas da realidade se dá ora a passos largos, ora a passos curtos, dependendo quase sempre dos interesses comerciais e do surgimento da necessidade de predição de riscos de acidentes para a garantia da segurança.

Instalações ideais para o teste de modelos deveriam possibilitar a simulação do ambiente completo no qual as embarcações e outros sistemas marítimos operam, com ondas regulares e irregulares, ambas em águas profundas e intermediárias, ventos, formações de gelo, correntes, características do solo submarino e até terremotos submarinos.

O estado da arte da tecnologia e a indisponibilidade de recursos em cada época acabam, entretanto, sendo o limite no qual a simulação de todos esses fenômenos juntos (isto é, simultaneamente atuantes como ocorre na natureza) se esbarra, fazendo com que o desenvolvimento de dispositivos se dê de forma quase sempre lentamente progressiva ao longo dos anos.

Esta seção apresenta um breve histórico desse desenvolvimento no que se refere aos tanques de provas.

Os primeiros estudiosos dedicaram suas pesquisas ao problema de resistência ao avanço das embarcações em águas calmas. Um registro desse tipo de pesquisa são os manuscritos de Leonardo da Vinci (1452 - 1519), que testava o efeito da variação da distribuição longitudinal de pesos no desempenho do navio.

O primeiro engenheiro a realizar testes com modelos em escala reduzida foi o inglês John Smeaton (1724 - 1792), contemporâneo de Benjamin Franklin (1706 - 1790). Franklin construiu o primeiro tanque de reboque para investigar sua observação nos canais da Holanda, a respeito de que os barcos andam mais devagar em profundidades menores. Seu tanque de provas era um canal estreito, construído com madeira, e o modelo era rebocado através de um fio passante por uma polia, conectado em sua extremidade com um peso em queda.

William Froude (1810 - 1879) fazia experimentos de resistência ao avanço com modelos de embarcações em escala reduzida no rio Dart, e mais tarde promoveu com o patrocínio da marinha britânica a construção de um canal experimental no terreno de sua casa em Torquay - Inglaterra, em 1871. Esse canal tinha um carro de reboque e suas dimensões eram: 84,79m de comprimento por 10,98m de largura e 3,05m de profundidade (D'ARCANGELO, 1978). As fotos da figura 1.1 ilustram os modelos em escala reduzida e o tanque.

Em parceria com seu filho Robert Edmund Froude (1846 - 1924), William Froude conseguiu desenvolver um procedimento de teste dos cascos que teve uma importância significativa na redução de perda de vidas no mar devida a falhas de desenho no projeto dos cascos. Mais tarde, o país teve um enorme crescimento no programa de construção naval.

Figura 1.1: Modelos de cascos em escala reduzida das embarcações Swam (topo) e Raven. Respectivamente de 3, 6 e 12 pés, feitos por Froude e usados nos ensaios de reboque (esq.). Chelston Cross Tank (Torquay, por volta de 1871) (dir.). retiradas de *en.wikipedia.org* e *btinternet.com*.

Depois da morte de seu pai, R. E. Froude recebeu pedidos de vários países para que desse suporte na construção de outros canais. Na Itália foi construído um tanque em Spezia, bem como em São Petersburgo, na Rússia, entre outros. Esses tanques, em geral, tinham seção retangular com proporções aproximadas $l \times b \times h$ de $10 \times 1 \times 0,5$.

Aproximadamente no final do século XIX, com a introdução da propulsão baseada em turbinas a vapor, e a troca das pás rotativas pelos hélices, as embarcações começaram a apresentar problemas sérios de cavitação. Em 1894, Sir Charles Parsons (1854 - 1931), na Grã-Bretanha, construiu o primeiro túnel de cavitação para testar modelos de hélices, já que no tanque de reboque, onde a superfície da água está na pressão atmosférica, não é possível simular as condições de trabalho do hélice da embarcação (a carga piezométrica não pode ser reduzida apropriadamente).

Na década de 1950 foi intensificado o estudo do comportamento marítimo de embarcações. Manley St. Denis (1910 - 2003) e Willard James Pierson (1922 - 2003) formalizaram o conceito de superposição linear de ondas em 1953 (DENIS; PIERSON, 1953), introduzindo a função de densidade espectral como uma ferramenta para descrever o comportamento dinâmico de embarcações no mar, validando tal método experimentalmente.

A aplicação da superposição linear havia revolucionado os estudos de comportamento no mar, mas requeria muitos ensaios para caracterizar adequadamente a resposta do modelo de embarcação. Para economizar tempo e número de ensaios, foi introduzido o uso de ondas irregulares que, bem como o ensaio de ondas regulares, demonstrava a validade da superposição linear para a arfagem (*heave*) e caturro (*pitch*).

Os ensaios em ondas regulares fornecem um meio qualitativo de comparar modelos diferentes com respeito a movimentos, acelerações, alagamentos, *slamming*¹, etc. O desenvolvimento de procedimentos analíticos sofisticados para o estudo do comportamento do navio fez com que as técnicas de ensaios em tanques evoluíssem para capacidades muito acima de seus propósitos originais.

Ocorreram mudanças tanto na aplicação das ondas, quanto na geometria dos tanques. Vários canais hidrodinâmicos para ensaios de resistência foram equipados com geradores de ondas. Iniciaram-se os estudos e projetos de canais próprios para a geração das ondas na escala condizente com aquelas encontradas no mar, pois concluiu-se que muitos dos já existentes, usados para reboque em águas calmas, não tinham as proporções adequadas para gerar as ondas sem que estas sofressem demasiada deformação (devida à reflexão nas paredes laterais, entre outros efeitos).

Os canais passaram a ter espelhos d'água cujas proporções das medidas das superfícies se aproximavam mais com quadrados ao invés dos retângulos dos tanques anteriores, o que permitiria a realização de testes com ondas oblíquas bem como estudos básicos de guinada (*yaw*), jogo (*roll*) e deriva (*sway*).

Nos últimos anos da década de 1950, a exploração dos recursos marítimos fora da zona costeira passou a ter uma importância muito grande, especialmente em função da exploração das reservas petrolíferas na plataforma continental. Os estudos realizados nesta área aumentaram a necessidade de confirmação experimental da teoria com precisões maiores, levando-se em conta correnteza e profundidades muito maiores do que as utilizadas anteriormente.

As novas proporções dos tanques para ensaios de comportamento marítimo permitiram também realizar ensaios de manobrabilidade. À medida em que as embarcações construídas se tornavam maiores, e que o tráfego de algumas rotas marítimas ficava congestionado, a importância dos ensaios de manobrabilidade cresceu de forma significativa.

No final da década de 1960 e começo da década de 1970, foram construídos tanques projetados para aplicação em ensaios de manobra e comportamento no mar. A geração de ondas realísticas em tanques de reboque continuou sendo de importância fundamental para as validações experimentais do desempenho dos navios em operação no mar.

---

¹*slamming*: fenômeno em que o navio se choca bruscamente com a superfície d'água após um erguimento exagerado de sua proa causado por uma posição de *trim* durante o caturro em ondas de grandes alturas e comprimento da ordem de grandeza do comprimento do casco.

Até 1986, havia um grande número de instalações com geradores de ondas de crista baixa com um espectro direcional específico, mas estes eram geralmente usados para ensaios de estruturas fixas ou ancoradas, e o espectro era necessário apenas em um ponto fixo do tanque. Uma análise dos tanques foi apresentada por Burcharth *et al.* (BURCHARTH; NIELSEN; SCHAARUP-JENS, 1986) avaliando o tamanho e a qualidade da área de testes no tanque em função do comprimento de onda e dos efeitos de escala.

No Canadá foram feitas instalações destinadas ao ensaio tanto de modelos parados quanto de modelos em movimento (MURRAY; FUDGE, 1989). Iniciam-se então os estudos para possibilitar a realização de ensaios de ondas com um espectro direcional específico e um protótipo de navio se movendo a uma velocidade constante, como detalhado por Miles (MILES, 1989), incluindo os efeitos das ondas evanescentes próximas dos geradores de onda, difrações próximas às extremidades do gerador, e requisitos para a aceleração e desaceleração do modelo.

A reflexão de ondas, antes apenas levada em conta passivamente como um fator limitante na escolha da duração dos ensaios e no tratamento de dados (como uma interferência a ser descontada), passou a ser estudada com o objetivo de a eliminar ativamente ou dela se tirar proveito.

Em 1988, Takezawa *et al.* (TAKEZAWA *et al.*, 1988) descreveram um método de geração de ondas oblíquas com um batedor segmentado em um extremo do tanque estreito convencional, utilizando-se da reflexão das ondas oblíquas em suas paredes.

Vários métodos para melhorar a geração de ondas regulares oblíquas com o aproveitamento das reflexões nas paredes também foram apresentadas por Funke & Miles (FUNKE; MILES, 1987), Gilbert & Huntington (GILBERT; HUNTINGTON, 1991), Benoit (BENOIT, 1995), Hirayama (HIRAYAMA, 1997), Marón (MARÓN, 1999), e Boudet & Perois (BOUDET; PEROIS, 2001).

Bullock e Murton (BULLOCK; MURTON, 1989) descreveram a absorção de ondas feita com um batedor, onde os sinais medidos com os sensores realimentariam o controle do gerador de ondas para eliminar a nova reflexão das ondas que retornavam do protótipo testado. Resultados de estudos e implementações de modelos similares nesse contexto também foram publicados por Naito *et al.* (NAITO *et al.*, 1998)(NAITO *et al.*, 1999) e Schäffer & Klopman (SHÄFFER; KLOPMAN, 2000).

Alguns dos trabalhos realizados durante esse tempo, que são importantes para o embasamento teórico ou têm uma relação próxima com este trabalho são

expostos mais adiante na revisão bibliográfica.

Parte II

Fundamentos teóricos

2 Embasamento da pesquisa

2.1 Contexto da pesquisa

Atualmente já existem sistemas implementados de geradores / absorvedores de ondas ativos, como o *Advanced Multiple Organized Experimental BASin*, AMOEBA de Osaka - Japão (NAITO, 2006) e o *Deep Sea Basin* do *National Maritime Research Institute*, NMRI em Tóquio - Japão (MAEDA et al., 2004), por exemplo, cada um deles baseado em uma forma diferente de tratar o problema de predição e absorção da onda.

O intuito deste estudo não é reproduzir esses métodos, mas sim, inspirando-se nesses exemplos, criar um modelo distinto desenvolvido dentro da Escola e que possa ser futuramente implementado no Tanque de Provas Didático I do PNV.

Como todo projeto inicial de engenharia, ele é uma proposição simples destinada a um estudo inicial (o primeiro ciclo da espiral de projeto), sobre o qual futuros aprimoramentos poderão ser realizados.

Sendo assim, são apresentadas a seguir algumas revisões comentadas de trabalhos anteriores em que esta pesquisa foi baseada, bem como as hipóteses assumidas para os cálculos feitos.

2.2 Revisão Bibliográfica

A teoria de ondas lineares é bastante utilizada no estudo da geração e absorção de ondas em tanques de prova com diversas finalidades, entre elas a validação da própria teoria, a pesquisa e a avaliação das características do tanque.

Muitos experimentos já foram desenvolvidos no sentido de verificar a validade dessa teoria, principalmente no que diz respeito a trens de ondas regulares ou às frequências.

Havelock (HAVELOCK, 1929) calculou, assumindo as hipóteses da hidrodinâ-

mica clássica, o movimento das ondas regulares. Já em 1952, engenheiros do Laboratório Neyrpic em Grenoble publicaram os resultados de um experimento que apresentava incompatibilidade com as previsões de Havelock, e que sugeriam que essa teoria era fisicamente inadequada ou até mesmo irrelevante ¹.

Nesse experimento, foram geradas ondas de baixa amplitude com um atuador do tipo placa basculante (*paddle wavemaker*). As alturas de onda foram medidas numa posição distante do gerador e comparadas com as previstas pela teoria. Chegou-se à conclusão de que as alturas de onda eram 30% mais baixas do que o valor teórico.

Outra tentativa de verificação da altura de onda teórica havia sido feita por Cooper & Longuet-Higgins (COOPER; LONGUET-HIGGINS, 1951), que estudaram a reflexão de uma barreira vertical parcialmente imersa através da medição do estado estacionário antes da volta da onda incidente secundária até o gerador de ondas. O estado transitório se manteve por tantos períodos que poderia ser tratado como um estado estacionário com pouca perda de precisão.

O coeficiente de reflexão era sempre menor do que o teórico, e a discrepância tendia a diminuir à medida em que se imergisse mais a barreira, mas ainda, era da ordem de 10% quando esta estava com 1/3 de comprimento de onda imerso.

Sugeriu-se que uma das razões para essa discordância fosse a perda de energia ocorrida perto da borda inferior da barreira, onde se observa um fluxo com vorticidade e descolamento. Chegou-se a cogitar a possibilidade de que a teoria previa tudo corretamente, a menos da altura das ondas - e talvez as forças -, às quais deveria ser aplicado um fator de redução de 0,7 a 0,9.

Ursell *et al.* (URSELL; DEAN; YU, 1960) publicaram os resultados de um experimento parecido com o do grupo de Neyrpic em que as medidas obtidas apresentavam uma boa concordância com as previsões teóricas de altura de onda, porém não conseguiu sugerir uma justificativa para o resultado encontrado pelo grupo de Neyrpic. Foram feitos experimentos para ondas de declividade pequena ($0,002 \leq H/\lambda \leq 0,03$, onde H é a altura e λ é o comprimento da onda).

Para esse intervalo de valores de inclinação, as alturas de onda medidas tinham uma média 3,4% menor do que a altura prevista pela teoria. O erro experimental era da ordem de 3%, em que se sugeria que o desvio de 3,4% nas medidas de altura se desse em parte por efeitos de amplitude finita e possivelmente por imperfeições no movimento do gerador de ondas.

---

¹Neyrpic 1952

Foi feita também uma série de testes para se determinar os efeitos de amplitude finita. No intervalo de inclinação de ondas de $0,045 \leq H/L \leq 0,048$, as alturas de onda tinham média 10% abaixo das alturas previstas pela teoria de pequenas amplitudes.

Percebeu-se então a importância do conhecimento acerca dos efeitos causados pela reflexão das ondas em tanques de provas, para a melhor análise dos fenômenos observados em ensaios. A partir da década de 1970, diversos estudos teóricos e experimentais foram realizados com o objetivo de tornar a teoria mais precisa.

O índice de reflexão de ondas é calculado através da razão entre as alturas de ondas refletida e incidente. Para se obter esses valores de alturas, foram desenvolvidos vários métodos de medição e cálculos. O método mais simples de se medir tais valores seria percorrer uma determinada distância do tanque com um sensor de altura de ondas, na direção de sua propagação. Embora simples, é difícil se conseguir com essa técnica uma leitura de dados confiáveis em tanques grandes, já que a leitura dos dados está amplamente sujeita a erros humanos.

Thornton e Calhoun (THORNTON; CALHOUN, 1972) apresentaram um método de medida de reflexão de ondas fixando sensores em posições diferentes, em que era necessário se conhecer duas alturas de ondas (correspondentes às leituras dos dois sensores) e a diferença de fase entre elas. Embora fosse uma forma de se obter dados mais confiáveis, a necessidade de se saber o valor da diferença de fase continua sendo uma informação difícil de se conseguir.

Mansard e Funke (MANSARD; FUNKE, 1980) propuseram um método em que as alturas das ondas incidente e refletida eram estimadas a partir dos sinais gravados por sensores em três posições diferentes, através de:

$$H_I = \frac{|S_2 S_3 - 3 S_4|}{S_5} \quad (2.1)$$

$$H_R = \frac{|S_1 S_4 - 3 S_3|}{S_5}$$

em que:

$$S_1 = \sum_{n=1}^3 e^{i2\Delta_n}$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^3 e^{-i2\Delta_n}$$

$$\begin{aligned}
S_3 &= \sum_{n=1}^3 H_n e^{i(\delta_n + \Delta_n)} \\
S_4 &= \sum_{n=1}^3 H_n e^{i(\delta_n - \Delta_n)} \\
S_5 &= S_1 S_2 - 9
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Isaacson (ISAACSON, 1991) utiliza três alturas de onda correspondentes aos sensores em três posições distintas, e calcula as alturas das ondas incidente e refletida por:

$$\begin{aligned}
H_I &= (\sqrt{P+Q} + \sqrt{P-Q})/2 \\
H_R &= (\sqrt{P+Q} - \sqrt{P-Q})/2
\end{aligned} \tag{2.3}$$

onde:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{H_1^2 \sin[2(\Delta_3 - \Delta_2)] - H_2^2 \sin(2\Delta_3) + H_3^2 \sin(2\Delta_2)}{\sin[2(\Delta_3 - \Delta_2)] - \sin(2\Delta_3) + \sin(2\Delta_2)} \\
Q &= \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{H_1^2 + H_3^2 - 2P}{\cos(\Delta_3)} \right]^2 + \left[\frac{H_1^2 - H_3^2}{\sin(\Delta_3)} \right]^2 \right\}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Todos esses métodos anteriores utilizam um tratamento de dados muito trabalhoso, em que a aquisição de dados requer ou dados muito difíceis de se obter ou, muitas vezes, equipamento de que não se dispõe (três sensores, por exemplo), o que dificulta sua implementação.

Uma proposta diferente para a identificação das parcelas de reflexão e amortecimento da onda medida foi feita por Zhu (ZHU, 1999), que utiliza dois sensores, com tratamento de dados que utiliza uma função de transferência no domínio da frequência para separar essas ondas.

Ainda assim, essa separação se daria numa análise posterior dos dados coletados durante um determinado ensaio de forma que, para a implementação de um absorvedor de ondas ativo, a informação imediata a respeito da onda a ser eliminada ainda não poderia ser obtida.

Uma interessante revisão foi feita por Schäffer e Klopman (SHÄFFER; KLOPMAN, 2000), em que se apresentam diversos aspectos dos métodos de absorção ativa, incluindo modelos de interpretação a respeito da interação entre as ondas incidentes e o atuador, discussão sobre o posicionamento dos sensores e o estudo dos casos de ondas unidirecionais, 2D e quasi 3D, e é feita uma descrição dos modelos 3D.

Conforme citado no artigo, há diversas maneiras de se conceber o fenômeno da absorção ativa, entre elas:

- Imaginar que a absorção nada mais é do que o processo, invertido no tempo, de geração de ondas, embora haja aqui a ressalva da perda da ordem de causalidade: na situação de geração de ondas, o movimento do atuador causa a perturbação na água, e na absorção, as ondas causam o movimento do atuador;
- Partindo do princípio da superposição, a praia ativa funcionaria como um segundo atuador que gera ondas de mesma amplitude, mas em antifase com as ondas incidentes. Ou, ainda com o conceito da superposição e sabendo que quando a onda atinge uma barreira parada, sofre reflexão total, a praia ativa (no caso do atuador do tipo *flap*) seria uma parede que se reposiciona dinamicamente de forma que a onda refletida acabe resultando numa interferência destrutiva ao se compor com a incidente;
- Considerar que o absorvedor é uma fronteira neutra entre as instalações físicas do tanque e o mar. Desta forma, a absorção pode ser vista como se as ondas atravessassem o atuador, rumo ao infinito.

É importante ressaltar a diferença marcante entre a geração e a absorção de ondas, como no exemplo do pistão, no que diz respeito à relação entre as ondas nas faces opostas do atuador, quando este funciona como gerador e quando funciona como absorvedor, conforme ilustra a figura 2.1 retirada de (SHÄFFER; KLOPMAN, 2000).

Figura 2.1: Defasagem entre as ondas com relação a ambas as faces do atuador: do lado esquerdo, a geração, e no direito, a absorção.

Supondo inicialmente que o tanque de ondas tenha extensão infinita para ambos os extremos do canal de ondas, o movimento forçado do atuador resulta na emissão de ondas em ambas as faces, progressivas em sentidos opostos (saíndo da face).

Além disso, na geração de ondas, ao passo que de um lado do atuador, um certo volume de água está sendo “empurrado” para frente e, sob a análise ins-

tantânea, uma crista está sendo formada, a capacidade do tanque nas vizinhanças da outra face do atuador é aumentada, pois foi diminuída a espessura da lâmina d'água naquela região, dando origem a um cavado. Já no caso da absorção ativa, conforme já descrito no último item a respeito dos modelos de interpretação do fenômeno, o atuador funciona como um elemento neutro, que apenas “deixa a onda atravessá-lo” livremente do tanque para o infinito.

Sendo assim, é natural que se observe que na absorção, as ondas nas duas faces do atuador tenham o mesmo sentido de propagação (saindo do verso do atuador, rumo ao infinito), e que se constituam numa única curva sem defasagem de ângulos entre ambas as faces do atuador. Não é difícil de se imaginar que neste caso, diferentemente do anterior, em que o movimento do atuador é forçado, pouco ou praticamente nenhuma aplicação de trabalho externo é necessária para realizar a absorção.

Porém, quando trazidas à aplicação no estudo de implementação do absorvedor no tanque físico, as considerações devem ser acrescidas de mais alguns complicadores, como a inércia do atuador e a extensão finita do canal, que levam à necessidade de se criar um procedimento que ajuste alguma medida das ondas ao movimento adequado do atuador.

3 Modelo matemático

3.1 Hipóteses adotadas

Os modelos aplicados em estudos da hidrodinâmica clássica assumem que a água é um fluido contínuo, ou seja, não há vazios formados por bolhas ou gases dissolvidos, nem partículas diversas em suspensão e, também, os campos envolvidos como os de pressão, velocidade, etc., são diferenciáveis (não mudam de fase¹).

Assume-se que não há fontes nem sumidouros no modelo. Considera-se também que a água seja incompressível e a sua viscosidade dinâmica μ uniforme.

A pressão do ar é P_{atm} constante², e os termos não lineares nas equações do movimento são desprezados (são considerados de amplitudes suficientemente pequenas). O movimento da água e da sua superfície livre são tais que o escoamento pode ser considerado como invíscido e irrotacional ($v = \nabla\Phi$), em que v é a velocidade de escoamento e Φ é o potencial de velocidades.

A forma final do potencial de velocidades adotada para este problema é³:

$$\Phi = A_p \cosh[k_p(h+z)] \sin[k_p x - \omega t] + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_s(n)x} \cos[k_s(n)(h+z)] \cos[\omega t] \quad (3.1)$$

em que:

A_p é a amplitude das ondas progressivas;

C_n é a amplitude das ondas evanescentes;

z é o valor da ordenada da posição do tanque de que se quer obter as informações⁴;

---

¹não evaporam, não condensam nem sublimam, etc.

²essa hipótese desacopla o movimento da água do movimento do ar, desconsiderando este nos cálculos das ondas. Isso só pode ser usado quando a densidade do ar é muito menor do que a da água, mas não pode ser usada, por exemplo, quando se consideram ondas em interfaces líquido-líquido, ou quando se estuda a geração de ondas por ventos.

³(DEAN; DALRYMPLE, 1991), eq. 6.19

⁴sua origem é a linha d'água quando esta está parada e sentido saindo da água

x é a abscissa dessa posição⁵;

k_p é o número de onda das ondas progressivas;

k_s é o número de onda das ondas evanescentes;

h é a espessura da lâmina d'água;

ω é a velocidade angular da onda.

O número de onda é

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.2)$$

e, λ é o comprimento de onda. k é tal que:

- para águas de profundidade intermediária ($0,05 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0,5$)

$$\frac{\omega^2}{g} = k_p \tanh(k_p h) = -k_s(n) \tan(k_s(n)h)$$

em que:

g é a aceleração da gravidade;

cada elemento de k_s é uma das raízes da equação.

- para águas profundas ($\frac{h}{\lambda} > 0,5$):

$$k_p = \frac{\omega^2}{g}$$

---

⁵sua origem é a posição neutra do atuador e orientação na direção longitudinal do tanque, no mesmo sentido da propagação das ondas geradas

Parte III

Sobre a pesquisa

4 Justificativas

4.1 Motivação

Como visto nos capítulos anteriores, a demanda progressiva de dispositivos melhores e soluções para o aumento da qualidade dos ensaios na engenharia oceânica mostra a importância de se encontrar maneiras de fazer com que cada simulação de fenômenos naturais se torne mais parecida com a realidade.

Especialmente no caso das estruturas oceânicas, essas necessidades se tornam mais críticas devido à dificuldade de se fazer experimentos em escala real.

Quando se usam escalas reduzidas, a não-factibilidade da reprodução total da realidade é mais evidente, devido às limitações dos materiais e aos conflitos de dimensões de valores, etc., dado que algumas escolhas devem ser feitas para privilegiar a precisão de uma medida em detrimento de outra.

Nesse contexto, é imperativo encontrar maneiras de se reduzir essas incompatibilidades ao mínimo possível, buscando mudar as condições de contorno dos experimentos através de adaptações e invenções. O tema desta pesquisa foi escolhido de forma a fazer uma primeira abordagem a respeito da diminuição de ondas refletidas aplicadas ao caso do Tanque de Provas Didático I do PNV através do uso de uma praia ativa.

4.2 Objetivo

O foco deste trabalho é o estudo para a implementação de um absorvedor ativo de ondas no Tanque de Provas Didático I do PNV compatível com a arquitetura desse tanque com o gerador já existente e com as necessidades do departamento.

Com este trabalho, pretende-se melhorar o entendimento dos mecanismos envolvidos na geração e absorção de ondas em tanques, afim de aplicá-los no TPD I do PNV. A melhora na qualidade da absorção de ondas do tanque permitirá a melhora na qualidade dos resultados obtidos e uma contribuição para eventual-

mente se implementar um sistema deste tipo (gerador/absorvedor) em tanques como o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT.

Os objetivos deste projeto são, portanto:

- Proporcionar a base do estudo para a implementação de um sistema de gerador e absorvedor ativo de ondas no Tanque de Provas Didático I do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP (PNV);
- Projetar um equipamento de geração de ondas que possa atuar como absorvedor;
- Propor, implementar e testar um sistema de geração /absorção de ondas regulares desenvolvido na Escola Politécnica.

5 Sobre a execução da pesquisa

5.1 Encaminhamento do trabalho

O tema desta pesquisa foi escolhido após a observação das condições atuais de operação do TPD I (canal) do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP - PNV.

Esse tanque é utilizado para ensaios ligados a aulas de algumas disciplinas do departamento e para outras pesquisas relacionadas às ondas, entre outros estudos acadêmicos. Com o intuito não só de tentar melhorar a qualidade dos ensaios e diminuir o intervalo de espera entre eles, mas também de se buscar uma solução desenvolvida dentro da Escola (obter um método original ao invés de simplesmente copiar e adaptar soluções já implementadas em outros laboratórios), iniciou-se a primeira fase do trabalho com o projeto, instalação, testes e levantamento de curvas características dos equipamentos contidos no laboratório e que seriam utilizados.

Nessa etapa, conseguiu-se o empréstimo do servomotor com pistão acoplado e demais equipamentos auxiliares (cabos, etc.) da MOOG do Brasil Controles Ltda. pelo período de 5 meses (contados a partir do mês de Novembro de 2004). O atuador tipo placa basculante e seu suporte foram construídos com a verba de auxílio da Agência Nacional do Petróleo, ANP.

Em paralelo com o desenvolvimento deste trabalho foram feitas também buscas de informações a respeito de algumas das demais soluções já implementadas em outros laboratórios, afim de que esse conhecimento também pudesse servir de base e inspiração para a implementação do método de absorção das ondas.

Durante esse estágio da pesquisa, houve a oportunidade de se ter mais contato e proximidade com os estudos de ondas desenvolvidos em outro laboratório didático (do *Department of Naval Architecture and Ocean-Space Engineering, Yokohama National University* - YNU, Japão) e visitar um dos laboratórios em que essa tecnologia de absorção ativa já havia sido implementada (o tanque

oceânico do *National Maritime Institute* - NMRI, Japão), que possibilitou o acesso a alguns materiais no idioma japonês e o conhecimento e a compreensão mais a fundo do que se estuda e se utiliza em termos de equipamentos e pesquisa nesses dois laboratórios, contribuindo para o progresso deste trabalho.

Após o término do período de empréstimo do equipamento cedido pela MOOG do Brasil Controles Ltda., a pós-graduanda teve a oportunidade de realizar pesquisas no Laboratório da YNU, o que acabou alterando a programação do projeto no TPD I, principalmente com relação à implementação dos algoritmos de absorção ativa nesse tanque.

Por outro lado, o período de pesquisa na YNU permitiu a realização de testes empíricos em outro tanque, distinto daquele disponível no PNV, além de facilitar o processo de implementação e verificação dos algoritmos de absorção inicialmente pretendidos.

Sendo assim, a segunda fase deste trabalho, que foi adaptada às condições do tanque de ondas didático disponível no laboratório da YNU, onde foram realizados os ensaios apresentados mais adiante neste texto, se mantém fiel em sua essência à sua aplicação no tanque de origem - o TPD I, bastando apenas alterar as partes correspondentes à comunicação entre o programa do controlador e a placa de conversão de dados A/D, D/A (configurações de *driver*), que dependem do fabricante e das especificações da placa; e à curva de eficiência (resposta em frequência) dos atuadores.

A alteração relativa às curvas dos atuadores é trivial, dado que essas são apresentadas neste trabalho, bastando uma substituição das equações. Quanto à alteração relativa à placa de conversão de dados, é necessária a utilização do manual fornecido pelo seu fabricante, o que não é contemplado pelo escopo deste trabalho e, portanto, em nada altera as conclusões e /ou contribuições da pesquisa.

Portanto, face ao histórico descrito, o encaminhamento deste trabalho acadêmico, em suma, foi constituído de duas grandes etapas. A primeira, focada no desenvolvimento e instalação de um novo dispositivo a ser utilizado como elemento absorvedor ativo de ondas, foi totalmente realizada no Tanque de Provas Didático I do PNV (Brasil).

A segunda, que inicialmente deveria ter sido a implementação de um algoritmo de controle do atuador para realizar a absorção ativa no tanque do PNV, de fato sofreu algumas alterações e foi efetivamente conduzida no tanque de ondas do laboratório didático do *Department of Naval Architecture and Ocean-Space En-*

gineering (Japão). Apesar de representar alteração substancial no plano traçado inicialmente, esta alteração não só permitiu as oportunidades já comentadas como também o acesso de longo prazo a um equipamento para testes, diferente do que aconteceria no Brasil, onde em princípio o referido prazo de empréstimo por parte da MOOG do Brasil Controles Ltda. não contemplaria toda a fase de implementação do algoritmo de absorção.

Além disso, a oportunidade de realização da pesquisa na YNU contribuiu para a realização de um segundo projeto, publicado em (MICHIMA, 2007), em que foram conseguidos maiores avanços nos resultados de absorção, graças à experiência e aos conhecimentos adquiridos com a conclusão do presente trabalho.

Considera-se, finalmente, que a alteração promovida no projeto não prejudicou seu andamento, nem mesmo seus resultados, visto que as adaptações sobre os trabalhos realizados no Brasil foram poucas, permitindo a conclusão do objetivo proposto inicialmente com um melhor embasamento teórico e prático, fruto das experiências no Japão. Os capítulos a seguir tratam do trabalho desenvolvido em cada uma dessas etapas.

Parte IV

Projeto e construção do absorvedor

6 Instalações e equipamentos

6.1 Tanque de Provas Didático

O Tanque de Provas Didático I do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP tem as seguintes dimensões nominais (SOUZA, 2002):

- Comprimento: $25m$
- Largura: $1m$
- Profundidade: $1m$

O equipamento atualmente instalado é constituído de um atuador em formato de cunha (*Plunger-type*), com acionamento eletro-mecânico e um absorvedor passivo em plano inclinado, impermeável e com rugosidade. As ondas regulares geradas apresentam as seguintes características:

- máxima altura: $0,1m$
- faixa de frequências: $0,5Hz$ a $3,0Hz$

Foram feitas as medidas das instalações, incluindo praia passiva e o atuador do tipo cunha. O croqui pode ser visto na figura 6.1. As referências adotadas para essa medição foram a linha d'água para a abscissa (X) e a linha de prumo encostada à parede interna do tanque, na extremidade onde se encontra a praia passiva, para a vertical (Z), com sentido positivo para cima (saindo da água).

As marcações indicadas com as letras *A*, *B*, *C*, *D* e *E* são, respectivamente, as posições da antepara da cunha, do ponto com maior valor de abscissa do perfil da cunha, da extremidade inferior da praia (submersa), ponto de inflexão da praia e extremidade superior (emersa) da praia.

Ao longo de toda a extensão do tanque foram notadas irregularidades tanto de boca quanto de lâmina d'água, esta variando também ao longo da seção transversal do tanque. A figura 6.2 ilustra a seção transversal do tanque na posição 21,58m.

Figura 6.1: Croqui indicando as medidas reais do tanque de ondas na longitudinal

Figura 6.2: Croqui indicando as medidas realizadas da seção transversal do tanque na posição 21,58m

Essas variações, inerentes a uma construção de longa data, tiveram impacto direto sobre o projeto do suporte do servomotor, pistão e atuador do absorvedor de ondas mais adiante apresentados.

6.2 Caracterização dos equipamentos existentes

6.2.1 Batedor tipo cunha

Cada batedor de ondas tem sua curva característica de resposta em frequência, dada uma determinada lâmina d'água. Assim, dada a altura e frequência da onda desejada, sabe-se qual é a amplitude de movimento que o atuador deve realizar para que se consiga gerar tal onda. Com o propósito de se conhecer o desempenho do batedor de ondas já existente, foi feito o ensaio de levantamento dessa curva numa faixa de frequências definida.

O ensaio foi realizado com o batedor e a praia passiva posicionados em extremos opostos do tanque, conforme mostrado na figura 6.3.

Figura 6.3: Desenho esquemático do arranjo experimental para o ensaio de eficiência do batedor tipo cunha.

A amplitude do movimento da cunha foi medida com um sensor de posição e a altura da superfície da água, com um sensor capacitivo. No anexo A são ilustradas as séries temporais de elevação medidas nas frequências $0,5Hz$, $0,8Hz$, $1,6Hz$ e $2,0Hz$.

Coletadas as séries temporais do movimento do batedor e da altura da superfície d'água, obteve-se através da medição pico a pico a relação, para cada frequência, entre altura de onda H e amplitude do movimento do batedor S . Foi obtida assim a curva apresentada na figura 6.4.

Figura 6.4: Curva de resposta em frequência do batedor de ondas tipo cunha.

Observa-se que o valor em 0,5Hz se destaca da linha de tendência para o valor 1. Isso ocorre porque a onda de 0.5Hz tem celeridade muito alta e acaba atingindo o sensor antes mesmo que se caracterize o fim do transiente, sendo registrada em duas componentes: a incidente e a refletida juntas. Deste modo, a sua amplitude calculada acaba não refletindo a realidade. Por isso, esse valor foi descartado das características objetivadas no projeto do absorvedor, conforme especificado no item 6.4, das premissas para o projeto do absorvedor, apresentado mais adiante.

6.2.2 Praia passiva

O ensaio de levantamento da curva do índice de reflexão da praia passiva foi feito para posterior comparação com o da praia ativa e consiste de um procedimento bastante simples, ilustrado na figura 6.5.

Figura 6.5: Ilustração das etapas simplificadas do ensaio de índice de reflexão da praia passiva.

Gera-se um trem de ondas regulares curto numa extremidade do tanque, e

mede-se sua altura, tanto na ida (propagando-se em direção à praia) quanto na volta (em direção ao batedor). O quociente entre essas duas alturas é o índice de reflexão.

O arranjo experimental é o mesmo do ensaio de levantamento da curva de eficiência da placa basculante, porém sendo necessária apenas a coleta da série temporal das medidas de altura da superfície da água. O anexo B contém as plotagens das séries temporais nas frequências $0,8Hz$, $1,2Hz$, $1,6Hz$ e $2,0Hz$.

A análise dos dados deste ensaio foi feita de maneira similar à dos ensaios de eficiência do batedor, aplicando-se duas vezes o método de análise para cada série temporal: primeiro no trecho das ondas incidentes (trem de ondas propagando-se em direção à praia), e em seguida, no trecho das ondas refletidas (voltando ao batedor). A curva de índice de reflexão é apresentada gráfico da figura 6.6.

Figura 6.6: Índice de reflexão em função da frequência

6.2.3 Sensores

Os sensores são do tipo capacitivo, manufaturados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. Cada um deles consiste de um par de arames paralelos semi-submersos na água, cuja variação da capacitância é medida como amostragem proporcional à mudança de altura da linha d'água. A figura 6.7 mostra fotos de um exemplar usado nos ensaios.

Figura 6.7: Sensor capacitivo utilizado nos ensaios

O gráfico da figura 6.8 mostra o resultado da calibração dos sensores feita antes do ensaio de resposta em frequência do batedor tipo placa basculante. Pode-se ver pelo gráfico que os sensores são lineares na faixa de aproximadamente $-1V$ a aproximadamente $1V$, sem histerese. As curvas estão plotadas com padrões antagônicos de orientação relativa à linha d'água em repouso, apenas para evidenciar a distinção das curvas. Nos ensaios, um único padrão de referência foi usado.

Figura 6.8: Curva de calibração do sensor capacitivo

Esses sensores são bastante frágeis e há que se lembrar que trata-se de um tanque didático. Por terem sido no passado manuseados de forma incorreta, por vezes apresentavam falhas ou mal funcionamento. Devido a esse problema, em alguns ensaios não foi possível utilizar mais de um sensor.

6.3 Equipamento disponibilizado pela MOOG: servomotor

Durante a absorção ativa de ondas são observados alguns efeitos (radiação e reflexão) devidos a fatores como a vibração do equipamento, a geração de ondas na parte de trás do atuador, a rugosidade do material e a geração de vórtices pelo fluxo de água através do vão entre o atuador e a parede do tanque. O equipamento a ser utilizado para a absorção ativa de ondas deve resultar num batedor cujos movimentos sejam exatos e controláveis o suficiente para que esses efeitos não prejudiquem a qualidade das ondas na região onde são realizados os ensaios.

Na impossibilidade de se impedir a ação dos ruídos, o batedor deve garantir que o intervalo de tempo útil para a coleta de dados seja aumentado com relação

ao atual.

Para se atender às necessidades de redução dos ruídos gerados pelo absorvedor ativo de ondas e, além disso, garantir que se tenha uma eficiência alta no fornecimento das forças e velocidades requeridas para a absorção dessas ondas, torna-se imprescindível a busca por componentes de boa qualidade, precisão e desempenho. Essa escolha acaba por restringir os fornecedores a um grupo muito pequeno e cujos equipamentos tenham preços muito altos (da ordem de R\$ 15.000,00 reais).

A partir de negociação com o fabricante MOOG do Brasil Controles Ltda., foi possível a obtenção por empréstimo de um servomotor com pistão acoplado para o desenvolvimento deste trabalho. Como esse tipo de equipamento é caro e sua aplicação normalmente é muito específica, em geral, sua fabricação é realizada a partir de encomendas, não havendo disponíveis em estoque sistemas de todos os modelos comercializados pela empresa.

O exemplar disponibilizado pela MOOG é parte de um aparato de demonstração promocional utilizado pela empresa em feiras e, portanto, tratava-se de um equipamento já construído. Sendo assim, algumas das características do sistema de atuação se tornaram pré-definidas pelo equipamento emprestado, e os demais componentes do batedor foram adaptados a elas. São listadas a seguir as características do equipamento emprestado:

1. *Servoatuador MOOG Z875-050-300*

- Força contínua: $500kgf$, força de pico: $1000kgf$
- Curso total: $300mm$
- Velocidade máxima: $20m/min$ (passo: $5mm$)

2. *Servomotor G414-604A*

- Torque contínuo: $5,2Nm$, torque de pico: $12,6Nm$
- Velocidade nominal: $4300rpm$

3. *Servoconversor L180-410B-A2* (para comando de velocidade e alimentação)

- Interface analógica: $+/- 10V$
- Interface digital: $220V$ (corrente alternada, trifásico)

4. *Cabo de resolver Z196-130-050*

5. *Cabo de potência Z196-402-050*

6. Transdutor de posição tipo Magnetostritivo

- Saída analógica: 0V a 10V (montado no corpo do atuador)

7. Módulo servoamplificador PID analógico (formato DIN, para fechar malha de posição)

6.4 Premissas para o projeto do absorvedor ativo com base no servomotor

O Tanque de Provas Didático I do PNV é bastante utilizado em ensaios destinados a trabalhos preliminares de pesquisa e em aulas de laboratório ministradas nas disciplinas oferecidas pelo departamento PNV. Por isso, não é passível de interdição no tempo integral de desenvolvimento deste projeto e não deve ser alterado o calendário de atividades programadas para o uso do tanque.

Com base nesse fato e nas características dos equipamentos e instalações anteriormente descritas, a escolha e projeto do dispositivo de absorção ativa de ondas foram feitos assumindo as seguintes premissas:

- As ondas geradas devem preencher o intervalo de frequências de $1Hz$ a $3Hz$
- Ser compatível com as características do sistema servomotor;
- Minimizar os custos de equipamentos, mantendo o bom funcionamento do atuador quanto aos pontos de vista: estrutural, de facilidade de manuseio e de resistência à corrosão.
- Possibilitar variações de posição dos elementos do sistema, tais como altura do servoatuador e sua posição longitudinal, para propiciar adaptações posteriores requeridas para ensaios futuros.
- Ser de fácil instalação e remoção;
- Ser facilmente adaptável às irregularidades apresentadas na geometria do tanque.

A primeira premissa estipula o valor mínimo da faixa de frequências de $1Hz$ e não os $0.5Hz$ que também foram ensaiados nas caracterizações dos equipamentos, devido à dificuldade de se reconhecer suas componentes incidente e refletida no TPD I, como já foi esclarecido no item 6.2, da caracterização dos equipamentos já existentes.

7 Absorvedor ativo - parte física

7.1 Projeto do absorvedor

7.1.1 Tipo de batedor

O tipo de absorvedor a ser utilizado foi escolhido dentre os modelos comumente encontrados em laboratórios, apresentados por Chakrabarti (CHAKRABARTI, 1994) e analisados por Souza (SOUZA, 2002). Os modelos apresentados são:

- Pneumático;
- Cunha (*plunger type*);
- Placa basculante (*flap type*);
- Pistão (*piston type*).

A figura 7.1 retirada de Bhattacharyya (BHATTACHARYYA, 1978) ilustra esses modelos.

Figura 7.1: Tipos de atuadores: Pneumático, Cunha, Placa basculante e Pistão.

O batedor do tipo pneumático não possui partes mecânicas móveis em contato direto com a água e por isso é chamado de atuador passivo. As ondas por ele

formadas se originam da variação alternada da pressão do ar dentro de uma câmara na forma de um domo, que é parcialmente imerso na água.

Devido à limitação da válvula que controla a passagem do ar, o batedor pneumático não é adequado para a passagem de grandes volumes de ar em frequências acima de $1Hz$.

Visto que a faixa de frequências das ondas a serem absorvidas deve contemplar da maneira mais ampla possível a faixa de frequências da capacidade do equipamento já instalado, este tipo de batedor não atenderia bem os requisitos de projeto.

As ondas geradas pelo atuador do tipo cunha surgem do movimento oscilatório vertical, em torno da linha d'água, de um corpo em forma de cunha. Devido ao fato de o movimento ser realizado na vertical, é necessário um espaço acima da parede do tanque para a estrutura de suporte e do sistema de acionamento maior do que o espaço requerido pelos demais sistemas.

Isso dificultaria o manuseio de instalação e retirada freqüentes do equipamento no tanque. Além disso, seria necessária a prevenção de movimentos horizontais da cunha causados pela mudança do centro de flutuação durante o movimento de imersão, o que tomaria muito tempo para calibração e ajustes do equipamento a cada instalação feita.

O atuador do tipo placa basculante é constituído de uma chapa lisa e plana, estruturalmente rígida, apoiada em articulação dentro do tanque e parcialmente imersa na água. A geração de ondas se dá pela oscilação dessa placa em torno do ponto articulado. Esse tipo de atuador tem uma boa resposta ao sinal de entrada, e sua capacidade de geração de ondas é melhor para frequências altas.

Atuadores desse tipo formam ondas com menos excitação na massa de água perto do fundo do que na superfície, sendo mais indicados para a simulação de ondas em águas profundas. A potência de acionamento a ser instalada é uma das menores pois, dado que todo o peso é apoiado no mancal, nenhuma estrutura de sustentação é necessária, tornando sua inércia baixa.

Embora as variações do nível d'água do tanque para cima do nível de projeto causem maior consumo de potência, isso não acarreta perdas na eficiência hidrodinâmica. Por outro lado, para as variações abaixo do nível de projeto, a perda da eficiência é proporcional à altura da placa.

Com o princípio de funcionamento análogo ao do atuador de placa basculante, o atuador do tipo pistão se difere pelo movimento horizontal puro. Com a

altura da placa abrangendo desde a superfície da lâmina d'água até o fundo, esse atuador não é adequado para ondas de águas profundas, uma vez que o deslocamento horizontal uniforme por toda a profundidade do tanque não representa o movimento real das partículas fluidas nessa condição de onda.

Considerando-se que a maior parte dos ensaios realizados no tanque é voltada a estudos de fenômenos em águas profundas, tal característica não é interessante ao projeto em questão. Outro fator que traz desvantagem ao uso do batedor tipo pistão é a necessidade de maior força física para o deslocamento da massa fluida.

Além disso, é necessária uma estrutura de suporte com sistema de guia para a placa desse atuador, visto que esta fica suspensa no tanque. A necessidade de instalação dessa guia, da mesma forma que o atuador tipo cunha, dificultaria os processos de instalação e retirada do equipamento.

Dadas as características acima discutidas foi escolhido, por atender de forma mais adequada os requisitos do projeto, o atuador do tipo placa basculante.

7.1.2 Função de transferência da placa basculante

O valor do deslocamento horizontal da placa basculante executado pelos pontos localizados em cada altura z do tanque em torno de $x = 0$ (conforme ilustra o croqui da figura 7.2) é:

$$s(z) = \begin{cases} S \left(1 + \frac{z}{(h-\delta h)} \right) & , \quad -(h - \delta h) \leq z \leq 0 \\ 0 & , \quad z < -(h - \delta h) \end{cases} \quad (7.1)$$

onde:

S é o valor máximo do curso, na linha d'água;

dh ou δh é a distância vertical entre o fundo do tanque e o ponto de pivotamento da placa basculante.

Figura 7.2: Ilustração dos significados das variáveis envolvidas no equacionamento.

Na dedução da função de transferência da placa (a sua resposta em frequência), é utilizado o equacionamento deduzido com base na teoria da hidrodinâmica clássica, já apresentados anteriormente no capítulo II, dos fundamentos teóricos. Equações análogas para placas basculantes articuladas no fundo do tanque podem ser encontradas em livros, como por exemplo (DEAN; DALRYMPLE, 1991), porém a dedução foi feita novamente neste trabalho para que fosse levada em conta também a variável relacionada à distância entre o ponto de pivotamento da placa e o fundo do tanque.

Como, no caso em estudo, trata-se da aplicação do modelo em um tanque com ondas que se propagam em uma única direção, utiliza-se a condição de contorno lateral no batedor e assim obtêm-se os valores de A_p e C_n da equação 3.1:

$$\frac{s(z)}{2}\omega \cos[\omega t] = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}(0, z, t) \quad (7.2)$$

ou seja,

$$\frac{s(z)}{2}\omega = -A_p k_p \cosh[k_p(h+z)] + \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \quad (7.3)$$

Para a obtenção da função de transferência da placa basculante, interessa apenas o efeito das ondas longe dele, isto é, apenas o efeito das ondas progressivas. Sendo assim, a princípio neste estudo é calculado apenas o valor de A_p , conforme o detalhamento apresentado a seguir (a obtenção de C_n é análoga).

Para se conseguir A_p independente de C_n , busca-se anular o termo em C_n . Isso é feito multiplicando-se a equação (7.3) por $\cosh[k_p(h+z)]$ e integrando-a em toda a lâmina d'água:

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 \{-A_p k_p \cosh[k_p(h+z)] + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)]\} \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ & = \frac{\omega}{2} \int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h+z)] dz \end{aligned} \quad (7.4)$$

Como a integral é um operador linear,

$$\int_{-h}^0 -A_p k_p \cosh[k_p(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz +$$

$$\begin{aligned}
+ \sum_{n=1}^{\infty} C_n \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz &= \\
&= \frac{\omega}{2} \int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h+z)] dz
\end{aligned} \tag{7.5}$$

Tem-se, então, que

$$A_p = \frac{-\frac{\omega}{2} \int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h+z)] dz}{k_p \int_{-h}^0 \cosh^2[k_p(h+z)] dz} \tag{7.6}$$

pois a parcela $\sum_{n=1}^{\infty} C_n \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz$ é nula devido à ortogonalidade de ambas as funções, como é mostrado no apêndice A.

Depois de calculadas as integrais da equação 7.6 (apresentadas no apêndice B), obtém-se:

$$A_p = \frac{-2\omega S}{\sinh[2k_p h] + 2k_p h} \left[\sinh[k_p h] + \frac{(\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h])}{k_p(h - \delta h)} \right] \tag{7.7}$$

.

O valor da altura das ondas progressivas H é calculado através da equação de onda longe da placa:

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{H}{2} \cos[k_p x - \omega t], x \gg h \tag{7.8}$$

Por outro lado, derivando-se a equação 3.1:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = -\frac{A_p}{g} \omega \cosh[k_p h] \cos[k_p x - \omega t]$$

então, a altura de onda pode ser escrita como:

$$H = \frac{-2A_p}{g} \omega \cosh[k_p h]. \tag{7.9}$$

Substituindo A_p de (7.7) em (7.9):

$$H = \frac{-2\omega \cosh[k_p h]}{g} \frac{-2\omega S}{\sinh[2k_p h] + 2k_p h} \left[\sinh[k_p h] + \frac{(\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h])}{k_p(h - \delta h)} \right]$$

A função de transferência da placa basculante é a relação de proporção entre a altura da onda gerada e o curso máximo do atuador na linha d'água:

$$\frac{H}{S} = \frac{4\omega^2}{g} \left(\frac{\cosh[k_p h]}{\sinh[2k_p h] + 2k_p h} \right) \left[\sinh[k_p h] + \frac{(\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h])}{k_p(h - \delta h)} \right] \quad (7.10)$$

Respeitando-se a relação entre $\frac{\omega^2}{g}$ e k_p como descrito na eq.(3.2), finalmente a função de transferência obtida permite calcular os valores teóricos da eficiência do atuador, dada a lâmina d'água.

7.1.3 Dimensionamento

Para gerar uma onda de determinada altura, fixada uma frequência, é necessário que a placa se desloque a distância S , chamada *stroke* ou *curso*, definida pela sua eficiência na linha d'água. Essa distância é limitada pelo sistema de geração de ondas. No caso do equipamento a ser utilizado neste projeto, visando atender à condição de mínimo custo, buscou-se o tamanho mínimo da placa que deve garantir a geração de todas as alturas máximas de onda pretendidas para a faixa de frequências estabelecida, movimentando-se num curso horizontal (D) no topo de, no máximo, $0,3m$, conforme já apresentado na figura 7.2.

Espera-se que as ondas geradas preencham o intervalo de frequências de $1Hz$ a $3Hz$, o que equivale aos números de onda aproximados de $4,04m^{-1}$ a $36,26m^{-1}$, calculados segundo a equação (3.2), com declividade máxima (altura/comprimento de onda) de $0,2$. Segundo Chakrabarti (CHAKRABARTI, 1994), a declividade recomendada para ensaios de simulação de águas profundas é de $0,1$. Porém, como o TPD I é utilizado também para estudos de ondas além dos ensaios com modelos, algumas declividades maiores podem ser utilizadas. A seguir são apresentados os procedimentos de projeto de cálculo e dimensionamento da placa basculante.

O primeiro passo para a determinação da altura do atuador é a busca dos valores possíveis para as condições de projeto anteriormente apresentadas. Para

tanto, calculou-se a função de transferência da placa basculante. Na figura 7.3 é apresentado um gráfico com as curvas de funções de transferência por frequência para diversas alturas de articulação do atuador, dh .

Figura 7.3: Curvas da função de transferência da placa basculante na linha d'água para cada altura do ponto de pivotamento, dh .

No eixo das ordenadas, encontram-se os valores da proporção entre a altura de onda progressiva gerada (H) e o curso do atuador na linha d'água (S). Cada curva representa uma posição diferente do ponto de pivotamento da placa. Pode-se notar que, para uma frequência fixa, à medida em que se aumenta a altura da articulação (ou seja, diminui-se o comprimento molhado da placa), um deslocamento maior é requerido para se obter a mesma altura de onda gerada.

Esse fato acaba sendo uma contrapartida do critério de mínimo custo no dimensionamento da placa basculante, uma vez que indica melhor desempenho daquelas que têm maior comprimento molhado e, sendo para isso mais longas, necessitam de mais material para a construção e portanto são mais caras.

Com os valores da função de transferência na linha d'água e das alturas máximas de onda pra cada frequência, é possível por semelhança de triângulos calcular o curso necessário na extremidade superior da placa para se gerar cada onda e, assim, definir a possibilidade ou não de o servo sistema atender àquelas configurações e de gerar todas as ondas requeridas por projeto.

A placa basculante é acoplada ao pistão do servo sistema acima da linha d'água. A altura (com relação ao fundo do tanque de ondas) em que o servo sis-

tema será posicionado é de $1,05m^1$, com possibilidade de elevação para propiciar as adaptações já referidas no início desta seção. As alturas máximas de ondas são obtidas diretamente de sua declividade:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (7.11)$$

$$H = 0,2\lambda \quad (7.12)$$

Conforme explicado no início do capítulo, apesar de a aproximação da onda à função senoidal ser adequada para declividades abaixo de 0,1, tal declividade foi escolhida superior para favorecer também a geração de outros tipos de ondas.

As figuras 7.4 a 7.7 apresentam as curvas obtidas de curso do topo da placa (D), curso máximo fornecido pelo servo sistema, e altura de onda para cada frequência. Em cada um dos gráficos, a altura em que se acopla a placa ao pistão do servo sistema é fixa e, portanto, com a variação do ponto de pivotamento da placa basculante, varia-se também o seu tamanho.

Figura 7.4: Curso do topo da placa, curso máximo fornecido pelo servo sistema e altura de onda “versus” frequência com diferentes alturas da conexão do servoatuador com a placa, a $1,05m$ do fundo do tanque.

Os gráficos também incluem as curvas de altura máxima da onda, segundo os requisitos de projeto, e a curva que representa o valor máximo de curso fornecido pelo pistão em cada frequência. Esta apresenta uma região de valor constante nas frequências mais baixas devido à sua limitação de curso. Esse valor passa a

¹altura próxima à altura do tanque de forma tal que, favorecendo a determinação do menor tamanho de placa, ainda garanta uma distância segura entre o pistão e a água

diminuir gradualmente à medida que sua capacidade de fornecimento de curso se torna menor para velocidades maiores de operação.

Figura 7.5: Curso do topo da placa, curso máximo fornecido pelo servo sistema e altura de onda “versus” frequência com diferentes alturas da conexão do servoatuador com a placa, a 1,10m do fundo do tanque.

Figura 7.6: Curso do topo da placa, curso máximo fornecido pelo servo sistema e altura de onda “versus” frequência com diferentes alturas da conexão do servoatuador com a placa, a 1,20m do fundo do tanque.

Nas figuras 7.5 e 7.6, por exemplo, observa-se que, para a geração de ondas com declividade 0,2 apenas as placas com tamanho superior a 0,6m e 0,8m, respectivamente, são atendidas pela capacidade de curso do pistão do servoatuador.

Sabendo-se que o servoatuador será posicionado no suporte, apoiado em um

Figura 7.7: Curso do topo da placa, curso máximo fornecido pelo servo sistema e altura de onda “versus” frequência com diferentes alturas da conexão do servoatuador com a placa, a 1,30m do fundo do tanque.

mancal na região do motor, o que lhe permite por rotação em torno desse ponto de apoio a variação de altura (coordenada em Z) da extremidade do pistão articulada com o topo da placa, o menor tamanho de placa basculante que garante a geração de toda a gama de ondas necessárias, repetindo as limitações do servoatuador e garantindo ainda uma flexibilidade de variação de altura da conexão do servoatuador com a placa de 0,15m² é a de comprimento 0,8m. A figura 7.8 mostra um croqui da placa instalada no tanque³.

Figura 7.8: Maquete do tanque com a placa basculante instalada, em três posições: máxima, vertical (neutra) e mínima de curso.

Uma vez definidas as dimensões da placa, é necessário projetar um suporte

²de 1,05m a 1,20m

³renderizado por Guilherme Pissiaia

de fácil manuseio que integre o servo sistema a ela. A concepção é mostrada a seguir.

7.1.4 Equipamentos de fixação

A estrutura projetada e construída é composta basicamente por perfis retangulares de aço inoxidável e chapas dobradas, além dos elementos de fixação da placa basculante e dos mancais de rolamento para apoio do servoatuador. A figura 7.9 mostra um corte longitudinal do tanque ilustrando o suporte com a placa basculante e o servoatuador acoplados.

Figura 7.9: Corte longitudinal do tanque com o absorvedor de ondas

Sua estrutura tubular é caracterizada por dois triângulos escalenos semelhantes pertencentes a dois planos paralelos entre si e perpendiculares à linha d'água. Uma das arestas de cada triângulo fica paralela à linha d'água e seus pontos médios são ligados. Desta forma, paralela à linha d'água e vista de cima, obtém-se uma estrutura em “H”. No centro dessa haste que liga as arestas há o suporte do mancal do servomotor.

O servomotor possui dois pinos laterais formando um eixo em torno do qual seu movimento em arco de círculo pode ser realizado durante a operação. Em cada um desses pinos é fixo um mancal de rolamento que por sua vez se apóia no suporte anexo à estrutura tubular. Esse suporte está preso à estrutura por parafusos. Estes passam por furos ovais, que permitem que seja modificada a posição do suporte deslizando-o para frente ou para trás.

A extremidade do pistão transmite o movimento para a placa basculante através de uma articulação do tipo rótula. Na base onde se encontra o seu eixo de pivotamento, a fixação da placa é feita com mancais nas extremidades, contendo buchas de poliéster. Os mancais são fixos com parafusos nos “braços” inclinados de tubo retangular. Essa posição (da altura do eixo de pivotamento da placa) também é ajustável, desde que se façam outros furos no tubo em lugares convenientes e se parafusem os mancais nessas novas posições.

O suporte é apoiado e fixado às paredes do tanque por quatro perfis em “U”,

dois para encaixar em cada parede, um por extremidade, frontal e posterior. Esses perfis são parafusados às chapas soldadas do suporte de forma tal que, de acordo com as necessidades de ajuste é possível se obter um deslocamento relativo entre essas duas partes para que o “gancho” do suporte na parede fique mais justo ou mais folgado com relação à parede interna do tanque.

A limitação de movimento do conjunto é garantida pelas sapatas existentes nesses quatro ganchos. Cada um deles possui duas sapatas: uma na parte superior, para o nivelamento da altura de toda a estrutura nas direções longitudinal e transversal do tanque, e a outra para limitar o jogo transversal e o escorregamento longitudinal do suporte durante a operação.

Algumas fotos dos detalhes de fixação são apresentadas no anexo D.

7.2 Caracterização do absorvedor

Seguindo os mesmos moldes do ensaio de levantamento da curva de eficiência do batedor de ondas tipo cunha, foi feito o levantamento da curva para o batedor do tipo placa basculante. Este, embora seja destinado à absorção, foi posicionado no extremo oposto ao da praia passiva.

Obviamente, a razão é diminuir a reflexão das ondas geradas pelo batedor, dado que se este estivesse posicionado no outro extremo, onde realizará a função de absorvedor as ondas geradas incidiriam diretamente na antepara vertical e rapidamente retornariam, prejudicando a obtenção dos valores de altura de onda gerada. A ilustração da montagem feita é mostrada na figura 7.10.

Figura 7.10: Desenho esquemático do arranjo experimental para o ensaio de eficiência do batedor tipo da placa basculante.

O sensor foi posicionado a $4m$ do batedor. Apesar de não se objetivar a operação do absorvedor em $0,5Hz$, a caracterização contemplou este valor de frequência para que se mantivesse o padrão de faixa de frequências das curvas dos equipamentos aqui documentados. As séries temporais das medidas de elevação nas frequências $0,5Hz$, $0,8Hz$, $1,6Hz$ e $2,0Hz$ são mostradas no anexo C. O tratamento de dados dos ensaios da placa basculante se difere do tratamento feito com os dados do batedor tipo cunha por necessitar de uma etapa a mais no

cálculo da relação entre a amplitude de movimento da placa e a altura de onda gerada.

Para a relação de H/S com a qual se levanta a curva de função de transferência, a medida S , conhecida como *stroke*, que é a amplitude de movimento do atuador na linha d'água é igual à medida da amplitude de translação do eixo no caso da cunha. Porém, no caso da placa basculante, a medida da amplitude de translação do pistão que empurra o topo da placa é diferente da medida que deveria ser tomada na linha d'água, conforme mostra a figura 7.11.

Figura 7.11: Medidas realizadas e *stroke*, nos casos da cunha e da placa basculante.

Essa conversão do valor lido de amplitude de movimento da placa basculante em valor real do *stroke* na linha d'água se dá em três etapas. A figura 7.12 ilustra tal procedimento.

Primeiramente, calculam-se as posições extremas (x_i, z_i) e (x_f, z_f) do movimento do ponto de articulação da placa com o pistão, dadas as medidas da geometria do equipamento. Por intersecção de arcos, encontram-se os pontos que distam $R_1(t)$ do ponto de pivotamento do pistão e R_2 do ponto de pivotamento da placa basculante. Em seguida, escolhem-se convenientemente as coordenadas do ponto que representa a situação real (com o pistão emerso, por exemplo), e finalmente, utilizando-se o Teorema de Tales, o valor real do *stroke* é obtido. As equações utilizadas são as seguintes:

- Para encontrar as coordenadas (x, z) do ponto de pivotamento:

Figura 7.12: Cálculo de conversão do *stroke* da placa basculante.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (z - z_1)^2 = R_1^2(t) \\ (x - x_2)^2 + (z - z_2)^2 = R_2^2 \end{cases} \quad (7.13)$$

em que x_j , z_j e R_j ($j = 1, 2$) são, respectivamente, a abscissa, ordenada e distância da articulação ao ponto de pivotamento do pistão (1) e da placa basculante (2).

- Semelhança de triângulos:

$$S = \frac{(x_f - x_i)(h - z_2)}{(z_i - z_2)} \quad (7.14)$$

Os valores cuja utilização se faz necessária na absorção, na verdade são aqueles obtidos diretamente da medição, dado que o comando do sistema de absorção de ondas será calculado tendo em vista o translado do próprio pistão, sob a execução dos movimentos do motor. Porém, para fins de verificação da eficiência real da placa basculante, foi feita a conversão para que se comparassem as curvas teórica e experimental. O gráfico comparativo se apresenta na figura 7.13.

Figura 7.13: Curvas de função de transferência teórica e experimental do batedor de ondas tipo placa basculante.

Parte V

Concepção e implementação do controle do absorvedor

8 Projeto

8.1 Interpretação do problema proposto

O planejamento da implementação do absorvedor é mais facilmente concebível se seu estudo for baseado nos procedimentos de operação. A seguir são apresentadas, sob um ponto de vista geral, as etapas que constituem a atividade básica de se gerar e absorver um trem de ondas.

Primeiramente, são ligados ambos os batedores de ondas (os motores entram em funcionamento), sem que seja ativada a movimentação do atuador, ou seja, os motores não recebem ordens para movimentar os atuadores. Neste instante, algumas ondas de alta frequência acabam sendo geradas devido à vibração causada pelos motores.

Essas ondas têm uma taxa de perda de energia alta durante a sua propagação, sendo evanescentes ao longe, e não chegam a alcançar distâncias muito grandes com relação ao batedor de ondas e, conseqüentemente não atingem o modelo ensaiado, se este for corretamente posicionado. Porém, para fins de medição e controle das ondas para a absorção, esse ruído é um fator complicante na identificação da onda que realmente precisa ser absorvida.

Uma vez escolhida a onda a ser gerada, é criado o sinal de entrada do motor do batedor de ondas com os comandos para a sua movimentação. Nesse instante, apesar de a informação já estar sendo enviada para o controlador (que é o componente que traduz o sinal correspondente ao movimento requisitado em comando para o motor), ainda não há comunicação entre este e o motor, até que esta se ative.

Há nesta etapa, devido às características do equipamento utilizado, uma grande dependência da qualidade da onda com relação à pessoa que está operando o equipamento. Isto é, a comunicação entre o controlador e o motor é ativada por quem o opera, o que significa que ocorrer ou não a coincidência entre a fase do sinal enviado e a posição inicial real do atuador depende - não só, mas grande-

mente - do reflexo da pessoa que o está ativando.

No caso em que o atuador se encontra numa posição que não seja a que lhe foi enviada no sinal de referência, antes de começar a oscilação, este rapidamente corrige sua posição para só então começar o movimento requerido.

Ao realizar esse reposicionamento, o atuador acaba gerando uma onda transiente, cuja velocidade de propagação é muito maior do que a da onda que se deseja gerar, fato a ser levado em conta para a absorção, pois exige grande velocidade de processamento da medição da onda e geração de sinal para que o absorvedor atue antes que esta se reflita e se “some” às ondas seguintes.

Após a ativação do batedor que atua como gerador de ondas, este passa a funcionar em regime regular, e o trem de ondas gerado se propaga em direção à outra extremidade do tanque, onde se encontra o outro batedor que terá o papel de absorvedor ativo. Ao atingir a posição em que se encontra o sensor, a série temporal da altura é coletada e, ao mesmo tempo em que tais dados são lidos, é feito o seu processamento para o comando do absorvedor. Também nesse outro extremo do tanque, há o problema da geração de onda transiente quando o atuador é tirado da inércia.

Dada a frequência da onda e a espessura média de lâmina d'água do tanque, se a onda é regular e sua altura se encontra dentro dos limites em que pode ser aplicada a teoria linear, é possível prever aproximadamente quanto tempo a partir da geração ela demora para atingir a posição do sensor. Da mesma forma, é possível calcular, a partir do momento em que o sensor detectou a chegada desse trem de ondas, quando este atingirá o atuador e, portanto, quando este deve ser ativado, conhecidos os tempos de transmissão de dados sensor-computador, computador-controlador e o tempo de processamento do computador para realizar os cálculos necessários.

Ressaltam-se aqui algumas observações a respeito das dificuldades que ocorrem durante a realização da atividade de geração e absorção, da forma como foi descrita anteriormente. Devido ao fato de que é a pessoa que ativa o gerador quem acaba determinando a defasagem entre o sinal e o atuador, esse atraso não é sempre o mesmo, e conseqüentemente, a onda transitória gerada também não o é.

Outro problema a ser contornado é a variação da voltagem inerente ao próprio equipamento, que faz com que os valores de frequência e o zero (valor de referência da oscilação) não sejam constantes, mas sim parâmetros que oscilam nas proxi-

midades dos valores nominais.

A consequência disso é que, dado um erro ϵ dentro da faixa de tolerância da frequência do absorvedor, supondo - por simplicidade - que não haja tal problema de variação no sistema gerador, se a onda que chega no atuador é de frequência ω , e o absorvedor atua com uma determinada frequência $\omega + \epsilon$ (ϵ : pequeno incremento em frequência), não haverá a absorção desejada. Ao contrário, a onda incidente se refletirá no atuador e se adicionará à outra onda gerada pelo absorvedor, propagando-se em direção ao gerador.

É claro que não existe equipamento ideal, portanto tal fenômeno certamente é inevitável, mas deve-se buscar uma forma de tornar os efeitos de imprecisão tão pequenos quanto possível, de forma a retardar sua influência na região de ensaio do modelo, ou ao menos minimizá-la.

A figura 8.1 ilustra as etapas descritas até este momento.

Figura 8.1: Etapas simplificadas de operação no ensaio de geração e absorção de um trem de ondas.

8.2 Algoritmo de controle

A altura da onda medida pelo sensor é enviada para o computador que, por sua vez, calcula o valor do deslocamento a ser realizado pelo dispositivo absorvedor, para que a onda seja finalmente absorvida (vide ilustração 8.2). Portanto, deve haver uma forma de reconhecer o movimento da superfície da água descrito pelas

medidas feitas e prever o movimento a ser realizado pelo absorvedor. Esta é a tarefa destinada ao controlador, e será descrita a seguir.

Figura 8.2: Ilustração do processo idealizado do controle

Podem-se imaginar três diferentes estratégias para tratar tal problema. A primeira seria a linearização do sinal depois do filtro de ruídos (passa baixa), e o comando enviado ao absorvedor seria o oposto deste sinal - para gerar a interferência destrutiva - corrigido pelo ganho relativo à eficiência do atuador. A linearização seria feita trecho a trecho da série temporal, atualizando-se a cada nova entrada de dado. O diagrama 8.3 ilustra tal procedimento.

Figura 8.3: Diagrama ilustrativo - linearização do sinal

A limitação desta estratégia seria a extensão do trecho usado nos cálculos, que depende do comprimento de onda λ , dado que se o trecho da série temporal utilizado para o cálculo é muito curto, o resultado obtido provavelmente seria mais vulnerável às imperfeições do sinal (como ruídos de amplitude muito grande, por exemplo) e se o trecho é muito longo, a onda acaba sendo distorcida (“achatada”), com suas amplitudes máximas mais próximas da média. A figura 8.4 mostra tais efeitos. No gráfico superior, percebe-se o efeito do achatamento,

e no gráfico inferior, nota-se o efeito do ruído nos casos de trecho de histórico temporal contendo 3 e 30 pontos.

Figura 8.4: Efeitos do comprimento do trecho da série temporal

A segunda estratégia seria o tratamento dos dados no domínio da frequência, ou seja, aplicar a transformação de Fourier (que, na implementação numérica seria substituída pela FFT) para que se obtenham a frequência e fase principais da onda naquele trecho e finalmente calcular o movimento do atuador. Aqui, o assim chamado *weighting function method*, “método de função ponderadora” proposto por Takezawa (TAKEZAWA, 1970), foi testado.

Nesse método de previsão da onda, a altura da superfície d’água no ponto em que se encontra o atuador, dada a medida prévia na posição do sensor, é fornecida através da convolução entre a função da série temporal amostrada e a função ponderadora, esta dependente da distância entre o sensor e o atuador.

A altura da superfície da água estimada num ponto B , dada a medida prévia em A seria então dada por:

$$h_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hh}(\tau) \cdot h_A(t - \tau) \cdot d\tau \quad (8.1)$$

em que W_{hh} é a função ponderadora obtida a partir da resposta do sistema a um sinal de impulso:

$$W_{hAhB}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{hAhB}(i\omega) \cdot e^{i\omega\tau} \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\omega\tau - \frac{\omega^2 x}{g}\right) d\omega \equiv W_{hh}(\tau) \quad (8.2)$$

Após adquiridas a frequência e fase do trecho de série temporal em tratamento, ainda no domínio da frequência, é feita a convolução entre a função da série temporal e a função ponderadora que, neste caso, é a equação da perda de altura durante a propagação da onda entre as abscissas do sensor e do atuador:

$$W_{hh} = e^{-i\frac{\omega^2}{g}x} \quad (8.3)$$

Esta implementação é mais facilmente compreendida com o auxílio do esquema ilustrado na figura 8.5. A dificuldade encontrada aqui é que, sabendo-se que a análise no domínio da frequência para dados discretos em geral é uma ferramenta aplicada em análise posterior, dada a necessidade de se aplicar pelo menos duas vezes a FFT com diferentes frequências de aquisição para cada grupo de amostras¹ e uma IFFT, o processo pode se tornar lento demais para as necessidades da aplicação ainda nesta fase preliminar do projeto.

Figura 8.5: Esquema do processo implementado no domínio da frequência.

Ainda que a frequência tenha sido dada (a convolução foi implementada, por simplicidade de cálculo, aproveitando-se os dados transformados no domínio da frequência), a busca pelo valor máximo acarreta o mesmo problema de reconhe-

¹para se distinguir os picos reais dos originados pela característica discreta do sinal

cimento de picos.

Por último, inspirada na solução utilizada pelo *National Maritime Research Institute* (NMRI - Japão) (KOKUBUN, 2005), que trabalha com as variáveis de tempo e velocidade, a solução estudada que fornece melhores resultados para esta primeira etapa de implementação é a de cálculo de deslocamentos por aderência de curvas de funções pelo método dos mínimos quadrados, aplicada no domínio do tempo, ilustrada no diagrama da figura 8.6.

Figura 8.6: Método dos mínimos quadrados

Este método consiste num conceito simples de se minimizar a soma dos quadrados das distâncias entre os pontos das amostras e uma função pré definida, variando-se os seus parâmetros. Neste estudo, senóides e cossenóides são ajustadas aos dados, variando-se as amplitudes e fases, uma vez conhecida a frequência. A teoria mais detalhada a respeito desse método está descrita no anexo E.

O procedimento implementado no programa do controlador atua segundo as seguintes etapas:

- Filtra o ruído do sinal lido;
- Detecta o início do estado de regime;
- Prevê o instante da chegada da onda para determinar o início da atuação como absorvedor;
- Reconhece a onda (fase e amplitude por instantes);
- Calcula - baseando-se na curva de resposta em frequência do atuador - qual o *stroke* necessário por instante a ser realizado pelo absorvedor.

Assim que o programa do controlador é inicializado, o atuador é movido para a posição neutra, e lêem-se os parâmetros que serão utilizados nos cálculos: valor de frequência nominal da onda, posição do sensor com relação ao atuador do absorvedor, espessura da lâmina d'água, tamanho do *buffer* de dados, e o número mínimo de pontos com registro de variação da altura da linha d'água necessário para se considerar o estado de regime (por exemplo, se no intervalo de 10 amostras, a variação for ininterrupta, é registrado o estado de regime que a partir de então não se altera mais até o fim do ensaio).

Ainda nesta etapa, o ganho relativo à eficiência do atuador já é imediatamente calculado. O registrador binário de estado de regime (VERDADEIRO ou FALSO) é inicializado como FALSO, bem como o de variação da altura da água e do comando de finalização do programa ("ESC"). A variável de contagem é zerada. Em seguida, é iniciada a amostragem, que alimenta o programa a cada ciclo.

Nos primeiros ciclos, enquanto a condição de estado de regime ainda não foi registrada - ou seja, o programa ainda não reconhece que a altura da água no ponto do sensor variou e, portanto, julga que não existe uma onda no tanque -, é aplicado o filtro no *buffer* de valores anteriores atualizado com a medida recente, e é feita a avaliação desta.

O filtro aplicado é um filtro de média, calculado trecho a trecho com um número pt de pontos limitado e pequeno com relação à frequência de aquisição Fs por segundo $\left(\frac{pt}{Fs/s}\right) \ll 1$. Esse recurso é utilizado para que se possa aplicar o critério de detecção do estado de regime, que consiste em reconhecer a variação da altura da linha d'água com relação à sua posição inicial (sem ondas).

Tal detecção se dá a partir do momento em que o programa registra a variação do valor dessa cota por um tempo mínimo determinado manualmente pelo usuário. Se a discrepância de valores é maior do que a tolerância estipulada de acordo com a precisão do sensor, considera-se que a altura da linha d'água variou, e a variável de contagem é incrementada. Porém, se a variação não ocorreu, o contador é zerado e o ciclo recomeça a partir da amostragem, pois considera-se que provavelmente os valores anteriores de variação ou eram nulos, ou referiam-se a um ruído de sinal que o filtro não retirou.

Se, com o incremento na contagem de pontos, ainda não foi atingido o número mínimo para que se considere o estado de regime, uma nova amostragem é feita, até que tal evento ocorra. Caso contrário, este é alterado para o valor "VERDADEIRO", e o programa passará dali em diante a operar como absorvedor.

Uma vez calculado o tempo que a onda levará para atingir o batedor de ondas (a partir dos valores de distância entre o sensor e o atuador e da frequência da onda regular, além da quantidade de amostras com registro de variação que foram acumuladas até o registro da condição em regime), ao sinal enviado é inserido um atraso na forma de comandos de posição neutra, correspondente à espera pela chegada da onda no atuador.

Enquanto esses comandos de posição neutra ainda são enviados, os valores lidos nas amostragens posteriores ao reconhecimento do estado de regime passam a ser finalmente utilizadas nos cálculos de ajuste de funções e, obtidos os valores de *stroke* inicialmente calculados, adiciona-se o ganho da eficiência do atuador, e o oposto do valor (troca-se o sinal para que a interferência seja destrutiva) é enviado ao atuador. O processo é interrompido manualmente pelo comando “ESC” do usuário. Enquanto tal comando não é enviado, o controle é repetido a partir de uma nova amostragem. O fluxograma da figura 8.7 resume este algoritmo.

Figura 8.7: Fluxograma do algoritmo de controle

9 Testes e avaliação

9.1 Simulações

A seguir são apresentados diversos exemplos de simulação da absorção de ondas para diferentes frequências de $0,5Hz$ a $2,0Hz$, com alturas diferentes. Foi utilizado como sinal de entrada (onda incidente) um sinal gerado com ruídos. A distância entre o atuador e o sensor é de $0.8m$.

Cada ilustração apresenta um conjunto de três gráficos:

- O primeiro mostra o sinal de entrada justaposto ao seu sinal sem ruído;
- já o segundo apresenta a entrada e a saída do programa, ou seja, a onda incidente e o comando de absorção obtido na aplicação do algoritmo e,
- no último, é feita a sobreposição de ambas as curvas de onda: incidente e comando, para fins de comparação da aderência.

No terceiro gráfico, o sinal do comando é invertido e é descontado o atraso em tempo entre as curvas. O atraso varia a cada caso, pois dado que a distância entre a posição de medida e o atuador é fixa, o tempo despendido pela onda que passa pela primeira posição até atingir a segunda dependerá de sua celeridade, característica para cada frequência ($c = \frac{\omega}{k}$).

Os gráficos apresentam um bom funcionamento do algoritmo no que se refere ao reconhecimento da forma de onda, sendo capaz de reduzir a influência dos ruídos provenientes da aquisição de dados e ao mesmo tempo recuperar, juntamente com o formato, também as amplitudes da onda, sem causar “achatamentos”, conforme discutido no capítulo 8.2 sobre os algoritmos de controle.

Figura 9.1: Simulações numéricas da absorção - Altura da linha d'água x tempo, 0,5Hz e 0,8Hz.

Figura 9.2: Simulações numéricas da absorção - Altura da linha d'água x tempo, 1, 0Hz e 1, 4Hz.

Figura 9.3: Simulações numéricas da absorção - Altura da linha d'água x tempo, 1,6Hz e 2,0Hz.

9.2 Experimentos

Os ensaios foram realizados no tanque de ondas da *Yokohama National University*, de dimensões $L = 16,0m$, $B = 1,0m$, $H = 2,2m$ e lâmina d'água $1,5m$. Este tanque é equipado com um batedor de ondas simples cujo atuador é do tipo cunha.

A princípio, o algoritmo deveria ser testado no TPD I, com a aplicação num equipamento cujo atuador é do tipo placa basculante. Mas, como já esclarecido no capítulo 5.1, do encaminhamento do trabalho, tal aplicação não pôde ser executada. Porém, essa mudança não afeta o julgamento da eficácia do algoritmo a que esta etapa da pesquisa se destina, pois trata-se de verificar se o método e sua implementação respondem de maneira esperada às condições que lhe são apresentadas. Essas condições, por sua vez, não dependem do tipo de atuador. Além disso, as diferenças em cálculo do *stroke*, que são as principais características de cálculos que mudam de um tipo de atuador para o outro não são inclusas, dado que a implementação opera com valores de deslocamento do pistão, e não do atuador na linha d'água¹.

O teste consistiu em gerar ondas com esse batedor, e em seguida absorvê-las com o mesmo equipamento, quando estas retornam após refletirem no extremo oposto do tanque. Os gráficos 9.4 e 9.5 apresentam as séries temporais dos ensaios com um trem de onda de, respectivamente, 1,4Hz com 6cm de altura e 1,0Hz com 3,5cm de altura. Ambos os gráficos possuem marcações de cada evento do ensaio, cujas ilustrações constam no gráfico 9.4, conforme detalhamento a seguir:

- i Um trem de ondas é gerado numa das extremidades do tanque. O movimento do batedor de ondas é pausado manualmente.
- ii O trem de ondas se propaga em direção à parede do tanque oposta ao batedor, passando pelo sensor. Os dados do sinal registrado pelo sensor nesse momento não são utilizados no processo de absorção. Imediatamente após o término do registro da passagem da última perturbação pelo sensor, o batedor de ondas é reativado.
- iii Ao incidir na parede, o trem de ondas se reflete e retorna propagando-se em direção ao batedor.
- iv O sensor registra novamente a passagem do trem de ondas, agora no sentido oposto ao anterior, e esses dados são enviados para o programa onde os

---

¹vide último parágrafo do capítulo 7.2, da caracterização do absorvedor.

cálculos dos comandos para absorção começam a ser realizados.

- v No instante em que, segundo a previsão do programa, a primeira perturbação da onda atinge o atuador, este volta a se movimentar em antifase com a onda nele incidente, para absorvê-la por interferência destrutiva. Uma parte dela, assinalada no gráfico, é atenuada. Porém, não é obtida a absorção total.
- vi A parcela não absorvida (o trem de ondas incidentes secundárias) que saiu do batedor de ondas em direção à extremidade oposta do tanque, passa novamente pelo sensor. Como a informação a respeito do comprimento do trem de ondas não é dado de entrada, quando o trem de ondas incidentes secundárias passa pelo sensor, os dados então colhidos são enviados para o processamento do programa, como se fossem os da onda refletida.
- vii Os comandos de absorção referentes à onda incidente secundária são executados. O ensaio então é interrompido após alguns instantes.

Nos gráficos, as curvas na cor laranja (série temporal superior) representam a altura da linha d'água medida pelo sensor de tipo *servo needle*, posicionado a 0,8m de distância com relação ao ponto de encontro entre a face da cunha e a posição em que a linha d'água se encontra quando não há ondas no tanque. Já as curvas na cor azul (série temporal inferior) representam a posição da cunha ao longo do tempo. Os valores de posição da cunha foram colhidos diretamente do sensor de realimentação da posição do batedor de ondas.

Pode-se observar que as séries temporais mostram uma concordância de tempos entre os eventos de geração da onda e detecção desta pelo sensor (i),(ii), e (iv),(v) no caso do teste com frequência 1,4Hz. Tal concordância não é encontrada no caso 1,0Hz porque a sensibilidade do programa reconhece como início de onda perturbações acima de uma determinada altura limite. Como apenas o parâmetro de frequência é fornecido para o algoritmo de absorção, não há como se fazer um ajuste caso a caso para essa sensibilidade.

O tempo decorrido entre os eventos (vi), da influência da onda incidente secundária na medição feita pelo sensor, e (vii), que é a resposta do batedor a esse sinal não apresenta a concordância comentada anteriormente. De fato, como essa realimentação não é detectada pelo algoritmo, este trata o sinal recebido como na situação imediatamente anterior, isto é, esse intervalo de tempo entre (vi) e (vii) é menor que os anteriores por não ter sido feita nenhuma correção. Isso é mais facilmente reconhecido no caso 1,4Hz do que no 1,0Hz, pelo motivo

já descrito anteriormente, da sensibilidade do algoritmo no reconhecimento de uma onda.

Quando os trens de onda se encontram na posição em que está o sensor, por terem sentidos opostos de propagação, a soma delas ora resulta em uma amplitude inferior às amplitudes individuais, ora superior. Desta forma, a partir do início desse encontro, em (vi), a série temporal passa a apresentar “pulsações”.

Figura 9.4: Séries temporais: teste empírico do algoritmo, 1,4Hz, altura 6,0cm

Figura 9.5: Séries temporais: teste empírico do algoritmo, 1,0Hz, altura 3,5cm

9.3 Análise dos resultados

Como se pode observar nos gráficos de simulação numérica do capítulo 9.1 e nos de teste empírico do capítulo 9.2 dos testes experimentais, o algoritmo reconhece a forma de onda satisfatoriamente. O sinal adquirido com o sensor não apresenta ruídos excessivos, o que contribui para o bom desempenho do programa.

Foi constatada no teste experimental uma deficiência no conjunto de equipamento e *software* implementado, que no caso de não conseguir realizar a absorção total da onda imediatamente, isto é, no caso de ocorrer imprecisão ao sincronizar as fases das ondas, ou falha de adaptação entre a amplitude de movimento necessária para absorver a onda e a amplitude realizada (*stroke*), não se tem dispositivos que possibilitem um ajuste ou correção, ou forma de detectar o advento de uma nova componente na onda que está sendo medida.

Com o intuito de conferir se a causa do fenômeno observado no teste empírico realmente é a composição da onda refletida com a incidente secundária, foi feita uma simulação desse encontro, na tentativa de se obter algum perfil de sinal parecido com aquele encontrado na situação real. Para isso, utilizou-se a série temporal da primeira aquisição de sinais do trem de ondas, ou seja, o sinal do trem de ondas que se propaga pela primeira vez em direção à parede do tanque oposta à do batedor de ondas (o registro das ondas geradas). Com esses dados, e conhecendo a celeridade da onda e a frequência de aquisição, foi feita a simulação passo a passo da propagação de dois trens de onda em sentidos opostos, na qual o valor da altura de onda em cada instante foi colhida na posição do sensor. Os gráficos comparativos das duas simulações encontram-se nas figuras 9.6 e 9.7.

Conforme o padrão estabelecido na seção 9.2 dos experimentos, os marcadores nos gráficos representam: (ii) a detecção da onda pelo sensor, (iv) o momento a partir do qual o programa reconhece os dados colhidos pelo sensor como o início de um trem de ondas, e (vi) o registro de um sinal composto com a onda incidente secundária.

As figuras mostram que, realmente, a série temporal simulada se assemelha à real no trecho em que há a influência do trem de ondas incidentes secundárias, ou seja, pode-se assumir que a deficiência encontrada tem origem no não-reconhecimento desse evento. Portanto, além da melhora na eficiência da absorção (sincronizações melhores de fase, ajuste da eficiência do atuador, reconhecimento da frequência real da onda), que já era esperada necessária por se tratar de uma primeira volta na espiral de projeto, nota-se imprescindível também buscar

soluções que neutralizam tal fenômeno.

Figura 9.6: Séries temporais: simulação da realimentação de sinal, 1,4Hz, altura 6,0cm

Figura 9.7: Séries temporais: simulação da realimentação de sinal, 1,0Hz, altura 3,5cm

Parte VI

Finalização

10 Conclusão da pesquisa e comentários

10.1 Conclusão

Com base nos objetivos propostos, com este trabalho, foi obtido um equipamento que possibilita a implementação do sistema de gerador/absorvedor de ondas ativo no Tanque de Provas Didático I do PNV. São fornecidos também dados a respeito dos principais componentes envolvidos no sistema, os detalhes do procedimento do projeto do atuador tipo placa basculante, ea descrição de seu suporte.

É feita uma breve apresentação de alguns dos métodos de absorção, entre eles o algoritmo proposto para o reconhecimento da onda a ser absorvida, juntamente com seus testes em simulação numérica e experimentais.

Infelizmente não foi possível testar o conjunto como um todo no tanque do PNV, pois como já explicado no capítulo 5.1 (do encaminhamento do trabalho), o equipamento emprestado pela MOOG do Brasil Controles Ltda. já havia sido devolvido após a expiração do tempo de empréstimo de 5 meses. Os ensaios foram realizados no tanque de ondas didático da *Yokohama National University*, YNU.

O suporte do atuador construído permite posteriores alterações de altura do eixo de pivotamento para diferentes ensaios, e pode ser instalado em qualquer trecho do comprimento útil do tanque, pois é ajustável às pequenas variações de largura do tanque, espessura de suas paredes ou mesmo variações de altura do fundo do tanque. Além disso, a resposta em frequência desse atuador está de acordo com o comportamento esperado.

Os resultados das simulações numéricas mostram que o método proposto funciona bem para o reconhecimento da forma de onda. Ou seja, dada a movimentação da superfície d'água, o programa é capaz de reproduzi-la. No entanto, esta implementação inicial ainda se encontra atrelada à frequência nominal tanto para o cálculo da eficiência do atuador (o ganho atribuído ao sinal a ser enviado para a absorção) quanto para o cálculo do instante em que o atuador deve

começar a se movimentar.

Como se pode observar nos resultados apresentados na análise dos dados experimentais, a implementação desse algoritmo não é suficiente para que o ensaio forneça bons resultados, pois foi detectado o problema de “realimentação” do sinal nos valores lidos pelo sensor.

Isto significa que, se não é obtida uma absorção total, seja por erro na amplitude devido ao cálculo equivocado da eficiência, ou por erro de defasagem devido ao cálculo inadequado da velocidade de propagação do trem de ondas, a parcela da onda que não foi absorvida alcança o sensor novamente, como se tivesse sido gerada pelo absorvedor - ou refletido nele -, somando-se à parcela da onda a ser absorvida que se encontra naquela região.

A medição utilizada não distingue as alturas relativas à componente de onda incidente ou refletida (a medida feita é do valor pontual, e para o cálculo dessa separação seria necessária a aplicação de algum método que requer o uso de um sensor adicional, por exemplo, conforme descrito no item 2.2 da revisão bibliográfica). Desta forma o novo valor enviado para o algoritmo que controla o absorvedor é maior do que o da onda que ele realmente deveria absorver, devido a essa composição, resultando na amplificação dos distúrbios na água.

Um outro motivo que pode ocasionar a não-totalidade da absorção é a geração da onda em antifase com amplitude menor do que a necessária para neutralizar a incidente. O erro se dá pela imprecisão da frequência, ou seja, se a frequência real é diferente da nominal, o ganho aplicado ao sinal enviado ao atuador é inadequado.

A correção do cálculo da eficiência pode ser feita pela determinação de um valor mais preciso da frequência da onda, o que acarretaria no acréscimo de uma rotina no código do programa atual. Isso, porém, pode fazer com que o tempo de processamento aumente e não se adeque à rapidez necessária para a absorção.

Para se determinar o instante em que se deve iniciar a operação do absorvedor, é necessária uma calibração para cada frequência, ou seja, é preciso que se tenha uma função que exprima a relação entre a distância do sensor ao atuador e a frequência real da onda, pois nesse cálculo está sendo usado o valor nominal.

Uma alternativa que pode ser computacionalmente mais rápida do que a associação dessa rotina de reconhecimento de frequência ao método dos mínimos quadrados para esse fim é a aplicação do método de função ponderadora descrito no capítulo 8.2 sobre o algoritmo de controle.

Os cálculos, porém, deveriam ser realizados no domínio do tempo, de forma tal

que não seria necessário o processo redundante para prevenção do erro de *aliasing*, e que a própria obtenção dos valores do sinal de controle seria possível a partir desses mesmos cálculos, já que as integrais de convolução para a determinação das frequências e do *stroke* são similares.

Finalmente, conclui-se que este trabalho teve uma grande contribuição na realização de um segundo projeto, publicado em (MICHIMA, 2007), em que foram conseguidos maiores avanços nos resultados de absorção, graças à experiência e aos conhecimentos adquiridos com a conclusão da presente pesquisa.

10.2 Comentários e sugestões para trabalhos futuros

O sistema de absorção ativa de ondas exige muita precisão e rapidez nos cálculos e na execução, e é exatamente isso o que torna a implementação de um conceito tão simples (gerar uma onda que resulte uma interferência destrutiva na incidente) um processo extremamente trabalhoso. O outro fator complicante são também as diferentes velocidades de propagação de grupo para cada frequência das ondas de água, que faz com que cálculos especiais sejam requeridos para o seu reconhecimento.

Sugere-se para os trabalhos futuros que se aplique a ferramenta de reconhecimento de frequência da onda ou se implemente o método de função ponderadora no domínio do tempo.

A capacidade de reconhecer diversas frequências diferentes possibilitará também a absorção de ondas em situações mais complicadas, como por exemplo, ondas aleatórias, ou quando estiverem sendo feitos ensaios com modelos no tanque. As ondas que refletem no modelo e retornam ao absorvedor, ou mesmo ao gerador, têm frequências diferentes resultantes da resposta em frequência do modelo ensaiado, além da sua deformação devida à interação com as paredes do tanque.

Outra melhoria que se propõe para os trabalhos futuros é a utilização de um segundo sensor, que não foi possível neste trabalho por falta de disponibilidade. Conforme comentado nas *conclusões*, com a medição da altura da superfície d'água em dois pontos é possível identificarem-se a onda incidente e a refletida de forma a diminuir o problema da “realimentação” encontrado nos ensaios realizados no presente trabalho.

Estudos também podem ser feitos para a avaliação do efeito real da eficiência

do atuador na aplicação instantânea durante a absorção ativa, dado que o cálculo é feito trecho a trecho, porém atribuindo valores pontuais a cada amostragem. Pode-se fazer também, após a sua implementação, a comparação dos índices de reflexão da praia ativa com os da praia passiva, apresentados no capítulo 6.2, da caracterização dos equipamentos existentes.

Uma forma de se eliminar a necessidade da função de transferência de fase (pelas relações entre as velocidades de propagação e as frequências) seria utilizar um sensor solidário ao atuador. Porém deve-se contornar o fato de que as ondas evanescentes seriam medidas também pelo sensor, o que traria a necessidade de se adicionar um cálculo que desconta tal parcela do sinal.¹

O reposicionamento do sensor junto ao atuador do absorvedor de ondas pode diminuir o erro de defasagem, porém não necessariamente o elimina. Sendo assim, continua sendo importante estudar o fenômeno da “realimentação” da parcela não absorvida da onda na medida realizada pelo sensor.

Na impossibilidade de se utilizar um sensor solidário ao atuador, pode-se testar um posicionamento próximo a ele (praticamente encostado). Assim, assume-se numa primeira tentativa que, com um erro suficientemente pequeno o intervalo de tempo que o trem de ondas demora para encontrar o atuador após sua passagem pelo sensor será aproximadamente o mesmo para uma faixa pequena de frequências - como pode ser visto no gráfico da figura 10.1, para um exemplo de espessura de lâmina d’água $0,9m$. Esse teste não foi feito por limitações físicas no tanque de ondas usado para o ensaio, porém seria factível no Tanque de Provas Didático I do PNV.

Figura 10.1: Relação entre a celeridade da onda e sua frequência (espessura da lâmina d’água $0,9m$, distância $0,2m$).

¹Nessa montagem, é importante reduzir-se tanto quanto possível o “vazamento” de água entre as bordas laterais do atuador e a parede no caso do pistão e da placa basculante. O fluxo de água nessas posições apresenta velocidades com componentes na direção transversal do tanque (de uma parede lateral à outra), e que podem alterar o perfil da superfície da água na região dos sensores, distorcendo a informação a respeito da onda que se quer absorver.

Com relação aos componentes do sistema de absorção ativa, podem ser realizados ensaios para a verificação da resposta em frequência do atuador com seu eixo de pivotamento em outras posições.

Na implementação futura do absorvedor ativo de ondas no Tanque de Provas Didático I do PNV, ressalta-se que a(s) placa(s) de conversão A/D, D/A devem ser escolhidas levando-se em conta características que não foram discutidas neste trabalho, mas que são muito importantes para o bom funcionamento do absorvedor, como por exemplo a existência de um filtro de alta frequência na conversão do sinal do modo digital para o analógico, pois dependendo da frequência de aquisição, o conversor pode fazer a ligação entre os valores discretos de forma tal que a curva analógica apresente diversos degraus e o atuador se movimente com pequenos “trancos”, que podem eventualmente ser mal interpretados como falhas no programa do controlador.

Parte VII

Anexos

Anexo A – Séries temporais dos ensaios de eficiência do batedor tipo cunha

A seguir, são apresentadas as séries temporais medidas nas frequências 0,5Hz, 0,8Hz, 1,6Hz e 2,0Hz, referidas na subseção 6.2.1, da caracterização do batedor de ondas tipo cunha.

Figura A.1: Séries temporais do ensaio do batedor tipo cunha: coluna da esquerda: $0,5Hz$ coluna da direita: $0,8Hz$ (As séries superiores são referentes ao movimento do batedor, e as inferiores, à altura da superfície d'água).

Figura A.2: Séries temporais: idem para as frequências $1,6Hz$ e $2,0Hz$.

Anexo B – Séries temporais dos ensaios de índice de reflexão da praia passiva

A seguir podem ser observadas as séries temporais medidas nas frequências 0,8Hz, 1,2Hz 1,6Hz e 2,0Hz, referidas na subseção 6.2.2, da caracterização da praia passiva.

Figura B.1: Séries temporais do ensaio de reflexão com praia passiva: coluna da esquerda: 0,8 Hz coluna da direita: 1,2 Hz.

Figura B.2: Séries temporais: idem para as frequências $1,6Hz$ e $2,0Hz$. A série temporal da onda de $2,0Hz$ apresenta um salto em sua média a partir dos aproximadamente $42s$, devido a problemas no equipamento de aquisição. O gráfico foi mantido com seus valores inalterados, porém tal evento foi levado em conta no tratamento de dados.

Anexo C – Séries temporais dos ensaios de eficiência do batedor tipo placa basculante

A seguir encontram-se as séries temporais medidas nas frequências 0,5Hz, 0,8Hz, 1,6Hz e 2,0Hz, referidas na seção 7.2, da caracterização do batedor de ondas tipo placa basculante.

Figura C.1: Séries temporais do ensaio do batedor tipo placa basculante: coluna da esquerda: $0,5Hz$ coluna da direita: $0,8Hz$ (As séries superiores são referentes ao movimento do batedor, e as inferiores, à altura da superfície d'água).

Figura C.2: Séries temporais: idem para as frequências $1,6Hz$ e $2,0Hz$.

Anexo D – Suporte do servomotor da praia ativa

Fotos ilustrativas do suporte do absorvedor de ondas ativo (mais fotos podem ser encontradas em (MANIGLIA; PATARO, 2005)):

Figura D.1: Suporte do absorvedor: frente com atuador (dir.) e trás

Figura D.2: Suporte do absorvedor: lateral com sapatas (dir.) e detalhe da posição ajustável do suporte do pistão

Figura D.3: Suporte do absorvedor: detalhe da fixação na parede, externo (dir.) e interno

Anexo E – Método dos mínimos quadrados

O método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática em que, dada uma série de dados medidos, tenta-se achar uma função que a ela se adapta (a “*best fit*”). Esse método busca minimizar a soma dos quadrados das diferenças das ordenadas (chamadas resíduos) entre os pontos gerados pela função e os pontos correspondentes dos dados, e é uma técnica comumente usada em ajuste de curvas. A formulação é simples. Seja um conjunto de dados representados pelos pontos (x_i, y_i) com $i = 1, 2, \dots, n$. Quer-se encontrar a função X tal que

$$X(x_i) \approx y_i \quad (\text{E.1})$$

Numa forma mais geral, a função X pode ser uma combinação linear de funções de x , e esse modelo pode ser expresso como:

$$y(x) = \sum_{k=1}^M a_k X_k(x) \quad (\text{E.2})$$

E as funções de x estipuladas arbitrariamente $X_1(x), \dots, X_M(x)$ são então chamadas “funções de base”. No caso em que se quer obter uma função trigonométrica (seno, por exemplo), dada uma certa frequência, tem-se:

$$\begin{aligned} y(x) &= A \sin(\omega t + \phi) \\ &= A(\sin(\omega t) \cos(\phi) + \sin(\phi) \cos(\omega t)) \\ &= A \sin(\omega t) \cos(\phi) + A \sin(\phi) \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (\text{E.3})$$

Dado que ϕ é constante a princípio, e utilizando-se a variável temporal $x = \omega t$, pode-se reescrever a equação E.3 como sendo:

$$y(x) = a_1 \sin(x) + a_2 \cos(x) \quad (\text{E.4})$$

em que $a_1 = A \cos(\phi)$, $a_2 = A \sin(\phi)$ são os parâmetros que se quer encontrar e ϕ pode ser posteriormente recuperado fazendo-se

$$\tan(\phi) = \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{E.5})$$

Como $y(x)$ é uma função linear de a_k , pode-se determinar uma função de mérito

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k X_k(x_i)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (\text{E.6})$$

onde σ_i é a precisão da medida (desvio padrão) do i ésimo dado, supostamente conhecido. Se os erros de medida não são conhecidos, todos eles podem adotar o valor constante $\sigma = 1$. O objetivo então é encontrar os melhores valores para os parâmetros de forma a minimizar χ^2 . Seja V uma matriz cujos $N \times M$ componentes são construídos a partir das M funções de base calculadas nas N abscissas x_i , e dos N erros de medida σ_i , representados por

$$V_{ij} = \frac{X_j(x_i)}{\sigma_i} \quad (\text{E.7})$$

Note que geralmente V tem mais linhas que colunas, $N \geq M$, já que devem haver mais pontos coletados do que parâmetros do modelo a serem obtidos¹. Definem-se também o vetor b de comprimento N :

$$b_i = \frac{y_i}{\sigma_i} \quad (\text{E.8})$$

e o vetor a cujas componentes são os parâmetros a ser definidos $a_1, \dots, a_M$. O mínimo ocorre quando a derivada de χ^2 da equação E.6 com relação a todos os M parâmetros A_k tornam-se nulos:

$$0 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma^2} \left[y_i - \sum_{j=1}^M a_j X_j(x_i) \right] X_k(x_i) \quad k = 1, \dots, M \quad (\text{E.9})$$

Invertendo a ordem dos somatórios, pode-se reescrever E.9 como uma equação

---

¹isso porque há a imprecisão das medidas. Por exemplo, é possível ajustar uma reta a dois pontos apenas da amostra, mas a probabilidade de ela não ser a representação real da função que definiria o conjunto é maior do que, por exemplo, com três ou mais pontos

matricial

$$\alpha_{kj}a_j = \beta_k \quad (\text{E.10})$$

sendo α_{kj} uma matriz $M \times M$

$$\alpha_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{X_j(x_i)X_k(x_i)}{\sigma_i^2} \quad (\text{E.11})$$

ou, em outra notação,

$$[\alpha] = V^T \cdot V \quad (\text{E.12})$$

e β_k

$$\beta_k = \sum_{i=1}^N \frac{y_i X_k(x_i)}{\sigma_i^2} \quad (\text{E.13})$$

equivalente a

$$[\beta] = V^T \cdot b. \quad (\text{E.14})$$

As equações E.9 e E.10 são chamadas “equações normais” do método dos mínimos quadrados. Há várias técnicas diferentes disponíveis para obter-se esse mínimo, como por exemplo a eliminação de Gauss-Jordan, as decomposições de Cholesky e em valores singulares.

O método de eliminação de Gauss-Jordan, porém, é altamente suscetível a erros de arredondamento e com a decomposição de Cholesky, embora pareça ser o modo mais eficiente de resolver essas equações, perde-se muito tempo de processamento para formar as equações a partir dos dados.

Além disso, em grande parte dos casos de problemas de ajuste por mínimos quadrados as equações são muito próximas de singulares, ou seja, um pivô nulo pode ser encontrado durante a solução das equações lineares, caso no qual possivelmente não se obtém nenhuma solução, ou então pode ocorrer um pivô muito pequeno que tendencia os valores dos parâmetros ajustados a magnitudes muito grandes que acabam por distorcer o resultado.

Isso ocorre porque freqüentemente os dados não permitem uma distinção clara entre duas ou mais das funções de base disponíveis. Em casos como esse,

se duas dessas funções ou em duas diferentes combinações de funções, o “nível de aderência” eventualmente for igual, a matriz $[\alpha]$, incapaz de escolher entre elas, por essa ambigüidade, torna-se singular.

A decomposição em valores singulares² é uma ferramenta cuja característica principal é exatamente produzir uma solução que é a menor aproximação sob o ponto de vista dos mínimos quadrados, ou seja, no caso de um sistema subdeterminado (em que há combinações ambíguas de parâmetros), quando alguma combinação de funções de base é irrelevante ao ajuste, tal combinação recebe um coeficiente ponderador pequeno (praticamente desprezível).

---

²Suponha M uma matriz $m \times n$ cujos elementos são do campo K que pode ser tanto dos números reais quanto complexos. Então, existe uma fatoração da forma

$$M = U \Sigma V^* \quad (\text{E.15})$$

onde U é uma matriz unitária $m \times m$ em K , a matriz Σ é $m \times n$ com elementos não-negativos na diagonal e zeros fora da diagonal, e V^* é o conjugado transposto de V . V é uma matriz $n \times n$ unitária em K . Tal fatoração é chamada “decomposição em valores singulares de M ”. A matriz V portanto contém um conjunto “de entradas” de vetores que compõem uma base de M , U contém um conjunto “de saídas” de vetores que compõem outra base de M , e finalmente a matriz Σ contém os valores singulares, que podem ser interpretados como “ganhos de controle” escalares, através dos quais cada entrada correspondente é multiplicada para fornecer a saída a ela associada.

Geometricamente falando, o teorema dos valores singulares pode ser resumido da seguinte forma: para cada mapa $T: K^n \rightarrow K^m$, pode-se encontrar bases ortonormais de K^n e K^m tais que T mapeia a i -ésima base de vetores de K^n para um múltiplo não-negativo da i -ésima base de vetores de K^m , e leva os vetores excedentes a zero. Com respeito a essas bases, o mapa T é então representado por uma matriz diagonal de elementos reais não negativos.

Parte VIII

Referências bibliográficas

Referências

- BENOIT, M. Quelques aspects du développement d'un bassin numérique à houle multidirectionnelle. *Proc. 5th Journées de l'Hydrodynamique*, 1995.
- BHATTACHARYYA, R. *Dynamics of marine vehicles*. [S.l.]: John Willey & Sons, 1978.
- BOUDET, L.; PEROIS, J. New control techniques of a segmented wavemaker for oblique wave generation. *8th Journées de L'Hydrodynamique*, 2001.
- BULLOCK, G. N.; MURTON, G. J. Performance of a wedge-type absorbing wavemaker. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1989.
- BURCHARTH, H. F. The design of breakwater. *Department of Civil Engineering, Aalborg University*, 1993.
- BURCHARTH, H. F.; NIELSEN, S. R. K.; SCHAARUP-JENS, K. A three dimensional sea facility for deep and shallow water waves. *Proc. Int. Symp. On Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1986.
- CHAKRABARTI, S. K. *Offshore structure modeling*. [S.l.], 1994.
- COOPER, R. I. B.; LONGUET-HIGGINS, M. S. An experimental study of the pressure variations in standing water waves. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1951.
- D'ARCANGELO, A. M. Canales hidrodinamicos navales: Tendencias de la decada del 70. *II Congresso del mar*, 1978.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. second. Singapore: World Scientific, 1991. 353 pp.
- DENIS, W. J. S.; PIERSON, J. R. On the motions of ships in confused seas. *Trans. Soc. Naval Architects and Marine Engineers*, 1953.
- FUNKE, E.; MILES, M. Multidirectional wave generation with corner reflectors. *Technical Report of the Div. of Mech. Eng., National Research Council of Canada*, 1987.
- GILBERT, G.; HUNTINGTON, S. A technique for the generation of short crested waves in wave basins. *Journal of Hydro-environment Research*, 1991.
- GODA, Y. *Random seas and design of marine structures*. [S.l.]: University of Tokyo Press, 1985. 323 p.
- HAVELOCK, T. H. Forced surface-waves on water. *Philosophical Magazine Letters*, S.7 vol. 8, n. 51, p. 569–576, 1929.

- HIRAYAMA, T. Modelling of multidirectional waves in naval architectural field. *Proc. IAHR-Seminar: Multidirectional Waves and their Interaction with Structures*, 1997.
- ISAACSON, M. Measurement of regular wave reflection. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 117, n. 6, p. 553–569, 1991.
- KINSMAN, B. *Wind waves*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1965. 676 p. Reprinted by Dover Phoenix editions, Mineola, N. Y.
- KOKUBUN, K. Comunicação pessoal. *NMRI*, 2005.
- MAEDA, K.; HOSOTANI, N.; TAMURA, K.; ANDO, H. Wave making properties of circular basin. *International Symposium on Underwater Technology*, 2004.
- MANIGLIA, B.; PATARO, L. *Controle de praia ativa para amortecimento de ondas em tanque de provas*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2005.
- MANSARD, E. P. D.; FUNKE, E. R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 17th Int. Conf. Coastal Eng.*, 1980.
- MARÓN, A. Optimization of wave generation for seakeeping tests. *Int. Workshop on Natural Disaster by Storm Waves and Their Reproduction in Experimental Basin*, 1999.
- MICHIMA, P. *Considerations and experiments for realizing more simple active wave absorber*. Dissertação (Mestrado) — Graduate School of Yokohama National University, Yokohama, Japão, 2007.
- MILES, J. Symmetries of internally resonant, parametrically excited surface waves. *Physical Review Letters*, American Physical Society, v. 63, n. 13, p. 1436, Sep 1989.
- MURRAY, J.; FUDGE, G. Construction and commissioning of the offshore engineering and seakeeping basin at the institute for marine dynamics. *22nd American Towing Tank Conference*, 1989.
- NAITO, S. Wave generation and absorption - theory and application. *Proc. 16th International Offshore and Polar Engineering Conf.*, 2006.
- NAITO, S.; MINOURA, M.; SAKASHITA, H.; TANAKA, K. A new concept of wave making basin. *Proc. RealSea 98*, 1998.
- NAITO, S.; MINOURA, M.; SAKASHITA, H.; TANAKA, K. An evaluation of performance of new wave making basin. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 1999.
- PRIESTLEY, M. B. *Spectral analysis and time series*. London: Academic Press, 1981. 890 p.
- SARPKAYA, T.; ISAACSON, M. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. [S.l.], 1981.

- SHÄFFER, H. A.; KLOPMAN, G. Review of multidirectional active wave absorption methods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 126(2), p. 88–97, 2000.
- SOUZA, C. de. *Implantação e análise de desempenho de um gerador de ondas tipo placa basculante*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2002.
- SWAMP Group. *Ocean wave modelling*. New York: Plenum Press, 1984.
- TAKEZAWA, S. On testing a ship model in transient water waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1970.
- TAKEZAWA, S.; HIRAYAMA, T.; MIYAKAWA, K.; TAKAYAMA, T. The directional spectrum water wave generator for towing tanks. *J. The Kansai Society of Naval Architects. Japan*, 1988.
- THORNTON, E. B.; CALHOUN, R. J. Spectral resolution of breakwater reflected waves. *J. Waterways, Harbour Coastal Eng.*, 1972.
- URSELL, F.; DEAN, R.; YU, Y. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 7, p. 33–52, 1960.
- WEHAUSEN, J. V.; LAITONE, E. V. Surface waves. In: FLÜGGE, S. (Ed.). *Encyclopedia of physics*. Springer-Verlag, 1960. IX, cap. VII, p. 446–815. Disponível em: <<http://www.coe.berkeley.edu/SurfaceWaves/>>.
- WHITHAM, G. B. *Linear and nonlinear waves*. New York: Wiley, 1974. 636 p.
- YOUNG, I. R. *Wind generated ocean waves*. Oxford: Elsevier Science, 1999. 288 p.
- ZHU, S. Separation of regular waves by a transfer function method. *Ocean Engineering*, v. 26, p. 1435–1446(12), 1999.

Parte IX

Apêndices

Apêndice A – Ortogonalidade das funções

Este apêndice apresenta o desenvolvimento matemático que mostra a ortogonalidade das parcelas referenciadas da equação 7.6 na qual se baseia a obtenção de 7.6 no capítulo 7.1.2, da função de transferência da placa basculante.

Duas funções $f(x)$ e $g(x)$ são ditas ortogonais em um intervalo $a \leq x \leq b$ com uma função ponderadora $w(x)$ se

$$(f(x) | g(x)) \equiv \int_a^b f(x)g(x)w(x)dx = 0. \quad (\text{A.1})$$

No caso da equação 7.6, $f(x)$ e $g(x)$ seriam $\cosh[k_p(h+z)]$ e $\cos[k_s(n)(h+z)]$, ou vice-versa, onde os outros termos multiplicadores corresponderiam a $w(x)$. No caso da eq.(A.2) de (7.6), tem-se (um procedimento análogo pode ser usado para o caso das equações referentes à obtenção de C_n):

$$\int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz \quad (\text{A.2})$$

que são nulas para cada valor de n , como segue:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz &= \\ &= [\sin[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)]]|_{z=-h}^0 + \\ &- \int_{-h}^0 k_p \sin[k_s(n)(h+z)] \sinh[k_p(h+z)] dz \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz &= \\ &= \sin[k_s(n)h] \cosh[k_ph] + \\ &- \int_{-h}^0 k_p \sin[k_s(n)(h+z)] \sinh[k_p(h+z)] dz \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

novamente, por partes:

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ & = \sin[k_s(n)h] \cosh[k_ph] - k_p \left[\frac{-\cos[k_s(n)(h+z)]}{k_s(n)} \sinh[k_p(h+z)] \right] \Big|_{z=-h}^0 \quad (A.5) \\ & \quad + \frac{k_p}{k_s(n)} \int_{-h}^0 -k_p \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ & = \sin[k_s(n)h] \cosh[k_ph] + \frac{k_p}{k_s(n)} \cos[k_s(n)h] \sinh[k_ph] \quad + \quad (A.6) \\ & \quad - \frac{k_p^2}{k_s(n)} \int_{-h}^0 \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz \end{aligned}$$

O terceiro termo do segundo membro é subtraído da equação:

$$\begin{aligned} & \left(k_s(n) + \frac{k_p^2}{k_s(n)} \right) \int_{-h}^0 \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ & = \sin[k_s(n)h] \cosh[k_ph] + \frac{k_p}{k_s(n)} \cos[k_s(n)h] \sinh[k_ph] \quad (A.7) \end{aligned}$$

da relação $\frac{\omega^2}{g} = k_p \tanh[k_ph] = -k_s(n) \tan[k_sh]$, tem-se:

$$\frac{k_p}{k_s(n)} = -\frac{\tan[k_sh]}{\tanh[k_ph]} = -\frac{\cosh[k_ph] \sin[k_sh]}{\sinh[k_ph] \cos[k_sh]} \quad (A.8)$$

substituindo em A.7:

$$\begin{aligned} & \left(k_s(n) + \frac{k_p^2}{k_s(n)} \right) \int_{-h}^0 \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ & = \sin[k_s(n)h] \cosh[k_ph] - \frac{\cosh[k_ph] \sin[k_sh]}{\sinh[k_ph] \cos[k_sh]} \cos[k_s(n)h] \sinh[k_ph] \quad (A.9) \end{aligned}$$

como $\left(k_s(n) + \frac{k_p^2}{k_s(n)}\right) \neq 0$, então:

$$\int_{-h}^0 k_s(n) \cos[k_s(n)(h+z)] \cosh[k_p(h+z)] dz = 0 \quad (\text{A.10})$$

Apêndice B – Cálculo das integrais para a obtenção do coeficiente A_p

Os cálculos das integrais indicadas na equação 7.6 no capítulo 7.1.2, da função de transferência da placa basculante, são mostrados a seguir.

A equação 7.6 do coeficiente A_p possui duas integrais cada:

$$\int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h+z)] dz \quad (\text{B.1})$$

$$\int_{-h}^0 \cosh^2[k_p(h+z)] dz \quad (\text{B.2})$$

Aplicando-se à integral B.1 a função $s(z)$ apresentada em 7.1, tem-se:

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ &= \int_{-h}^{-h+\delta h} 0 dz + \int_{-h+\delta h}^0 S \left(1 + \frac{z}{(h-\delta h)} \right) \cosh[k_p(h+z)] dz \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

$$= S \int_{-h+\delta h}^0 \cosh[k_p(h+z)] dz + \frac{S}{(h-\delta h)} \int_{-h+\delta h}^0 z \cosh[k_p(h+z)] dz \quad (\text{B.4})$$

em que

$$\begin{aligned} \int_{-h+\delta h}^0 \cosh[k_p(h+z)] dz &= \left[\frac{\sinh[k_p(h+z)]}{k_p} \right]_{z=-h+\delta h}^0 = \\ &= \frac{\sinh[k_p h] - \sinh[k_p \delta h]}{k_p} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

e por partes:

$$\begin{aligned} & \int_{-h+\delta h}^0 z \cosh[k_p(h+z)] dz = \\ &= \left[\frac{z \sinh[k_p(h+z)]}{k_p} \right]_{z=-h+\delta h}^0 - \int_{-h+\delta h}^0 \frac{\sinh[k_p(h+z)]}{k_p} dz \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(h - \delta h) \sinh[k_p \delta h]}{k_p} + \frac{1}{k_p} \left[\frac{\cosh[k_p(h + z)]}{k_p} \right] \Big|_{z=-h+\delta h}^0 \\
 &= \frac{(h - \delta h) \sinh[k_p \delta h]}{k_p} + \frac{\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h]}{k_p^2} \\
 &= \frac{k_p(h - \delta h) \sinh[k_p \delta h] + \cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h]}{k_p^2} \tag{B.7}
 \end{aligned}$$

e, portanto, chega-se ao valor de B.1:

$$\int_{-h}^0 s(z) \cosh[k_p(h + z)] dz = \frac{S}{k_p} \left[\sinh[k_p h] + \frac{\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h]}{k_p(h - \delta h)} \right] \tag{B.8}$$

A integral B.2 é calculada aplicando-se a transformação $\cosh^2(a) = \frac{\cosh(2a)+1}{2}$:

$$\begin{aligned}
 &\int_{-h}^0 \cosh^2[k_p(h + z)] dz = \\
 &= \frac{1}{2} \int_{-h}^0 (\cosh[2k_p(h + z)] + 1) dz \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh[2k_p(h + z)]}{2k_p} \right] \Big|_{z=-h}^0 + \frac{z}{2} \Big|_{z=-h}^0 \\
 &\int_{-h}^0 \cosh^2[k_p(h + z)] dz = \frac{1}{2} \left(\frac{\sinh[2k_p h]}{2k_p} + h \right) \tag{B.9}
 \end{aligned}$$

Finalmente, substituindo-se B.8 e B.9 em 7.6:

$$A_p = \frac{-2\omega S}{\sinh[2k_p h] + 2k_p h} \left[\sinh[k_p h] + \frac{(\cosh[k_p h] - \cosh[k_p \delta h])}{k_p(h - \delta h)} \right] \tag{B.10}$$