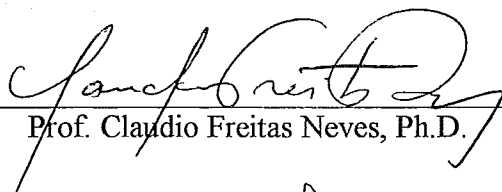


AMORTECIMENTO DE ONDAS GRAVITACIONAIS POR CAMPOS DE
VEGETAÇÃO SIMULADOS POR ELEMENTOS DE GRANDE FLEXIBILIDADE

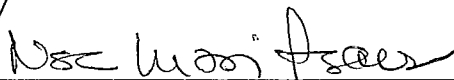
Sávio Freire Lima

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

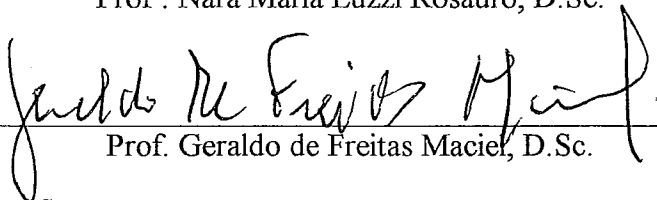
Aprovada por:



Prof. Claudio Freitas Neves, Ph.D.



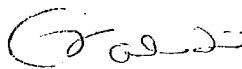
Prof.^a Nara Maria Luzzi Rosau, D.Sc.



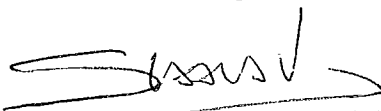
Prof. Geraldo de Freitas Maciel, D.Sc.



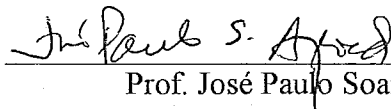
Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.



Prof.^a Enise Maria Salgado Valentini, D.Sc.



Prof.^a Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.



Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2005

LIMA, SÁVIO FREIRE

Amortecimento de ondas gravitacionais por campos de vegetação simulados por elementos de grande flexibilidade [Rio de Janeiro] 2005

IX, 114 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2005).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Amortecimento de ondas de gravidade
2. Vegetação aquática 3. Proteção de margens

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Esta tese é dedicada a minha família

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração deste trabalho, muitas foram as pessoas que contribuíram não só para o desenvolvimento da pesquisa, mas também do pesquisador. Gostaria de dedicar mais do que estas poucas palavras a todos vocês, começando pelo meu orientador, professor Claudio Freitas Neves, que em todos os momentos esteve presente ajudando a dar os passos certos nos momentos mais incertos. À minha co-orientadora, Professora Nara Maria Luzzi Rosauo, que, mesmo em Porto Alegre, esteve sempre presente nas discussões fornecendo apoio e orientação para o trabalho. Ao professor Geraldo Freitas Maciel por sua constante atuação crítica, que tanto contribuiu nos rumos da pesquisa. Ao professor Paulo Kroeff pela participação nas questões experimentais e pelas tantas conversas que se desenrolaram ao longo das missões de trabalho.

Aos professores Paulo César Rosman, Susana Vinzon, Carlos Eduardo Parente, Enise Valentini e demais docentes do Programa de Engenharia Oceânica pelo conhecimento e experiência transmitidos e por todo o apoio à esta pesquisa. À minha querida mestra, Professora Maria Helena Silveira, que me fez olhar a educação por um enfoque mais humano. Ao professor George Satander, pela motivação à carreira acadêmica. Aos meus amigos de curso Rodrigo Campos de Andrade, Marcelo Montenegro Cabral, Renato Feitosa, Maximiliano Strasser, Marcos Gallo, Mariela Gabioux, Maria Francisca do Nascimento e ainda ao Joel Roberto G. Vasco. Aos demais funcionários e amigos da COPPE, em particular a Webber Zopellari, grande companheiro para discussões a respeito dos mais variados assuntos, inclusive da tese. À Marise, que sempre me ajudou nas horas mais difíceis. À Glace. Aos técnicos Luiz Antônio e Assis, pelo apoio fornecido durante a preparação e execução dos experimentos.

Ao Instituto de Pesquisas Hidroviárias/INPH, pelo apoio, não só material, mas principalmente técnico. Em particular aos engenheiros Paulo Cesar Freire e Ricardo Sampaio, e aos funcionários Orlando e Eudes. A Moacir de Paula do núcleo de multimídia do NCE/UFRJ, que tanto me ajudou na aquisição e tratamento de imagens.

Aos companheiros Carlos Henrique, Pedro Cardozo, Carlos Marley, Emilio Cesar, Daniel Bonavides, Adailson Souza e tantos outros que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho. À Isabel, pelo companheirismo, senso crítico e apoio que encontrei além do desenvolvimento acadêmico.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto PROCAD 0144/01 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES que envolve a COPPE/UFRJ, a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS. Desta forma, gostaria de expressar meu agradecimento à CAPES por investir em um conceito de educação onde as oportunidades de intercâmbio de pessoal e de material só vem a beneficiar o aluno, possibilitando uma formação mais completa e compatível com as necessidades da sociedade.

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

AMORTECIMENTO DE ONDAS GRAVITACIONAIS POR CAMPOS DE VEGETAÇÃO SIMULADOS POR ELEMENTOS DE GRANDE FLEXIBILIDADE

Sávio Freire Lima

Junho/2005

Orientadores: Claudio Freitas Neves

Nara Maria Luzzi Rosauro

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho propõe uma abordagem para a determinação do amortecimento de ondas de gravidade propagando-se sobre campos de vegetação. As simplificações implícitas nos modelos existentes restringem sua aplicação para espécies de grande flexibilidade. Deste modo, propõe-se um modelo empírico dependente de um único parâmetro, o coeficiente de arraste, para estimar a força média exercida pela coluna d'água sobre uma haste em um período de onda. Uma técnica de medição indireta por meio de filmagem foi desenvolvida particularmente para o procedimento de calibração do modelo. Ensaio de laboratório forneceram resultados para diferentes características de onda e haste, sendo esta última fabricada com material sintético. As informações obtidas com o modelo calibrado geraram uma expressão que relaciona a força média exercida pelo fluido com parâmetros adimensionais do escoamento e da haste. A inserção desta expressão nas equações do movimento como um termo de resistência possibilitou a determinação do decaimento da altura da onda ao longo de um campo de hastes e apontou para a importância da interação entre as mesmas no amortecimento total.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DAMPING OF GRAVITATIONAL WAVES BY FIELDS OF VEGETATION
SIMULATED BY HIGHLY FLEXIBLE ELEMENTS

Sávio Freire Lima

June/2005

Advisors: Cláudio Freitas Neves

Nara Maria Luzzi Rosauero

Department: Ocean Engineering

This work suggests an alternative approach to obtain the damping of gravity waves propagating over fields of vegetation. Assumptions made on existing models limits its validity when studding highly flexible species. An empirical model based on a single parameter, the drag coefficient, is proposed to obtain the mean force exerted by the water column over one stem during a wave period. An indirect video measuring technique was developed to calibrate the model. Wave flume experiments generated results for a group of waves and artificial stem characteristics. Information obtained with calibrated model generated an expression relating mean force exerted by the fluid to non-dimensional parameters of the flow and the stem. The use of this expression as a resistance term on the momentum equations made possible the determination of the rate of decay of the wave amplitude through a field of stems and pointed out the importance of stem interaction on the total damping.

ÍNDICE

CAPÍTULO

1 Introdução.....01

2 Colocação do problema..... 05

 2.1 Estudos de caso..... 05

 2.2 Desenvolvimentos teóricos..... 06

 2.3 Abordagem local..... 14

3 Amortecimento de ondas por elementos de grande flexibilidade.....17

 3.1 Modelo de campo..... 17

 3.2 Termo de resistência do campo.....19

 3.3 Resistência de uma haste.....20

 3.3.1 Concepção do modelo mecânico..... 22

 3.3.2 Balanço das forças atuantes em cada nó..... 23

 3.3.3 Considerações sobre os tipos de nós.....24

 3.3.4 Modelagem da força exercida pelo escoamento..... 26

 3.3.5 Teoria de onda utilizada.....27

 3.4 Fechamento do problema..... 28

4 Procedimentos experimentais..... 30

 4.1 Medições do comportamento de uma haste..... 32

 4.1.1 Obtenção do histórico de posições.....32

 4.1.2 Correção das distorções ópticas..... 33

 4.1.3 Ensaios..... 39

 4.2 Medições com campo de hastes.....40

 4.2.1 Medição de altura das ondas.....43

 4.2.2 Medição de velocidade..... 47

 4.2.3 Procedimento laboratorial.....49

5 Resultados e discussão.....51

 5.1 Comportamento de uma haste..... 51

 5.1.1 Critérios de ajuste do modelo..... 52

 5.1.2 Coeficiente de arraste.....56

 5.1.3 Processamento das informações geradas pelo modelo..... 58

 5.1.4 Determinação da função para representar $\overline{F}_x'$ 60

5.2	Comportamento do campo de hastes.....	63
5.2.1	Quantificação da interação entre hastes.....	65
5.2.2	Determinação de uma expressão para α	66
5.2.3	Considerações a respeito das medições de velocidades.....	67
5.3	Modelo de amortecimento.....	69
6	Conclusões e recomendações.....	72
APÊNDICE		
A	Relato fotográfico dos experimentos realizados em Ilha Solteira.....	74
B	Modelo mecânico para uma haste.....	80
C	Comparação entre os resultados medidos e os gerados pelo modelo calibrado.....	87
D	Estimativa da força exercida sobre uma haste.....	100
E	Amortecimento de onda ao longo do campo de hastes.....	105
REFERÊNCIAS.....		112

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A literatura aponta para vários casos onde o desenvolvimento de campos de vegetação aquática modifica padrões de escoamento, amortece ondas, favorece a deposição de sedimentos e nutrientes e fornece abrigo para diferentes espécies animais. No caso específico do Brasil, os reservatórios e hidrovias interiores possuem uma grande variedade de macrófitas aquáticas adaptadas aos mais diversos ambientes. Em tais localidades, é fácil observar que, nas margens onde se desenvolve vegetação aquática, as evidências de erosão ocasionada por ondas, como desbarrancamentos e formação de falésias, são mínimas se comparadas com as margens desmatadas.

Tal constatação motivou uma análise mais aprofundada deste processo natural de proteção. Em junho de 2003, dentro do projeto “Amigos de Boussinesq – Rede Cooperativa de Pesquisa sobre Hidrodinâmica Costeira de Águas Rasas” (CAPES/PROCAD 0144/01-0) que envolve a COPPE/UFRJ, a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, uma campanha experimental foi conduzida com o intuito de quantificar o amortecimento e gerar subsídios para o desenvolvimento de um estudo mais aprofundado sobre o fenômeno.

Sondas de nível foram instaladas em dois pontos específicos do reservatório de Ilha Solteira, próximos à margem oeste onde se localiza a Fazenda Experimental da UNESP. O primeiro deles (P1), situado a 100 m da margem a 4 m de profundidade, serviu de referência para identificação das ondas incidentes, enquanto que o segundo (P2) consistiu em uma clareira de 1 m² situada no interior de um campo de vegetação da espécie *Brachiaria subquadrípara* com cerca de 1.800 m² de área. A abertura no campo foi feita 13 m para dentro do seu limite externo, a uma lâmina d’água de 1 metro. A Figura 1.1 ilustra o arranjo final montado para medição. No Apêndice A é apresentado um relato fotográfico da campanha experimental empreendida.

A intensidade dos ventos locais aliada à extensão do espelho d’água acarreta a geração de ondas expressivas na margem oeste do reservatório (LIMA *et al.*, 2003). Medições realizadas durante a incidência de fortes ventos no dia 31 de junho daquele

ano, indicaram que ondas com período médio de 2,5 s e altura da ordem de 0,5 m registradas no primeiro ponto atingiam o ponto interno ao campo com alturas aproximadamente 10 vezes menores.

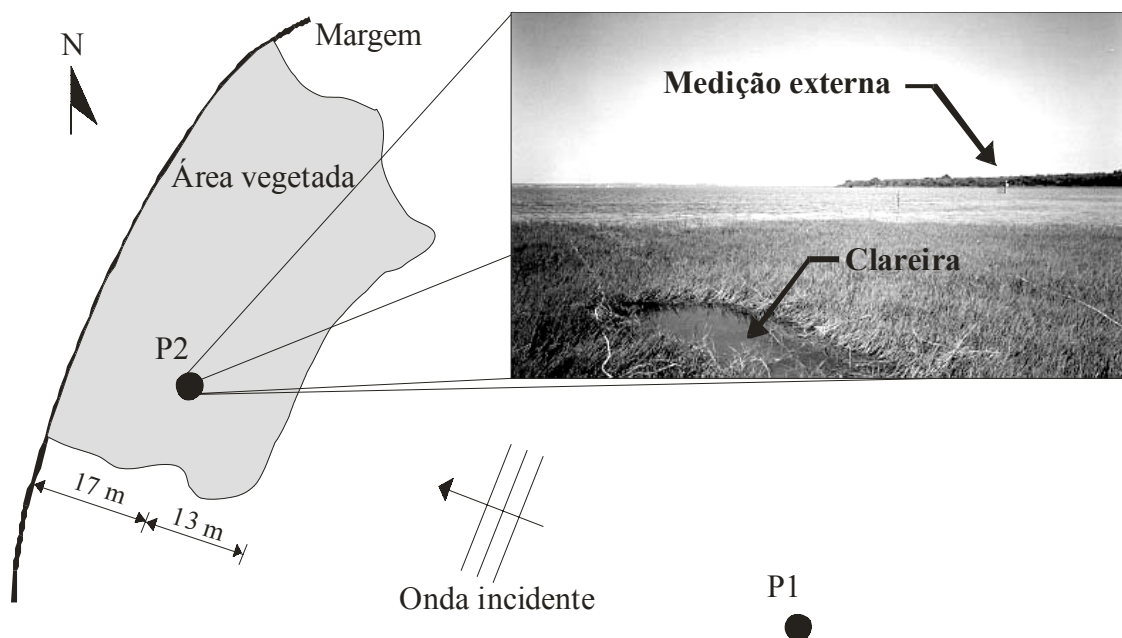


Figura 1.1 – Visão em planta do arranjo experimental com dois pontos de medição de ondas. O detalhe mostra a clareira aberta no campo de vegetação para colocação dos instrumentos.

A *Brachiária subquadrípara* é uma espécie esbelta, enraizada no fundo e possui uma haste de grande flexibilidade. A sua ocorrência é registrada em grande parte dos reservatórios nacionais perfazendo extensos campos, onde o conjunto de hastes fornece abrigo natural para diversas espécies peixes. Embora a presença de uma camada lamosa no fundo, o desenvolvimento de outras espécies de maior biomassa em alguns pontos do campo e a retenção de organismos mortos pelos tramos de hastes possam ter influenciado na taxa de amortecimento, ainda assim o valor registrado é muito significativo, correspondendo a um amortecimento da ordem de 90% em menos de dois comprimentos de onda.

A observação *in loco* revelou que a morfologia do campo é variável com a profundidade. Para lâminas d'água compreendidas entre 1,5 m a 1 m, os indivíduos apresentam um comprimento de haste praticamente igual à profundidade, dispendo-se verticalmente para possibilitar que suas folhas permaneçam emersas. Nesta região, a troca de quantidade de movimento entre o fluido e as hastes parece ser o principal mecanismo de amortecimento de ondas. Em áreas de menor profundidade, próximas à margem, a lâmina d'água tende a ser menor que o comprimento das hastes, acarretando

o entrelaçamento dos indivíduos. Neste ponto, a ação conjunta das hastes sugere um meio poroso de grande resistência ao escoamento. A Figura 1.2 ilustra a descrição apresentada para as diferentes configurações de nível d'água.

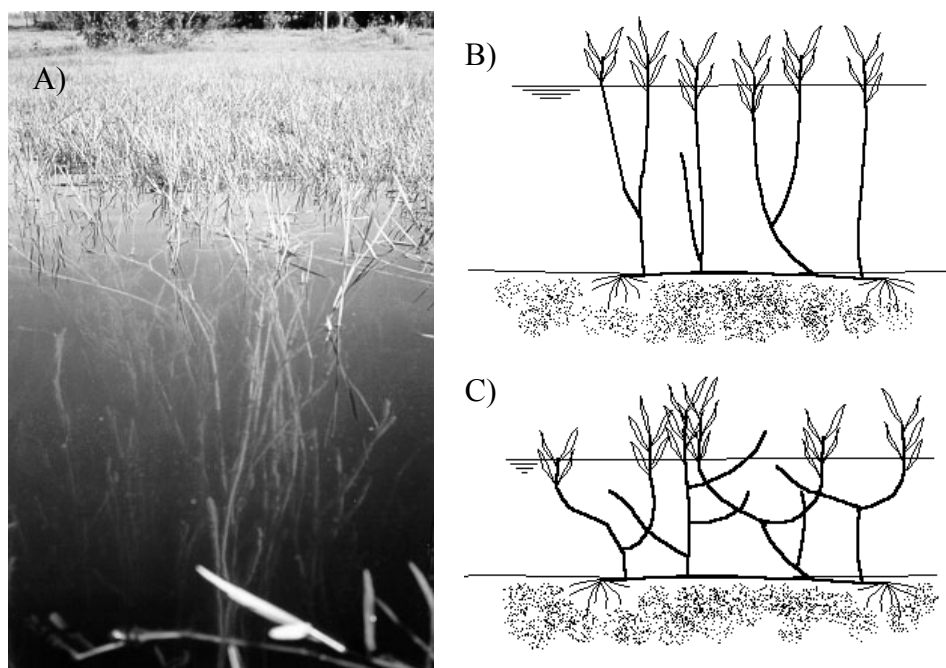


Figura 1.2 A) *Brachiaria subquadrípara*. B) Esquema da planta quando o nível d'água encontra-se elevado. C) Entrelaçamento das hastes decorrente da redução do nível.

Motivado pela eficiência dissipativa da zona mais profunda do campo de *B. Subquadrípara*, este trabalho tem por objetivo investigar o efeito que conjuntos de elementos verticais esbeltos e flexíveis exercem sobre a propagação de ondas de gravidade. Dada a necessidade de se garantir repetibilidade das condições experimentais e de se controlar as características físicas e a disposição espacial das hastes, elementos artificiais foram usados para simular a vegetação em laboratório, fornecendo subsídios para a elaboração de um modelo conceitual e matemático representativo dos principais processos envolvidos.

A modelagem permite estimar as dimensões e características necessárias ao campo, para que uma onda considerada nociva atinja padrões aceitáveis para a margem, conforme ilustrado na Figura 1.3.

Uma revisão dos principais estudos realizados sobre o assunto é apresentada no Capítulo 2, enfocando tanto trabalhos experimentais quanto teóricos. Dentro das limitações encontradas para adaptar os modelos existentes a hastes de grande flexibilidade, o Capítulo 3 propõe uma abordagem alternativa. Inicialmente, as equações do movimento são manipuladas para expressar a modificação da altura da onda

mediante a ação de uma força média distribuída na coluna d'água. Em seguida, um modelo mecânico é desenvolvido para descrever o comportamento de uma única haste mediante os esforços impostos pela propagação da onda. A conexão entre os dois modelos possibilita a determinação do amortecimento de ondas propagando-se em um campo formado por elementos flexíveis.

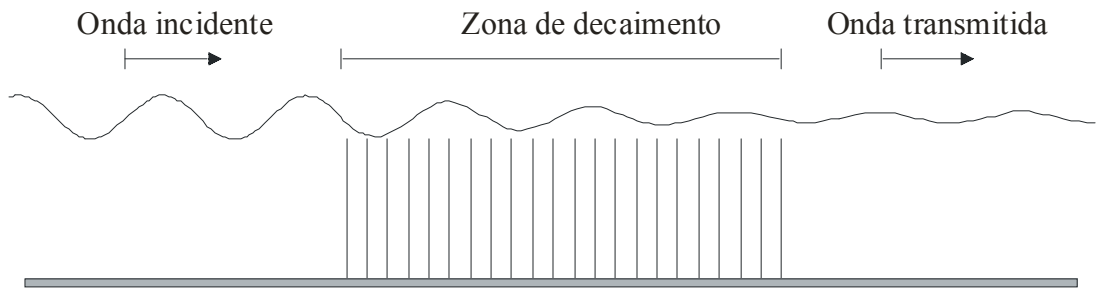


Figura 1.3 - Modelo geral do uso de estruturas verticais esbeltas como forma de promover a perda de energia de ondas sem arrebentação.

Os dois enfoques apresentados são validados por meio de experimentos em laboratório. Os recursos utilizados, bem como a metodologia desenvolvida para as medições são apresentados no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta uma discussão crítica dos resultados obtidos, onde a constatação de que a resistência das hastes em conjunto não corresponde à simples soma de suas resistências individuais atenta para a importância da quantificação de fenômenos decorrentes da interação entre hastes.

As principais conclusões obtidas ao longo do trabalho, bem como as perspectivas para continuação desta linha de pesquisa são apresentadas no Capítulo 6, onde se sugere a aplicação da metodologia e dos conceitos desenvolvidos no estudo de espécies naturais.

Capítulo 2

COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

A importância da vegetação aquática enquanto componente físico e biológico de ambientes costeiros e lacustres é amplamente reconhecida. Sua presença fornece alimento e abrigo para diversos organismos, modificando parâmetros ambientais e dissipando energia e turbulência de ondas e correntes (BRUNO & KENNEDY, 2000; MENDEZ & LOSADA, 2004). O grau de influência de uma espécie sobre a hidrodinâmica local será função do tamanho, densidade e distribuição espacial de seus indivíduos, que por outro lado são parâmetros controlados pela turbidez e pelos esforços mecânicos induzidos pelo escoamento (MADSEN *et al.*, 2001). Conseqüentemente, um estudo aprofundado do assunto deve contemplar a interatividade desta relação, onde a presença da vegetação influencia o escoamento, ao mesmo tempo em que este controla o seu desenvolvimento.

A natureza dos processos envolvidos especificamente no amortecimento de ondas por vegetação ainda não é totalmente compreendida, e a quantificação dos esforços envolvidos está longe de ser satisfatória (MORK, 1996). Em virtude da diversidade de espécies e configurações ambientais existentes, a literatura apresenta uma grande variedade de trabalhos onde hipóteses e aproximações são validadas para estruturas específicas, sejam elas naturais ou artificiais. Na maioria dos casos, o escoamento e o comportamento da vegetação são estudados separadamente, e de acordo com o foco da pesquisa, o efeito de um sobre o outro é representado por modelos simplificados.

2.1 Estudos de caso

Se por um lado não existe uma descrição teórica geral para estimar as modificações que elementos vegetais introduzem na propagação de ondas de gravidade, muitos são os estudos de caso que procuram representar o fenômeno para condições particulares. Alguns dos exemplos mais relevantes são: uso de algas artificiais para a reconstrução de bancos de areia (PRICE *et al.*, 1968); uso de espécies naturais na fixação de bancos submetidos a ondas geradas pelo tráfego de embarcações (COOPS *et*

al., 1996); estudo dos impactos do desmatamento da *Laminaria hyperborea* na costa da Noruega (MORK, 1996); análise dos efeitos de campos de *Macrocystis pyrifera* na propagação de ondas no litoral da Califórnia (ELWANY *et al.*, 1995); determinação dos esforços e limites para comprometimento da estrutura de diferentes espécies de algas (DENNY & GAYLORD, 2002; GAYLORD *et al.*, 2003; DENNY, 1999).

No Brasil, embora não haja registros precisos do amortecimento de ondas de gravidade devido à presença de campos de vegetação ao longo da costa, bancos de algas pardas de grandes dimensões do gênero *Laminaria* estão presentes no trecho que se estende desde o sul da Bahia até o norte de Cabo Frio (JOLY & OLIVEIRA, 1967). Além das algas, angiospermas marinhas da espécie *Halodule wrightii* são comuns em diversos pontos do litoral (OLIVEIRA *et al.*, 1997), formando extensas pradarias subaquáticas em algumas áreas da costa nordestina. OLIVEIRA *et al.* (1999), mencionam que o desaparecimento ou redução da densidade de um banco de angiospermas, em virtude de ação antrópica, seja pela extração artesanal para consumo animal, ou pela crescente emissão de poluentes na zona costeira, pode levar à erosão das praias próximas.

Nos rios e lagos, a interação do escoamento com a vegetação é mais evidente. Isto se deve principalmente à grande variedade de espécies adaptadas para ambientes que vão desde brejos até áreas totalmente submersas. De uma forma geral, estas espécies compreendem tanto macroalgas quanto plantas vasculares, e são usualmente denominadas macrófitas aquáticas, estando amplamente difundidas ao longo dos corpos d'água brasileiros (IRGANG e GASTAL Jr., 1996). Duas espécies particulares denominadas *Brachiária subquadrípara* e *Brachiária mutica* são encontradas em grandes quantidades nas margens de lagos e reservatórios de múltiplos usos (CARBONARI *et al.*, 2003). Porém, não foi encontrado na literatura nenhum registro de modelos que representem o efeito destas espécies sobre a propagação de ondas.

2.2 Desenvolvimentos teóricos

A modelagem do fenômeno da propagação de ondas de gravidade em meios fluidos na presença de vegetação comporta diferentes abordagens de acordo com o foco da investigação. Transporte de sedimentos, proteção de margens ou costa, efeitos sobre a hidrodinâmica da onda e preservação de ecossistemas são alguns dos exemplos da importância prática do assunto (STEPHAN & BIGFORD, 1997; TEETER *et al.*, 2001).

Ao longo das últimas três décadas, várias foram as inovações realizadas no tratamento matemático dos escoamentos oscilatórios para as mais diferentes situações. Conforme as hipóteses e simplificações adotadas, pode-se chegar a modelos de maior ou menor complexidade que representem as características de interesse.

Embora alguns autores como PRICE *et al.*(1968) e MORK (1996) tenham conseguido bons resultados com modelos que simulam a área vegetada por uma camada de grande viscosidade, tradicionalmente, as modelagens teóricas deste tipo de problema têm como base a determinação das forças induzidas pelas ondas nas plantas e suas reações. CAMFIELD (1983) propôs que se representasse a vegetação como uma força de atrito de fundo resistente ao escoamento. Com o tempo, linhas de pesquisa voltadas para a abordagem das forças atuantes ao longo da estrutura da planta tiveram maior desenvolvimento (i.e. DALRYMPLE *et al.*, 1984; KOBAYASHI *et al.*, 1993; MENDEZ & LOSADA, 2004). Contudo, a movimentação da planta é negligenciada em todos estes trabalhos e na maioria dos estudos existentes.

DALRYMPLE *et al.* (1984) propuseram um modelo para representar as modificações impostas às ondas por áreas localizadas de perda de energia, tais como zonas de grande concentração de pilares ou vegetação submersa. As plantas foram representadas por elementos esbeltos que, por sua vez, introduziriam uma força de arraste superficial sobre o escoamento. Com base no balanço de energia ao longo da área vegetada, estes autores apresentam uma dedução para a taxa de decaimento da altura da onda. A idéia principal consiste em escrever o balanço de energia de uma onda propagando-se na direção x como:

$$\frac{\partial(Ec_g)}{\partial x} = -\bar{\epsilon}_D \quad (2.1)$$

sendo:

E – energia da onda por unidade de área horizontal, $E = 1/8 \rho_f g H^2$;

ρ_f – massa específica do fluido;

g – aceleração da gravidade;

H – altura da onda;

c_g – celeridade de grupo da onda;

$\bar{\epsilon}_D$ – taxa média de dissipação de energia por unidade de área em planta.

Estes autores expressam a perda total de energia da onda devido a um campo de vegetação por:

$$\bar{\varepsilon}_D = N_h \bar{\varepsilon}_D^I \quad (2.2)$$

onde:

N_h – número de hastes por unidade de área;

$\bar{\varepsilon}_D^I$ - taxa média de dissipação de energia de uma haste em um período de onda.

Considerando que a dissipação ocasionada por uma haste se deva somente ao trabalho realizado pela força de arraste ($\vec{F}_D$) exercida pelo campo de velocidades, a taxa média de dissipação de energia de uma haste pode ser dada por:

$$\bar{\varepsilon}_D^I = \frac{I}{T} \int_0^T \left(\int_0^{\lambda h} \vec{F}_D \cdot \vec{u}_f dz \right) dt \quad (2.3)$$

onde $\vec{u}_f$ corresponde à velocidade do fluido, λ é relação entre o comprimento da haste (s) e a profundidade (h), dada por $s = \lambda h$.

Adotando a força de arraste como uma função quadrática da velocidade do fluido, e expressando a velocidade horizontal pela teoria linear das ondas, chega-se a:

$$\bar{\varepsilon}_D = N_h \frac{I}{T} \int_0^T \left[\int_0^{\lambda h} \left(\frac{I}{2} \rho_f C_D A_{eq} \vec{u}_f |\vec{u}_f| \right) \cdot \vec{u}_f dz \right] dt \therefore \bar{\varepsilon}_D = B_0 H^3 \quad (2.4)$$

com:

$$B_0 = N_h \frac{\rho_f}{4} \frac{C_D}{3\pi} \frac{\phi}{k} \left(\frac{gk}{\sigma} \right)^3 \frac{[\sinh^3(\lambda kh) + 3\sinh(\lambda kh)]}{3\cosh^3(kh)},$$

$k = 2\pi/L$ sendo L o comprimento da onda;

$\sigma = 2\pi/T$ sendo T o período da onda;

C_D – coeficiente de arraste da vegetação;

ϕ – diâmetro da haste;

Substituindo o resultado da Equação 2.4 em 2.1, chega-se a:

$$\frac{d(Ec_g)}{dx} = \frac{I}{8} \rho_f g \frac{d}{dx} (H^2 c_g) = -B_0 H^3 \quad (2.5)$$

Para uma altura de onda H_o na entrada do campo ($x=0$), a solução final para um fundo plano e horizontal será dada por uma expressão do tipo:

$$H(x) = H_o \left[\frac{I}{I + \beta x} \right] \quad (2.6)$$

onde:

$$\beta = \frac{B_0}{\rho_f g c_g} \frac{H_o}{2} = \frac{H_o}{8 g c_g} N_h \frac{C_D}{3\pi} \frac{\phi}{k} \frac{[\sinh^3(\lambda kh) + 3\sinh(\lambda kh)]}{3\cosh^3(kh)} \left(\frac{gk}{\sigma}\right)^3 \quad (2.7)$$

A expressão de decaimento indicada na equação 2.6 possui a mesma forma algébrica da expressão da perda de energia devido à camada limite turbulenta (e.g. DEAN e DALRYMPLE, 1984). Esta equação é consequência do uso de uma potência quadrática no termo de velocidade da força de arraste, que acarreta o aparecimento de um termo cúbico da altura da onda na equação da taxa de dissipação de energia (equação 2.4). A Figura 2.1 ilustra o comportamento da altura da onda na zona de decaimento para diferentes fatores de amortecimento na função encontrada.

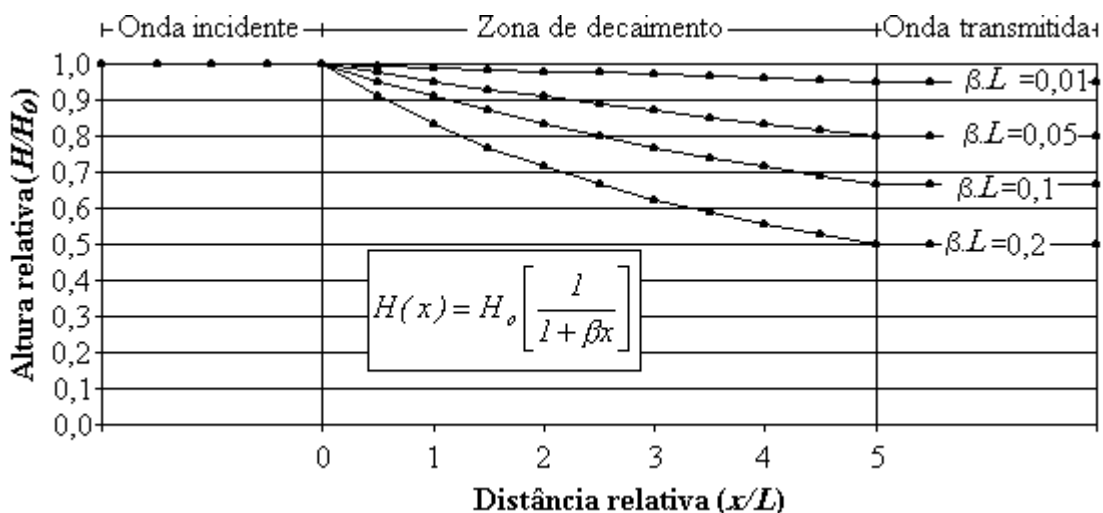


Figura 2.1 - Decaimento da altura da onda segundo a função algébrica dependente de β em um campo com $5L$ de extensão.

KOBAYASHI *et al.* (1993) criticaram esta abordagem comum na maioria das pesquisas baseadas na equação da energia da onda, pois o escoamento local é estimado pela teoria linear e os efeitos produzidos pela presença da vegetação são representados somente por um termo de dissipação. Estes autores ressaltam que, embora muitos dos trabalhos desenvolvidos tenham encontrado resultados satisfatórios para os casos estudados, em situações onde a vegetação modifica o escoamento local significativamente, a hipótese da teoria linear e a aplicação das expressões obtidas sem vegetação são questionáveis. Estes autores propõem uma formulação, obtida a partir das equações da continuidade e do movimento, visando uma solução mais realista para o problema de ondas monocromáticas de pequena amplitude propagando-se sobre áreas vegetadas.

Uma consideração importante neste último trabalho é a de que a força de arraste é uma função linear da velocidade do escoamento, e sua expressão é inserida como um termo de resistência horizontal na equação do movimento:

$$\vec{F}_D = \rho_f D \vec{u}_f \tag{2.8}$$

onde D introduzido como um coeficiente de arraste linear por área de campo.

Ao substituir esta expressão em 2.3, chega-se a um termo quadrático em H referente à dissipação de energia. Considerando novamente que $H=H_0$ para $x=0$, a solução de 2.1 será satisfeita por uma expressão do tipo:

$$H(x) = H_o e^{-k_i x} \tag{2.9}$$

Assim como β , k_i é um coeficiente de amortecimento que deve ser determinado a partir de parâmetros tanto do escoamento quanto do campo de vegetação. A expressão obtida por KOBAYASHI *et al.* (1993) é:

$$k_i = \frac{D}{2} \frac{k}{\sigma} \frac{2\lambda kh + \sinh(2\lambda kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \tag{2.10}$$

A adoção de um decaimento exponencial possui grande aceitação na literatura (e.g. PRICE *et al.*, 1968; MORK, 1996), dada a conveniência de se trabalhar com um número de onda complexo. A Figura 2.2 apresenta a forma do decaimento em altura das ondas obtida pela expressão 2.9.

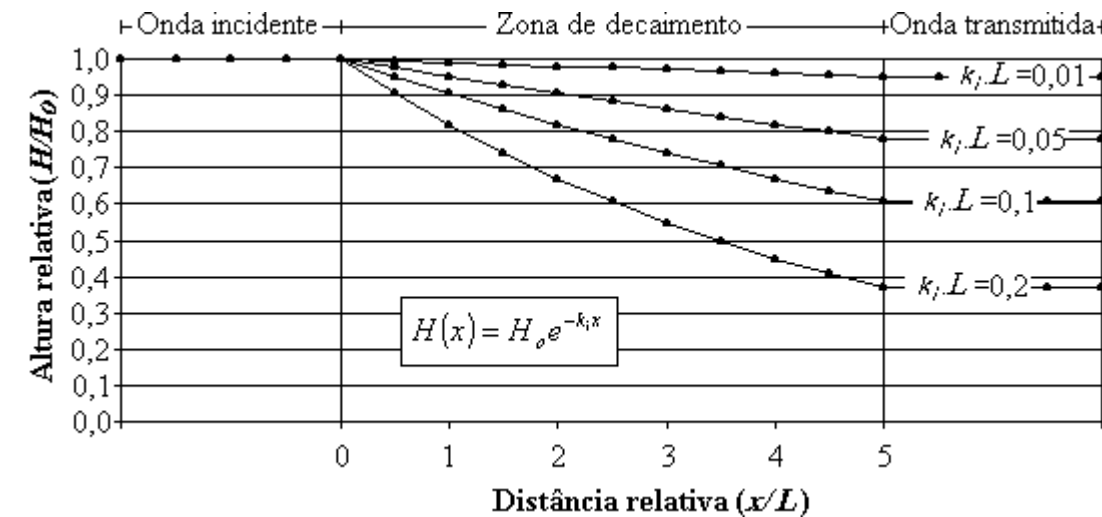


Figura 2.2 - Decaimento da altura da onda segundo a função exponencial dependente de k_i em um campo com $5L$ de extensão.

Expandindo-se o segundo membro da equação 2.6 e a função exponencial dada em 2.9, pode-se determinar uma relação entre β e k_i :

$$\frac{I}{I + \beta x} = I - \beta x + (\beta x)^2 - (\beta x)^3 \quad (2.11a)$$

$$e^{-k_i x} \cong I - k_i x + \frac{(k_i x)^2}{2} - \frac{(k_i x)^3}{3} \quad (2.11b)$$

Logo, para pequenos valores dos argumentos $k_i x$ e βx (inferiores a 0,1), as expressões aproximam-se assintoticamente, e $\beta \cong k_i$.

MENDEZ & LOSADA (2004) estenderam a solução de DALRYMPLE (1984) para a condição de águas rasas considerando um fundo com declividade constante. Desta forma, o fluxo de energia de uma onda propagando-se paralelamente ao eixo x é escrito como:

$$\frac{d}{dx} \left(H^2 h^{1/2} \right) = -B_I \frac{H^3}{h^{1/2}} \quad (2.12)$$

$$\text{onde } B_I = 2 \frac{C_D}{3\pi} \phi \lambda N_h$$

Para uma praia de declividade constante (m), tem-se $h = h_o - mx$, onde h_o é a profundidade no início do campo de vegetação. A equação 2.12 pode ser integrada pelo uso de uma variável auxiliar $y = H^2 (h_o - mx)^{1/2}$

$$y = \left[\frac{2B_I}{m(h_o - mx)^{1/4}} + C^{te} \right]^{-2} \quad (2.13)$$

Aplicando a condição de contorno na entrada da vegetação, onde $H=H_o$ e $h=h_o$ para $x=0$, e substituindo a variável auxiliar chega-se a:

$$H(x) = \frac{I}{\left[\frac{I}{H_o} \left(\frac{h^{1/4}}{h_o^{1/4}} \right) + \frac{2B_I}{m} \left(I - \frac{h^{1/4}}{h_o^{1/4}} \right) \right]} \quad (2.14)$$

Como em águas rasas o coeficiente geométrico de refração das ondas (K_s) reduz-se ao inverso da relação entre profundidades encontrada em 2.14, obtém-se finalmente:

$$H(x) = H_o K_s K_v \quad (2.15)$$

com:

$$K_s = \left(\frac{h_o}{h} \right)^{\frac{I}{4}} \quad (2.16a)$$

$$K_v = \frac{l}{l + \frac{2B_l}{m} H_o (K_s - l)} \tag{2.16b}$$

A equação 2.15 corresponde à aproximação de águas rasas da expressão 2.6 para um fundo plano com declividade constante. A Figura 2.3 apresenta a altura relativa da onda em função da profundidade relativa para diferentes valores do coeficiente de amortecimento $B_l H_o / m$. Ao contrário das soluções anteriores, este caso apresenta a interferência de dois fenômenos: o aumento da altura da onda decorrente da redução de profundidade e o seu amortecimento pela presença do campo de vegetação. No caso particular de $B_l H_o / m = 0,5$, tem-se o equilíbrio entre as duas parcelas, e para valores superiores, a altura da onda tende a ser reduzida.

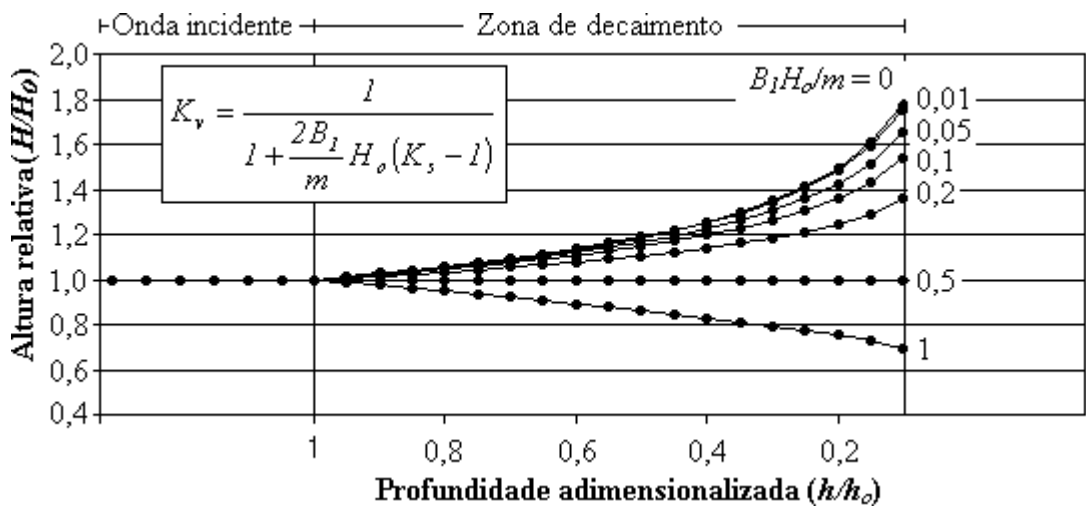


Figura 2.3 - Modificação da altura da onda propagando-se em águas rasas sobre um fundo de declividade constante m , segundo a função algébrica dependente de $B_l H_o / m$.

Os modelos discutidos foram verificados através de experimentos e apresentaram bons resultados para as características ensaiadas por seus autores, porém, em todos eles, o movimento da haste é negligenciado. Tal simplificação restringe a aplicação destes desenvolvimentos na determinação do amortecimento de ondas por ocasião de estruturas de grande flexibilidade.

Embora MENDEZ & LOSADA (1999) incluam o movimento das plantas no cálculo dos esforços hidrodinâmicos, as hastes são modeladas como vigas engastadas no fundo submetidas a um carregamento transversal, onde a reposta da linha elástica é aproximada pela hipótese de pequenos deslocamentos em função das propriedades biomecânicas da planta. Conseqüentemente, a solução do problema fica restrita a casos

em que os movimentos da extremidade livre da haste sejam pequenos em relação ao seu comprimento.

Estas simplificações estão muito distante do observado no campo de *B. subquadrípara* no lago de Ilha Solteira e nos elementos artificiais adotados no presente trabalho, que mediante a passagem das ondas podem atingir amplitudes de oscilação da extremidade livre superiores a 10 % do comprimento da haste. Neste ponto, fica evidente a necessidade de se propor uma abordagem alternativa para o problema, que contemple o deslocamento das hastes, e conseqüentemente, sua distribuição de velocidade no cálculo dos esforços exercidos sobre o escoamento. Esta é uma das contribuições do presente trabalho, onde propõe-se um modelo de amortecimento voltado para estruturas de grande flexibilidade. A Tabela 2.1 mostra um resumo das principais características dos estudos apresentados, bem como do modelo proposto.

Tabela 2.1 – Resumo dos principais modelos existentes para representar o amortecimento de ondas por campos de vegetação.

Trabalho	Efeito da Presença das plantas	Movimento das hastes	Modelagem da força	Batimetria do fundo	Teoria de onda*	Interação entre hastes
DALRYMPLE <i>et al.</i> (1984)	Dissipação de energia por trabalho	Não	Arraste quadrático	Plano e horizontal	Linear	Não
KOBAYASHI <i>et al.</i> (1993)	Força distribuída contrária ao escoamento	Não	Arraste linear	Plano e horizontal	Linear	Não
MENDEZ & LOSADA (1999)	Força distribuída contrária ao escoamento	Sim	Arraste linear e inércia	Plano e horizontal	Linear	Não
MENDEZ & LOSADA (2004)	Dissipação de energia por trabalho	Não	Arraste quadrático	Plano com declividade constante	Linear em águas rasas	Não
Modelo a ser proposto	Força média contrária ao escoamento	Sim	Arraste quadrático (pode incluir inércia)	Plano e horizontal	Não linear (função de corrente)	Sim

* Referente à teoria de onda utilizada para o cálculo das forças hidrodinâmicas

Todos trabalhos apresentados neste item propõem uma visão global do campo, onde procura-se determinar somente o efeito final do conjunto de hastes sobre a onda. Mesmo que as expressões obtidas para o amortecimento tenham se baseado no cálculo das forças exercidas sobre um elemento isolado, a idéia de que a resistência total do campo será dada pela soma das resistências individuais é questionável. Particularmente no caso de espécies flexíveis, onde os excessivos deslocamentos favorecem o contato direto entre as hastes, novos esforços podem surgir modificando o comportamento idealizado.

Na prática, a eventual interação entre hastes é contemplada de forma implícita nos modelos de campo, pois a validação de expressões como as apresentadas em 2.6, 2.9 e 2.15 tradicionalmente é feita com base em curvas de amortecimento obtidas experimentalmente. Desta forma, o único parâmetro desconhecido na expressão do amortecimento, o coeficiente de arraste, é escolhido como sendo aquele valor que garante o melhor ajuste entre as curvas experimental e teórica. Portanto, o valor obtido para este parâmetro estará englobando qualquer efeito adicional que influencie o amortecimento total, como a interferência entre hastes adjacentes.

Desta forma, a idéia da modelagem isolada de uma haste, que possibilite a determinação precisa dos coeficientes relacionados às forças atuantes, torna possível a consideração explícita de um termo de interação entre hastes na equação final do amortecimento pelo campo. Esta perspectiva traz consigo uma abordagem inédita para este tipo de estudo. O próximo item ilustra a modelagem da resposta de uma haste.

2.3 Abordagem local

Procurando descrever o comportamento de um único indivíduo quando submetido a escoamentos oscilatórios, alguns autores adotam modelos mecânicos idealizados para representar a espécie estudada. Em duas publicações complementares, GAYLORD e DENNY (1997) e DENNY *et al.* (1997) apresentam diferentes enfoques para estudar o movimento e os esforços exercidos por ondas de gravidade sobre plantas de grande porte. O primeiro trabalho modelou o comportamento das espécies *Eisenia arborea* e *Pterygophora californica* através da teoria de viga em balanço. Deste modo, a estrutura da vegetação é representada por uma haste rígida com um determinado módulo de elasticidade e momento de inércia, onde o escoamento exerce um carregamento variável tanto no espaço quanto no tempo. Os resultados teóricos mostraram-se satisfatórios

quando comparados à experiência, porém, o modelo foi validado apenas para espécies de grande rigidez.

Já no segundo trabalho, a espécie estudada foi a *Nereocystis luetkeana*, que possui uma haste mais esbelta que as anteriores. Devido à grande concentração de folhas e estruturas adicionais na extremidade superior, e ainda, diante de sua grande flexibilidade, os autores optaram por representar a planta por um único elemento pontual onde toda a sua massa e as forças distribuídas atuariam. No modelo, este ponto é ligado ao substrato por um cabo elástico. Desta forma, a medida que as ondas incidem sobre a estrutura idealizada, o movimento relativo entre o fluido e o elemento pontual gera esforços sobre a planta. A Figura 2.4 ilustra a vegetação estudada e as simplificações adotadas na concepção do modelo.

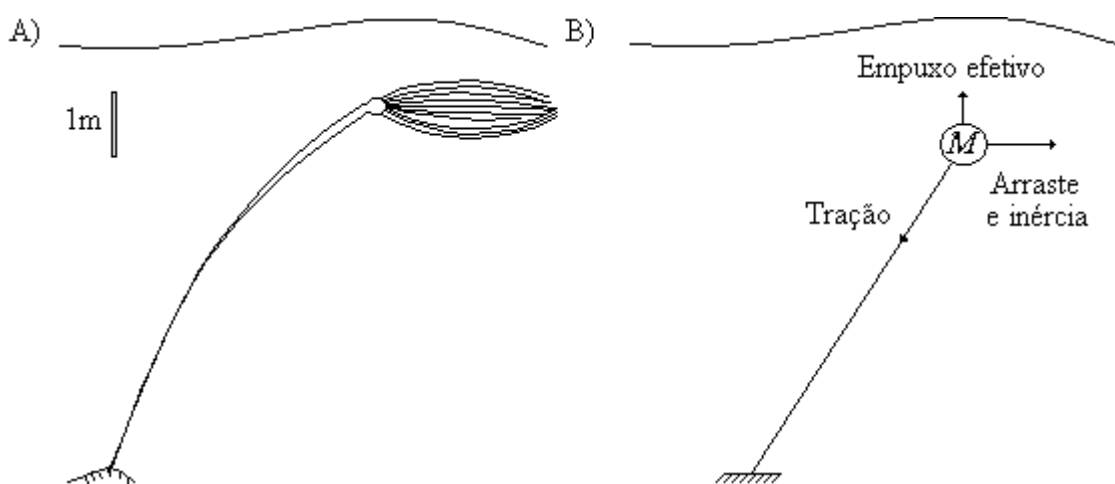


Figura 2.4 – Modelagem do comportamento da *Nereocystis luetkeana* diante da ação de ondas. A) Representação da estrutura da espécie. B) Modelo simplificado por meio da consideração de uma massa concentrada na extremidade de um cabo elástico. Modificado de DENNY *et al.* (1997).

Os esforços hidrodinâmicos e o empuxo são balanceados pelo cabo elástico, e a força resultante acarretará uma aceleração do elemento pontual. A partir da integração numérica da aceleração no tempo, os autores obtêm séries temporais de posição e velocidade do elemento e de tensão no cabo. A Figura 2.5 apresenta uma comparação entre resultados gerados pelo modelo e medições experimentais.

Desde que o modelo seja suficientemente representativo das condições ensaiadas, este tipo de aproximação permite que os coeficientes relacionados às forças exercidas pelo escoamento sejam determinados a partir de medições experimentais. O modelo calibrado possibilita ainda a análise dos diferentes termos de força ao longo do tempo.

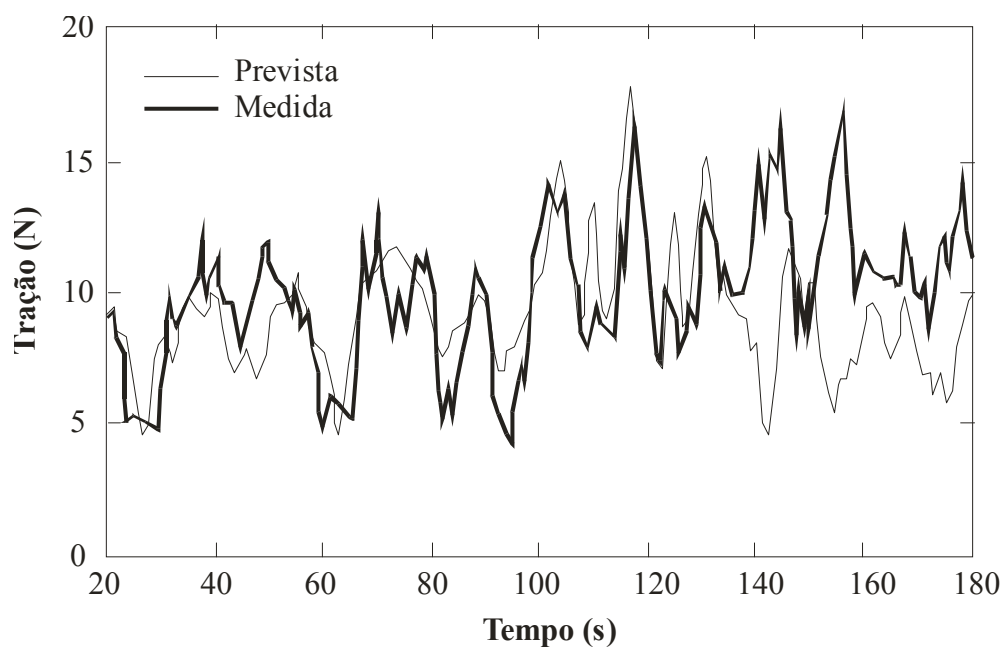


Figura 2.5 – Comparação entre séries temporais de tensões medida em campo e prevista pelo modelo numérico. Fonte: DENNY *et al.* (1997).

Capítulo 3

AMORTECIMENTO DE ONDAS POR ELEMENTOS DE GRANDE FLEXIBILIDADE

A presente investigação procura modelar as modificações impostas à propagação de ondas de gravidade pela presença de conjuntos de elementos flexíveis que simulam o comportamento de algumas espécies de vegetação aquática. Entenda-se por elementos flexíveis, um arranjo de estruturas esbeltas, fixadas ao fundo, verticalizadas pelo empuxo e que diante dos esforços impostos pelo escoamento se permitam oscilações. Durante a propagação de ondas sobre campos formados por estes elementos, a troca de quantidade de movimento entre o fluido e a estrutura resulta na perda de energia do primeiro, e conseqüentemente, na redução da altura das ondas. Serão investigados os processos relacionados à hidrodinâmica da zona de decaimento, com o objetivo de se propor um modelo para estimar as modificações impostas a uma determinada onda em função de suas características iniciais e das propriedades geométricas das hastes.

Para tanto, o trabalho é dividido em duas etapas. Inicialmente, as equações do movimento são manipuladas de forma a expressar a variação da altura da onda em função de uma força média na coluna d'água. O procedimento foge ao tradicional balanço de energia, permitindo que se trabalhe explicitamente em termos de força, o que é fisicamente justificável a partir do momento que esta grandeza não se dissipa e pode ser obtida de forma direta.

Em uma segunda etapa, a exemplo do exposto no item 2.3, um modelo mecânico é desenvolvido para caracterizar hidrodinamicamente as hastes estudadas. As informações de força obtidas pela calibração deste modelo são inseridas diretamente nas equações modificadas do movimento, fornecendo uma expressão para o amortecimento das ondas.

3.1 Modelo de campo

As equações da quantidade de movimento promediadas ao longo de um período de onda e integradas na vertical são reescritas como (PHILLIPS, 1977):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} M_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i M_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{-\tilde{M}_i \tilde{M}_j}{\rho_f (h + \bar{\eta})} + \frac{I}{T} \int_0^T \int_{-h}^{\eta} (\rho_f \tilde{u}_j \tilde{u}_i + p \delta_{ij}) dz d\tilde{t} - \frac{I}{2} \rho_f g (h + \bar{\eta})^2 \delta_{ij} \right] \\ & = p_{atm} - \rho_f g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} + \frac{I}{T} \int_0^T F_i d\tilde{t} \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde $i, j = x, z$;

M_i – transporte de massa total associado a uma corrente arbitrária e à onda, definido por

$$M_i = \hat{M}_i + \tilde{M}_i \text{ com } \hat{M}_i = \frac{I}{T} \int_0^T \left(\int_{-h}^{\eta} \rho_f \hat{U}_i dz \right) d\tilde{t}, \quad \tilde{M}_i = \frac{I}{T} \int_0^T \left(\int_{-h}^{\eta} \rho_f \tilde{u}_i dz \right) d\tilde{t};$$

U_i – velocidade associada ao transporte de massa total devido à corrente e à onda,

$$U_i = \frac{M_i}{\rho_f (h + \bar{\eta})} = \frac{\hat{M}_i}{\rho_f (h + \bar{\eta})} + \frac{\tilde{M}_i}{\rho_f (h + \bar{\eta})} = \hat{U}_i + \frac{\tilde{M}_i}{\rho_f (h + \bar{\eta})};$$

$\hat{U}_i$ - componente de velocidade associado a uma corrente permanente na escala da onda;

$\tilde{u}_i$ - componente de velocidade associado ao escoamento oscilatório;

$\tilde{t}$ - escala de tempo da onda. Por se tratar de uma equação média no período da oscilação, a expressão obtida trabalha com uma escala de tempo t superior a $\tilde{t}$.

$$\bar{\eta} - \text{posição média da superfície livre dada por } \bar{\eta} = \frac{I}{T} \int_0^T \eta d\tilde{t};$$

p_{atm} – pressão atmosférica;

F_i – termo de forças distribuídas ao longo da coluna d'água.

O termo entre colchetes depende somente das propriedades da onda. Suas componentes (S_{ij}) formam um tensor conhecido como “tensor de radiação”, que representa as forças induzidas pelas ondas sobre o escoamento médio. A equação pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t} M_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i M_j) = p_{atm} - \rho_f g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij} + \frac{I}{T} \int_0^T F_i d\tilde{t} \quad (3.2)$$

com

$$S_{ij} = -\frac{\tilde{M}_i \tilde{M}_j}{\rho_f (h + \bar{\eta})} + \frac{I}{T} \int_0^T \int_{-h}^{\eta} (\rho_f \tilde{u}_j \tilde{u}_i + p \delta_{ij}) dz d\tilde{t} - \frac{I}{2} \rho_f g (h + \bar{\eta})^2 \delta_{ij} \quad (3.3)$$

Considerando que o escoamento oscilatório é devido a ondas progressivas, e mantendo os termos não lineares nas expressões até $O(H)^2$, as componentes do tensor de tensão de radiação são obtidas a partir da teoria linear das ondas:

$$S_{xx} = \frac{(3n-1)}{2} E + \frac{nE}{2} \cos(2\theta) \quad (3.4a)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{nE}{2} \sin(2\theta) \quad (3.4b)$$

$$S_{yy} = \frac{(3n-1)}{2} E - \frac{nE}{2} \cos(2\theta) \quad (3.4c)$$

onde θ corresponde ao ângulo entre a direção de propagação da onda e o eixo x e n é a razão entre a celeridade de grupo e da onda.

Para um escoamento permanente, com ondas propagando-se paralelamente ao eixo x , a retenção dos termos até $O(H)^2$ reduz 3.2 a:

$$\frac{\partial}{\partial x} S_{xx} = P_{atm} - \rho_f g(h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} + \frac{1}{T} \int_0^T F_x d\tilde{t} \quad (3.5)$$

Substituindo 3.4a para $\theta=0$, tem-se:

$$H \frac{\partial}{\partial x} H = - \frac{8}{\rho_f g(4n-1)} \left[\frac{1}{4} \rho g H^2 \frac{\partial}{\partial x} n + \rho_f g(h + \bar{\eta}) \frac{\partial}{\partial x} \bar{\eta} + \bar{F}_x \right] \quad (3.6)$$

onde $\bar{F}_x$ foi introduzido para representar forças médias no período da onda que estejam sendo exercidas sobre a coluna d'água, como por exemplo a reação exercida pelas hastes.

3.2 Termo de resistência do campo

No caso específico de um campo onde os elementos são idênticos entre si, pode-se dizer que a força total exercida sobre o fluido por unidade de área horizontal será função da força exercida por uma única haste e da quantidade de hastes por metro quadrado. Escreve-se:

$$\bar{F}_x = \alpha N_h \bar{F}_x^I \quad (3.7)$$

sendo α um coeficiente de interação entre hastes, N_h o número de hastes por metro quadrado e $\bar{F}_x^I$ a força média exercida na coluna d'água por uma única haste durante a passagem de uma onda. Deve-se observar que ao contrário da equação 2.2, não se está impondo que a resistência do campo será dada pela soma direta dos efeitos individuais das hastes. A introdução de α em 3.7 permite isolar efeitos decorrentes da ação conjunta das hastes do cálculo das forças individuais, cujo procedimento para sua determinação é apresentado a seguir.

3.3 Resistência de uma haste

Ao considerar uma haste flexível induzida ao movimento por um escoamento oscilatório onde o empuxo é o único agente restaurador, tem-se como principais grandezas físicas envolvidas:

- (i) relacionadas ao escoamento – altura (H), comprimento (L) e período (T) da onda, profundidade (h) e massa específica do fluido (ρ_f);
- (ii) relacionadas à haste – comprimento (s), massa específica (ρ_v), diâmetro (ϕ), e ainda uma grandeza de força relacionada à ação do fluido sobre a mesma;
- (iii) aceleração da gravidade (g).

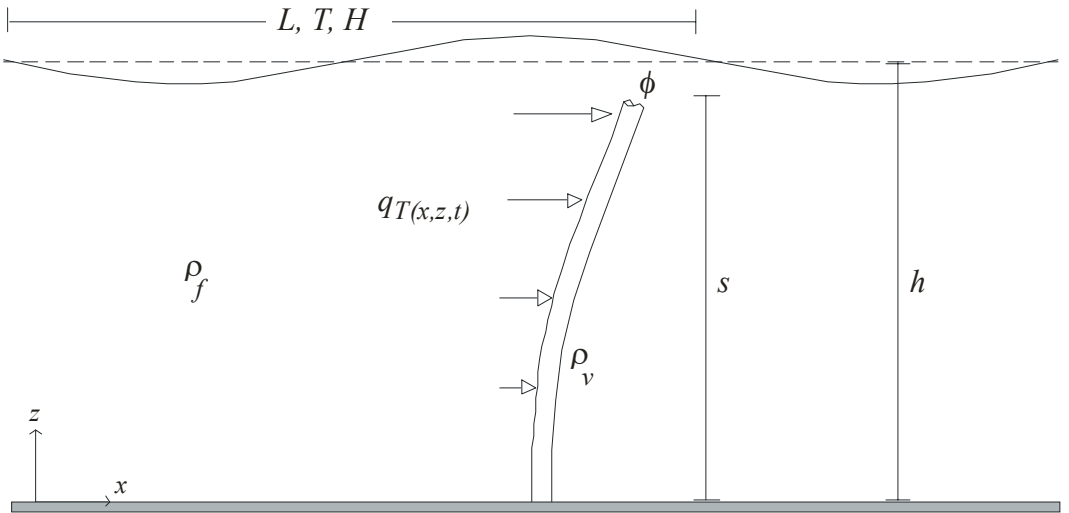


Figura 3.1 – Grandezas físicas envolvidas na indução do movimento da haste.

A força instantânea que atua ao longo da haste pode ser interpretada como a força de resistência que o elemento exerce sobre o escoamento, ou seja:

$$F_x^I(t) = \int_0^s q_{Tx}(x, z, t) ds \quad (3.8)$$

onde q_{Tx} é a força horizontal por unidade de comprimento atuando sobre o elemento em consequência do movimento relativo entre fluido e haste. A priori, q_T é dividida em duas componentes perpendiculares q_{Tx} e q_{Tz} , porém, para efeito de balanço de forças sobre o escoamento médio integrado na vertical, somente a resistência horizontal está sendo considerada. Esta abordagem é justificada para as características de onda dominantes no tipo de ambiente estudado, que contempla águas intermediárias a rasas. Por outro lado, pode ser uma simplificação exagerada não só para estudos em águas

profundas, mas também para casos onde a posição média da haste esteja afastada do eixo vertical.

Deseja-se obter uma expressão para a força média exercida pelo fluido ao longo de toda a haste durante a passagem de uma onda. Esta força equivale exatamente à média temporal de F_x^I , ou seja:

$$\overline{F}_x^I = \frac{1}{T} \int_0^T F_x^I(t) dt \tag{3.9}$$

A Figura 3.2 ilustra o comportamento medido de F_x^I durante a passagem de uma onda, onde pode-se observar a assimetria da curva em relação à amplitude da força. Este desvio resulta em uma componente média no sentido de propagação da onda, e é exatamente o valor a ser inserido em 3.7.

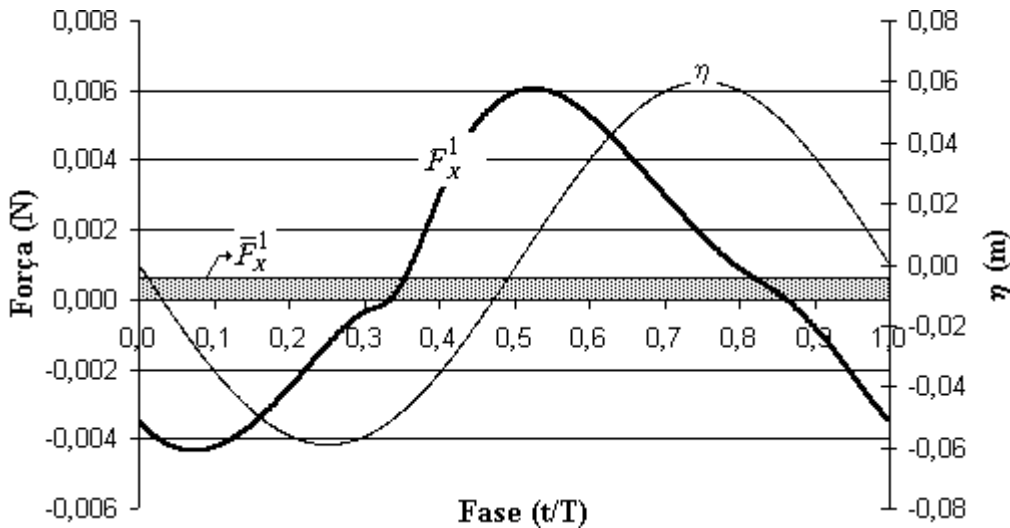


Figura 3.2 – Comportamento da força resultante sobre a haste ao longo de um período de onda. O limite superior da área hachurada indica o seu valor médio no tempo.

Fica evidente que a determinação de $\overline{F}_x^I$ dependerá do conhecimento da evolução temporal das forças atuantes sobre todo o elemento flexível. Por outro lado, esta grandeza será consequência da velocidade relativa entre a haste e o fluido, que a priori não é conhecida, pois a velocidade da haste já é resultado do histórico dos esforços sobre ela aplicados.

Neste ponto, propõe-se uma idealização do elemento flexível com o objetivo de desenvolver um modelo mecânico representativo de seu comportamento hidrodinâmico mediante a passagem de ondas. Uma vez calibrado, o modelo deve fornecer o histórico das forças exercidas ao longo da haste e consequentemente a equação 3.9 poderá ser resolvida.

3.3.1 Concepção do modelo mecânico

Considerando uma distribuição uniforme de massa ao longo do elemento, propõe-se uma discretização da haste em segmentos, onde a força que atua em um pequeno trecho de comprimento l_n é representada em um único nó. Diante da ação das ondas, em um dado instante t' , cada elemento pontual terá uma velocidade $\vec{u}_{v(n,t')}$ e aceleração $\vec{a}_{v(n,t')}$. Neste mesmo instante, o fluido possui uma velocidade $\vec{u}_{f(n,t')}$ e aceleração $\vec{a}_{f(n,t')}$. A velocidade resultante entre cada nó e o escoamento em sua volta dará origem a forças hidrodinâmicas. A consideração fundamental do modelo é de que para intervalos de tempo muito menores que o período da onda ($\Delta t \ll T$), a resultante de todas as forças atuantes em um nó pode ser considerada constante. Desta forma, cada um dos nós será uniformemente acelerado desde o instante t' até $t' + \Delta t$. A Figura 3.3 apresenta as simplificações adotadas na concepção do modelo.

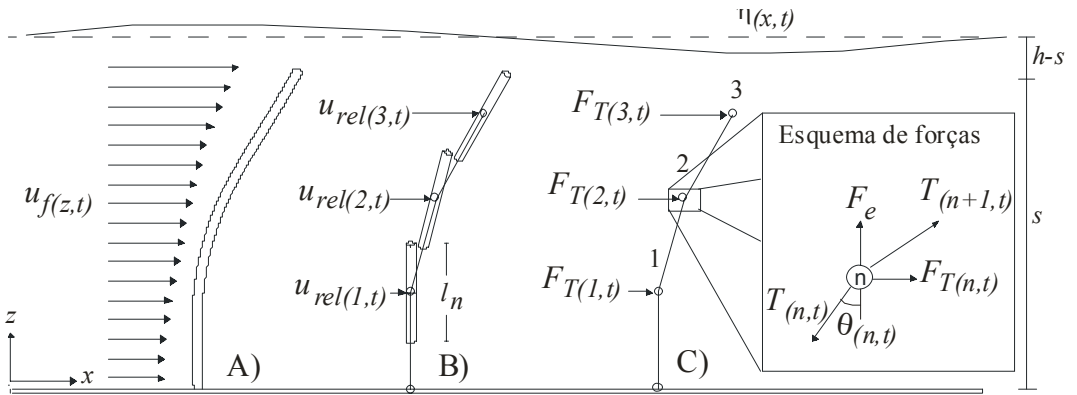


Figura 3.3 – Modelo mecânico para representar o comportamento de uma haste. A) Forma original da estrutura. B) Divisão em segmentos. C) Balanço de forças nos nós.

Outra consideração importante, é de que devido à pequena resistência do material da haste à flexão, o momento ao longo de seu eixo pode ser desprezado, e os nós são considerados articulados. Adota-se uma profundidade constante e igual a h . O sistema de coordenadas cartesianas (x, z) é estacionário e fixo no fundo, de modo que a superfície da água ficará em $z = h + \eta$. Considera-se ainda que o movimento da haste se dá somente no plano x, z .

Tendo a velocidade da haste como condição inicial, o modelo deverá calcular a aceleração atuante sobre cada nó durante o passo de tempo Δt , que induzirá modificação em seu campo de velocidades, resultando em uma nova posição e condições iniciais

para o passo seguinte. Desta forma, o modelo deverá fornecer séries temporais de posição, velocidade e forças ao longo de toda a haste.

3.3.2 Balanço das forças atuantes em cada nó

A Figura 3.3C ilustra as forças consideradas atuantes em cada elemento. Supondo que a haste possui diâmetro e massa específica constantes ao longo de seu comprimento, o empuxo ($\vec{E}$) e o peso ($\vec{P}$) atuante em cada elemento cilíndrico com altura l_n e diâmetro ϕ serão constantes e dados por:

$$|\vec{E}| = \rho_f g V_{el} \quad (3.10)$$

$$|\vec{P}| = \rho_v g V_{el} \quad (3.11)$$

onde V_{el} corresponde ao volume de um dado elemento da haste: $V_{el} = A_\phi l_n$, sendo A_ϕ a área de sua seção transversal: $A_\phi = \pi \phi^2 / 4$.

Como estas duas forças opostas atuarão sempre na direção vertical, convém fazer uso somente da força resultante dada por:

$$\vec{F}_e = (\rho_f - \rho_v) g V_{el} \vec{k} \quad (3.12)$$

Para um fenômeno em duas dimensões, pode-se escrever as equações para o balanço de forças horizontais e verticais para um certo elemento n :

$$\sum F_{x(n,t')} = M a_{vx(n,t')} \therefore F_{Tx(n,t')} - T_{(n,t')} \text{sen} \theta_{(n,t')} + T_{(n+1,t')} \text{sen} \theta_{(n+1,t')} = M a_{vx(n,t')} \quad (3.13a)$$

$$\sum F_{z(n,t')} = M a_{vz(n,t')} \therefore F_{Tz(n,t')} + F_e - T_{(n,t')} \cos \theta_{(n,t')} + T_{(n+1,t')} \cos \theta_{(n+1,t')} = M a_{vz(n,t')} \quad (3.13b)$$

onde $F_{Tx(n,t')}$ e $F_{Tz(n,t')}$ correspondem às componentes da força $F_{T(n,t')} = q_{T(n,t')} l_n$ atuante nos nós, $\theta_{(n,t')}$ representa o ângulo de inclinação do nó n com a vertical no instante t' e M corresponde à massa do elemento cilíndrico $M = \rho_v V_{el}$. O fato de se considerar as acelerações constantes ao longo do intervalo de tempo Δt permite aproximar os deslocamentos dos nós por:

$$\Delta x_{(n,t')} = u_{vx(n,t')} \Delta t + \frac{1}{2} a_{vx(n,t')} \Delta t^2 \therefore a_{vx(n,t')} = \frac{2}{\Delta t} \left[\frac{\Delta x_{(n,t')}}{\Delta t} - u_{vx(n,t')} \right] \quad (3.14a)$$

$$\Delta z_{(n,t')} = u_{vz(n,t')} \Delta t + \frac{1}{2} a_{vz(n,t')} \Delta t^2 \therefore a_{vz(n,t')} = \frac{2}{\Delta t} \left[\frac{\Delta z_{(n,t')}}{\Delta t} - u_{vz(n,t')} \right] \quad (3.14b)$$

Substituindo 3.14 em 3.13, chega-se a um sistema com duas equações e três incógnitas em cada nó, a saber: $T_{(n,t')}$, $\Delta x_{(n,t')}$ e $\Delta z_{(n,t')}$. Para tornar o problema determinado, propõe-se uma terceira equação baseada em uma condição constitutiva da haste. Considerando que os esforços impostos são de magnitude muito inferior aos necessários para causar deformações na estrutura, postula-se que a distância entre dois nós adjacentes será sempre l_n , ou seja, não ocorre deformação. Propõe-se a expressão:

$$\left(x_{(n,t')} - x_{(n-l,t')}\right)^2 + \left(z_{(n,t')} - z_{(n-l,t')}\right)^2 = l_n^2 \quad (3.15)$$

Deve-se reparar que todos os nós possuem conexão inferior, mas nem todos possuem uma conexão superior (caso do nó da extremidade superior), desta forma, a equação é escrita relacionando sempre o nó n com o nó $n-l$. Desenvolvendo e derivando em relação ao tempo, tem-se:

$$\left[x_{(n,t')} - x_{(n-l,t')}\right] \left[\frac{\partial}{\partial t} x_{(n,t')} - \frac{\partial}{\partial t} x_{(n-l,t')} \right] + \left[z_{(n,t')} - z_{(n-l,t')}\right] \left[\frac{\partial}{\partial t} z_{(n,t')} - \frac{\partial}{\partial t} z_{(n-l,t')} \right] = 0 \quad (3.16)$$

Substituindo os termos das derivadas por uma aproximação numérica e reorganizando os membros:

$$\left[\frac{\Delta x_{(n,t')}}{\Delta t} - \frac{\Delta x_{(n-l,t')}}{\Delta t} \right] = - \left[\frac{z_{(n,t')} - z_{(n-l,t')}}{x_{(n,t')} - x_{(n-l,t')}} \right] \left[\frac{\Delta z_{(n,t')}}{\Delta t} - \frac{\Delta z_{(n-l,t')}}{\Delta t} \right] \quad (3.17)$$

onde a primeira fração do lado direito representa o inverso da tangente de $\theta_{(n,t')}$.

Finalmente, multiplicando ambos os lados por Δt , chega-se à:

$$\Delta x_{(n,t')} = \left[\Delta x_{(n-l,t')} + \frac{\Delta z_{(n-l,t')}}{\text{tg}\theta_{(n,t')}} \right] - \frac{\Delta z_{(n,t')}}{\text{tg}\theta_{(n,t')}} \quad (3.18)$$

A Equação 3.18 relaciona $\Delta x_{(n,t')}$ a $\Delta z_{(n,t')}$. Desta forma, para cada nó, tem-se três equações e três incógnitas. Desta forma, para um sistema com N nós, ter-se-á um total de $3N$ equações e $3N$ variáveis, caracterizando um problema determinado.

3.3.3 Considerações sobre os tipos de nós

As equações apresentadas em 3.13 e 3.18 podem ser simplificadas no caso dos nós das extremidades, ou seja $n=1$ e $n=N$. Neste último, não existirá uma tensão T_{N+l} , logo as equações referentes a este elemento podem ser reescritas como:

$$F_{Tx(N,t')} - T_{(N,t')}\text{sen}\theta_{(N,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta x_{(N,t')}}{\Delta t} - u_{vx(N,t')} \right] \quad (3.19a)$$

$$F_{Tz(n,t')} + F_E - T_{(N,t')} \cos \theta_{(N,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta z_{(N,t')}}{\Delta t} - u_{vz(n,t')} \right] \quad (3.19b)$$

$$\Delta x_{(N,t')} = \left[\Delta x_{(N-1,t')} + \frac{\Delta z_{(N-1,t')}}{\operatorname{tg} \theta_{(N,t')}} \right] - \frac{\Delta z_{(N,t')}}{\operatorname{tg} \theta_{(N,t')}} \quad (3.19c)$$

Para o primeiro nó, considera-se que não ocorrerão variações das posições horizontal e vertical no ponto de ligação da haste com o substrato, ou seja, o fundo é fixo no tempo. Para $n=1$, as equações serão reescritas como:

$$F_{Tx(n,t')} - T_{(1,t')} \sin \theta_{(1,t')} + T_{(2,t')} \sin \theta_{(2,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta x_{(1,t')}}{\Delta t} - u_{vx(1,t')} \right] \quad (3.20a)$$

$$F_{Tz(n,t')} + F_E - T_{(1,t')} \cos \theta_{(1,t')} + T_{(2,t')} \cos \theta_{(2,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta z_{(1,t')}}{\Delta t} - u_{vz(1,t')} \right] \quad (3.20b)$$

$$\Delta x_{(1,t')} = - \frac{\Delta z_{(1,t')}}{\operatorname{tg} \theta_{(1,t')}} \quad (3.20c)$$

Finalmente, para cada um dos $N-2$ nós intermediários tem-se:

$$F_{Tx(n,t')} - T_{(n,t')} \sin \theta_{(n,t')} + T_{(n+1,t')} \sin \theta_{(n+1,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta x_{(n,t')}}{\Delta t} - u_{vx(n,t')} \right] \quad (3.21a)$$

$$F_{Tz(n,t')} + F_E - T_{(n,t')} \cos \theta_{(n,t')} + T_{(n+1,t')} \cos \theta_{(n+1,t')} = \frac{2M}{\Delta t} \left[\frac{\Delta z_{(n,t')}}{\Delta t} - u_{vz(n,t')} \right] \quad (3.21b)$$

$$\Delta x_{(n,t')} = \left[\Delta x_{(n-1,t')} + \frac{\Delta z_{(n-1,t')}}{\operatorname{tg} \theta_{(n,t')}} \right] - \frac{\Delta z_{(n,t')}}{\operatorname{tg} \theta_{(n,t')}} \quad (3.21c)$$

A solução do sistema das $3N$ equações 3.19 a 3.21 fornecerá, as forças longitudinais de conexão entre os nós e os seus deslocamentos em um passo de tempo. A posição final, juntamente com os valores das velocidades iniciais, são inseridos nas equações 3.14 fornecendo as acelerações de cada nó.

Dentro da hipótese de aceleração constante durante o passo de tempo, a velocidade final do nó é obtida pela aproximação de movimento uniformemente acelerado:

$$u_{vx(n,t'+\Delta t)} = u_{vx(n,t')} + a_{vx(n,t')} \Delta t \quad (3.22a)$$

$$u_{vz(n,t'+\Delta t)} = u_{vz(n,t')} + a_{vz(n,t')} \Delta t \quad (3.22b)$$

Esta informação fornecerá as condições iniciais de velocidade para os cálculos no próximo passo de tempo. Da mesma forma, a nova posição será:

$$x_{(n,t'+\Delta t)} = x_{(n,t')} + \Delta x_{(n,t')} \quad (3.23a)$$

$$z_{(n,t'+l)} = z_{(n,t')} + \Delta z_{(n,t')} \quad (3.23b)$$

3.3.4 Modelagem da força exercida pelo escoamento

A força exercida pelo escoamento sobre uma estrutura vertical cilíndrica, é tradicionalmente representada por uma equação do tipo:

$$\vec{F}_T = \underbrace{\frac{l}{2} C_D \rho_f \vec{A}_{eq} \vec{u}_{rel} |\vec{u}_{rel}|}_{(1)} + \underbrace{k_m \rho_f V_{el} \vec{a}_{rel}}_{(2)} + \underbrace{\rho_f V_{el} \vec{a}_f}_{(3)} \quad (3.24)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste, $\vec{A}_{eq}$ corresponde à área da face da estrutura normal ao vetor velocidade relativa entre o fluido e o nó, $\vec{u}_{rel} = \vec{u}_f - \vec{u}_v$, k_m é o coeficiente de massa adicional e $\vec{a}_{rel} = \vec{a}_f - \vec{a}_v$.

A expressão 3.24 é uma generalização da Equação de Morison, para considerar o movimento da estrutura (BREBBIA & WALKER, 1979). Embora a equação tenha origem empírica, tentativas de se obter formulações que melhor representem esforços hidrodinâmicos sobre estruturas não tem apontado para soluções mais realistas (CHAKRABARTI, 1987).

A expressão apresentada considera efeitos de arraste e inércia. O primeiro deles, surge em consequência da viscosidade do fluido, que ao escoar em torno do elemento cria uma zona de baixa pressão na região posterior. Este efeito é representado pelo primeiro termo de 3.24, onde o módulo se faz necessário devido à inversão de sentido do escoamento.

Os efeitos de inércia independem da viscosidade, e podem ser divididos em duas componentes. A primeira delas representa a parcela de fluido que acompanha o movimento da estrutura, aumentando a massa aparente do elemento. Como consequência, faz-se presente uma inércia adicional resistente ao movimento. Esta componente está representada pelo segundo termo de 3.24, onde o coeficiente k_m será uma função da forma da estrutura.

A segunda componente inercial surge como consequência da aceleração do fluido em relação ao substrato. Assim como no caso do empuxo hidrostático decorrente da aceleração da gravidade, o gradiente de pressão imposto pela aceleração do escoamento dá origem a uma força. Este efeito é representado pelo terceiro termo de 3.24.

Durante o desenvolvimento do modelo, o movimento da haste foi filmado de cima do canal de ondas, revelando que oscilações transversais ao sentido de propagação das ondas não eram observadas. Por este motivo, a expressão adotada não contempla forças de sustentação.

O coeficiente de arraste, C_D , será uma função do escoamento e das características da estrutura. Na literatura existem diversos trabalhos correlacionando o seu valor com parâmetros adimensionais, tais como o número de Reynolds e de Keulegan-Carpenter. Já o coeficiente de massa adicional k_m , depende da forma do objeto, e muitos autores apresentam funções explícitas de seu valor para diferentes seções transversais. É comum ainda, a aceleração da estrutura ser ignorada, e as forças de inércia serem representadas por um único termo a partir da introdução de um novo coeficiente $C_M = 1 + k_m$. Buscando uma maior representatividade para os casos estudados neste trabalho, os coeficientes de força deverão ser ajustado a partir de medições experimentais.

3.3.5 Teoria de onda utilizada

A obtenção da velocidade do escoamento nos nós para cálculo do modelo deve ser feita a partir de uma teoria de ondas que represente satisfatoriamente as características observadas nos locais de ocorrência da vegetação, que na maioria das vezes está próxima da margem. Esta característica aponta para ondas que eventualmente estarão próximas de seu limite de arrebenção (Figura A.9 no Apêndice A), e cujos termos não-lineares passam a ser importantes. Segundo DEAN (1968), próximo a este limite, a teoria da função de corrente é a mais indicada para representar o escoamento. Este autor constatou ainda que, em águas rasas, o cálculo da força de arraste a partir de teorias analíticas pode incorrer em erros exagerados.

Para a determinação das propriedades da onda durante as simulações com o modelo mecânico, optou-se pelo uso da teoria da função de corrente, assim, a assimetria do campo de velocidades decorrente da não-linearidade das ondas passa a ser considerada no cálculo das forças hidrodinâmicas. O ganho obtido com o uso desta teoria em detrimento da aproximação linear pode ser visto na representação da superfície livre para algumas das ondas ensaiadas (parte A das figuras do Apêndice C). Fica evidente que a teoria linear não poderia representar satisfatoriamente ondas como a 24-1h, mostrada na Figura C.12A.

A referida teoria consiste em uma aproximação em série, onde os coeficientes multiplicadores de cada termo são obtidos através de um método iterativo de minimização do erro na condição de contorno dinâmica na superfície livre. Conforme NEVES (1987), a função de corrente para uma onda monocromática é expressa por uma série do tipo:

$$\psi(x, z, t) = \sum_{j=1}^N \frac{X(j)}{j} \sinh(jkz) \cos[j(kx - \sigma t)] \quad (3.25)$$

onde $X(j)$ são coeficientes ajustados através do processo de minimização. As expressões para as componentes da velocidade são obtidas diretamente:

$$u_{fx} = -\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\sum_{j=1}^N k.X(j) \cosh(jkz) \cos[j(kx - \sigma t)] \quad (3.26a)$$

$$u_{fz} = \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\sum_{j=1}^N k.X(j) \sinh(jkz) \sin[j(kx - \sigma t)] \quad (3.26b)$$

Detalhes sobre a colocação do problema de minimização do erro para a obtenção dos coeficientes da série podem ser obtidos em DEAN (1968) e DEAN e DALRYMPLE (1984).

3.4 Fechamento do problema

O desenvolvimento apresentado neste capítulo aliado a experimentos com o tipo de haste investigado permite uma análise criteriosa não só das forças exercidas sobre o escoamento por um indivíduo, como também da força total de resistência de um conjunto deles. A Figura 3.4 apresenta um resumo da metodologia proposta e das diferentes etapas de sua aplicação. A repetição do procedimento para diferentes condições de onda e características físicas da haste produzirá informações que possibilitarão o refinamento de um modelo conceitual específico para o amortecimento de ondas de gravidade em campos formados por estes elementos.

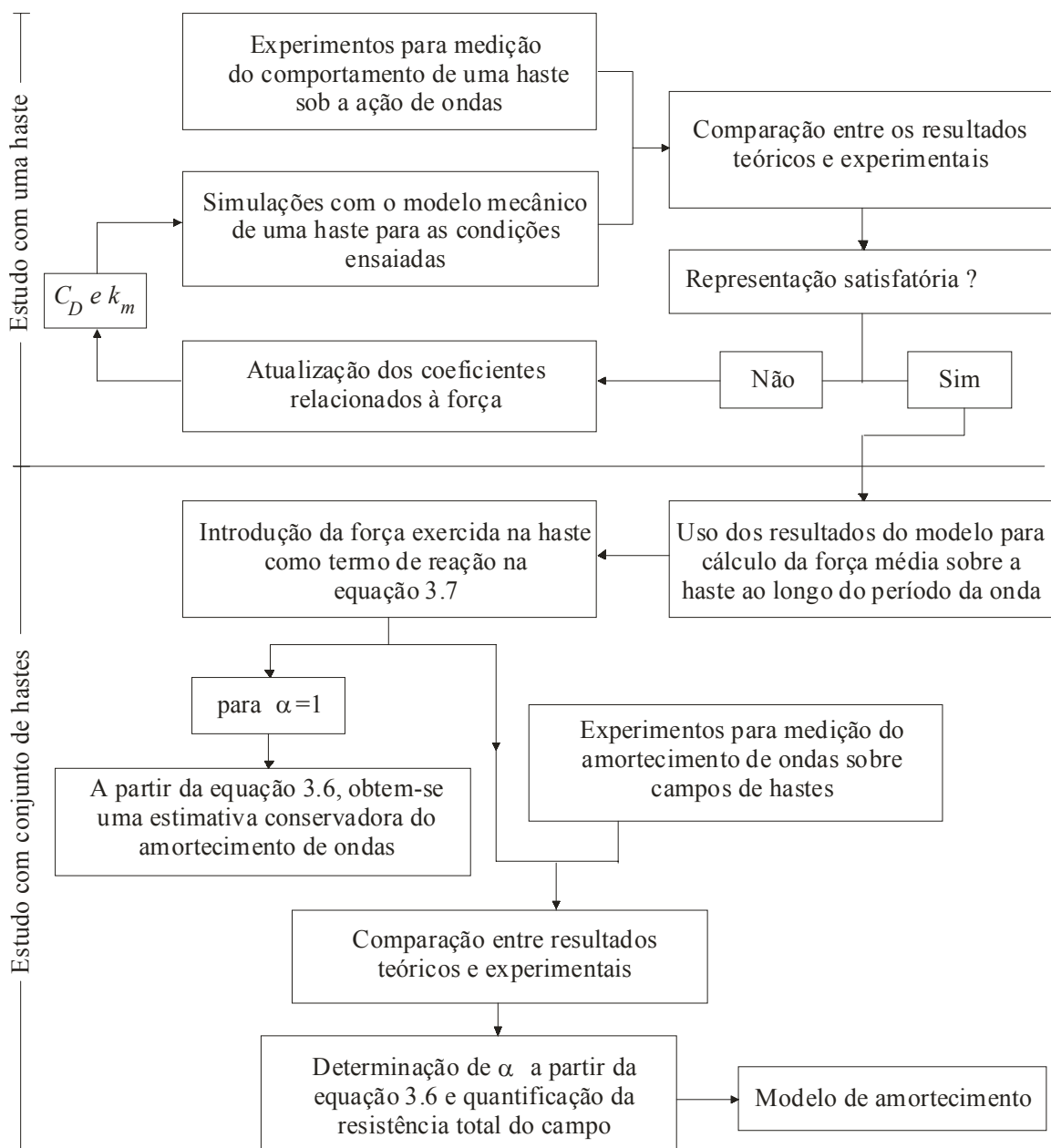


Figura 3.4 – Metodologia proposta para investigação e modelagem do amortecimento ocasionado pelo conjunto de uma determinada haste.

Capítulo 4

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Duas etapas experimentais foram conduzidas para caracterizar o amortecimento gerado por um tipo específico de elemento flexível através da abordagem proposta. As atividades de laboratório utilizaram hastes artificiais cujo comportamento hidrodinâmico mostrou-se semelhante ao da espécie vegetal observada no reservatório de Ilha Solteira. A seleção do material foi feita com base em dois critérios fundamentais: (i) assim como as hastes das plantas mais desenvolvidas, a haste artificial deveria possuir baixa resistência à flexão, a ponto de somente permanecer na posição vertical quando submetido à ação do empuxo; (ii) sob a ação de ondas semelhantes às registradas no reservatório paulista, o elemento deveria responder com deslocamentos de magnitude próxima à observada nas espécies nativas. Após um processo de teste com diferentes materiais disponíveis comercialmente, optou-se pelo uso de cabos de nylon trançado com 6 mm de diâmetro e massa específica $\rho_v=681,43 \text{ kg/m}^3$. Este elemento satisfaz as condições impostas, sendo ainda de fácil manipulação.

Todas as atividades de laboratório foram realizadas nas instalações do Instituto de Pesquisas Hidroviárias/INPH em três períodos distintos. Os ensaios relacionados à calibração do modelo numérico para uma única haste foram conduzidos entre os meses de maio e junho de 2004. Os ensaios com campo de hastes foram realizados entre os meses de janeiro e fevereiro de 2005 para um espaçamento entre elementos de 50 mm, e em março deste mesmo ano para um espaçamento de 25 mm.

O canal utilizado possui 43 m de comprimento por 0,8 m de largura e 1 m de profundidade. O gerador de ondas acoplado é de acionamento hidráulico, operando com um pistão controlado por micro computador. A outra extremidade do canal possui uma praia absorvedora feita com brita de granulometria variada, com 5 m de extensão.

O canal possui ainda duas janelas para observação com 2,9 m de largura por 0,80 m de altura, feitas de vidro com 17 mm de espessura. A Figura 4.1 apresenta uma planta esquemática, onde se observa a existência de dois canais laterais que não foram utilizados no presente estudo. A pequena declividade do canal principal possui objetivo prático de facilitar operações de esvaziamento.

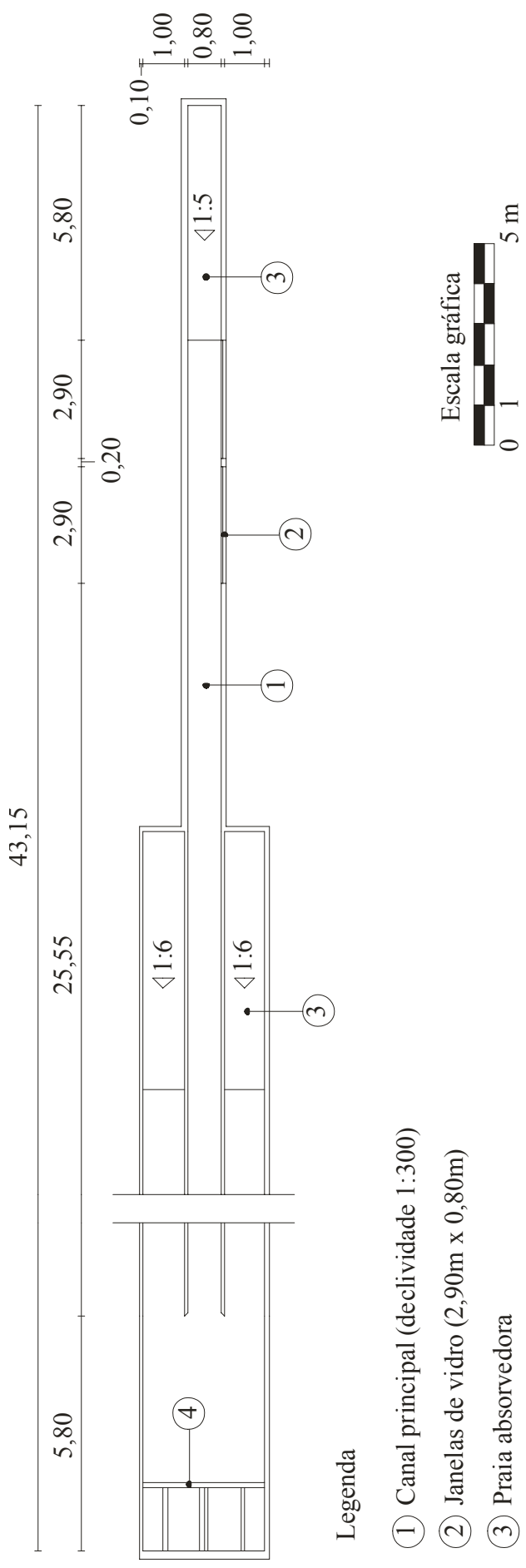


Figura 4.1 - Planta baixa do canal de ondas do INPH utilizado nos experimentos

4.1 Medições do comportamento de uma haste

Para a calibração do modelo de uma haste, optou-se por uma técnica de medição indireta baseada em vídeo. Pontos discretos foram marcados ao longo do elemento com tinta fosforescente a um espaçamento regular de 5 centímetros. O processamento da posição dos nós ao longo do tempo forneceu o histórico de velocidades da haste. A comparação das curvas de posição e velocidade com aquelas geradas pelo modelo numérico indicou o grau de representatividade dos coeficientes de força utilizados nas simulações.

4.1.1 Obtenção do histórico de posições

Durante os ensaios, uma lâmpada ultra-violeta compacta L.C. Light de 25 W foi utilizada para destacar a marcação dos pontos. A movimentação da haste durante a incidência de ondas foi filmada através das janelas de observação do canal por uma câmera de vídeo modelo JVC GR-D72U a uma frequência de aquisição de 29,97 quadros por segundo. Os dados foram armazenados em formato digital em mídia MDV. O tempo de filmagem para cada ensaio foi de um minuto. A Figura 4.2 apresenta um exemplo da imagem registrada em dois quadros de um mesmo experimento.

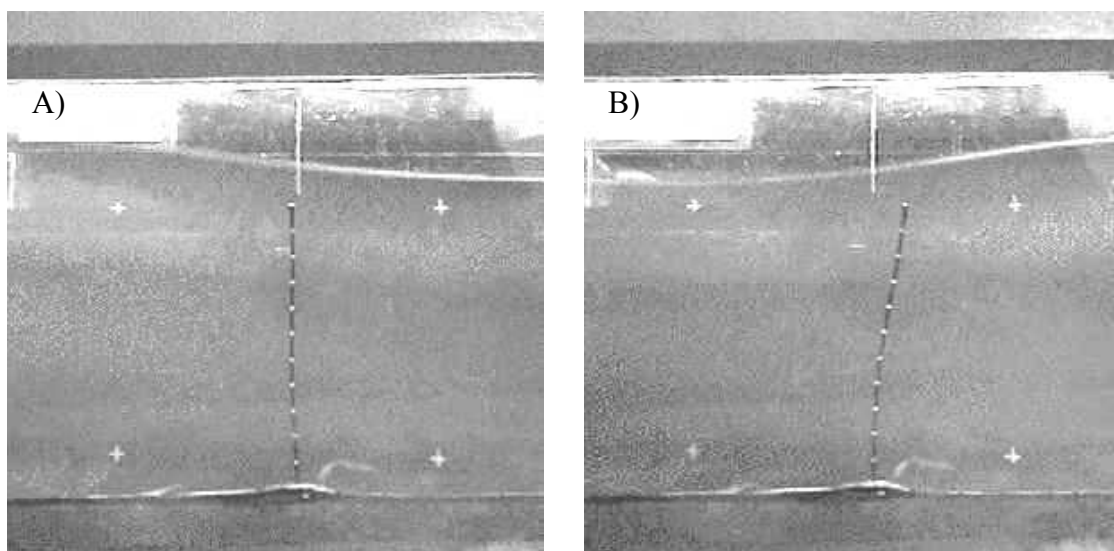


Figura 4.2 – Quadros de filmagem. A) haste graduada em seu recuo máximo após a passagem da cava da onda. B) Haste em sua posição mais avançada após passagem da crista da onda.

O processamento das informações obtidas foi dividido em três etapas: (i) conversão dos dados para vídeo padrão Microsoft Windows em formato AVI com resolução de 720 x 480 de 24 bits com Codec Cinepak, através de uma placa de captura Matrox modelo RT2000; (ii) edição dos arquivos de vídeo através do programa Adobe Premier da Adobe, de modo a selecionar dentro do tempo de filmagem do ensaio, o intervalo a ser estudado; (iii) identificação da posição das marcas em cada quadro da filmagem com o auxílio do programa ONDAS versão beta 1.1 de 28/04/2004 desenvolvido no Laboratório de Multimídia do NCE/UFRJ.

A conversão das informações em unidade de pixel para uma escala métrica foi feita com base em marcações no vidro do canal (pequenas cruzeiras brancas nos quadros da Figura 4.2), cujas distâncias eram precisamente conhecidas. A Figura 4.3 apresenta o esquema principal de posicionamento da câmera, bem como um exemplo do resultado obtido após a digitalização.

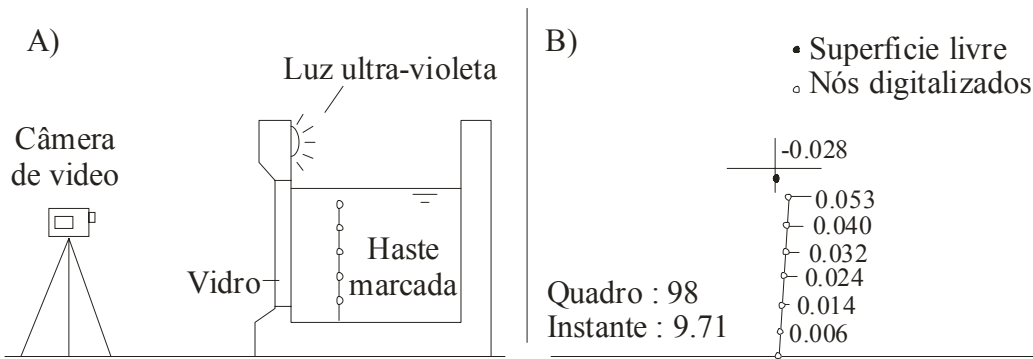


Figura 4.3 – Técnica de filmagem utilizada para obtenção da posição dos nós da haste. A) Seção do canal de ondas utilizada para registrar o movimento da haste. B) Resultado obtido para um quadro digitalizado.

Para garantir a precisão da metodologia, as posições dos nós obtidas devem passar por um procedimento de correção que leva em conta eventuais distorções ópticas.

4.1.2 Correção das distorções ópticas

O fato de a referência métrica (marcas no vidro do canal) está a uma certa distância do objeto medido, e de as filmagens realizadas neste estudo contemplarem três meios distintos (ar, água e vidro), faz com que ocorram dois fenômenos ópticos que influenciam no valor de posição medido. O primeiro deles consiste na distorção entre a posição da marca na haste e sua projeção sobre a escala do vidro, também conhecido como paralaxe. O segundo é a refração da luz que sai do ponto estudado dentro da água,

incide no vidro e finalmente passa pelo ar até atingir a lente de filmagem. A Figura 4.4 apresenta uma seção transversal do canal ilustrando a posição virtual da haste e a posição que será projetada sobre a malha de referência na face externa do vidro, posição que será obtida no processo de digitalização.

- Posição virtual do ponto na haste
- Posição do ponto projetada no vidro

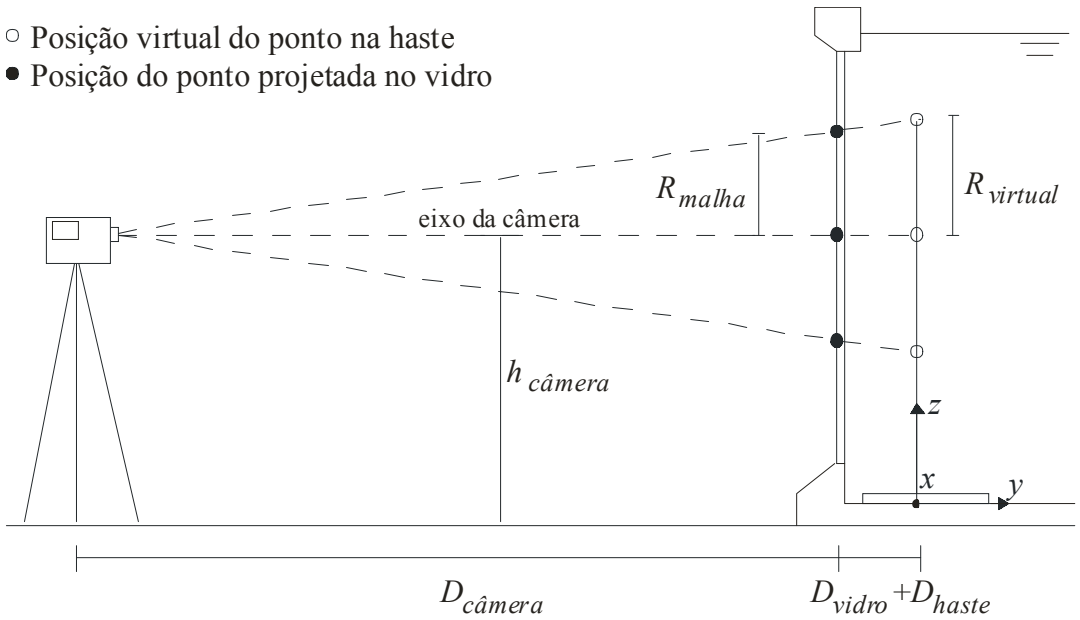


Figura 4.4 – Posição relativa da marcação na haste que é registrada em consequência de a referência métrica encontrar-se na face externa do vidro do canal.

A relação entre os pontos $R_{virtual}$ e R_{malha} é estimada por semelhança de triângulos:

$$\frac{R_{virtual}}{D_{câmera} + D_{vidro} + D_{haste}} = \frac{R_{malha}}{D_{câmera}} \therefore R_{virtual} = \left(1 + \frac{D_{vidro} + D_{haste}}{D_{câmera}} \right) R_{malha} \quad (4.1)$$

É intuitivo supor que a diferença entre os pontos virtual e na malha será maior, quanto maior for a distância da haste ao vidro. Assim, do ponto de vista da medição, a configuração ideal consistiria em posicionar a haste no limite do contato com o vidro. Por outro lado, do ponto de vista do fenômeno, o objeto em estudo passaria a ser influenciado por esta proximidade, o que leva a adoção de um valor intermediário, satisfatório sob os dois aspectos.

A Figura 4.5 ilustra um corte transversal na proximidade do vidro, indicando que a posição $R_{virtual}$ calculada pode ainda não coincidir com a posição real da marca devido ao efeito da refração. A relação entre os ângulos do raio de luz (θ) e o índice de refração (I_r) de cada meio pode ser quantificada com base na lei de Snell:

$$I_{r(água)} \text{sen}\theta_1 = I_{r(vidro)} \text{sen}\theta_2 \therefore \text{sen}\theta_2 = \frac{I_{r(água)}}{I_{r(vidro)}} \text{sen}\theta_1 \quad (4.2)$$

$$I_{r(vidro)} \text{sen} \theta_2 = I_{r(ar)} \text{sen} \theta_3 \therefore \text{sen} \theta_3 = \frac{I_{r(vidro)}}{I_{r(ar)}} \text{sen} \theta_2 \quad (4.3)$$

- ✱ Posição real do ponto estudado
- Posição virtual (paralaxe já corrigido)

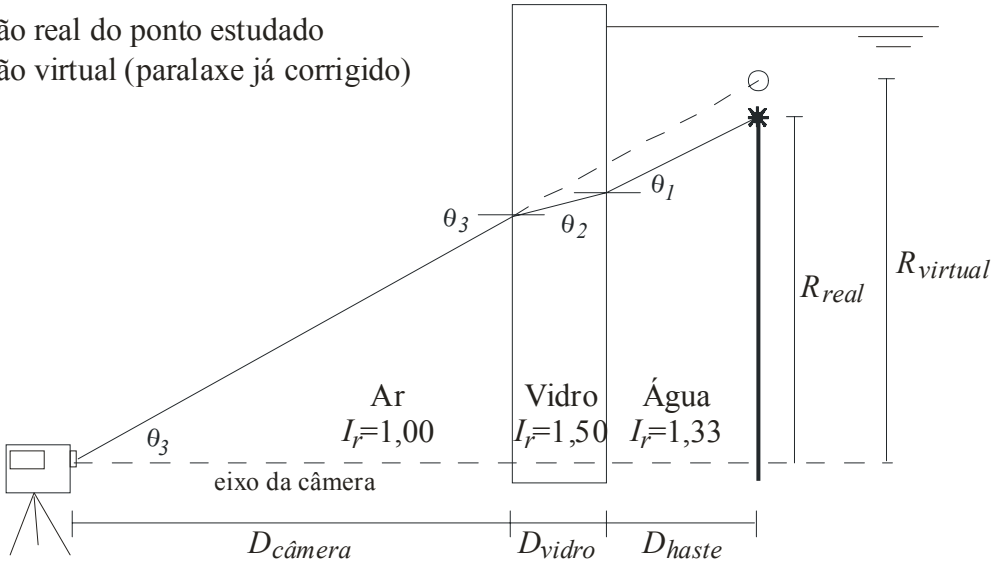


Figura 4.5 – Refração da luz ao passar da água para o vidro e deste para o ar até atingir a lente da câmera.

Substituindo a equação 4.2 em 4.3, vê-se que a relação entre os ângulos θ_1 e θ_3 depende somente da razão entre os índices de refração da água e do ar:

$$\text{sen} \theta_3 = \frac{I_{r(água)}}{I_{r(ar)}} \text{sen} \theta_1 \quad (4.4)$$

Procurando definir o erro entre a posição real do ponto (R_{real}) e a posição virtual ($R_{virtual}$), escreve-se:

$$R_{real} = D_{camera} \text{tg} \theta_3 + D_{vidro} \text{tg} \theta_2 + D_{haste} \text{tg} \theta_1 \quad (4.5)$$

A posição virtual será simplesmente:

$$R_{virtual} = (D_{camera} + D_{vidro} + D_{haste}) \text{tg} \theta_3 \quad (4.6)$$

Usando as relações 4.3 e 4.4, reescreve-se a posição real dada em 4.5 em função de um único ângulo:

$$R_{real} = D_{camera} \text{tg} \theta_3 + D_{vidro} \text{tg} \left[\text{asen} \left(\frac{I_{r(ar)}}{I_{r(vidro)}} \text{sen} \theta_3 \right) \right] + D_{haste} \text{tg} \left[\text{asen} \left(\frac{I_{r(ar)}}{I_{r(água)}} \text{sen} \theta_3 \right) \right] \quad (4.7)$$

Finalmente, relaciona-se R_{real} ao $R_{virtual}$ substituindo a expressão 4.6 em 4.7:

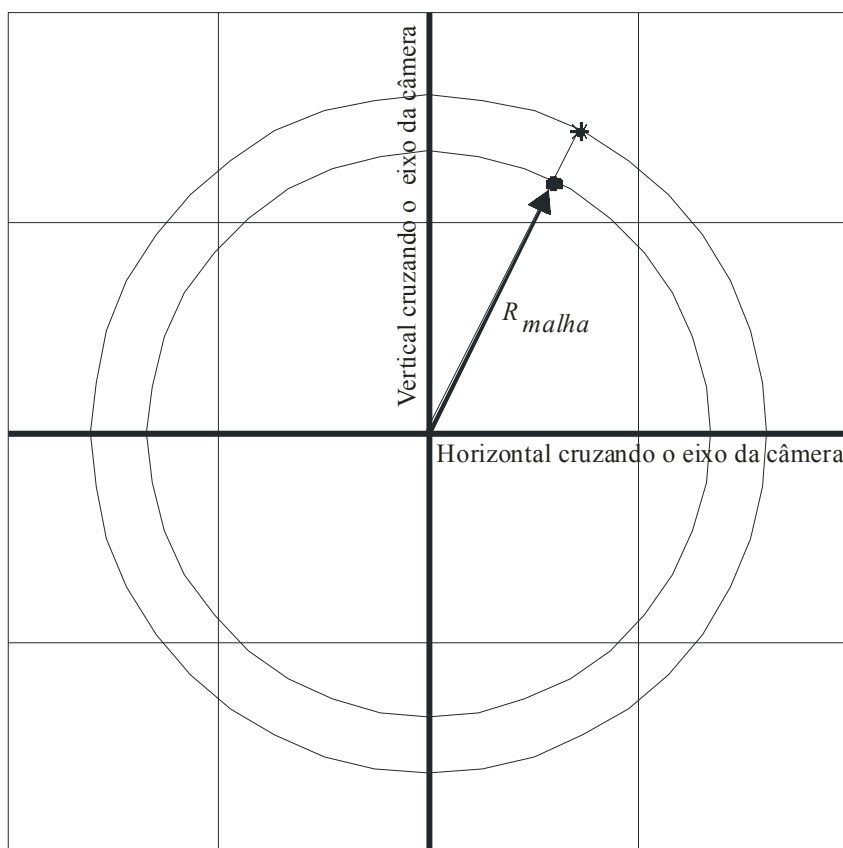
$$R_{real} = D_{camera} \left(\frac{R_{virtual}}{D_{camera} + D_{vidro} + D_{haste}} \right) + D_{vidro} \text{tg} \left\{ \text{asen} \left[\frac{I_{r(ar)}}{I_{r(vidro)}} \frac{R_{virtual}}{\sqrt{R_{virtual}^2 + (D_{camera} + D_{vidro} + D_{haste})^2}} \right] \right\}$$

$$+ D_{haste} \operatorname{tg} \left\{ \operatorname{asen} \left[\frac{I_{r(ar)}}{I_{r(\acute{a}gua)}} \frac{R_{virtual}}{\sqrt{R_{virtual}^2 + (D_{camera} + D_{vidro} + D_{haste})^2}} \right] \right\} \quad (4.8)$$

De posse das relações 4.1 e 4.8, calcula-se a posição real de um ponto filmado, desde que se tenha como referência o eixo da câmara. Para um determinado ponto digitizado, distante R_{malha} do eixo, corrige-se o erro de paralaxe a partir da equação 4.1, obtendo $R_{virtual}$, para em seguida corrigir os efeitos da refração com a equação 4.8, o que fornece a posição procurada R_{real} .

Embora os cálculos apresentados tenham sido desenvolvidos para pontos medidos sobre uma reta vertical perpendicular ao eixo da câmara, os erros comportam-se da mesma forma para quaisquer pontos distantes R_{malha} deste eixo. Conseqüentemente, as distorções serão as mesmas para pontos que estejam sobre o círculo com centro no eixo da câmara e raio R_{malha} . A posição real deste círculo será dada por um novo círculo concêntrico ao anterior, porém com raio igual a R_{real} . A Figura 4.6 mostra a posição de um ponto qualquer da haste registrada em um quadro da filmagem. O vetor posição do ponto será $\vec{R}_{malha}$, cujo módulo pode ser usado nas equações 4.1 e 4.8 fornecendo um outro vetor de mesma direção, porém com módulo igual a $\vec{R}_{real}$.

A Figura 4.7 representa as diferenças de posição registradas ao longo de toda a faixa de abrangência dos experimentos conduzidos para uma única haste, onde a câmara filmadora foi ajustada na horizontal a uma altura $h_{câmara}=0,59$ m do piso. As distâncias $D_{câmara}$, D_{vidro} e D_{haste} foram de 4,00, 0,017 e 0,13 metros respectivamente, e os índices de refração do ar, do vidro e da água adotados foram 1,00, 1,50 e 1,33. Observa-se que o efeito de paralaxe pode acarretar erros quatro vezes maiores que os decorrentes da refração da luz. Todavia, os cálculos indicam que um efeito atenua o outro, e como resultado final encontram-se erros máximos da ordem de 1,5 cm.



- Posição registrada de um ponto qualquer da haste sobre o vidro
- * Posição real do ponto

Figura 4.6 – Generalização das equações para correção de posição para um ponto qualquer relacionado ao eixo da câmera.

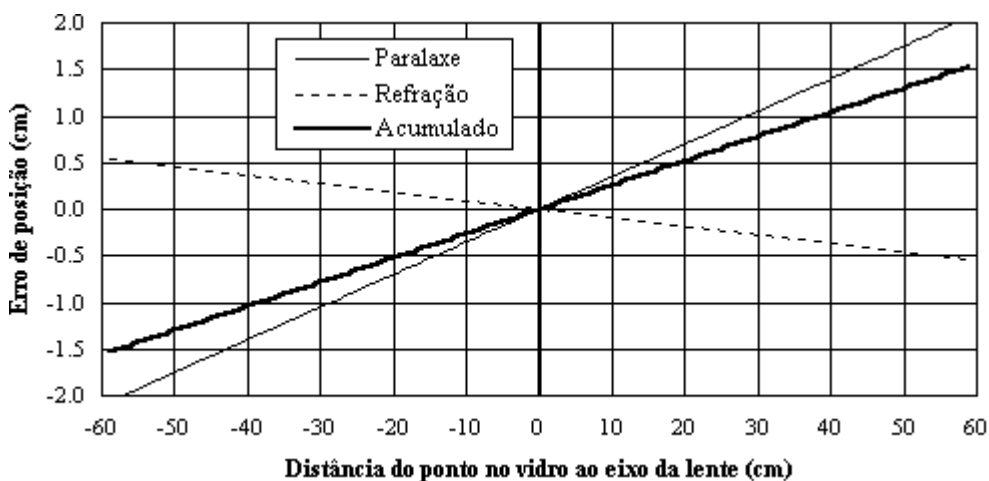


Figura 4.7 – Erros ópticos estimados pelas equações 4.1 e 4.8 para a configuração experimental adotada.

A compreensão e quantificação das distorções ópticas permite a redução dos erros inerentes ao processo de medição. Todavia, a câmera possui uma precisão limite, e deve-se garantir que este valor seja satisfatório para os fins da pesquisa.

Tomando como definição de precisão a metade da menor divisão de escala que o instrumento reconhece, a precisão da câmera corresponde a meio píxel, onde o tamanho de cada píxel dependerá do enquadramento utilizado. Para as condições do experimento, dentro da resolução adotada no processo de captura de vídeo, cada píxel passou a ter cerca de 0,30 mm, desta forma, a precisão do equipamento era de 0,15 mm, mostrando-se satisfatória por ser significativamente inferior a qualquer grandeza característica que se procurou medir.

4.1.3 Ensaios

As características dos ensaios foram determinadas com base na faixa de operação do canal e do gerador, procurando reproduzir condições semelhantes às registradas no ambiente natural. Foram usados dois níveis d'água, correspondendo a 0,75 e 0,55 metros de profundidade. As alturas de onda estudadas foram de 0,10 e 0,20 metros respectivamente, com períodos de 1,0, 1,5, e 2,0 segundos. Os comprimentos de haste foram sempre 0,1 metros menores que a lâmina d'água, de forma que mesmo diante da maior onda a haste permanecesse sempre submersa, evitando o aparecimento de outros fenômenos decorrentes da ausência de empuxo. Estes valores implicaram em um modelo de escala 1:1. A Tabela 4.1 apresenta o plano de ensaios usado para os 12 experimentos realizados. Faz-se oportuno comentar que todos os valores de comprimento de onda, L , indicados deste ponto em diante foram obtidos através da teoria da função de corrente de terceira ordem.

Tabela 4.1 – Plano de ensaios utilizado para os estudos com uma única haste.

Ensaio	h	s	H	T	L	h/L	H/L	ϕ/L ($\times 10^3$)
07-1h	0,75	0,65	0,10	1,0	1,61	0,466	0,062	3,727
08-1h	0,75	0,65	0,10	1,5	3,20	0,234	0,031	1,875
09-1h	0,75	0,65	0,10	2,0	4,77	0,157	0,021	1,258
10-1h	0,75	0,65	0,20	1,0	1,76	0,426	0,114	3,409
11-1h	0,75	0,65	0,20	1,5	3,29	0,228	0,061	1,824
12-1h	0,75	0,65	0,20	2,0	4,86	0,154	0,041	1,235
19-1h	0,55	0,45	0,10	1,0	1,58	0,348	0,063	3,797
20-1h	0,55	0,45	0,10	1,5	2,95	0,186	0,034	2,034
21-1h	0,55	0,45	0,10	2,0	4,26	0,129	0,023	1,408
22-1h	0,55	0,45	0,20	1,0	1,73	0,318	0,116	3,468
23-1h	0,55	0,45	0,20	1,5	3,06	0,180	0,065	1,961
24-1h	0,55	0,45	0,20	2,0	4,42	0,124	0,045	1,357

Na prática, os valores medidos apresentaram flutuações em torno dos valores idealizados. As tabelas apresentadas no Apêndice C, relacionadas a cada um dos ensaios, trazem as medições de onda registradas nos intervalos utilizados para a calibração do modelo mecânico.

Antes de cada ensaio, a haste de nylon era recolocada manualmente na posição vertical, garantindo assim que as séries de posição dos nós possuísem sempre a mesma origem. Tal procedimento se fazia necessário para algumas das ondas de maior comprimento que, após induzirem oscilação nas hastes, estabilizavam sua posição de forma inclinada. Para garantir repouso da condição inicial, foi dado um intervalo de 10 minutos entre cada ensaio.

4.2 Medições com campo de hastes

Para os experimentos com campo de hastes, a fixação no fundo foi garantida através de telas de ferro com 3,4 mm de diâmetro (Fio 10) e espaçamento entre nós 25 mm. Foram montadas 3 grades de 1,0 x 0,75 m, e cada uma delas foi colocadas no fundo do canal, lado a lado, de forma a representar um campo com 3 m de extensão por 0,75 m de largura. Em uma primeira montagem, os cabos foram fixados a 5 cm de distância um do outro ($E_v=0,05$), configurando uma densidade $N_h=1/E_v^2 = 400$ hastes/m². Na segunda montagem, o espaçamento utilizado entre os elementos foi de 2,5 cm, configurando uma densidade $N_h= 1600$ hastes/m². A Figura 4.8 ilustra o aparato utilizado, onde as marcações com “x” indicam o esquema de fixação para as hastes na primeira montagem.

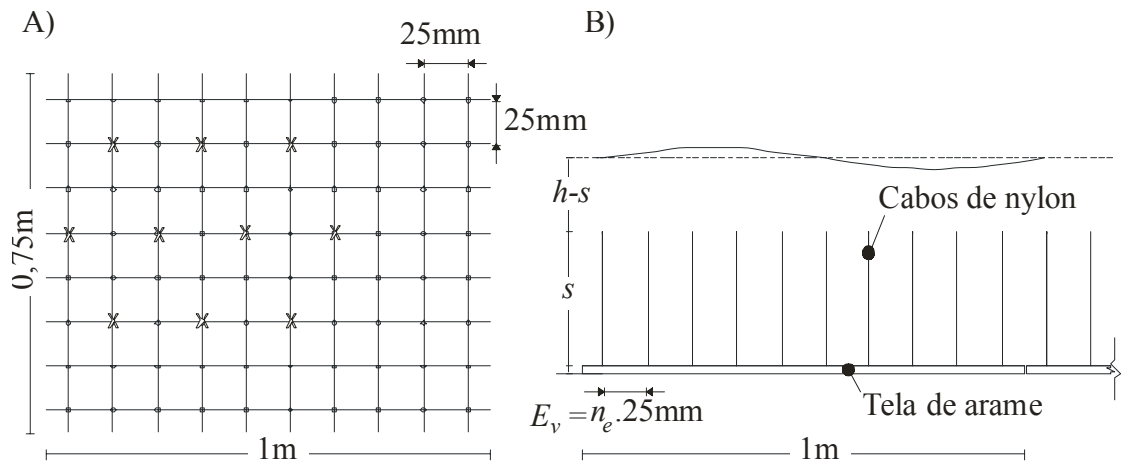


Figura 4.8 – Esquema de fixação das haste no fundo do canal. A) Vista superior da tela de arame. B) Visão lateral do aparato já com as hastes de nylon fixadas ao fundo.

Como os espaçamentos entre hastes (E_v) usados nos ensaios com campo foram de 25 e 50 milímetros, os valores do múltiplos da malha da grade (n_e) utilizados foram 1 e 2, respectivamente. Nos estudos com uma única haste, usou-se o mesmo tipo de tela ilustrado, porém com apenas 26 cm de comprimento por 26 cm de largura. A amarração

dos cabos nos nós da grade foi feita por meio de presilhas plásticas com 10 cm de comprimento por 0,25 cm de largura. A Figura 4.9 apresenta o processo de fixação dos cabos na tela de arame e sua configuração final no canal de ondas. Ao contrário dos experimentos com uma única haste, onde o contraste com a tinta fosforescente exigiu cabos escuros, nos experimentos com campo de hastes foram utilizados cabos de coloração branca. Na Figura 4.10, as peças montadas estão posicionadas no canal de ondas para testes preliminares.



Figura 4.9 – Preparação para experimentos com campo de hastes através da montagem das telas de 1,00 x 0,75 m com hastes de 0,6 m.



Figura 4.10 - Testes preliminares no canal de ondas com o campo artificial.

As características de onda ensaiadas foram semelhantes às utilizadas na etapa com uma haste, sendo que, por questões operacionais relacionadas à quantidade de material utilizado e ao procedimento de corte e montagem, a altura das hastes manteve-se fixa e igual a 0,6 m. O plano de ensaios utilizado está indicado na Tabela 4.2, onde H_o refere-se à altura da onda estimada no início do campo.

Devido às curvas de geração desenvolvidas na primeira fase de ensaios, conseguiu-se reduzir a flutuação da altura da onda medida em relação aos valores estipulados para diferenças da ordem de poucos milímetros.

Os experimentos foram realizados em três etapas, a saber: (i) sem a presença do campo artificial, (ii) com 3 metros de campo e uma densidade de 400 hastes/m², (iii) com 3 metros de campo e uma densidade de 1600 hastes/m². Durante todos os ensaios, as alturas de onda foram registradas ao longo de toda a extensão do campo por meio de cinco sondas resistivas. Dois microADV's SonTek de 16MHz pertencentes à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira foram cedidos pelo professor Geraldo de Freitas Maciel e utilizados para determinação das componentes da velocidade a profundidades constantes de 0,7*h* e 0,5*h*, respectivamente. Procurou-se, desta forma, não só identificar as modificações que a presença da vegetação induz na altura da onda, mas também no campo de velocidades.

Tabela 4.2 – Plano de ensaios utilizado para os estudos com campo de hastes.

Ensaio	<i>h</i>	<i>s</i>	H_o	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>h/L</i>	H/L	$\phi/L(x10^3)$
01-Ch	0,7	0,6	0,05	1,00	1,57	0,447	0,032	3,831
02-Ch	0,7	0,6	0,05	1,25	2,34	0,299	0,021	2,564
03-Ch	0,7	0,6	0,05	1,50	3,13	0,224	0,016	1,919
04-Ch	0,7	0,6	0,10	1,00	1,61	0,435	0,062	3,729
05-Ch	0,7	0,6	0,10	1,25	2,37	0,295	0,042	2,533
06-Ch	0,7	0,6	0,10	1,50	3,15	0,222	0,032	1,905
07-Ch	0,7	0,6	0,15	1,00	1,68	0,418	0,090	3,582
08-Ch	0,7	0,6	0,15	1,25	2,42	0,290	0,062	2,483
09-Ch	0,7	0,6	0,15	1,50	3,19	0,219	0,047	1,881

A Figura 4.11 apresenta o esquema de montagem e medição dos experimentos no canal. O campo foi colocado à esquerda das janelas de vidro com o intuito de aumentar o período de trabalho antes da chegada de ondas refletidas pela praia.

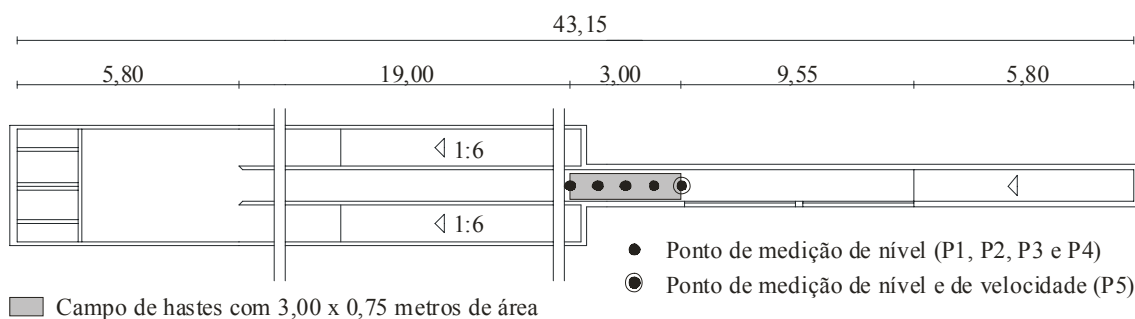


Figura 4.11 – Configuração do aparato experimental para ensaios com campo de haste.

Cada um dos experimentos foi executado três vezes, desta forma, trabalhou-se com valores médios da taxa de decaimento, garantindo uma maior representatividade para os dados e identificando anomalias pontuais no processo de medição. Considerando as nove ondas escolhidas, os ensaios sem vegetação e aqueles para as duas densidades de haste referidas, foram realizados 81 experimentos, todos com medições simultâneas de nível em cinco pontos, e de velocidade em dois pontos na mesma vertical do último sensor.

4.2.1 Medição de altura das ondas

O princípio de funcionamento das sondas de nível é baseado na variação de voltagem em um circuito de corrente constante, cuja resistência é sensível ao nível d'água. Cada uma das sondas possui duas hastes que não entram em contato diretamente, mantendo o circuito aberto até que estas sejam inseridas na água. De acordo com a posição onde a água fecha o circuito, tem-se uma resistência característica para o aparelho, que influenciará diretamente na tensão lida. A Figura 4.12 apresenta o esquema de funcionamento do sistema.

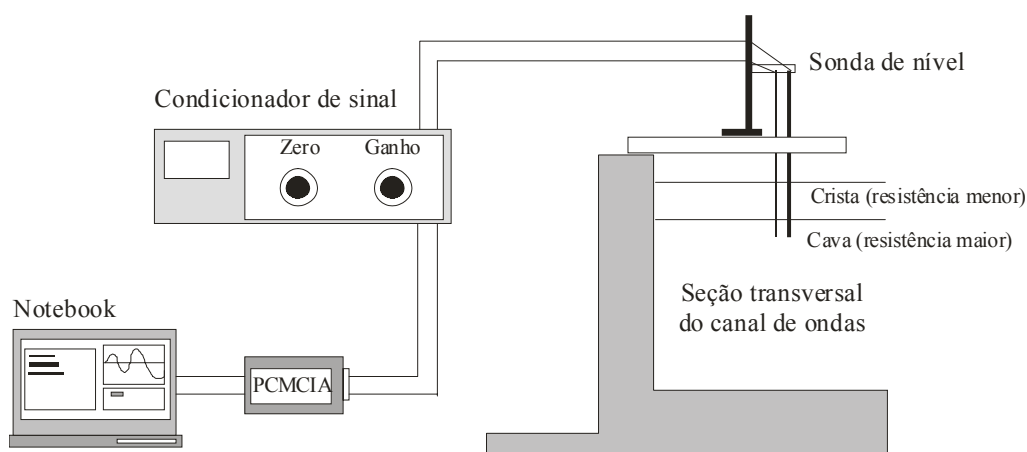


Figura 4.12 – Esquema de instrumentação para medição de nível d'água através de sondas resistivas.

A partir do condicionador de sinal, estabelece-se o zero da tensão no centro da haste, e fixa-se o ganho mm/V que se deseja trabalhar. A saída de tensão de cada uma das 5 sondas foi ligada a uma placa de aquisição analógica PCMCIA DAQCard 700, da National Instruments, conectada a um Notebook. Desta forma, os dados dos experimentos eram diretamente gravados em disco rígido em séries temporais de tensão para cada canal. A Figura 4.13 ilustra a montagem das sondas para medição de amortecimento de ondas durante os experimentos.

Com o intuito de verificar a linearidade da resposta do sistema de medição, um teste preliminar foi conduzido com a leitura da voltagem de saída sendo registrada a cada dois centímetros da haste. As curvas geradas para as 5 sondas utilizadas estão nas Figuras 4.14 a 4.18. As leituras foram feitas inicialmente com a sonda entrando na água (descendo) e logo em seguida com sua retirada (subindo).

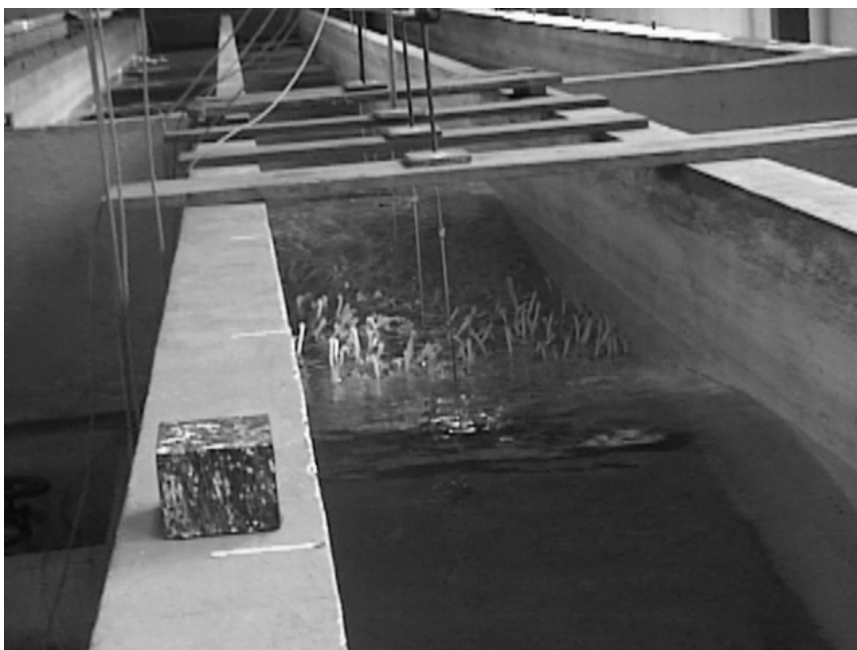


Figura 4.13 – Sondas de nível espaçadas de 0,75 m registrando o amortecimento de ondas pelo campo de hastes artificiais de 3 m de comprimento.

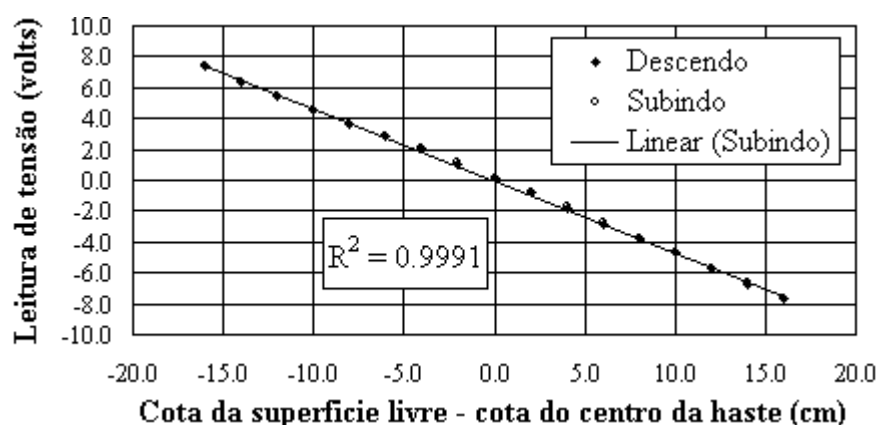


Figura 4.14 – Curva de resposta do sistema de medição da Sonda 1.

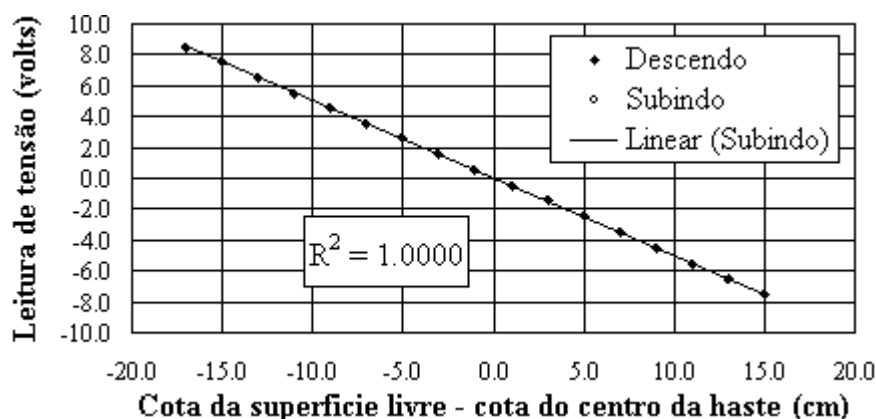


Figura 4.15 – Curva de resposta do sistema de medição da Sonda 2.

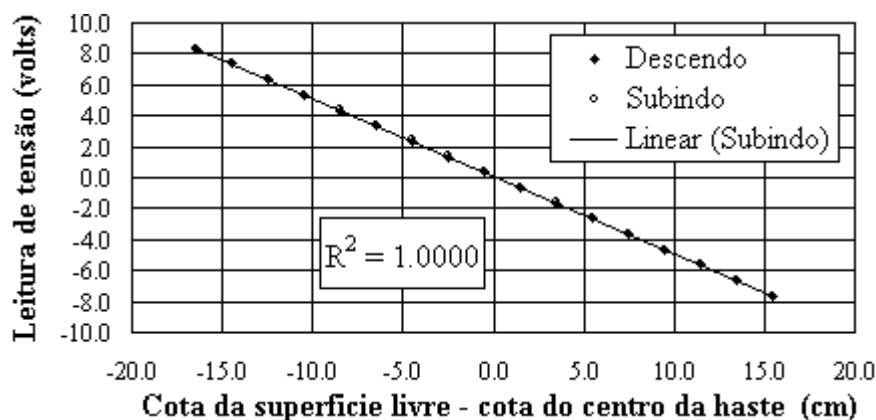


Figura 4.16 – Curva de resposta do sistema de medição da Sonda 3.

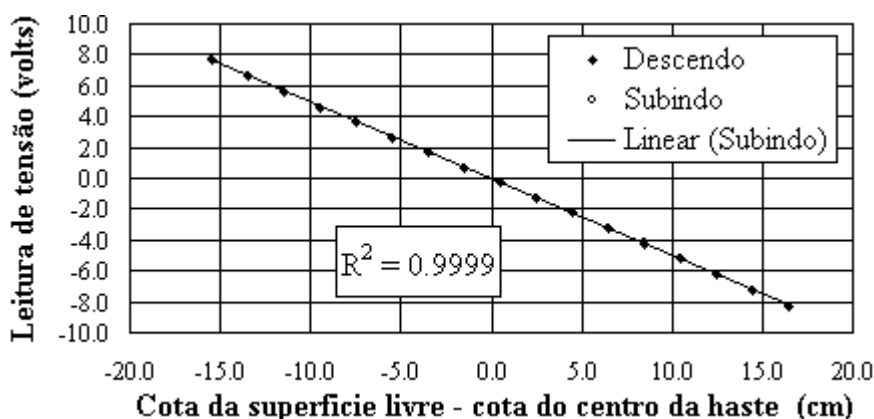


Figura 4.17 – Curva de resposta do sistema de medição da Sonda 4.

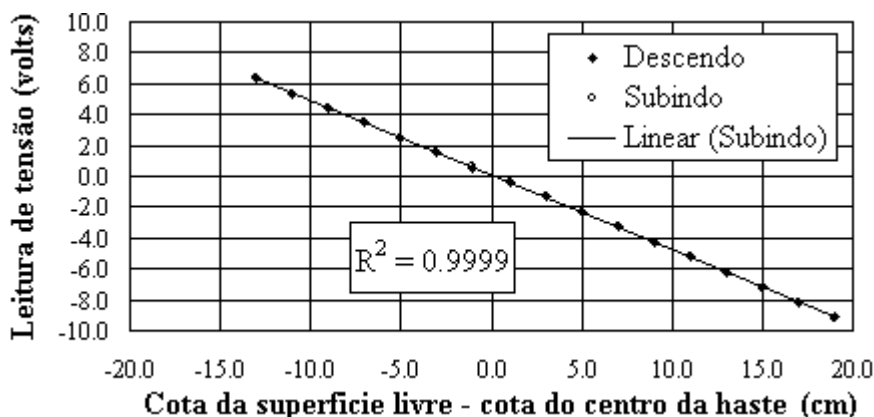


Figura 4.18 – Curva de resposta do sistema de medição da Sonda 5.

As curvas mostram um elevado grau de linearidade na resposta em voltagem das sondas. Esta característica é muito importante, pois teoricamente, a resposta do equipamento em escala métrica pode ser prevista com a tomada de apenas dois pontos de leitura para os quais se ajuste uma reta semelhante às mostradas nas figuras.

A Figura 4.19 mostra um exemplo do sinal de uma onda de 0,1 m e 1 s a uma profundidade de 0,7 m para as cinco sondas regularmente distanciadas de 0,75 cm com os valores já convertidos de volts para milímetro. Pode-se observar a chegada da frente de onda inicial com uma defasagem da ordem de 0,44 segundos. Este é o tempo requerido para que a onda em questão percorra os 0,75 centímetros que separam as sondas. As aquisições foram feitas por 120 segundos, mas para efeito de cálculo de decaimento de altura, foram utilizados os 10 segundos seguintes à passagem da frente irregular (no exemplo da figura, de 35 a 45 s), e em seguida calculou-se a altura média das ondas registradas neste intervalo para cada um dos 5 pontos.

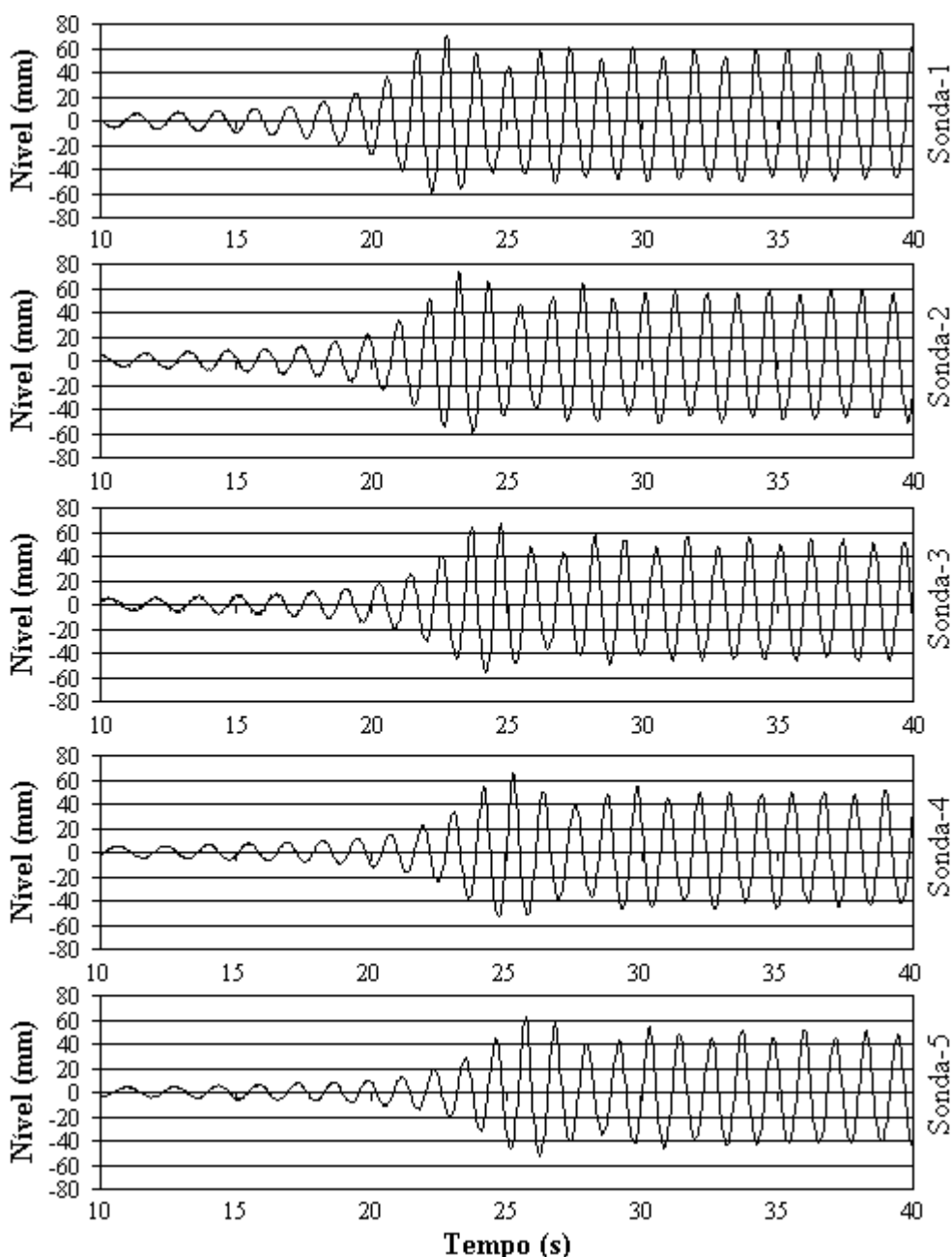


Figura 4.19 – Registro de nível para as cinco sondas resistivas regularmente espaçadas de 0,75 cm durante um ensaio com a onda 04-Ch.

4.2.2 Medição de velocidade

O princípio de funcionamento dos sensores de velocidade está baseado na reflexão de ondas sonoras emitidas pelo equipamento e que se chocam com partículas em suspensão na água. As sondas possuem um emissor sônico e três receptores alinhados para captar a variação da frequência da onda sonora refletida em um determinado volume de medição e estimar a velocidade instantânea do fluido. O processamento e

aquisição dos dados é feito por uma placa PCI que acompanha o equipamento. A Figura 4.20 apresenta o esquema de montagem do sistema.

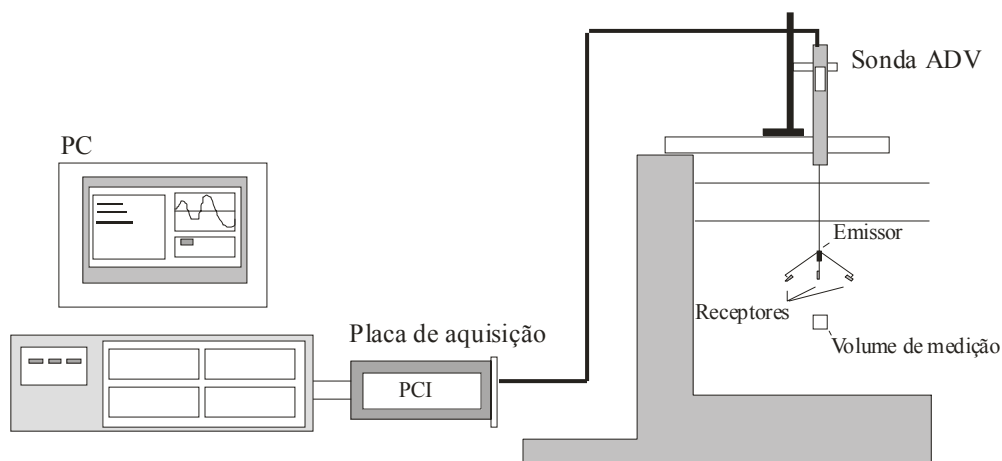


Figura 4.20 – Esquema de instrumentação para medição de velocidade a partir de sondas ADV.

As duas sondas utilizadas são praticamente idênticas, exceto pelo formato final de suas hastes. Enquanto uma atua em um volume de medição localizado 5 cm abaixo de sua extremidade (ADV-0, tipo *downlook*), a outra possui um final de haste curvo, o que faz com que o volume de medição localize-se 5 cm ao seu lado (ADV-1, tipo *sidelook*). Desta forma, é possível medir dois pontos em uma mesma vertical. Os esquema de montagem das duas sondas no ponto de medição P5, bem como a presença da sonda de nível S5 estão representados na Figura 4.21. A Figura 4.22 mostra o aparato instalado no canal de ondas.

As medições realizadas para ensaios com vegetação e sem vegetação possibilitaram uma análise correlacionando a superfície livre e o campo de velocidades. Os resultados experimentais foram confrontados com resultados teóricos previstos pela teoria da função de corrente de terceira ordem, de modo a apontar se esta aproximação era adequada para uso no modelo numérico.

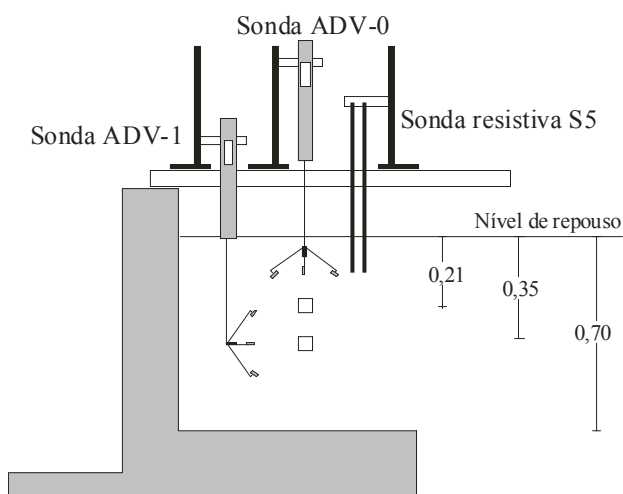


Figura 4.21 – Seção transversal do ponto de medição P5, onde além da aquisição de nível semelhante à dos outros quatro pontos, há medição de velocidade a $0,7h$ e $0,5h$.



Figura 4.22 – Detalhe do ponto de medição P5, com duas sondas de velocidade a esquerda e a sonda de nível a direita.

4.2.3 Procedimento laboratorial

Definida a configuração dos experimentos e a disposição dos equipamentos, foi desenvolvida uma rotina a ser observada durante toda a fase de ensaios. No início de cada dia de ensaio, o procedimento a ser seguido consistia em:

- 1) colocação do nível d'água no ponto a ser utilizado;
- 2) limpeza das 5 sondas resistivas com álcool para retirar eventuais incrustações de poeira ao longo das hastes;

- 3) verificação dos cabos e conexões dos computadores de geração de onda, de aquisição de nível e de aquisição de velocidade;
- 4) ajuste de zero e ganho para cada uma das hastes de forma a garantir uma relação de leitura da ordem de 20mm/volt.;
- 5) colocação de cada uma das cinco sondas resistivas e duas sondas ADV nas posições e níveis corretos;
- 6) início dos experimentos.

Com o intuito de compensar eventuais variações no valor do ganho das hastes de nível, antes e depois de cada bateria de 9 ondas, a calibração das sondas era registrada novamente, através da leitura de três pontos conhecidos. Se por um lado a adoção de três pontos para a determinação da curva de resposta da sonda é redundante (dada a resposta linear indicada pelas Figuras 4.14 a 4.18), do ponto de vista prático, torna-se uma ferramenta a mais para a identificação de erros de leitura que possam ocorrer no processo.

Antes do acionamento do gerador para cada ensaios, cerca de 100 ml de leite de magnésia diluído em água na proporção 1:2 eram despejados próximos às sondas de velocidade. Este procedimento melhorava significativamente a qualidade do sinal sonoro recebido.

Concluídos os dois minutos de medição, aguardava-se 10 minutos para que o canal atingisse novamente a condição de repouso e assim o experimento seguinte era conduzido. Caso um determinado experimento acarretasse em excessivo entrelaçamento das hastes, ou mesmo as estabilizasse em posições inclinadas, antes do início do próximo ensaio, estas deveriam ser recolocadas na posição vertical com o auxílio do garfo de jardineiro.

Finalmente, após um dia de ensaios, os arquivos de medição gerados eram salvos em outra mídia para garantir uma cópia de segurança.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento de uma haste

Cada uma das 12 configurações experimentais apresentadas na Tabela 4.1 foi simulada pelo modelo numérico para uma haste, tendo inicialmente os coeficientes C_D e k_m como parâmetros de ajuste. Posteriormente, devido à reduzida magnitude dos termos inerciais, optou-se por modelar a força sobre os nós somente pelo termo de arraste da equação 3.24. A pequena representatividade dos demais termos dentro das condições estudadas está relacionada à dependência no volume do elemento, o que os torna uma função quadrática de um raio de 0,006 m.

Um indicador da relação entre os dois termos pode ser deduzido para uma estrutura circular esbelta submetida à incidência de ondas. Visando a obtenção de uma expressão analítica que forneça uma primeira estimativa da ordem de grandeza das forças, duas considerações serão feitas: (i) o movimento do elemento é desprezível e (ii) as ondas serão representadas pela teoria linear. A primeira consideração não só permite trabalhar com a velocidade do fluido em vez da velocidade relativa, como possibilita a introdução de $C_M = 1 + k_m$ na equação 3.24, reduzindo as forças de inércia a somente um termo. Escreve-se:

$$\frac{(dF_I)_{max}}{(dF_D)_{max}} = \frac{\rho_f C_M V_{el} (a_{fx})_{max}}{0,5 C_D \rho_f A_{eq} (u_{fx})_{max}^2} \quad (5.1)$$

onde dF_D e dF_I são as forças de arraste e inércia atuantes em um trecho da haste. Os valores máximos da aceleração e da velocidade do fluido serão dados para $t=T/4$ e $t=0$, respectivamente, em $z=h$. Assim, escreve-se:

$$(a_{fx})_{max} = \frac{H}{2} \frac{\sigma^2}{\tanh(kh)} \quad \text{e} \quad (u_{fx})_{max}^2 = \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{\sigma^2}{\tanh^2(kh)} \quad (5.2)$$

A relação final será expressa por:

$$\frac{(dF_I)_{max}}{(dF_D)_{max}} = \frac{C_M \pi \phi}{C_D H} \tanh(kh) \quad (5.3)$$

Considerando que os coeficientes C_M e C_D são de ordem $O(1)$, a equação 5.3 fornece valores entre 0,06 à 0,17 para os experimentos conduzidos com uma haste. Em outras palavras, nas estimativas mais desfavoráveis, o termo de inércia corresponde a somente 17% da magnitude do termo de arraste, o que justifica a sua já mencionada desconsideração em uma primeira aproximação.

5.1.1 Critérios de ajuste do modelo

As séries temporais de posição e velocidade de cada nó, obtidas pelo tratamento dos dados de vídeo, foram tomadas como referência para indicar o grau de representatividade dos dados gerados no modelo numérico. Para cada uma das 12 configurações experimentais, diferentes valores de C_D foram usados em simulações numéricas até que se considerasse o resultado do modelo coerente com os valores experimentais.

Procurando estabelecer um critério de julgamento satisfatório, tomaram-se as curvas de posição e de velocidade das marcações superior e central da haste. A Figura 5.1 ilustra a sobreposição de resultados obtidos experimentalmente com outros gerados pelo modelo numérico para o nó correspondente. Na ilustração, é detalhada a comparação entre os pontos em um instante de tempo específico, t' , e a posição média da leitura experimental ao longo do tempo é $\bar{X}_{Exp}$.

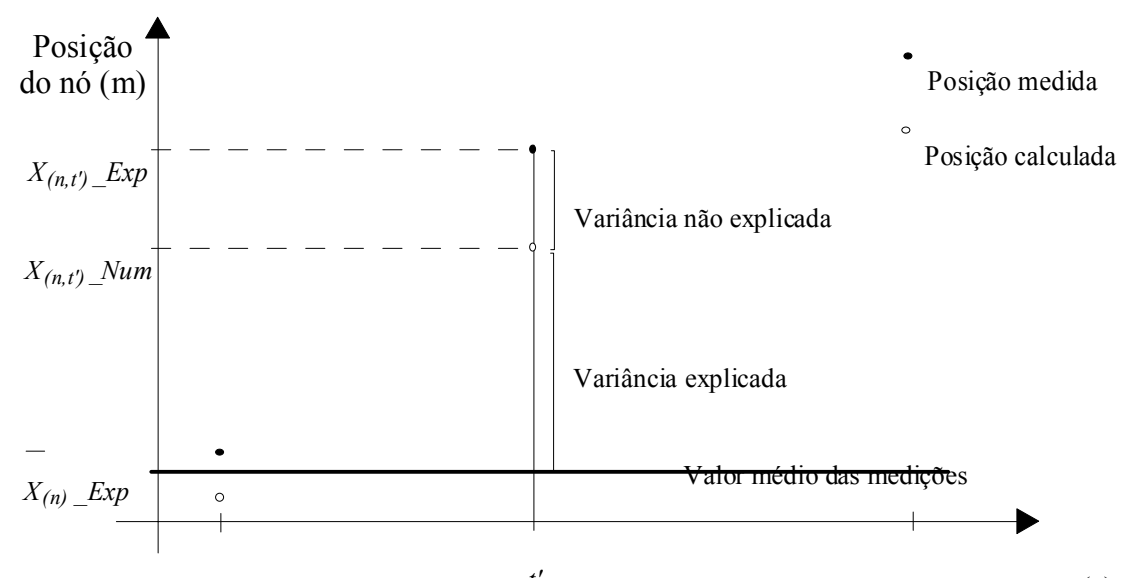


Figura 5.1 - Esquema ilustrativo da comparação entre posição X_{Exp} de um determinado nó n , medida no instante t' e a prevista pelo modelo numérico X_{Num} .

Para comparar os dois conjunto de pontos ao longo de um intervalo t_o a t_F , define-se a variação total da amostra como a soma do quadrado dos desvios dos valores medidos ao longo do tempo, ou seja:

$$V_t[X_{(n)}] = \sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Exp - \bar{X}_{(n)} - Exp)^2 \quad (5.4)$$

A diferença entre o valor medido no instante t' e o valor estimado corresponde à variação não explicada pelo modelo. Para quantificar esta grandeza ao longo do intervalo define-se:

$$V_{ne}[X_{(n)}] = \sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Exp - X_{(n)} - Num)^2 \quad (5.5)$$

Enquanto que a variação explicada corresponde à diferença entre o valor estimado e o valor médio do parâmetro. Em termos do intervalo tem-se:

$$V_e[X_{(n)}] = \sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Num - \bar{X}_{(n)} - Exp)^2 \quad (5.6)$$

Neste ponto, define-se o coeficiente de determinação R^2 , como um indicador do grau de associação entre as curvas a serem comparadas. Este parâmetro será dado pela razão entre a variação explicada e a variação total, ou seja:

$$R^2[X_{(n)}] = \frac{\sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Exp - \bar{X}_{(n)} - Exp)^2 - \sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Exp - X_{(n)} - Num)^2}{\sum_{t=t_o}^{t_F} (X_{(n,t)} - Exp - \bar{X}_{(n)} - Exp)^2} \quad (5.7)$$

O coeficiente de determinação fornece uma estimativa do percentual da variação da medição experimental que o modelo pode explicar. Quanto mais próximo de 1, menor o resíduo não representado, consequentemente melhor o ajuste.

Os intervalos de amostragem selecionados para as comparações com os dados de laboratório consistiram em três períodos de onda. Porém, como a condição inicial do modelo numérico não previa a chegada de uma frente irregular - como acontece no canal de ondas - o início do intervalo foi estabelecido como sendo após a fase transiente de movimentação da haste. Durante esta fase, a haste (que parte do repouso) apresenta um comportamento irregular, com a magnitude crescente de suas oscilações. Em geral, depois de decorridos 3 a 6 períodos de onda do início da simulação, o movimento torna-se harmônico e os três ciclos seguintes podem ser selecionados para a comparação com os dados experimentais.

Os resultados numéricos foram obtidos após a implementação do modelo em ambiente MatLab da MathWorks, Inc., com recurso de exportar todos os parâmetros calculados em cada passo de tempo para um arquivo em formato ASCII, o que possibilitou um pós processamento detalhado dos dados gerados em cada simulação (Apêndice B). Para uma execução padrão, com passo de tempo de 0,001 segundos, o tempo computacional necessário para calcular 15.000 passos de tempo, ou 15 segundos no modelo, foi da ordem de 15 minutos em um computador tipo PC Athlon XP 2.200 MHz com 256 MB de memória RAM. Uma interface gráfica foi desenvolvida em Visual Basic de modo a possibilitar leitura dos arquivos de dados, animação dos resultados e exportação de curvas comparativas tanto do modelo numérico quanto dos resultados experimentais.

O Apêndice C traz as curvas comparativas obtidas para cada experimento a partir do coeficiente de arraste que melhor se ajustou. As tabelas apresentadas em conjunto com as figuras mostram as características de cada simulação. A Figura 5.2 apresenta um exemplo dos resultados gerados pelo modelo calibrado para o experimento 09-1h.

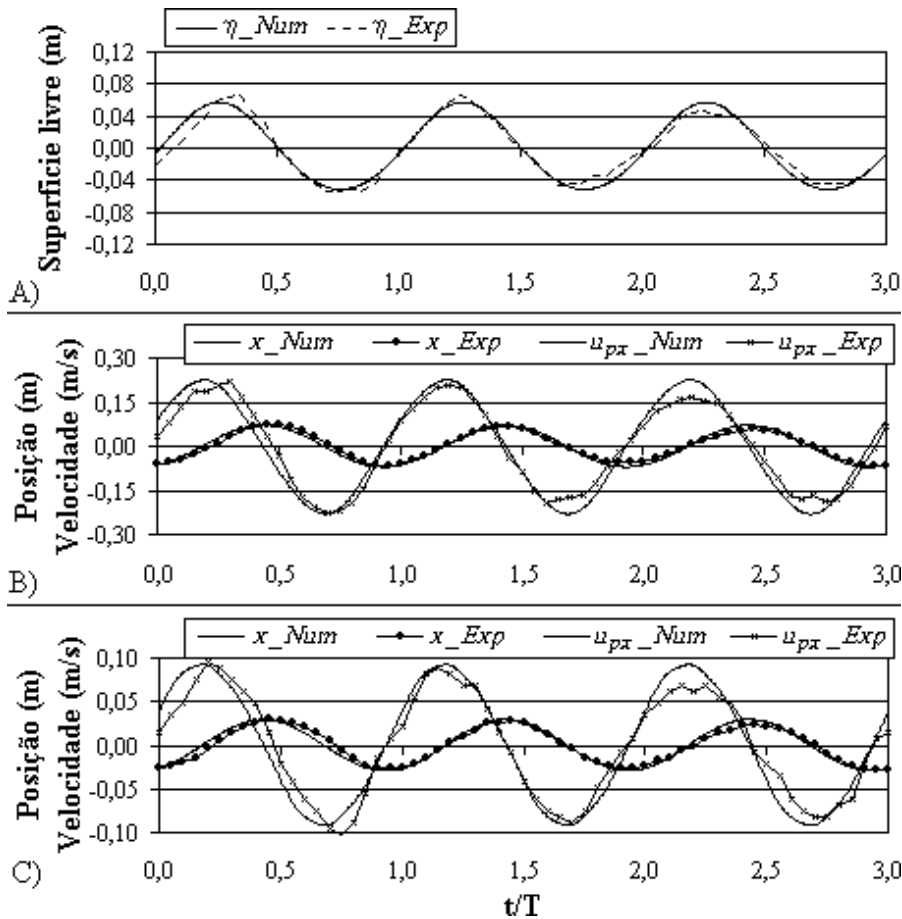


Figura 5.2 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 09-1h e os resultados numéricos obtidos para $C_D=0,05$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) do nó central ($n=3$).

Embora as ondas teóricas fossem bem regulares, as ondas geradas no canal apresentaram flutuações em relação aos valores previstos. Desta forma, pode-se observar nos gráficos que pequenas variações, principalmente relacionadas à amplitude, são registradas entre ondas adjacentes. Em alguns dos experimentos, observa-se que, mesmo com a superfície livre numérica estando em perfeita coerência com a superfície livre experimental, ainda ocorre uma defasagem entre o movimento dos nós previsto e medido (máxima de $0,2T$). Conseqüentemente, as velocidades também se apresentarão fora de fase. Em tais casos, a adoção de um valor para o coeficiente de arraste diferente do apontado, somente possibilitou alteração na magnitude das componentes, não na defasagem. Testes numéricos complementares, com diferentes passos de tempo indicaram que a adoção de outros valores não traz melhora ao resultado.

Do ponto de vista exclusivamente mecânico, as defasagens registradas não devem influenciar significativamente a estimativa da força média exercida sobre um elemento. Tomando-se a força resultante em um dado instante como a variação da quantidade de movimento do elemento, é razoável considerar que a força exercida pelo escoamento - que é predominantemente horizontal - pode ser obtida a partir do conhecimento de sua massa, e da curva de velocidades horizontais. Assim, como o modelo forneceu curvas de velocidade com períodos e amplitudes muito semelhantes às medidas, o valor médio da força estará próximo do valor real, não sofrendo influencia da defasagem.

É possível que a introdução dos termos inerciais no cálculo das forças reduza a diferença de fase, o que implicaria em ligeiras modificações nos valores de C_D encontrados. No âmbito desta linha de pesquisa, julga-se satisfatória a representação da força somente pelo termo de arraste, dado que se conhece uma estimativa da baixa representatividade do termo ignorado. Por este motivo, tomou-se uma postura menos rigorosa na interpretação do critério de julgamento, onde foi considerado satisfatório aquele ajuste com $R^2 > 0,5$.

Contudo, o modelo numérico foi implementado com a expressão completa para força, com todos os seus termos, fornecendo uma ferramenta para trabalhos mais aprofundados nesta questão. Uma investigação futura poderia partir dos coeficientes de arraste aqui apresentados, procurando melhorar o R^2_m de cada experimento através da variação de k_m .

A Tabela 5.1 apresenta um resumo das características obtidas da análise comparativa entre as curvas de superfície livre, posição e velocidade dos nós para cada uma das simulações através da equação 5.7.

Tabela 5.1 - Qualidade dos resultados gerados no processo de calibração do modelo.

Ensaio	07	08	09	10	11	12	19	20	21	22	23	24
C_D	1,60	0,70	0,05	1,30	0,40	0,15	0,90	0,05	0,05	0,50	0,02	0,12
$Def./T^*$	0,10	0,13	0,00	0,15	0,03	0,03	0,15	0,23	0,00	0,20	0,17	0,00
$t_0(s)$	3,4	3,5	2,7	5,4	3,3	0,4	3,4	0,6	2,9	5,5	2,0	3,0
$t_F(s)$	6,4	8,0	8,7	8,4	7,8	6,4	6,4	5,1	8,9	8,5	6,5	9,0
$R^2[\eta]$	0,97	0,98	0,95	0,95	0,95	0,96	0,94	0,96	0,96	0,90	0,93	0,95
$R^2[X_{(N)}]$	0,60	0,42	0,97	0,49	0,75	0,86	0,35	0,16	0,86	0,12	0,21	0,97
$R^2[u_{p(N)}]$	0,61	0,40	0,96	0,45	0,71	0,88	0,35	0,14	0,86	0,10	0,24	0,94
$R^2[X_{(N/2)}]$	0,42	0,69	0,96	0,42	0,92	0,77	0,46	0,21	0,83	0,18	0,24	0,96
$R^2[u_{p(N/2)}]$	0,43	0,66	0,94	0,38	0,90	0,80	0,45	0,18	0,83	0,16	0,26	0,92
R_m^{**}	0,52	0,54	0,96	0,44	0,82	0,83	0,40	0,17	0,85	0,14	0,24	0,95

* $Def./T$ =Defasagem média (s) entre as cristas medidas e calculadas divida pelo período da onda;

** R_m^{**} = a média aritmética entre $R^2[X_{(N)}]$, $R^2[u_{p(N)}]$, $R^2[X_{(N/2)}]$, $R^2[u_{p(N/2)}]$.

5.1.2 Coeficiente de arraste

Os valores de C_D obtidos para cada um dos experimentos foram expressos em função de grandezas adimensionais como o número de Reynolds, $Re_{rel} = (u_{rel})_{max} \phi / \nu$ e o parâmetro de Keulegan-Carpenter, $KC_{rel} = (u_{rel})_{max} T / \phi$ e onde ν corresponde à viscosidade dinâmica do fluido. Os resultados estão ilustrados nas Figuras 5.3 e 5.4.

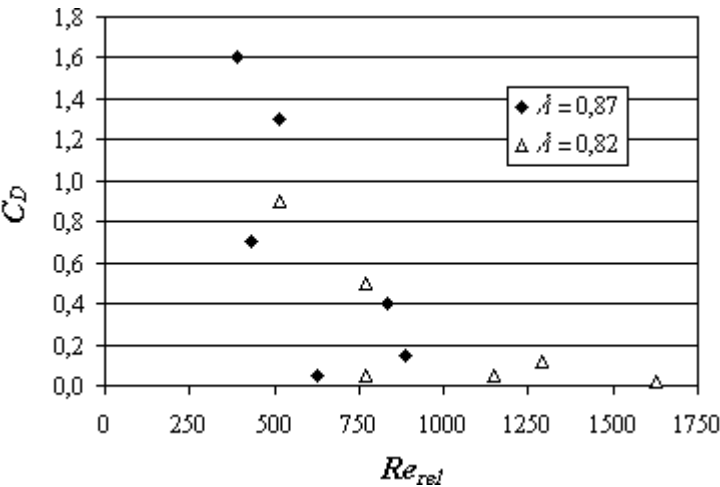


Figura 5.3 - Valores calibrados do coeficiente de arraste C_D como função do número de Reynolds para velocidade relativa nos dois grupos de λ utilizados ($\lambda=s/h$).

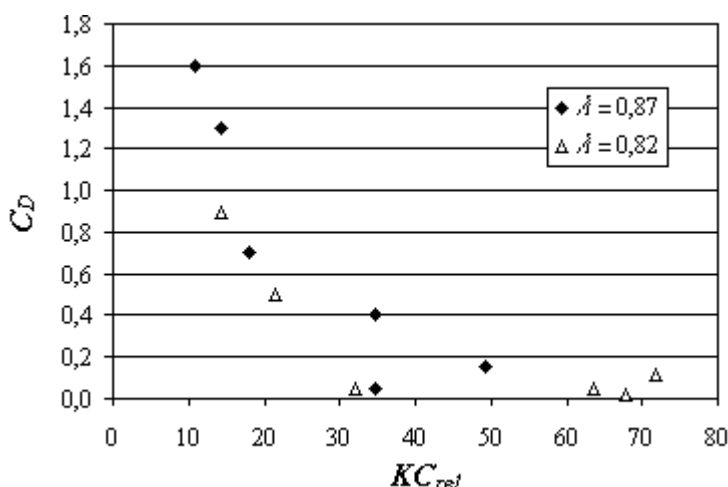


Figura 5.4 - Valores calibrados do coeficiente de arraste como função do parâmetro de Keulegan-Carpenter para velocidade relativa.

Observa-se que o C_D apresentou uma melhor relação de dependência com o segundo parâmetro, o que está de acordo com MENDEZ & LOSADA, (2004). As magnitudes aqui encontradas tendem a ser um pouco superiores às obtidas por aqueles autores e ilustradas na Figura 5.5. Esta diferença é uma consequência direta da inclusão do movimento das hastes. A forma tradicional de se calcular a força com o uso da velocidade do fluido ao invés da velocidade relativa requer um coeficiente de arraste menor para compensar as maiores velocidades utilizadas. Logo, os resultados da Figura 5.5 se assemelham aos da Figura 5.4 com um leve deslocamento para baixo.

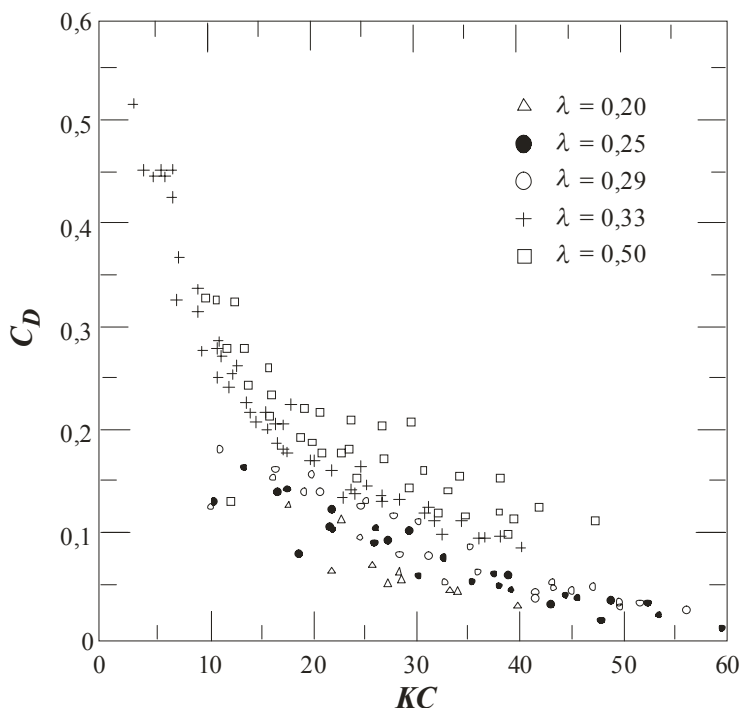


Figura 5.5 - Valor calibrado de coeficiente de arraste (C_D) em função do parâmetro de Keulegan-Carpenter (KC) e da altura relativa da haste (λ). Fonte: MENDEZ & LOSADA, (2004).

Contudo, a velocidade relativa máxima $(u_{rel})_{max}$ não é uma grandeza prática de se trabalhar, pois requer o conhecimento do histórico de velocidades da haste e do fluido ao longo de todo um período de onda. No item 5.4, será apresentada uma expressão mais conveniente, onde o valor de C_D é expresso em função de variáveis diretas relacionadas às características do experimento.

5.1.3 Processamento das informações geradas pelo modelo

O conjunto de dados gerado em cada passo de tempo para as simulações foi inicialmente manipulado para fornecer o comportamento da força resultante sobre a haste durante a passagem de uma onda. Esta grandeza corresponde a F_x^I , que para os dados discretos gerados pelo modelo é dado por:

$$F_x^I(t) = \sum_{n=1}^N F_{T(n,t)} \tag{5.8}$$

Os resultados obtidos para cada ensaio são apresentados no Apêndice D. A Figura 5.6 apresenta a curva obtida para o ensaio 07-1h.

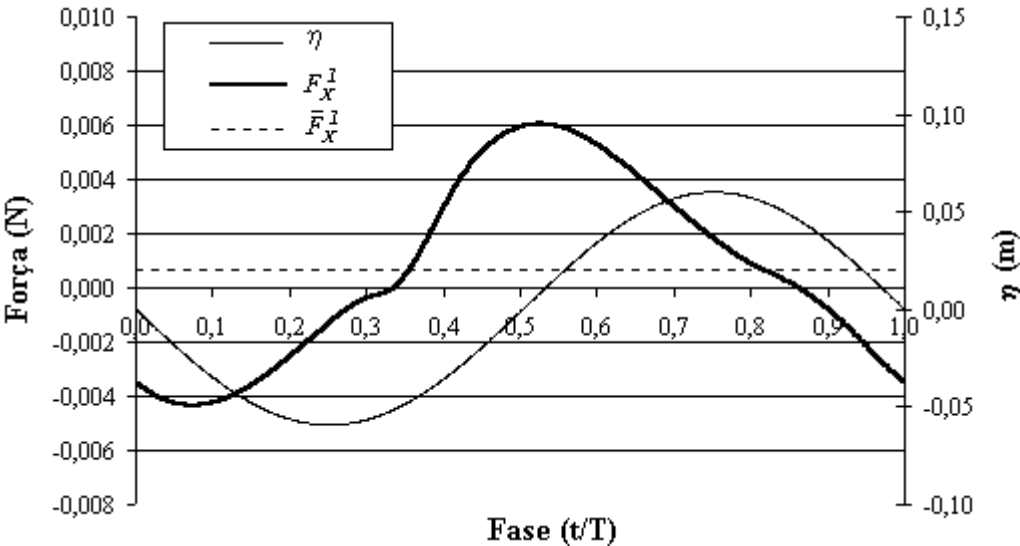


Figura 5.6 - Variação da força exercida sobre a haste durante a passagem de uma onda para o ensaio 07-1h.

A linha tracejada indicando $\overline{F}_x^I$ corresponde à média temporal de 5.8. Este valor foi obtido por integração numérica através do método dos trapézios:

$$\overline{F}_x^I = \frac{I}{(T - 2\Delta t)} \left[F_{x(0)}^I \frac{\Delta t}{2} + \sum_{t=\Delta t}^{T-2\Delta t} F_{x(t)}^I \Delta t + F_{x(T-\Delta t)}^I \frac{\Delta t}{2} \right] \tag{5.9}$$

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para as simulações. A quarta coluna apresenta um parâmetro adimensional da força média calculada que mais a frente será usado para a obtenção de uma expressão geral pra sua determinação.

Tabela 5.2 - Força média exercida pela haste sobre a coluna d’água.

Ensaio	R^2_m	$\overline{F}_x^I$ (N)	$\overline{F}_x^I T^2 / \rho_v s^4$
07-1h	0,52	6,45E-04	5,30E-06
08-1h	0,54	2,61E-04	4,82E-06
09-1h	0,96	4,72E-05	1,55E-06
10-1h	0,44	1,13E-03	9,30E-06
11-1h	0,82	9,21E-04	1,70E-05
12-1h	0,83	4,30E-04	1,41E-05
19-1h	0,40	4,01E-04	1,44E-05
20-1h	0,17	4,83E-05	3,89E-06
21-1h	0,85	4,54E-05	6,50E-06
22-1h	0,14	4,86E-04	1,74E-05
23-1h	0,24	1,04E-04	8,39E-06
24-1h	0,95	6,43E-04	9,21E-05

Os valores $\overline{F}_x^I$ podem ser substituídos diretamente na equação 3.7, onde para $\alpha=I$, obtém-se uma primeira estimativa do termo de resistência por metro quadrado decorrente da presença das hastes. Para um fundo plano e horizontal, a equação 3.6 pode ser reescrita como:

$$H \frac{\partial}{\partial x} H = - \frac{8\alpha N_h \overline{F}_x^I}{\rho_f g (4n - I)} \tag{5.10}$$

Onde a variação da posição média da superfície livre no sentido de propagação da onda foi considerada desprezível. Estimativas preliminares realizadas para as ondas ensaiadas mostraram que estas variações são da ordem de décimos de milímetros.

Ao se substituir um valor da Tabela 5.2 na equação 5.10, a equação pode ser integrada, e o decaimento em altura de onda para as características do experimento será dado por:

$$\frac{H}{H_o} = \sqrt{I - \kappa x} \tag{5.11}$$

$$\text{onde } \kappa = \frac{16\alpha N_h \bar{F}_x^I}{\rho_f g(4n-1)}$$

A aplicação desta expressão fica restrita aos casos ensaiados onde o modelo representou satisfatoriamente o comportamento da haste.

5.1.4 Determinação de uma função para representar $\bar{F}_x^I$

Com o intuito de se obter uma expressão mais geral para o amortecimento, procura-se estabelecer uma equação para representar $\bar{F}_x^I$ a partir de grandezas diretas do ensaio. Uma vez obtida uma expressão representativa, evita-se a necessidade de novas calibrações do modelo para condições que estejam dentro dos limites de validade utilizados na sua determinação.

A sensibilidade adquirida no processo experimental juntamente com a análise dimensional possibilitaram o desenvolvimento de uma expressão relacionando a força procurada a parâmetros característicos do escoamento e da haste. Em uma primeira etapa, procurou-se determinar uma função f tal que:

$$\bar{F}_x^I = f(H, L, T, h, \rho_a, \mu, \phi, s, \rho_v, g) \quad (5.12)$$

Para o total de 11 parâmetros envolvidos, contemplando as 3 dimensões fundamentais, adotou-se o comprimento da onda, L , seu período, T , e a força média, $\bar{F}_x^I$, como parâmetros de referência. Desta forma, a equação 5.12 pôde ser reescrita em função de 8 grupos adimensionais:

$$\frac{\bar{F}_x^I T^2}{\rho_v L^4} = f_1 \left(\frac{H}{L}, \frac{\bar{F}_x^I T^2}{\rho_a L^4}, \frac{\bar{F}_x^I T}{\mu L^2}, \frac{h}{L}, \frac{\phi}{L}, \frac{s}{L}, \frac{g T^2}{L} \right) \quad (5.13)$$

Considerando a quantidade de grupamentos obtidos, procurou-se reescrever a expressão 5.13 de modo a evitar a repetição daqueles contendo o parâmetro dependente, $\bar{F}_x^I$. Após algumas manipulações, propôs-se uma relação funcional entre os parâmetros adimensionais do tipo:

$$\left(\frac{\bar{F}_x^I T^2}{\rho_v s^4} \right) = a \left(\frac{H}{L} \right)^b \left(\frac{h}{L} \right)^c \left(\frac{\phi}{L} \right)^d \quad (5.14)$$

onde a , b , c e d são constantes a serem determinadas.

Para obtenção dos coeficientes com base nos valores de T , ρ_v , s , H , h , ϕ e L de cada ensaio, tomou-se como referência os valores de $\bar{F}_x^I$ gerados pelo modelo numérico

e recorreu-se à técnica de regressão linear multivariada. Para tanto, a expressão foi linearizada:

$$\ln\left(\frac{\overline{F}_x^{\prime}T^2}{\rho_v s^4}\right)=\ln(a)+b.\ln\left(\frac{H}{L}\right)+c.\ln\left(\frac{h}{L}\right)+d.\ln\left(\frac{\phi}{L}\right) \tag{5.15}$$

tem-se assim uma equação do tipo:

$$Y=a'+b.X_1+c.X_2+d.X_3 \tag{5.16a}$$

onde: $Y=\ln\left(\frac{\overline{F}_x^{\prime}T^2}{\rho_v s^4}\right)$, $a'=\ln(a)$, $X_1=\ln\left(\frac{H}{L}\right)$, $X_2=\ln\left(\frac{h}{L}\right)$, $X_3=\ln\left(\frac{\phi}{L}\right)$

ou em forma de matriz:

$$\overline{Y}_{(px1)}=\overline{X}_{(px4)}.\overline{B}_{(4x1)} \tag{5.16b}$$

sendo $\overline{Y}$ o vetor dado em função das observações do parâmetro dependente, $\overline{X}$ a matriz com as funções das observações realizadas em cada experimento para os parâmetros independentes, $\overline{B}$ o vetor com os parâmetros a serem determinados e p o número de ensaios utilizados para o ajuste.

Aplicando o método dos mínimos quadrados, chega-se à solução da matriz de coeficientes dada por:

$$\overline{B}=\left(\overline{X}^T\overline{X}\right)^{-1}.\overline{X}^T\overline{Y} \tag{5.17}$$

Porém, a matriz $\overline{B}$ contém os coeficientes que minimizam o erro médio quadrático da equação linear 5.16, que não necessariamente serão os mesmos que minimizam a expressão não-linear original 5.14. Desta forma, os valores obtidos fornecem uma primeira estimativa dos expoentes aos quais estão elevados os parâmetros adimensionais independentes. A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos para diferentes testes realizados.

Tabela 5.3 - Coeficientes ajustados pelo método de regressão linear para diferentes grupos de simulações.

Regressão	Descrição	p	a	b	c	d	$R^2\left[\overline{F}_x^{\prime}\right]$
Reg. 01	Todas as simulações	12	0,002	2,5	-2,2	-0,1	0,76
Reg. 02	aquelas com $R_m^2>0,50$	7	17,887	3,3	-4,4	1,7	0,93
Reg. 03	aquelas com $R_m^2>0,40$	9	2,408	3,2	-4,4	1,5	0,92

A Figura 5.7 apresenta a comparação entre as três regressões realizadas e os valores originais de força calculados. Percebe-se uma dispersão nas estimativas, com os piores resultados sendo obtidos para o ensaio 10-1h. A discrepância na representação

deste experimento pela curva Reg. 02 se deve ao fato de ele não ter sido utilizado nos cálculos por apresentar $R^2_m=0,44$.

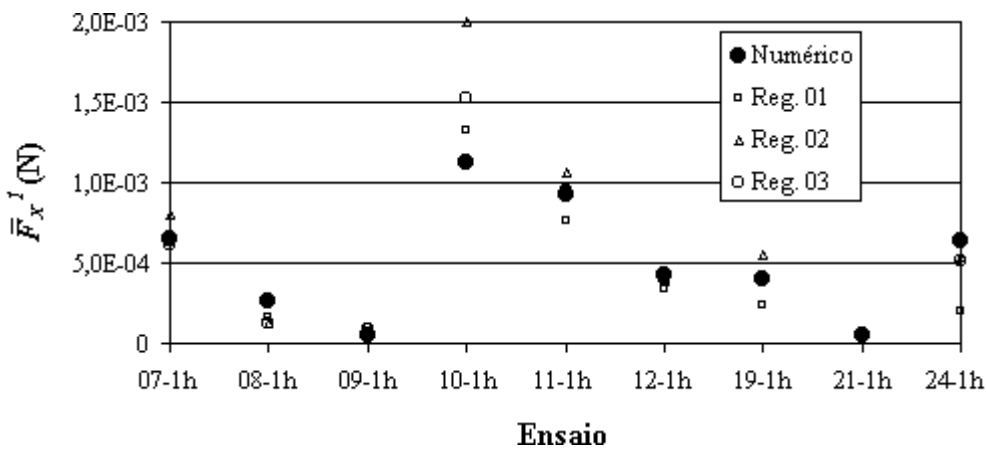


Figura 5.7 - Comparação entre o valor calculado de $\overline{F}_x^I$ para cada ensaio e o estimado pela equação 5.14 com os coeficientes dados na Tabela 5.3.

Procurando melhorar a representatividade da expressão, foram realizados testes de refinamento dos coeficientes. Dadas as vantagens de manipulação, os expoentes b , c e d foram tomados por números inteiros próximos dos valores apontados pelas duas últimas regressões. Em seguida, o coeficiente a foi ajustado iterativamente de forma a minimizar o erro médio quadrático entre as forças médias calculada pelo modelo numérico e a obtida com os novos coeficientes. A Tabela 5.4 apresenta os resultados, onde é registrada uma melhora em $R^2[\overline{F}_x^I]$ para o último ajuste.

Tabela 5.4 - Refinamento dos coeficientes indicados pelas regressões 02 e 03.

Ajuste	p	a	b	c	d	$R^2[\overline{F}_x^I]$
Reg. 02-Ref1	7	76,948	3	-4	2	0,72
Reg. 02-Ref2	7	0,143	3	-4	1	0,93
Reg. 03-Ref1	9	39,297	3	-4	2	0,74
Reg. 03-Ref2	9	0,133	3	-4	1	0,95

A Figura 5.8 apresenta a comparação entre a curva de forças originada pelo modelo para as simulações com $R^2_m>0,4$ e a curva estimada com o ajuste Reg. 03-Ref2, que apresentou um coeficiente de determinação de 0,95.

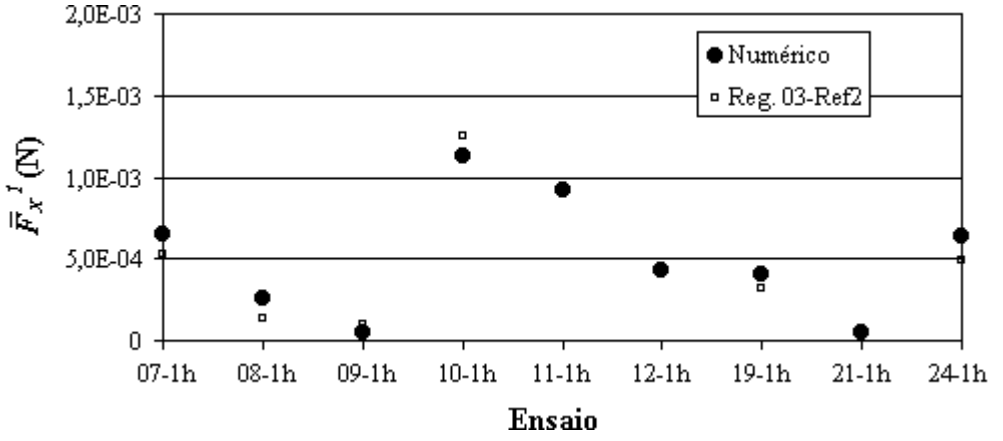


Figura 5.8 - Distribuição de $\bar{F}_x^I$ determinado para cada ensaio pelo modelo numérico, pela equação 5.14 com os coeficientes $a=0,133$, $b=3$, $c=-4$ e $d=1$.

O resultado final passa a ser uma expressão de maior representatividade que as anteriores, onde curiosamente os expoentes relacionados ao comprimento da onda se anulam. A substituição dos coeficientes ajustados na equação 5.14 fornece uma expressão final para a força, dada por:

$$\bar{F}_x^I = 0,133 \frac{\rho_v \phi \lambda^4 H^3}{T^2} \quad (5.18)$$

Além de ter se mostrado bastante representativa para indicar a força dentro das simulações calibradas, a equação 5.18 apresenta o termo cúbico na altura da onda, que como será discutido no próximo item acarreta implicações importantes no cálculo do amortecimento de ondas.

5.2 Comportamento do campo de hastes

A expressão 5.18 foi obtida a partir dos dados de 9 experimentos. A realização de novos ensaios para outras condições de onda e características de haste pode apontar para um diferente conjunto de coeficientes, e conseqüentemente um outra expressão para a força média. A substituição da forma geral da expressão 5.14 em 5.10 fornecerá uma expressão para o decaimento da altura da onda dada por:

$$H^{1-b} \frac{\partial}{\partial x} H = -a \frac{8\alpha N_h s^4}{g T^2 (4n-1) L^b} \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right) \left(\frac{h}{L} \right)^c \left(\frac{\phi}{L} \right)^d \quad (5.19)$$

que pode ser integrada fornecendo

$$H^{2-b} = -a \frac{8\alpha N_h s^4 (2-b)}{g T^2 (4n-1) L^b} \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right) \left(\frac{h}{L} \right)^c \left(\frac{\phi}{L} \right)^d x + C^{te} (2-b) \quad (5.20)$$

Considerando $H=H_0$ para $x=0$, teremos: $C^{ie}(2-b)=H_0^{2-b}$, e finalmente escreve-se:

$$\frac{H}{H_0} = \left[1 - a \frac{8\alpha N_h s^4 (2-b)}{gT^2 (4n-1) L^b H_0^{2-b}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right) \left(\frac{h}{L} \right)^c \left(\frac{\phi}{L} \right)^d x \right]^{\frac{1}{2-b}} \quad (5.21)$$

A substituição dos coeficientes a , b , c e d obtidos fornece uma expressão de decaimento do tipo:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \tilde{\beta}x} \quad (5.22)$$

onde

$$\tilde{\beta} = 1,064 \frac{\alpha N_h \phi \lambda^4 H_0}{gT^2 (4n-1)} \frac{\rho_v}{\rho_f} \quad (5.23)$$

Esta forma de decaimento é a mesma deduzida analiticamente por DALRYMPLE *et al.* (1984) considerando as estruturas vegetais como cilindros rígidos, e negligenciando o seu movimento. O fato de os dados experimentais terem apontado uma solução similar sugere que a expressão 2.6 pode ter uma abrangência mais geral em fenômenos de amortecimento de ondas por grupos de elementos esbeltos.

A expressão 5.23 evidencia os aspectos que influenciam diretamente o fenômeno final investigado por este trabalho, ou seja, a magnitude do amortecimento das ondas. Algumas relações merecem um comentário a parte:

- 1) O amortecimento cresce com o aumento da densidade relativa da haste ρ_v/ρ_f , indicando que a inércia do elemento prevalece sobre o empuxo enquanto força de resistência ao movimento, pois se o empuxo fosse mais significativo, o amortecimento deveria ser maior para uma menor densidade relativa;
- 2) como seria intuitivo prever, quanto mais representativo o diâmetro da haste (ϕ) , maior a taxa de amortecimento.
- 3) a relação não linear entre o amortecimento e a parcela da coluna d'água ocupada pela haste (λ) , definida como a razão entre o seu comprimento (s) e a profundidade de repouso (h) , mostra que o amortecimento é fortemente reduzido a partir do momento que a extremidade da haste se afasta da superfície livre. Este estudo não considerou o caso em que as hastes atravessam a superfície livre $(\lambda > 1)$.

5.2.1 Quantificação da interação entre hastes

Para os experimentos com campo descritos na Tabela 4.2, todos os parâmetros da equação 5.23 são conhecidos, exceto o coeficiente de interação entre hastes (α). Através da minimização do erro médio quadrático entre as curvas de amortecimento experimentais e teóricas, este parâmetro foi estimado para cada um dos ensaios. A Figura 5.9 apresenta uma comparação entre as curvas de decaimento medidas e aquelas previstas com o modelo para $\alpha=1$ e para α igual ao valor ajustado. A sigla MECh refere-se ao Modelo Empírico para Conjunto de hastes proposto (equação 5.22).

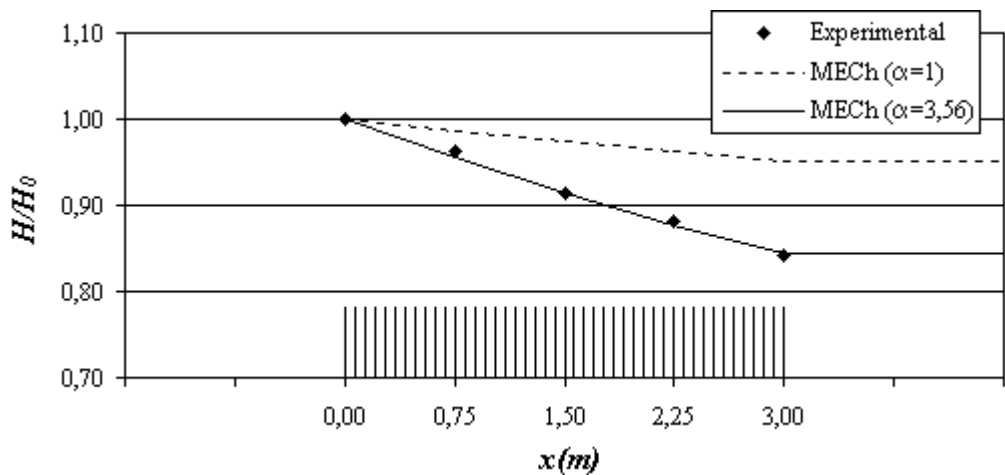


Figura 5.9 - Decaimento de altura de onda para o experimento 01-Ch ($E_v=0,025m$).

No Apêndice E são apresentadas as curvas para as demais configurações experimentais. Observa-se o significativo incremento na atenuação das ondas com o aumento do número de hastes por metro quadrado de 400 ($E_v=0,050\text{ m}$) para 1600 ($E_v=0,025\text{ m}$). No primeiro caso, a redução da altura da onda nos três metros de campo variou de 2,5 a 5 %, enquanto que, após o aumento da densidade, a taxa de atenuação passou a variar em torno de 15%. Este valor é bastante expressivo, principalmente se for considerado que a extensão do campo simulado é somente da ordem de um a dois comprimentos de onda.

Os valores ajustados para o coeficiente de interação entre hastes estão apresentados na Tabela 5.5, onde são repetidos os parâmetros alternados em cada ensaio. Como seria presumível, α mostrou-se mais representativo nos experimentos com a maior densidade, onde a relação entre a amplitude de oscilação da haste e a distância entre as mesmas torna-se menor, favorecendo o contato direto entre elementos adjacentes.

Observa-se uma constante tendência de crescimento de α com o aumento do período da onda (T), porém em relação à altura de onda incidente (H_o), este valor mostrou-se inversamente proporcional.

Tabela 5.5 - Coeficiente de interação entre hastes determinado para cada uma das configurações de onda ensaiadas.

Onda	H_o	T	α ($E_v=0,050$)	α ($E_v=0,025$)
01-Ch	0,05	1,00	2,309	3,563
02-Ch	0,05	1,25	4,553	6,320
03-Ch	0,05	1,50	8,789	12,237
04-Ch	0,10	1,00	2,102	1,865
05-Ch	0,10	1,25	3,396	3,293
06-Ch	0,10	1,50	4,604	6,124
07-Ch	0,15	1,00	0,694	1,291
08-Ch	0,15	1,25	0,756	2,507
09-Ch	0,15	1,50	3,459	4,410
Media			3,407	4,623
Desvio P.			2,475	3,340

Os valores encontrados sugerem que a resistência ao escoamento imposta pelo conjunto de hastes é em média quatro vezes maior que a estimada pela soma da força individual de cada haste. Este resultado indica que, ao contrario do que se considera na maioria dos desenvolvimentos teóricos, a interação entre hastes é um fenômeno de grande representatividade, e a idéia de se estimar a resistência total do campo pela soma das resistências individuais das hastes não é justificada, principalmente para o caso de hastes flexíveis, onde fenômenos como o entrelaçamento de hastes ou o contato direto podem ocorrer.

5.2.2 Determinação de uma expressão para α

Mais uma vez recorre-se à técnica de regressão linear multivariada para determinar uma expressão que represente o comportamento de α diante de parâmetros adimensionais. Tomando por base os grupos apresentados na equação 5.13, incluiu-se um novo fator para representar a relação entre o diâmetro das hastes e o espaçamento entre as mesmas, fornecendo um conceito semelhante à porosidade do campo de hastes.

Foram testadas diferentes combinações entre os grupamentos adimensionais, sendo os melhores resultados obtidos com uma expressão do tipo:

$$\alpha = a'' \left(\frac{H_o}{E_v} \right)^{b''} \left(\frac{s}{L} \right)^{c''} \left(\frac{\phi}{E_v} \right)^{d''} \tag{5.24}$$

Conseguiu-se um coeficiente de determinação $R^2[\alpha]=0,98$ para os valores de: $a''=7,44$, $b''=-1,0$, $c''=-2,0$ e $d''=1,5$. Desta forma, obteve-se uma função direta e de grande representatividade para o coeficiente de interação entre hastes dada por:

$$\alpha = 7,44 \frac{L^2 \phi^{\frac{3}{2}}}{H_o s^2 E_v^{\frac{1}{2}}} \tag{5.25}$$

onde, conforme mencionado no item 4.1.3, o comprimento de onda utilizado foi estimado pela teoria da função de corrente. A Figura 5.10 compara os valores determinados para α com os resultados da equação 5.25.

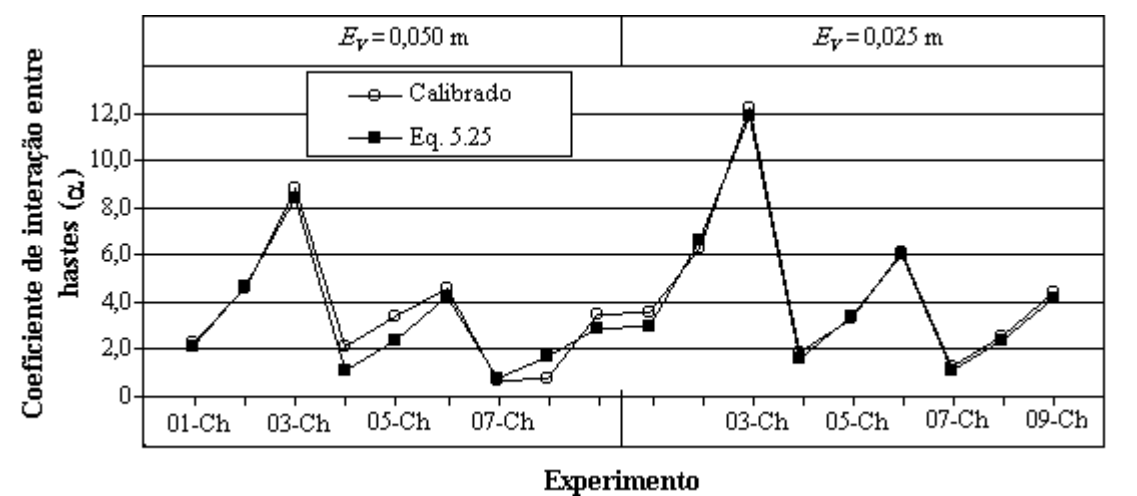


Figura 5.10 - Comparação entre o valor de α obtido nos experimentos com aqueles previstos pela equação 5.25.

5.2.3 Considerações a respeito do campo de velocidades

As medições realizadas com as sondas de velocidade para ensaios com e sem o campo de vegetação tiveram o propósito de responder a duas questões principais: (i) quão representativa é a teoria de onda utilizada no modelo numérico para os ensaios realizados ? (ii) a presença da vegetação introduz alguma outra modificação no campo de velocidades além da redução de sua magnitude ?

Os resultados indicaram que a teoria da função de corrente de 3ª ordem representou satisfatoriamente o campo de velocidades das ondas estudadas. A Figura

5.11 traz as curvas comparativas entre as componentes horizontal e vertical do escoamento obtidas nos dois pontos de medição durante o experimento 03-Ch sem vegetação, e aquelas geradas numericamente. A boa coerência apresentada foi registrada nos demais experimentos.

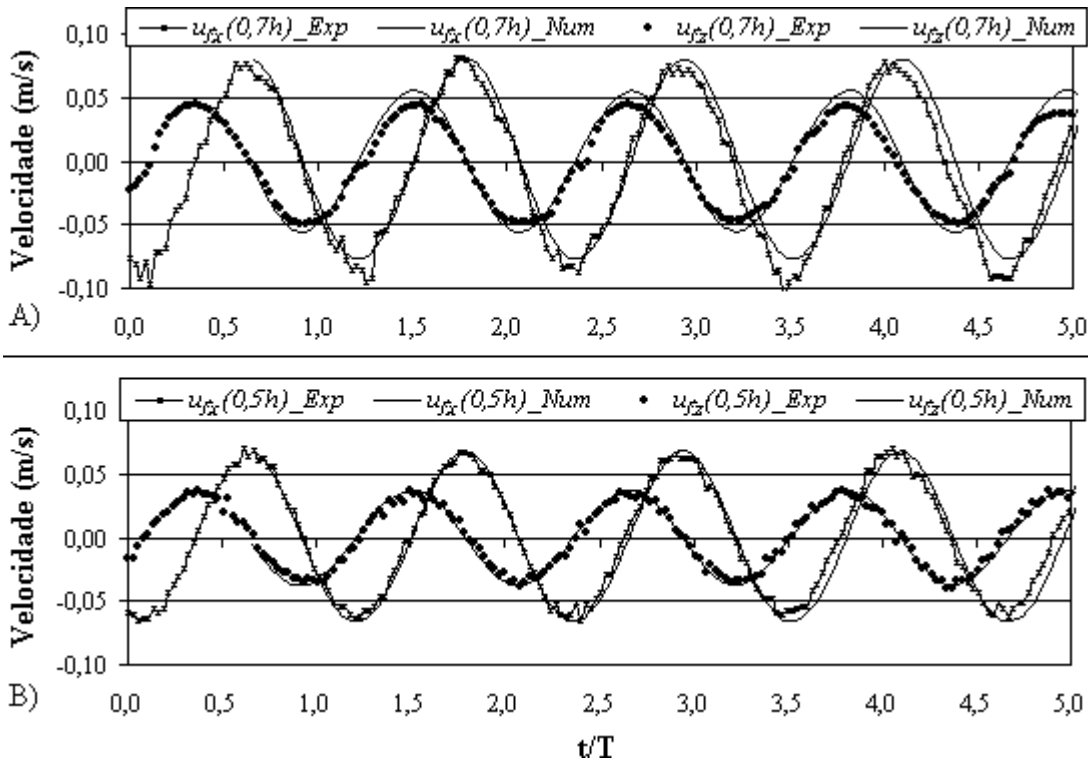


Figura 5.11 – Comparação entre valores de velocidade do escoamento previsto pela teoria da função de corrente e medidas durante o ensaios 03-Ch. A) Ponto localizado à 0,7h. B) Ponto localizado à 0,5h.

Comparações similares foram realizadas para as curvas de velocidade obtidas com e sem vegetação. Medições simultâneas de nível no ponto de fixação dos ADV's revelaram que as modificações impostas no campo de velocidades pela presença das hastes estão relacionadas diretamente à redução da altura da onda. Em outras palavras, uma vez conhecida a altura da onda em um ponto do campo, a velocidade do escoamento neste local pode ser obtida através da teoria de onda.

5.3 Modelo de amortecimento

A discussão conduzida com base nas considerações teóricas e evidências experimentais permite, neste ponto, a proposição de um modelo de amortecimento para ondas de gravidade propagando-se em campos formados pelo elemento flexível estudado. A altura da onda poderá ser obtida em qualquer ponto pela expressão:

$$\frac{H}{H_o} = \frac{1}{1 + \tilde{\beta}x}$$

(5.22)

onde a substituição da expressão obtida para α na equação 5.23 fornece:

$$\tilde{\beta} = 7,916 \frac{L^2 \lambda^4}{g T^2 (4n - 1) s^2} \frac{\rho_v}{\rho_f} \phi^{5/2} N_h^{5/4}$$

(5.26)

Desta forma, para uma mesma haste, o amortecimento será uma função somente da profundidade e do comprimento da onda, não dependendo da altura incidente. As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam as curvas de decaimento para as condições ensaiadas.

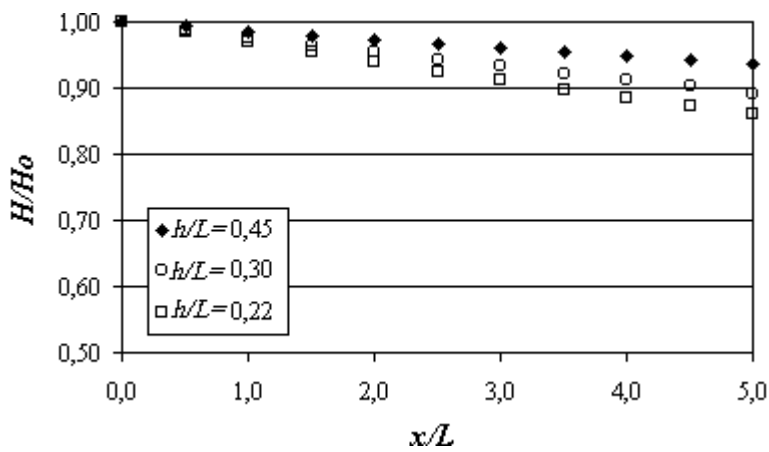


Figura 5.12 – Decaimento da altura da onda propagando-se através de um campo de hastes flexíveis com espaçamento $E_v=0,050$ m.

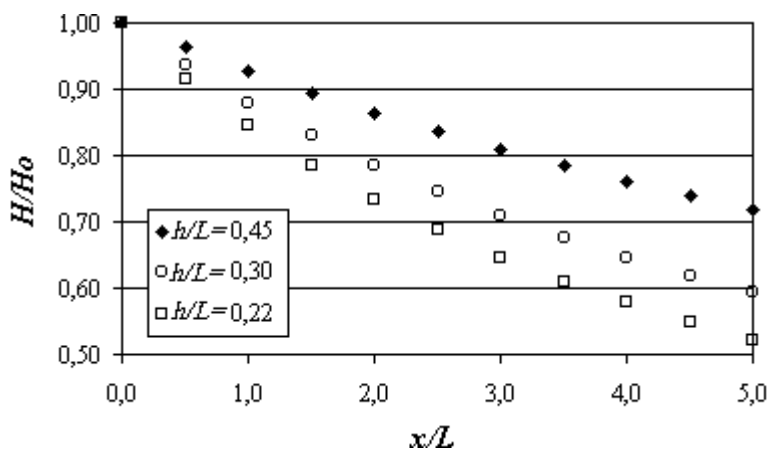


Figura 5.13 - Decaimento da altura da onda propagando-se através de um campo de hastes flexíveis com espaçamento $E_v=0,025$ m.

Conforme mencionado no item 4.1.3, os valores de comprimento de onda utilizados foram estimados pela teoria da função de corrente. A expressão 5.26 deve ser aplicada somente em condições próximas às ensaiadas. Uma expressão relacionando as características dos ensaios realizados com os valores encontrados para o coeficiente de arraste é apresentada para fornecer uma primeira estimativa do C_D a ser utilizado no modelo mecânico em novas simulações com os elementos flexíveis adotados no presente estudo:

$$C_D = 1,56 \frac{H^{1/2} h^2}{\phi^{1/2} L^2} \tag{5.27}$$

Esta expressão foi obtida através de regressão usando os nove experimentos com $R^2_m > 0,40$. O seu coeficiente de determinação foi $R^2[C_D] = 0,93$. A Figura 5.14 apresenta uma comparação entre os valores de coeficiente de arraste obtidos para os experimentos através da calibração do modelo mecânico e aqueles estimados pela equação 5.27.

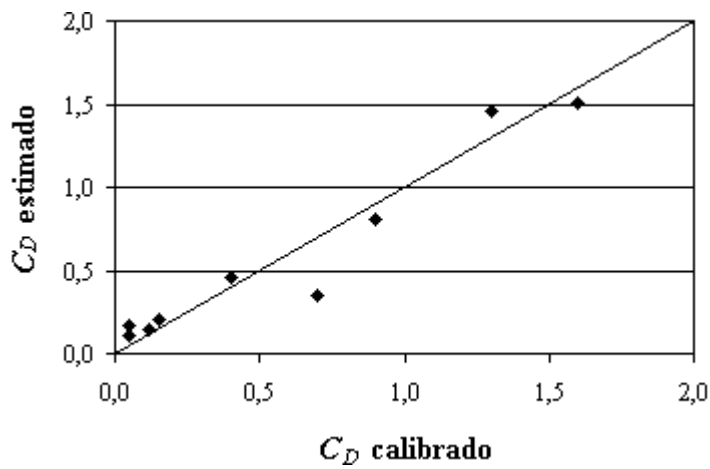


Figura 5.14 – Comparação entre os valores de coeficiente de arraste calibrados e estimados pela expressão 5.27.

A título de comparação, os valores estimados para C_D foram inseridos na expressão estabelecida por DALRYMPLE *et al.* (1984), equação 2.7. Os coeficientes de amortecimento, β , obtidos, mostraram-se até 5 vezes maiores que os valores determinados para $\tilde{\beta}$. Em uma primeira análise, seria intuitivo supor que, ao introduzir-se a flexibilidade (e conseqüentemente o movimento) das hastes, as forças atuantes seriam reduzidas, e desta forma, a resistência ao escoamento se mostrasse menor, o que justifica o resultado encontrado. Contudo, esta comparação tem um cunho meramente ilustrativo, dado que o modelo proposto neste trabalho, entre outros aspectos, foge da

idéia de se atribuir um C_D único para todo o campo, trabalhando diretamente com uma expressão para a força, variável com a altura da onda.

Além disso, o modelo apresentado contempla uma expressão empírica para representar o efeito de conjunto das hastes, o que não acontece no referido trabalho. Mesmo que este efeito fosse negligenciado através da adoção de um alfa unitário, o uso da velocidade relativa entre a haste e o fluido no cálculo da resistência individual já consiste em uma diferença teórica grande o suficiente para limitar a comparação direta entre os dois coeficientes de amortecimento propostos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apresentou-se um modelo de amortecimento de ondas de gravidade propagando-se através de um conjunto de elementos artificiais flexíveis. O fenômeno foi dividido em dois processos principais. Inicialmente, a resistência individual de uma haste foi caracterizada através de um modelo mecânico. Uma vez estimada a contribuição de um elemento, avaliou-se o amortecimento gerado pelo conjunto, o que permitiu a quantificação de uma resistência adicional resultante do processo de interação entre hastes.

Dentro das simplificações consideradas, o modelo mecânico proposto mostrou-se satisfatório na representação da resposta da haste às forças impostas pelo escoamento. Uma vez calibrado, pôde-se gerar séries temporais de força, posição e velocidade ao longo da haste, o que caracteriza uma ferramenta útil para estudos físicos e biológicos. Acredita-se que a inclusão dos termos de inércia na equação do cálculo das forças hidrodinâmicas pode corrigir as defasagens temporais registradas em algumas das simulações. A investigação dos efeitos decorrentes da inclusão destes termos, juntamente com o aprimoramento da metodologia para obtenção dos coeficientes de calibração, são pontos a serem explorados em trabalhos futuros.

Para as características de onda e de haste analisadas, a resistência total do campo mostrou-se em média quatro vezes superior à soma das resistências individuais de cada haste. É possível que esta amplificação se deva à grande flexibilidade dos elementos estudados, pois fenômenos adicionais como o entrelaçamento das hastes e o contato direto, não são considerados no modelo mecânico. Contudo, a quantificação deste fenômeno só pôde ser realizada graças à análise compartimentada do amortecimento, o que normalmente não é feito. Como a interação entre hastes pode ocorrer mesmo para elementos de maior rigidez (em consequência do desprendimento de vórtices, por exemplo) os resultados obtidos põem em dúvida a fundamentação teórica de grande parte dos modelos existentes, onde o fenômeno não é tratado explicitamente.

A expressão algébrica obtida para a curva de decaimento da altura da onda é semelhante à deduzida analiticamente para estruturas rígidas. O fator de amortecimento

mostrou-se independente da altura da onda incidente, logo, mantidas as características físicas do campo, o decaimento pode ser expresso como uma função exclusiva da profundidade relativa. As expressões obtidas configuram uma ferramenta para dimensionamento das características físicas necessárias a um campo formado pelos elementos estudados, de modo que uma onda considerada nociva atinja padrões aceitáveis após percorre-lo.

Uma linha de pesquisa sugerida para trabalhos futuros, consiste na aplicação da metodologia desenvolvida para caracterização do amortecimento em campos de vegetação natural. Para espécies como a *Brachiária subquadrípara*, é possível que o modelo mecânico se mostre adequado, logo, ensaios em canal de onda ou *in loco* com um único indivíduo representativo poderiam fornecer informações para calibração. Por outro lado, a aplicação para outras espécies pode requerer modificações de alguns aspectos do modelo, como por exemplo, da equação constitutiva da haste para contemplar a introdução da elasticidade do material. Esta é uma área de pesquisa que vem ganhando especial atenção, voltada para a determinação de propriedades biomecânicas das plantas.

Uma vez caracterizada a resistência de um exemplar, uma primeira estimativa do potencial de amortecimento do campo poderia ser obtida pela expressão 5.11 considerando-se $\alpha=1$. Como os resultados indicam que em média este coeficiente tende a ser superior, pode-se dizer que o dimensionamento de um campo com o objetivo de atenuar ondas nocivas estaria sendo conservador, ou a favor da segurança. Estudos mais aprofundados poderiam ser conduzidos com o intuito de medir precisamente o amortecimento em um campo desta espécie, o que indicaria o potencial de amplificação decorrente da interação entre indivíduos.

Apêndice A

RELATO FOTOGRÁFICO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EM ILHA SOLTEIRA

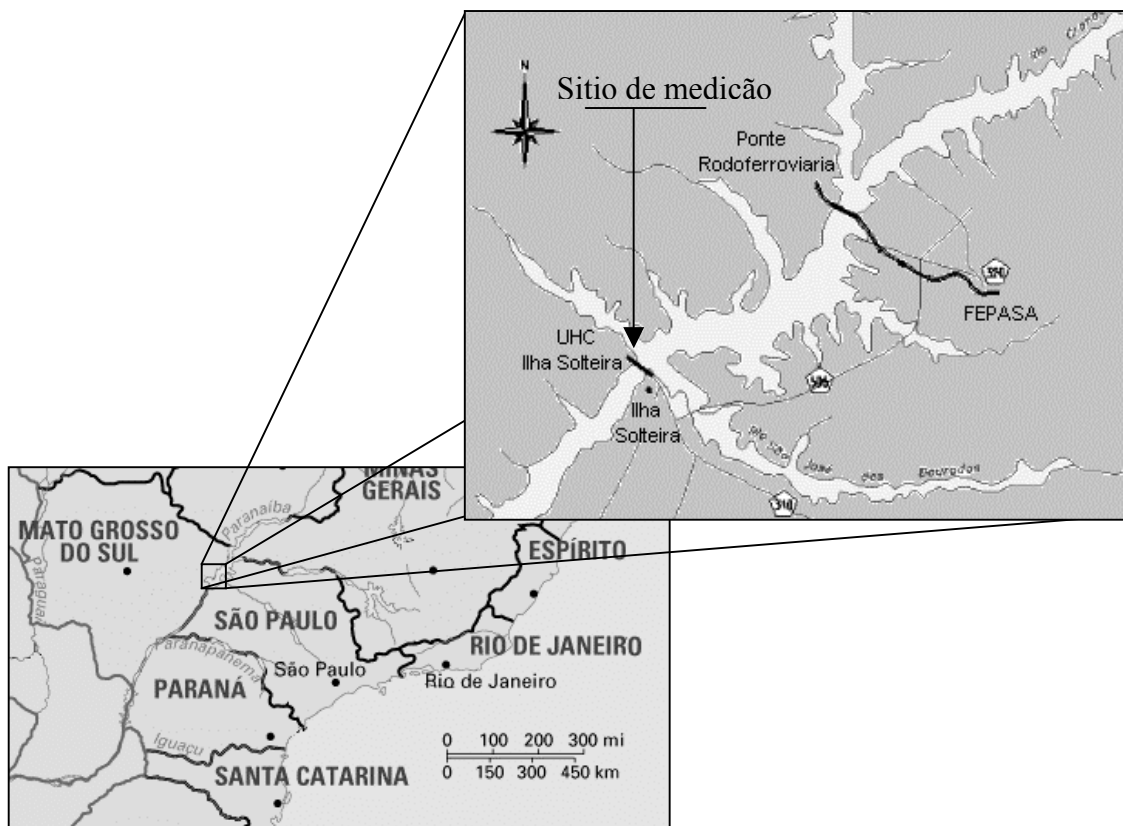


Figura A.1 – Localização do sitio utilizado para as medições.

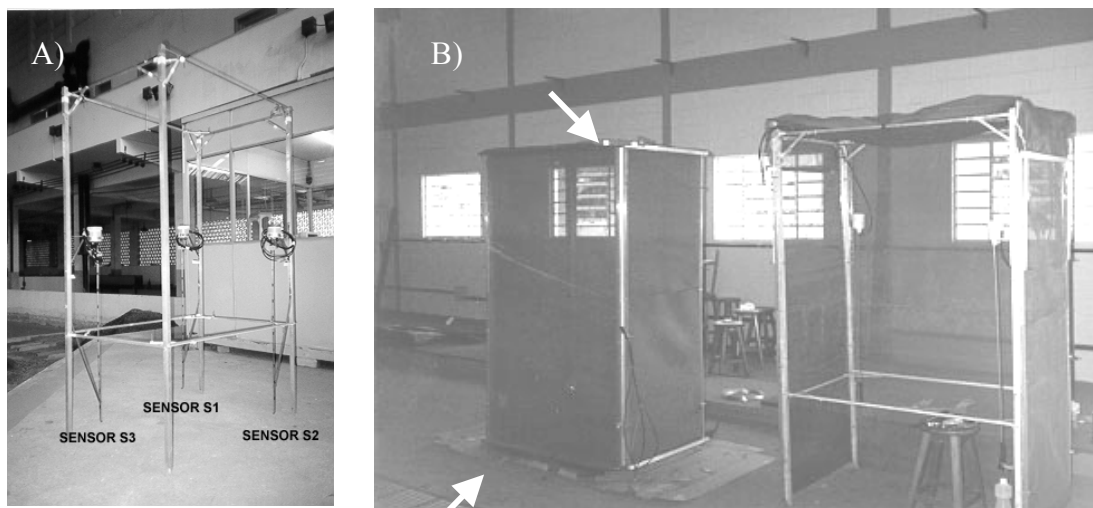


Figura A.2 - Medidores direcionais de onda. A) Estrutura original usada por BORGES, 2001. B) À direita, modelo original parcialmente revestido pelas telas, e à esquerda gaiola do ponto externo, com reforço em quadros aço (indicados pelas setas).

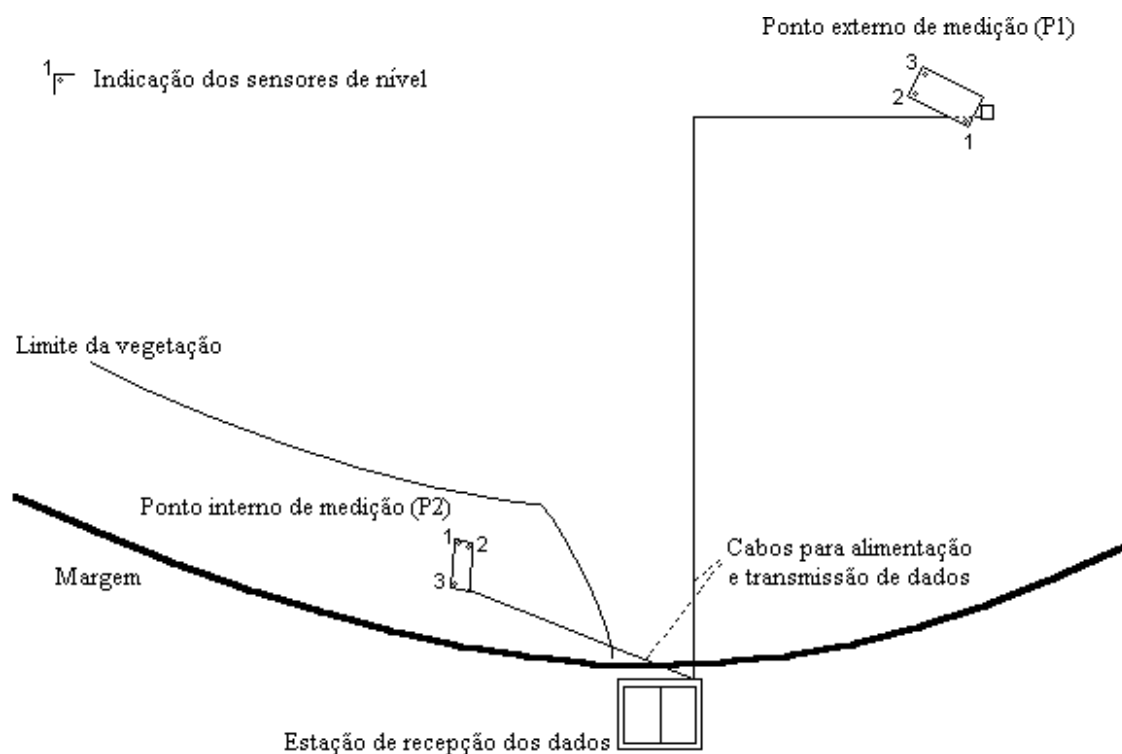


Figura A.3 - Configuração do sítio de medição de ondas localizado na margem oeste do reservatório, nas instalações da Fazenda Experimental da UNESP.

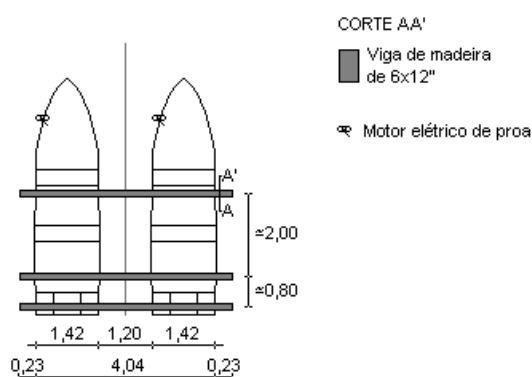


Figura A.4 - Esquema de montagem do catamarã para lançamento da gaiola externa.

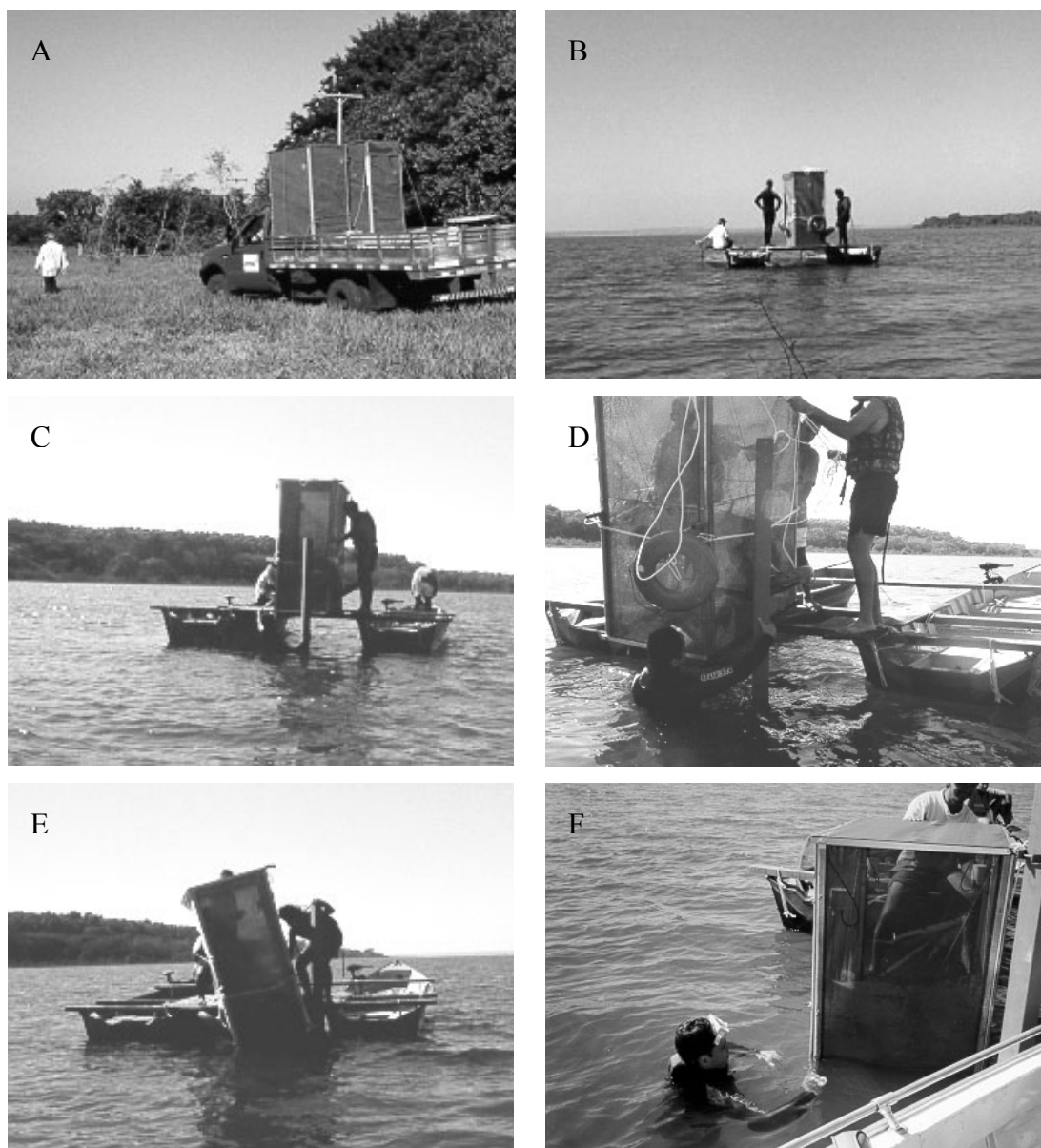


Figura A.5 - Seqüência de preparação, lançamento e fixação da gaiola de medição no ponto externo. A) Chagada das gaiolas à fazenda. B) A gaiola externa é colocada sobre as vigas de madeira do catamarã improvisado. C) O ondógrafo chega na torre de fixação. D) Tendo sua flutuabilidade garantida por 4 bóias salva-vidas o equipamento é descido até a água. E) Um mergulhador e dois homens na embarcação garantem a sustentação até que as bóias passam a atuar. F) Finalmente, as presilhas de fixação são apertadas e a barra travamento contra giro é colocada.

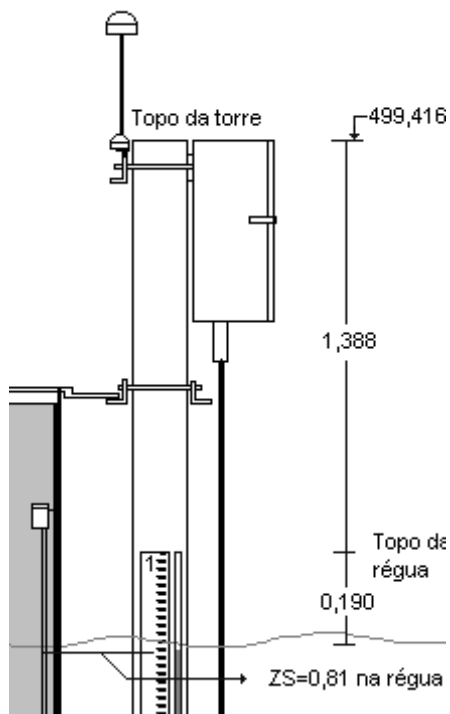


Figura A.6 - Estado final da torre externa, com o cabo chegando na caixa de passagem para alimentação da iluminação noturna e das sondas. O esquema mostra a posição do zero dos sensores coincidindo com o nível d'água.



Figura A.7 – Ponto de montagem do sistema de medição de ondas interno ao campo de *Brachiária subquadrípara*. A) Trilha aberta para acesso B) Colocação dos instrumentos.



Figura A.8 - Estação base situada na margem do reservatório com sistema de aquisição de dados.



Figura A.9 – Incidência de ondas no sitio de medição.

Apêndice B

MODELO MECÂNICO PARA UMA HASTE

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Arquivo: menu.m          Autor: Savio Freire Lima      Ultima atualização: 25/03/2005  %
% Descrição: Menu de controle para chamada das rotinas que compoem o MN1h          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%% Preparacao da tela do Menu principal %%%

```

```

figure(1), clf;
set(gcf,'Units','Normalized','Position',[0.05 0.6 0.35 0.3],'Name','Modelagem dinamica da haste');

Botao2=uicontrol('Style','Pushbutton','String','Modelo Fd(X&Z)
StF','FontSize',10,'Units','normalized','Position',[.20 .7 .60 .1],'Callback','strfct');
Botao3=uicontrol('Style','Pushbutton','String','Plotar','FontSize',10,'Units','normalized','Position',[.20 .6 .60
.1],'Callback','plotar');
Botao4=uicontrol('Style','Pushbutton','String','Exportar
parametros','FontSize',10,'Units','normalized','Position',[.20 .5 .60 .1],'Callback','exporta');
Botao5=uicontrol('Style','Pushbutton','String','Exportar anima
(VB)','FontSize',10,'Units','normalized','Position',[.20 .4 .60 .1],'Callback','exportavb');
Botao5=uicontrol('Style','Pushbutton','String','Sair','FontSize',10,'Units','normalized','Position',[.20 .3 .60
.1],'Callback','close all, clear all');

Passotxt=uicontrol('Style','text','String','Passos: ','FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.1 .2 .5 .1]);
Passosbox=uicontrol('Style','edit','String',15000,'FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.6 .2 .2 .1]);

Nontxt=uicontrol('Style','text','String','No para plotar: ','FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.1 .1
.5 .1]);
Nonbox=uicontrol('Style','edit','String',0,'FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.6 .1 .2 .1]);

TmpCrttxt=uicontrol('Style','text','String','Exportar a partir de:
','FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.1 .0 .5 .1]);
TmpCrtbox=uicontrol('Style','edit','String',6,'FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.6 .0 .2 .1]);

```

% Arquivo: strfct.m Autor: Savio Freire Lima Ultima atualização: 27/03/2005 %
 % Descrição: rotina para pré e pos processamento dos dados a relacionados ao MN1h %
 %

%%% Modelo baseado na teoria da funcao de corrente %%%

```

[ifile,ipath]=uigetfile('*.*','Abrir arquivo de resultados do PSI22');
if ifile~=0,
    if exist([ipath ifile],'file');
        Instante=clock;
        'Modelo de ondas pela funcao de corrente'
        MarcaInst=['Inicio do processamento:
',num2str(Instante(1,4)),':',num2str(Instante(1,5)),':',num2str(Instante(1,6))]]
  
```

```

    %%%% Leitura do arquivo de saida do programa PSI22 %%%%
    [OSTf]=textread([ipath ifile],'%f',1,'delimiter','th');
    [Temp1 HStf Temp2 profStf Temp3 TStf]=textread([ipath ifile],'%s %f %s %f %s %f',1,'delimiter',
    '=', 'headerlines',4);
    [Temp1 HLOStf]=textread([ipath ifile],'%s %f',1,'delimiter','=', 'headerlines',5);
    [Temp1 LLOStf]=textread([ipath ifile],'%s %f',1,'delimiter','=', 'headerlines',6);
    [Temp1 Xi Temp2 Xp]=textread([ipath ifile],'%s %f %s %f',fix(OSTf/2)+1,'delimiter',
    '=', 'headerlines',13);
    Xn(1,1)=Xi(1,1);
    Xn(2,1)=Xp(1,1);
    Xn(3,1)=Xi(2,1);
    LStf=HStf*LLOStf/HLOStf;

    Passos=str2num(get(Passosbox,'String'));
  
```

%%% Rotina para leitura dos dados de configuracao do experimento %%%

```

Arquivo1='..\dados.ini';
[Temp H]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 2,'delimiter',' ');
[Temp T]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 3,'delimiter',' ');
[Temp prof]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 4,'delimiter',' ');
[Temp L]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 5,'delimiter',' ');
[Temp pa]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 6,'delimiter',' ');

[Temp n]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 10,'delimiter',' ');
[Temp pv]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 11,'delimiter',' ');
[Temp D]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 12,'delimiter',' ');
[Temp ln]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 13,'delimiter',' ');
[Temp Cd]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 14,'delimiter',' ');
[Temp Cm]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 15,'delimiter',' ');
[Temp Xo]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 16,'delimiter',' ');
[Temp Dt]=textread(Arquivo1,' %s %f', 1, 'headerlines', 19,'delimiter',' ');
  
```

%%% Verificacao de coerencia entre dados do arquivo ".ini" e da funcao de corrente %%%

```

Erro=0;
if H-HStf>.001
    'A Altura do arquivo da funcao de corrente nao e a mesma do arquivo de dados'
    Erro=Erro+1;
end
if prof-profStf>.001
    'A Profundidade do arquivo da funcao de corrente nao e a mesma do arquivo de dados'
    Erro=Erro+1;
end
if T-TStf>.001
    'O periodo do arquivo da funcao de corrente nao e o mesmo do arquivo de dados'
    Erro=Erro+1 ;
  
```

```

end
if Erro>0
    close all;
end

Passos=str2num(get(Passosbox,'String'));

ModFXZStF; % Chamada para o modelo mecanico propriamente dito

Nonbox=uicontrol('Style','edit','String',n,'FontSize',10,'Units','Normalized','Position',[.6 .1 .2 .1]);
Non=str2num(get(Nonbox,'String'));

TmpCorte=str2num(get(TmpCrtbox,'String'));
PtoCorte=round(TmpCorte*1/Dt+1);

Tempo_2=Tempo(PtoCorte:Passos,1);
Passos_2=Passos-PtoCorte+1;

Instante=clock;
MarcaInst=['Fim do processamento:
',num2str(Instante(1,4)),':',num2str(Instante(1,5)),':',num2str(Instante(1,6))]
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Arquivo: ModFXZStf.m      Autor: Savio Freire Lima      Ultima atualização: 24/03/2005 %
% Descrição: Modelo mecanico propriamente dito para solução das equacoes de cada no em cada %
% passo de tempo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%% Definicao de variaveis intermediarias %%%
Vc=pi*(D/2)^2*ln; % Volume do cilindro que envolve cada no'
Fe=9.806*(pa-pv)*Vc; % Empuxo efetivo atuante sobre cada no'
M=pv*Vc; % Massa de cada no'
k=2*pi/LStF;
Sigma=2*pi/T;
B=0.5*Cd*pa*D*ln; % Constante para calculo do arraste
C=pa*Vc;

```

```

%%% Dimensionalizacao dos coeficientes da funcao de corrente %%%
Xn=9.806*H*T*Xn;
%%% Definicao das condicoes de contorno iniciais (posicao dos nos e velocidades) %%%
for j=1:n+1
    Alfa(1,j)=0.00001;
    uvx(1,j)=0;
    uvz(1,j)=0;
end
%%% Definicao do ponto de contato da haste com o fundo ao longo do tempo (no' zero) %%%
for i=1:Passos
    X(i,1)=Xo;
    Z(i,1)=0;
end

```

```

%%% Loop no dominio do tempo %%%
for i=1:Passos
    Tempo(i,1)=(i-1)*Dt;
    for j=1:n, % Calculo dos parametros no inicio do passo de tempo
        X(i,j+1)=X(i,j)+ln*sin(Alfa(i,j+1));
        Z(i,j+1)=Z(i,j)+ln*cos(Alfa(i,j+1));
        ux(i,j+1)=0;
        uz(i,j+1)=0;
        ax(i,j+1)=0;
        az(i,j+1)=0;
        for s=1:3
            ux(i,j+1)=ux(i,j+1)-s*Xn(s,1)*k*cosh(s*k*Z(i,j+1))*cos(s*(k*X(i,j+1)-Sigma*Tempo(i,1)));
            uz(i,j+1)=uz(i,j+1)-s*Xn(s,1)*k*sinh(s*k*Z(i,j+1))*sin(s*(k*X(i,j+1)-Sigma*Tempo(i,1)));
            ax(i,j+1)=ax(i,j+1)-s^2*Xn(s,1)*Sigma*k*cosh(s*k*Z(i,j+1))*sin(s*(k*X(i,j+1)-Sigma*Tempo(i,1)));
            az(i,j+1)=az(i,j+1)+s^2*Xn(s,1)*Sigma*k*sinh(s*k*Z(i,j+1))*cos(s*(k*X(i,j+1)-Sigma*Tempo(i,1)));
        end
        Fdx(i,j+1)=B*cos(Alfa(i,j+1))*abs(ux(i,j+1)-uvx(i,j+1))*(ux(i,j+1)-uvx(i,j+1));
        Fdz(i,j+1)=B*sin(Alfa(i,j+1))*abs(uz(i,j+1)-uvz(i,j+1))*(uz(i,j+1)-uvz(i,j+1));

        Finx(i,j+1)= Cm*C*(ax(i,j+1)- acx(i,j+1))+ C*ax(i,j+1);
        Finz(i,j+1)= Cm*C*(az(i,j+1)- acz(i,j+1))+ C*az(i,j+1);
        Fx(i,j+1)=Fdx(i,j+1)+Finx(i,j+1);
        Fz(i,j+1)=Fdz(i,j+1)+Finz(i,j+1);
    end
    %%%% Sistema linear para obtencao dos deslocamentos e da tensao normal de cada no' %%%%
    % Montagem da matriz de coeficientes (A) e do vetor independente (Y)
    for j=1:n
        A(3*j-2,3*j-2)=-sin(Alfa(i,j+1));
        A(3*j-1,3*j-2)=-cos(Alfa(i,j+1));
        A(3*j-2,3*j-1)=-2*M/Dt^2;
    end
end

```

```

A(3*j-1,3*j)=-2*M/Dt^2;
A(3*j,3*j)=1/tan(Alfa(i,j+1));
A(3*j,3*j-1)=1;
if j>1
    A(3*(j-1)-2,3*j-2)=sin(Alfa(i,j+1));
    A(3*(j-1)-1,3*j-2)=cos(Alfa(i,j+1));
    A(3*j,3*(j-1)-1)=-1;
    A(3*j,3*(j-1))=-1/tan(Alfa(i,j+1));
end
Y(3*j-2,1)=-Fx(i,j+1)-2*M/Dt*uvx(i,j+1);
Y(3*j-1,1)=-Fe-Fz(i,j+1)-2*M/Dt*uvz(i,j+1);
Y(3*j,1)=0;
end

XSol=A\Y; % Solucao do sistema linear no vetor Xsol

for j=1:n
    %%% Saida do sistema %%%
    Tn(i,j+1)=XSol(3*j-2,1);
    Dsx(i,j+1)=XSol(3*j-1,1);
    Dsz(i,j+1)=XSol(3*j,1);
    %%% Calculo da nova posicao da haste ao fim do passo de tempo %%%
    X(i+1,j+1)=X(i,j+1)+Dsx(i,j+1);
    Z(i+1,j+1)=Z(i,j+1)+Dsz(i,j+1);
    Alfa(i+1,j+1)=atan((X(i+1,j+1)-X(i+1,j))/(Z(i+1,j+1)-Z(i+1,j)));
    %%% Calculo das aceleracoes consideradas constantes durante o passo de tempo %%%
    acx(i,j+1)=2/Dt*(Dsx(i,j+1)/Dt-uvx(i,j+1));
    acz(i,j+1)=2/Dt*(Dsz(i,j+1)/Dt-uvz(i,j+1));
    %%% Calculo das velocidades finais de cada no para entrada no proximo passo %%%
    uvx(i+1,j+1)=uvx(i,j+1)+acx(i,j+1)*Dt;
    uvz(i+1,j+1)=uvz(i,j+1)+acz(i,j+1)*Dt;
end
end

```

% Arquivo: ExportaVB.m Autor: Savio Freire Lima Ultima atualização: 24/03/2005 %
 % Descrição: Rotina para exportacao de parâmetros calculados em cada no a cada passo de tempo %

```

Instante=clock;
MarcaInst=['Inicio da exportacao de dados:
',num2str(Instante(1,4)),',';num2str(Instante(1,5)),',';num2str(Instante(1,6))]

```

```

for j=1:n+1
  j
  for i=1:Passos_2
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,1)=Tempo(PtoCorte+(i-1),1);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,2)=X(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,3)=Z(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,4)=acx(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,5)=acz(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,6)=Fdx(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,7)=Fdz(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,8)=Finx(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,9)=Finz(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,10)=Tn(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,11)=uvx(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,12)=uvz(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,13)=ux(PtoCorte+(i-1),j);
    Saida3((j-1)*Passos_2+i,14)=uz(PtoCorte+(i-1),j);
  end
end
save(['Animacao\' ArquivoOut'],'Saida3','-ASCII')

```

```

Instante=clock;
MarcaInst=['Fim da saida de dados:
',num2str(Instante(1,4)),',';num2str(Instante(1,5)),',';num2str(Instante(1,6))]

```

Apêndice C

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MEDIDOS E OS GERADOS PELO MODELO CALIBRADO

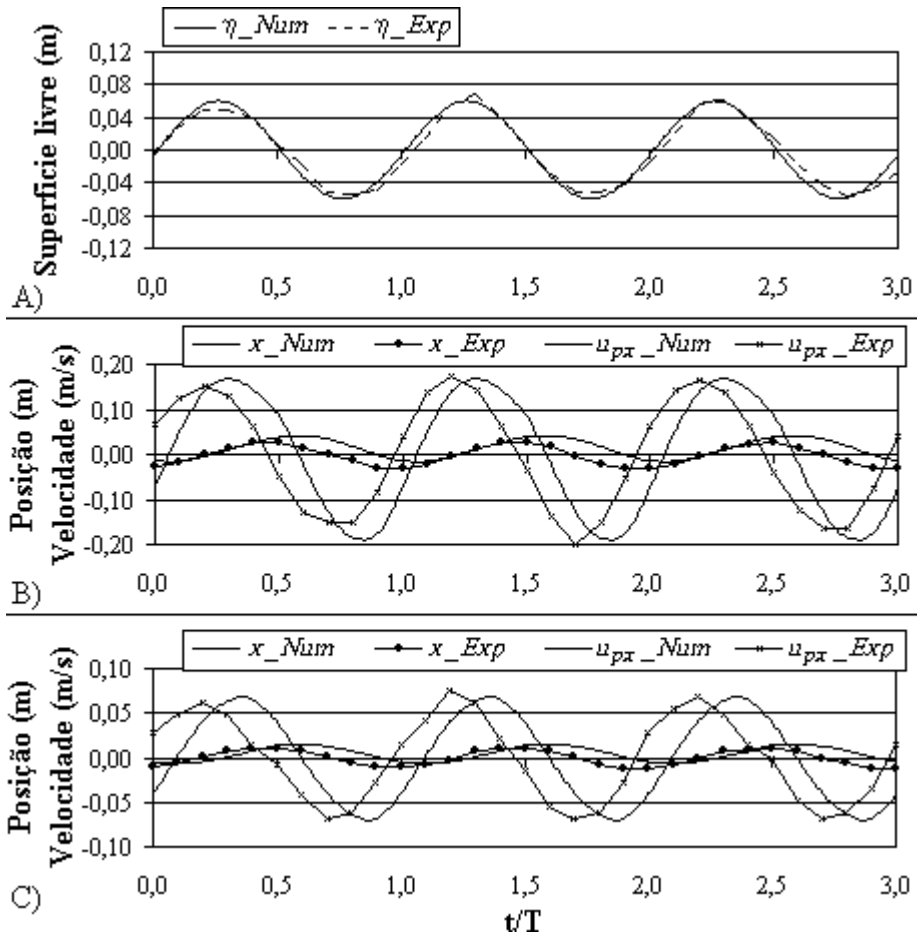


Figura C.1 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 07-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=1,60$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.1 – Características da simulação numérica do ensaio 07-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,12
Período (T)	s	1,0
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa específica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	1,6
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

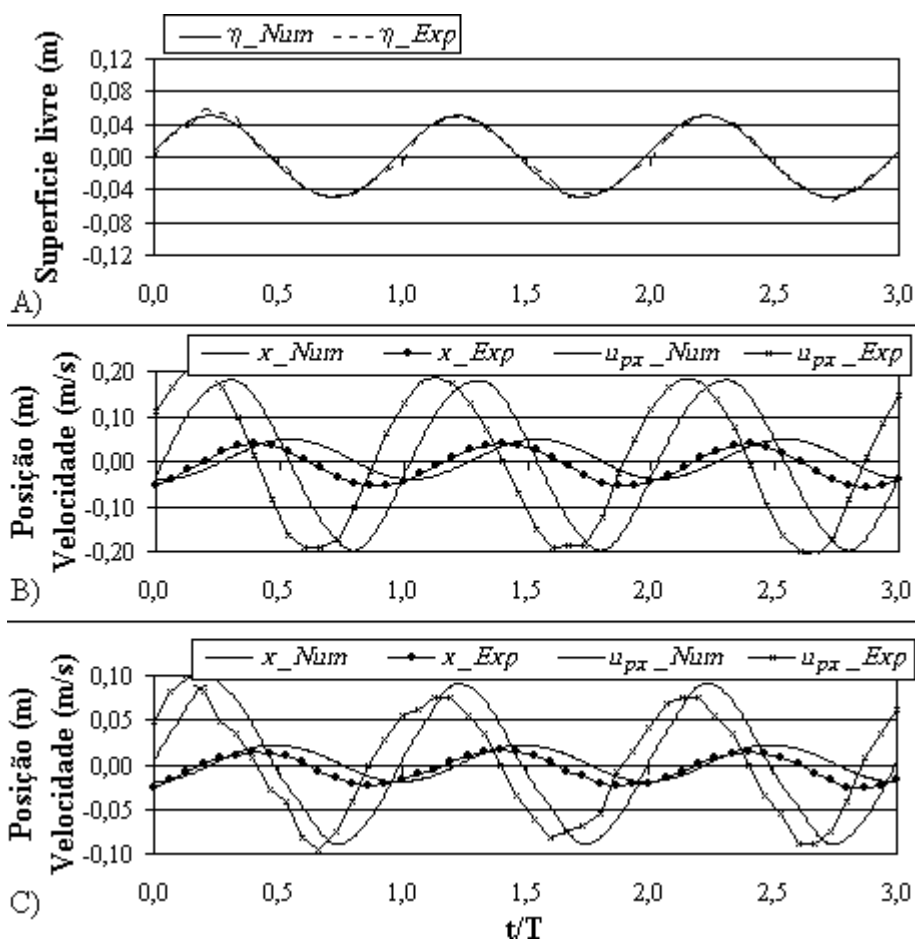


Figura C.2 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 08-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,70$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.2 – Características da simulação numérica do ensaio 08-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,1
Período (T)	s	1,5
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa específica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,7
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

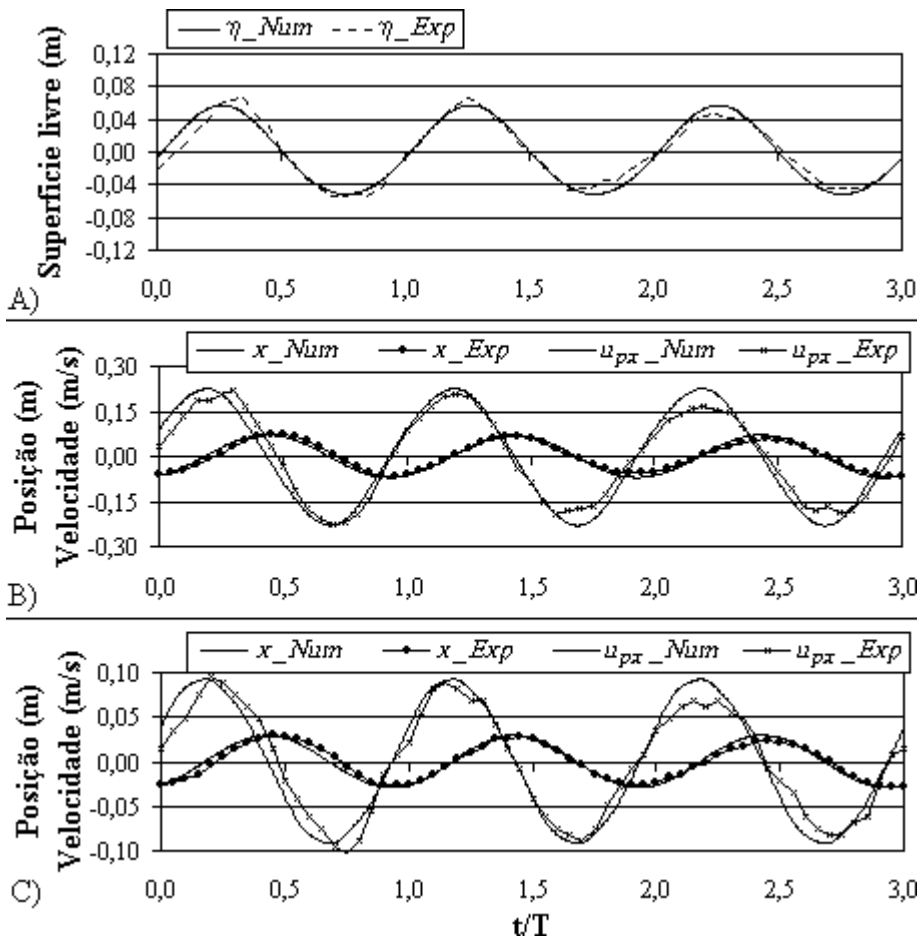


Figura C.3 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 09-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,05$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.3 – Características da simulação numérica do ensaio 09-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,11
Período (T)	s	2,0
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,05
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

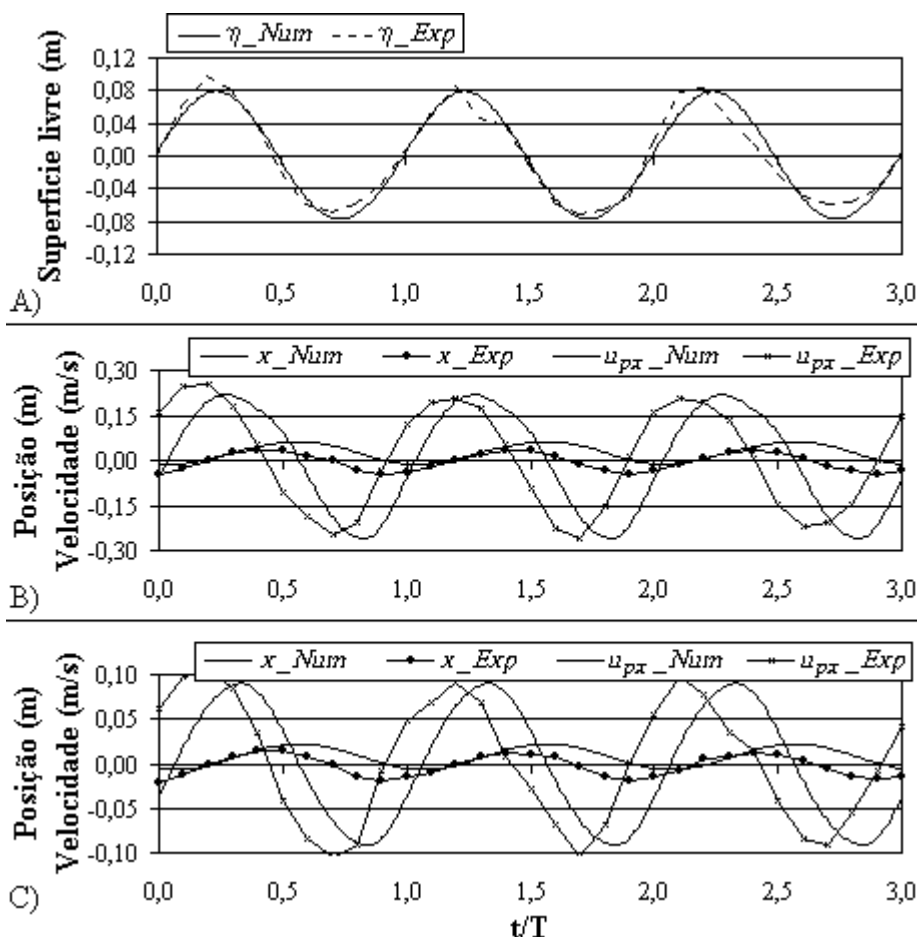


Figura C.4 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 10-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=1,30$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.4 – Características da simulação numérica do ensaio 10-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,16
Período (T)	s	1,0
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coefficiente de arraste (C_D)	-	1,30
Coefficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

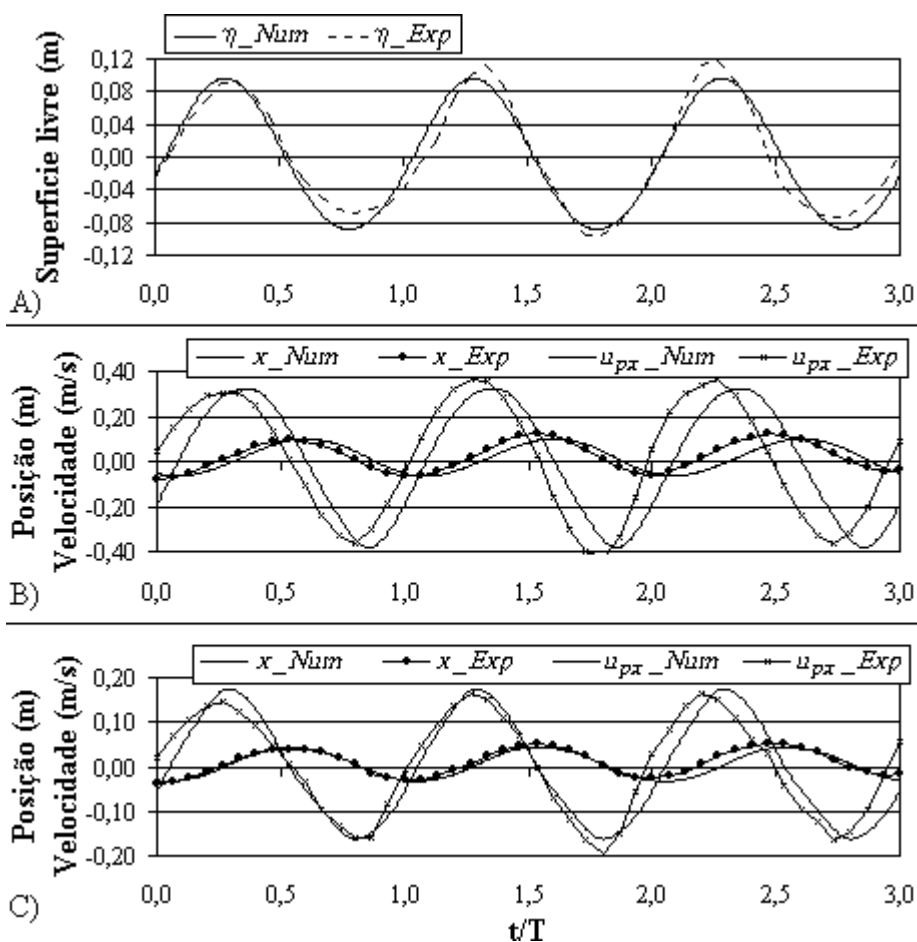


Figura C.5 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 11-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,40$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nós superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.5 – Características da simulação numérica do ensaio 11-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,19
Período (T)	s	1,5
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,40
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

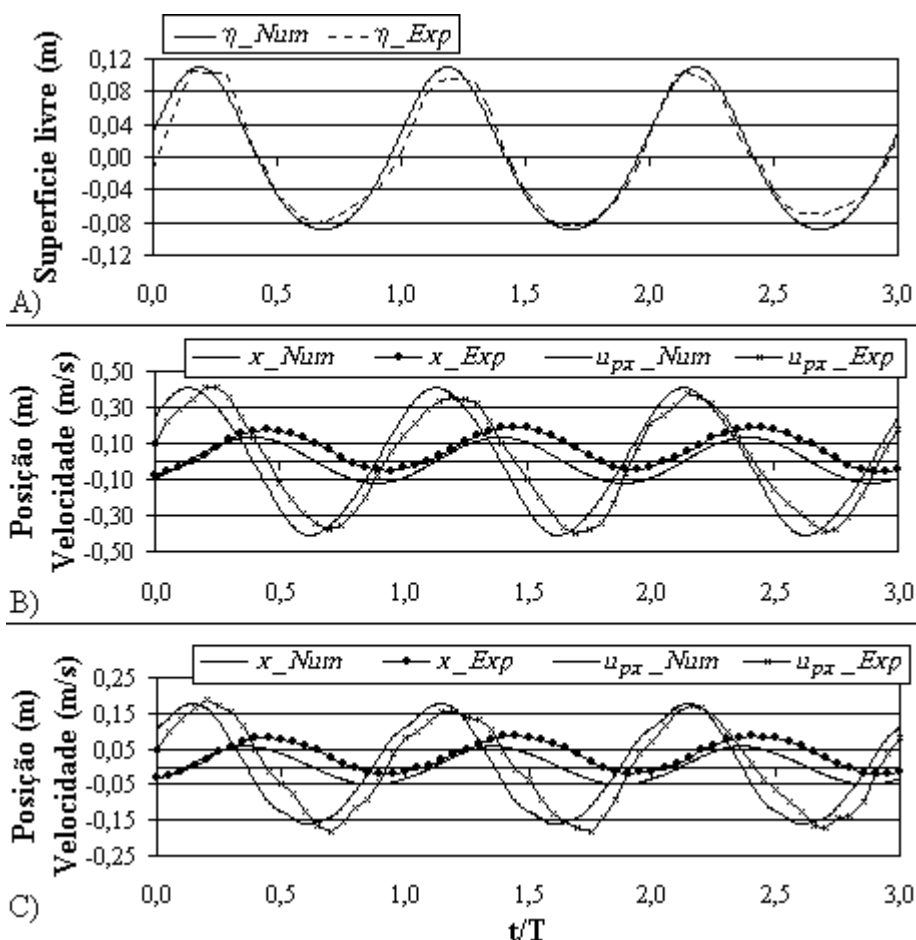


Figura C.6 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 12-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,15$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=6$) e C) nó central ($n=3$).

Tabela C.6 – Características da simulação numérica do ensaio 12-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,18
Período (T)	s	2,0
profundidade (h)	m	0,75
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa específica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coefficiente de arraste (C_D)	-	0,15
Coefficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	6
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

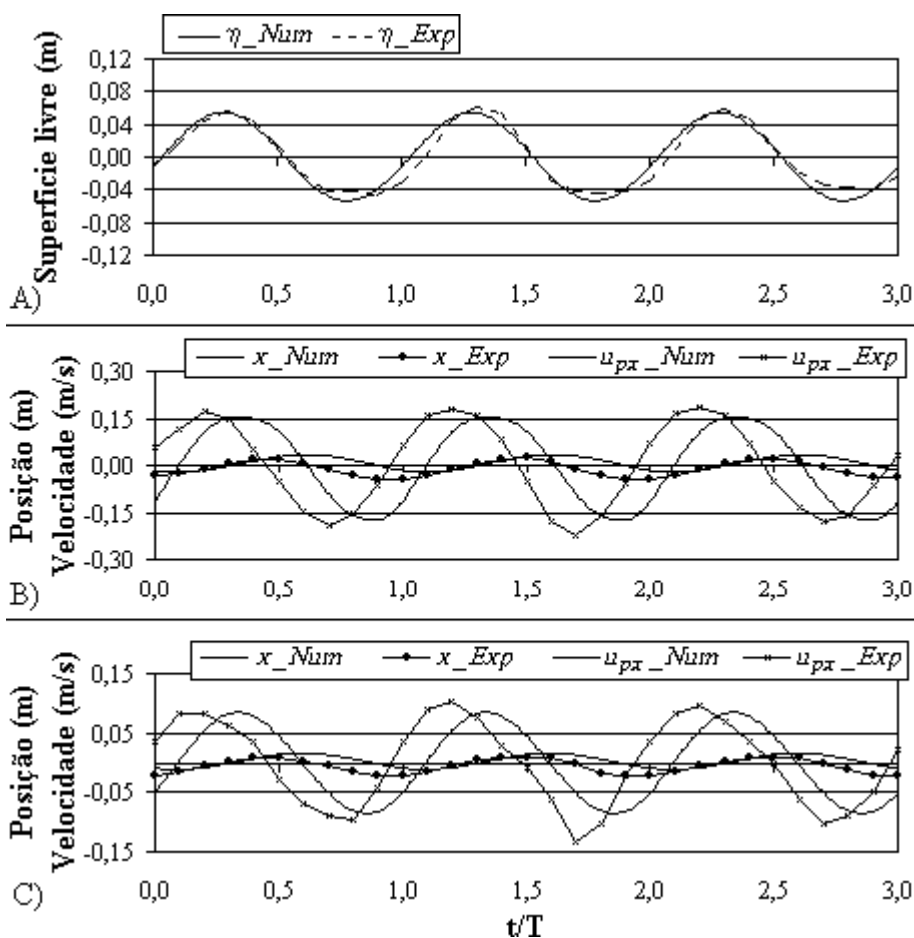


Figura C.7 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 19-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,90$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.7 – Características da simulação numérica do ensaio 19-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,11
Período (T)	s	1,0
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,90
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

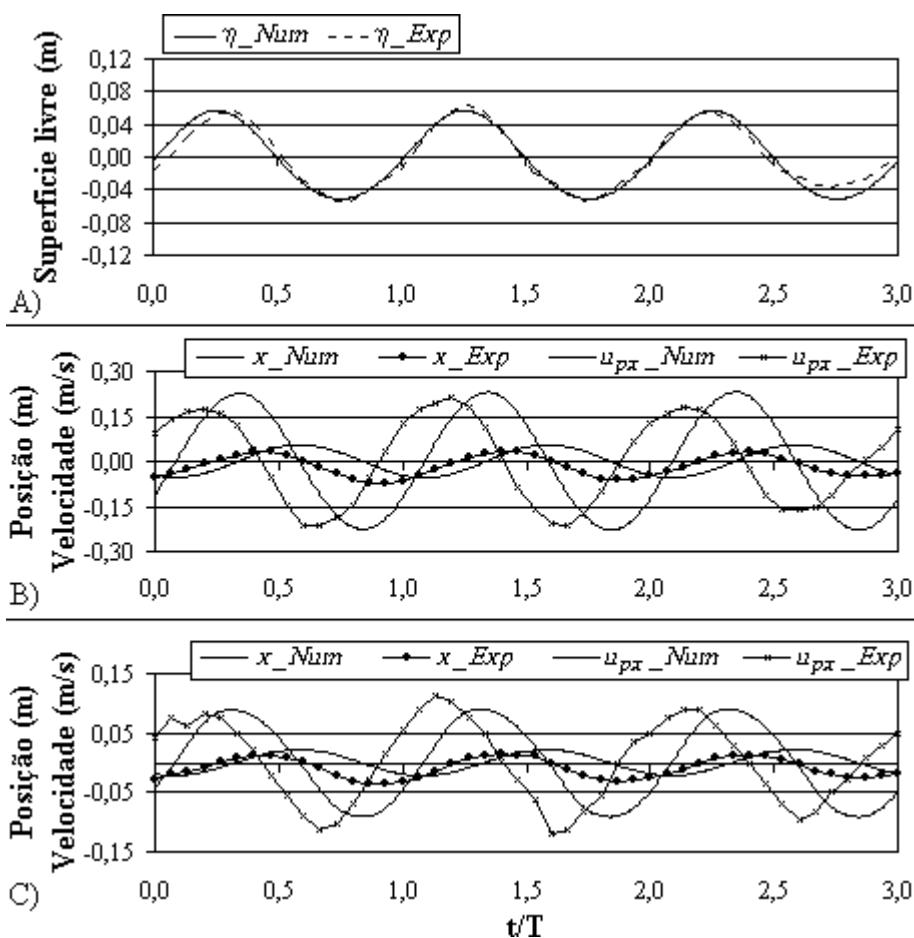


Figura C.8 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 20-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,05$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.8 – Características da simulação numérica do ensaio 20-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,11
Período (T)	s	1,5
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,05
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

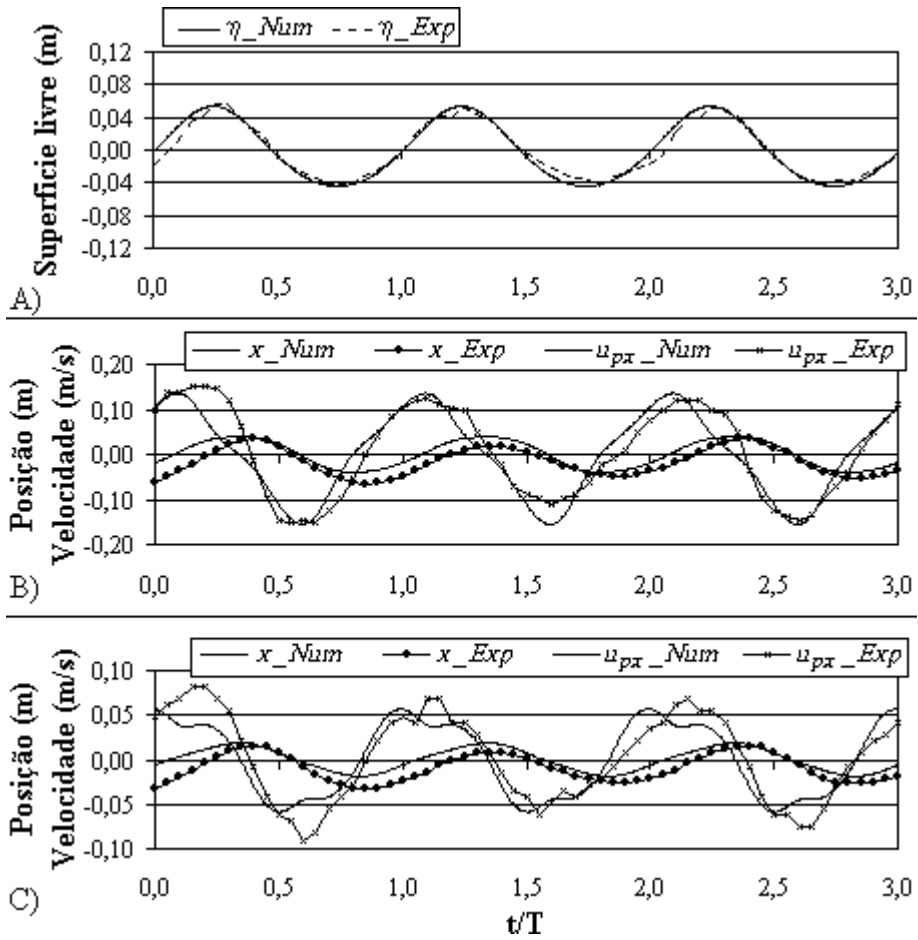


Figura C.9 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 21-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,05$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.9 – Características da simulação numérica do ensaio 21-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,10
Período (T)	s	2,0
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,05
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

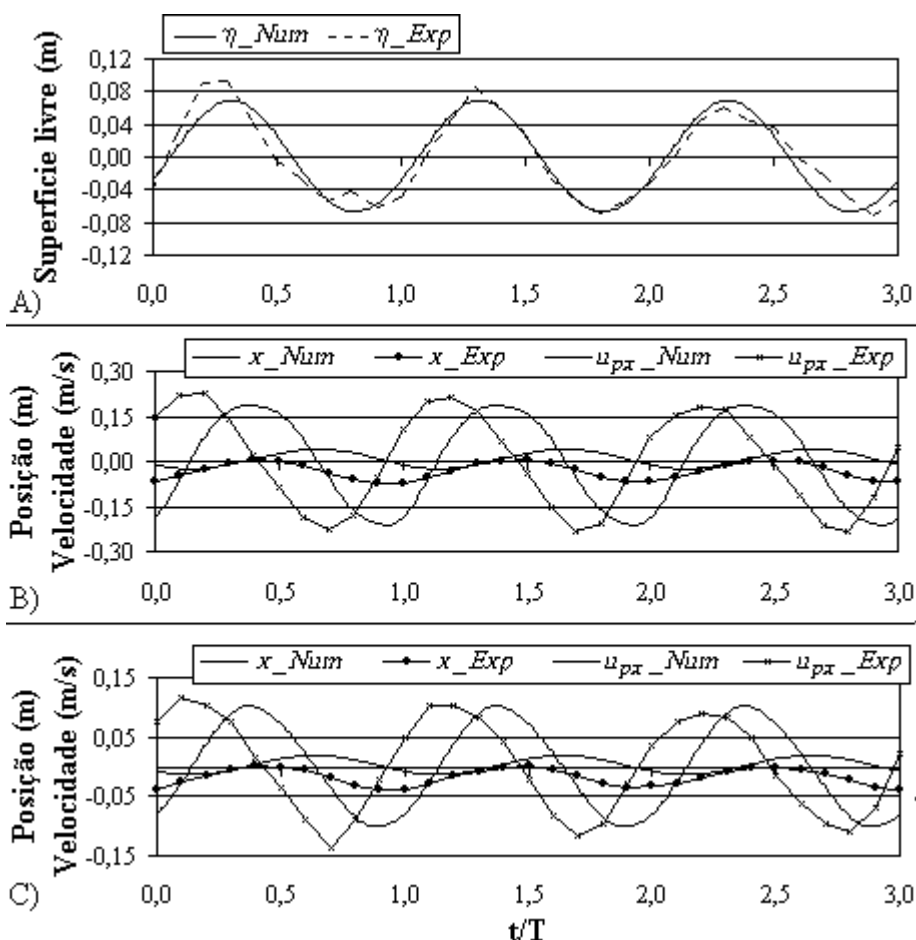


Figura C.10 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 22-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,50$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.10 – Características da simulação numérica do ensaio 22-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,14
Período (T)	s	1,0
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,50
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

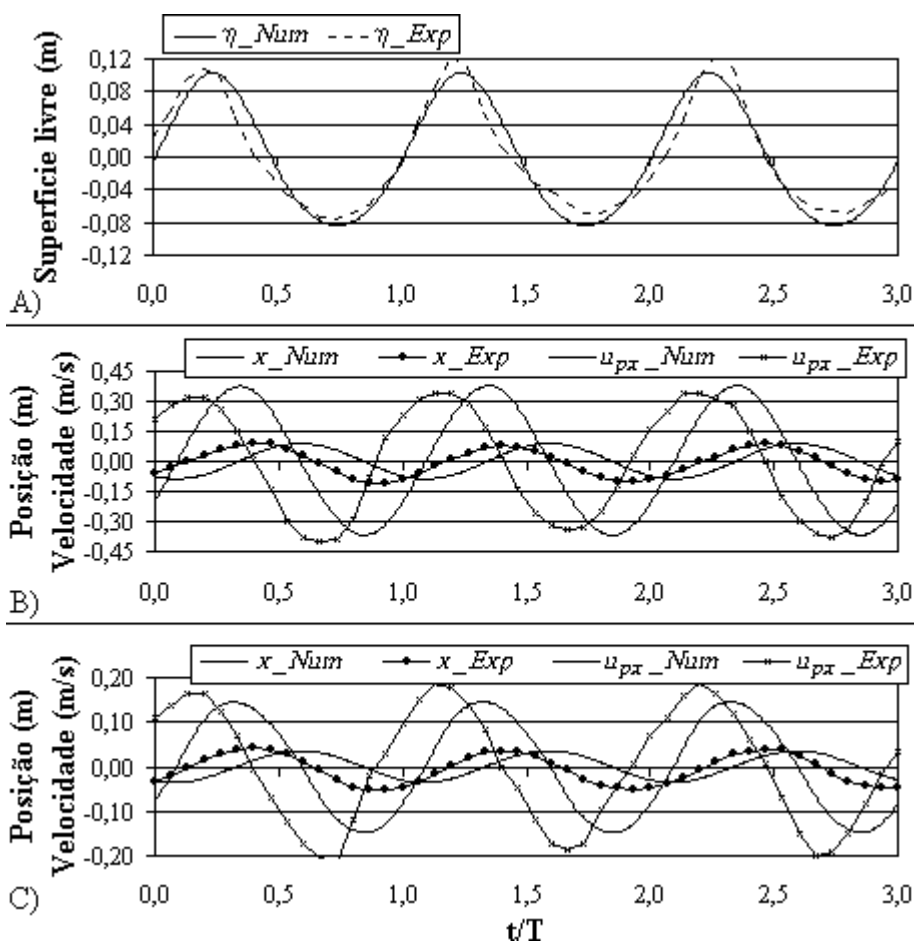


Figura C.11 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 23-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,02$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.11 – Características da simulação numérica do ensaio 23-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,20
Período (T)	s	1,5
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coeficiente de arraste (C_D)	-	0,02
Coeficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

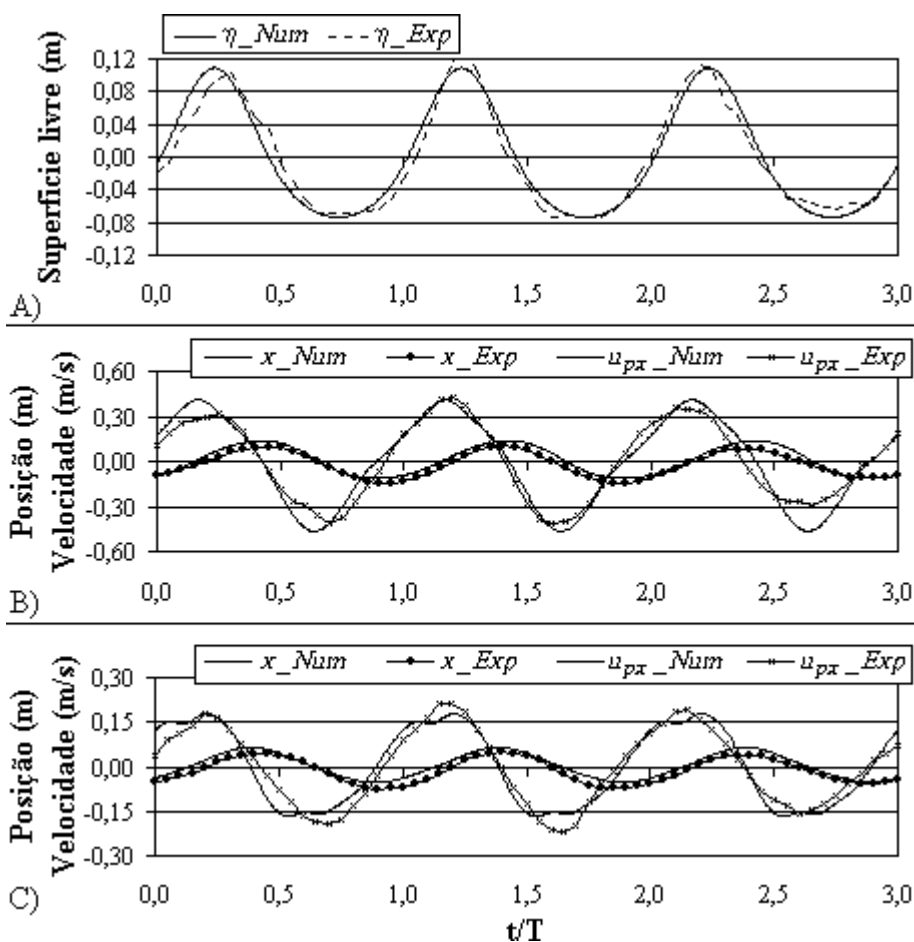


Figura C.12 – Comparação entre os dados experimentais do ensaio 24-1h e os resultados numéricos obtidos com $C_D=0,12$. A) Posição da superfície livre sobre o eixo inicial da haste. B) Posição e velocidade do nó superior ($n=4$) e C) nó central ($n=2$).

Tabela C.12 – Características da simulação numérica do ensaio 24-1h.

Parâmetro	Unidade	Valor
Altura de onda (H)	m	0,20
Período (T)	s	2,0
profundidade (h)	m	0,55
Massa específica da água (ρ_f)	kg/m ³	1000
Massa especifica da haste (ρ_v)	kg/m ³	681,43
Coefficiente de arraste (C_D)	-	0,12
Coefficiente de inércia (C_M)	-	0
Número de nós (N)	-	4
Passo de tempo (Δt)	s	0,001
Distância entre nós (l_n)	m	0,1

Apêndice D

ESTIMATIVA DA FORÇA EXERCIDA SOBRE UMA HASTE

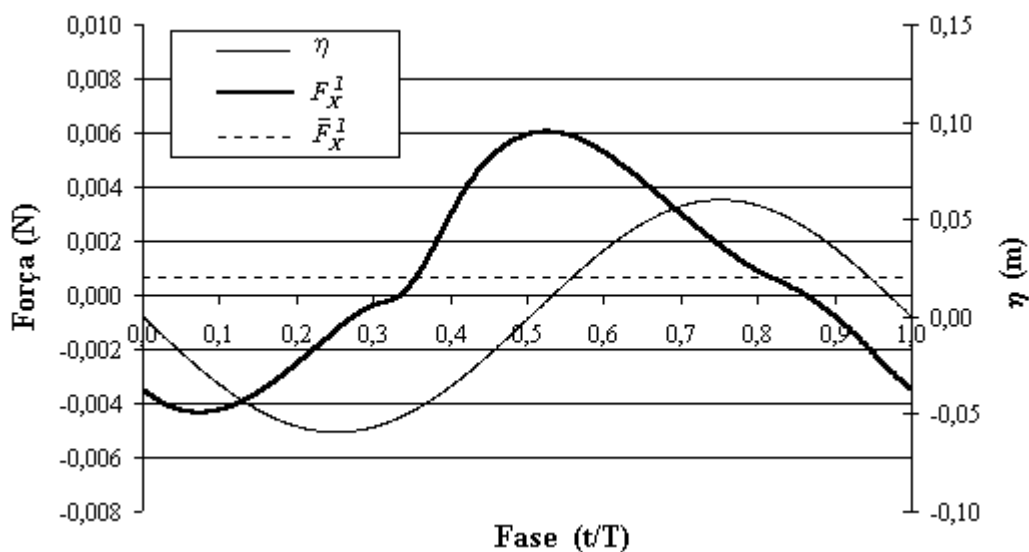


Figura D.1 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 07-1h.

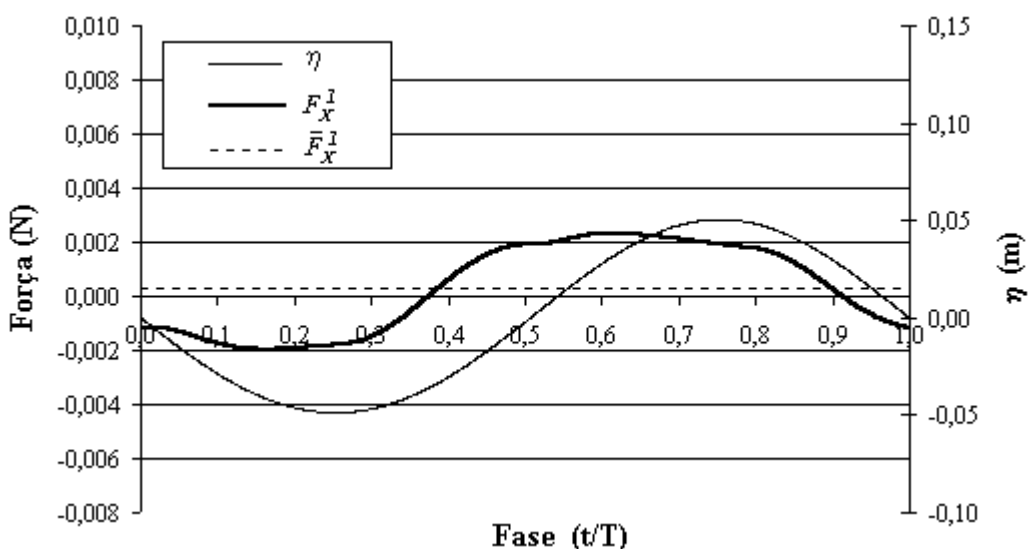


Figura D.2 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 08-1h.

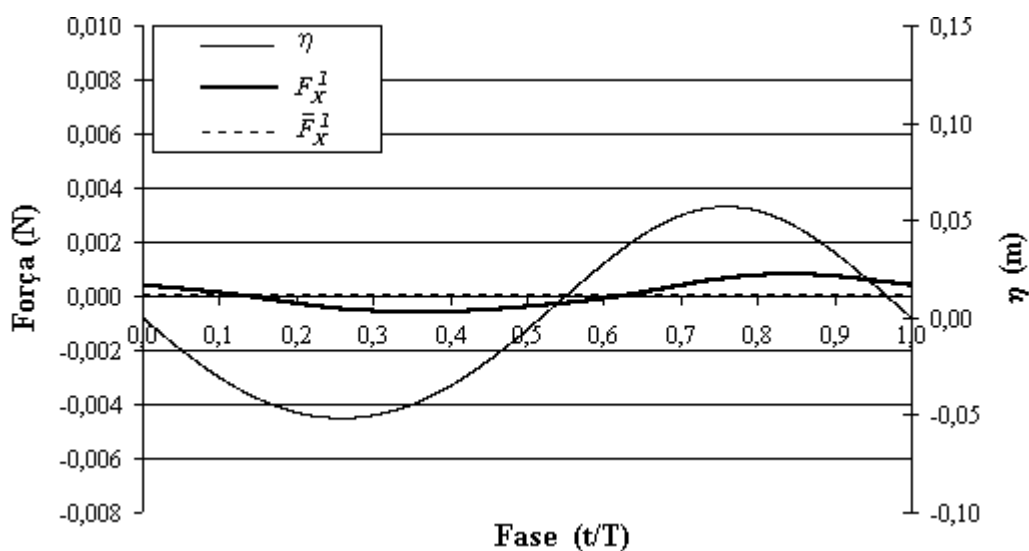


Figura D.3 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 09-1h.

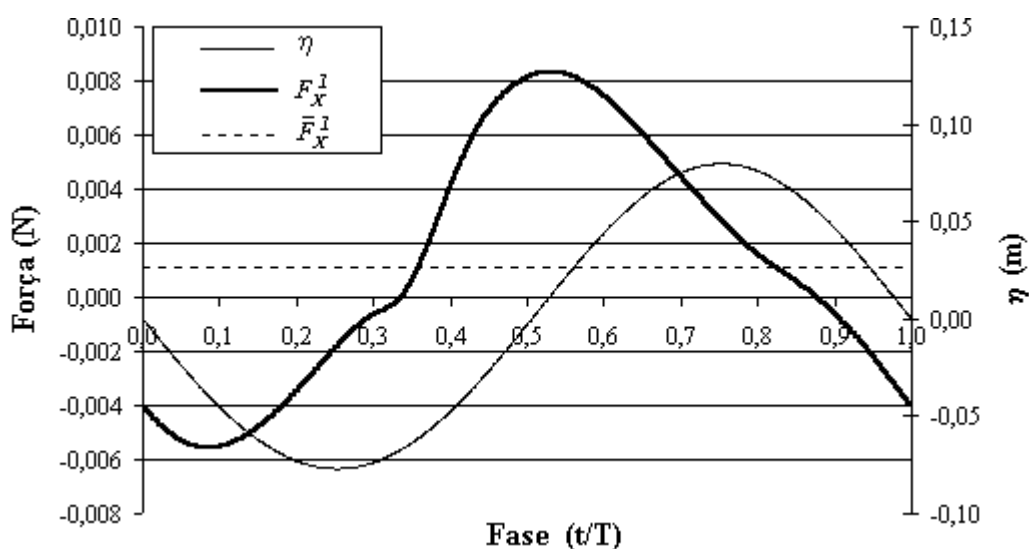


Figura D.4 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 10-1h.

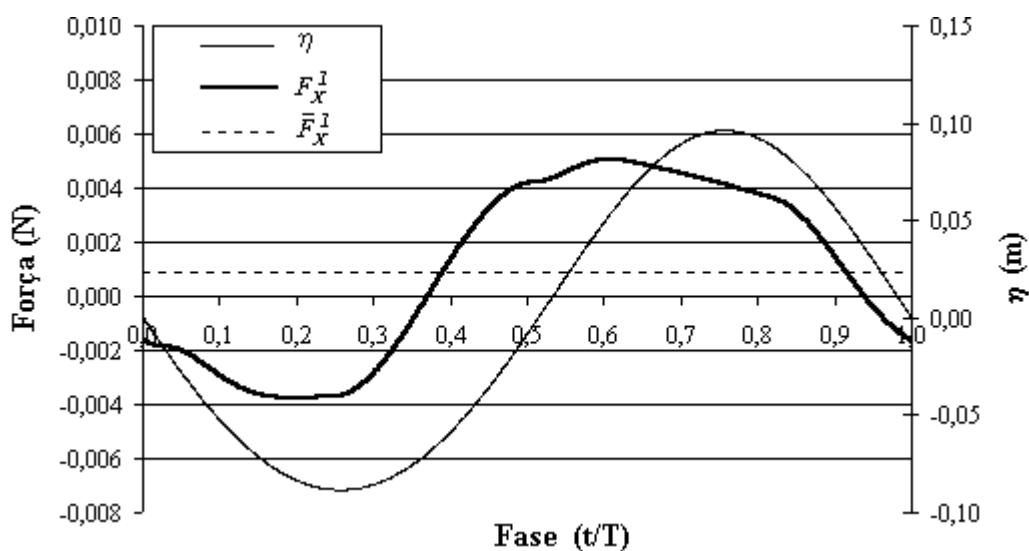


Figura D.5 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 11-1h.

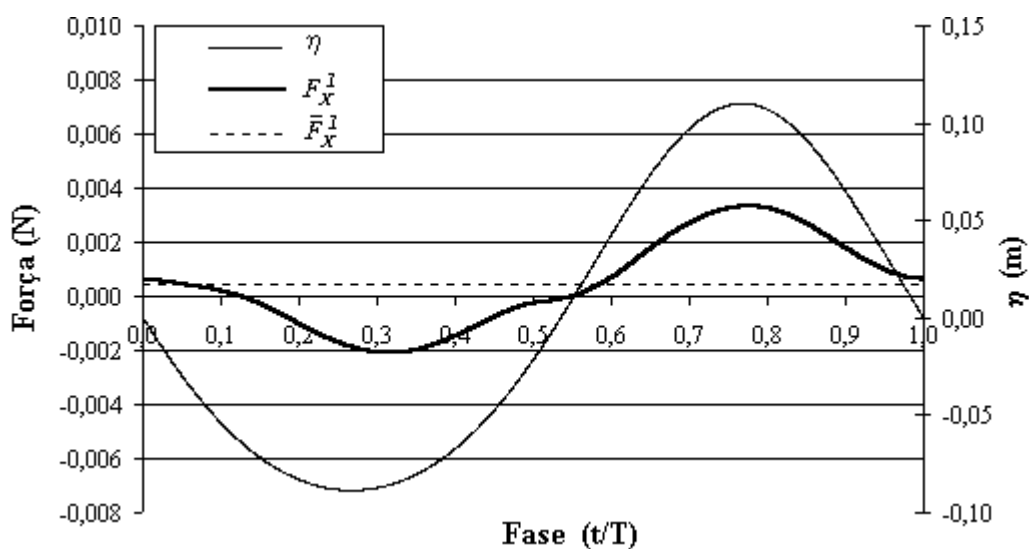


Figura D.6 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 12-1h.

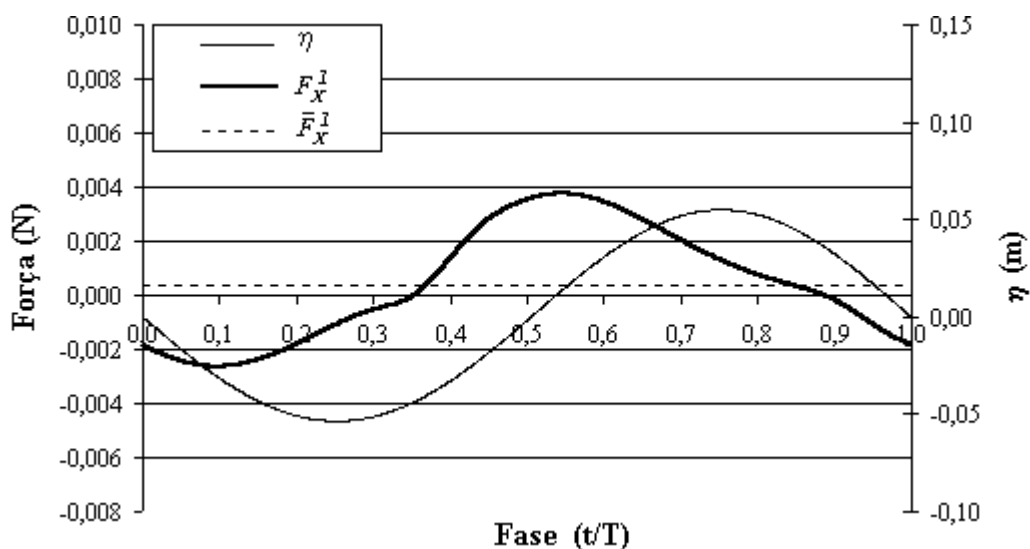


Figura D.7 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 19-1h.

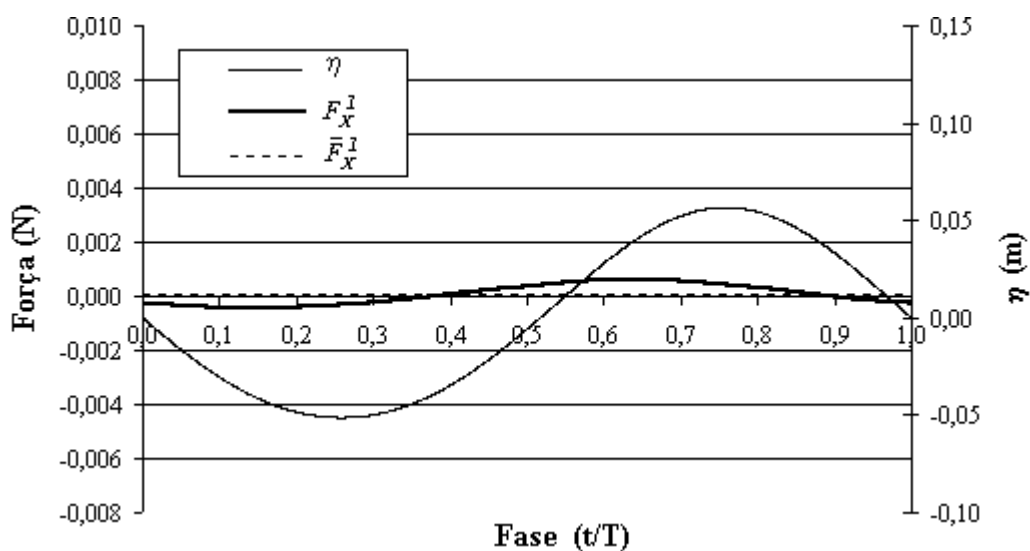


Figura D.8 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 20-1h.

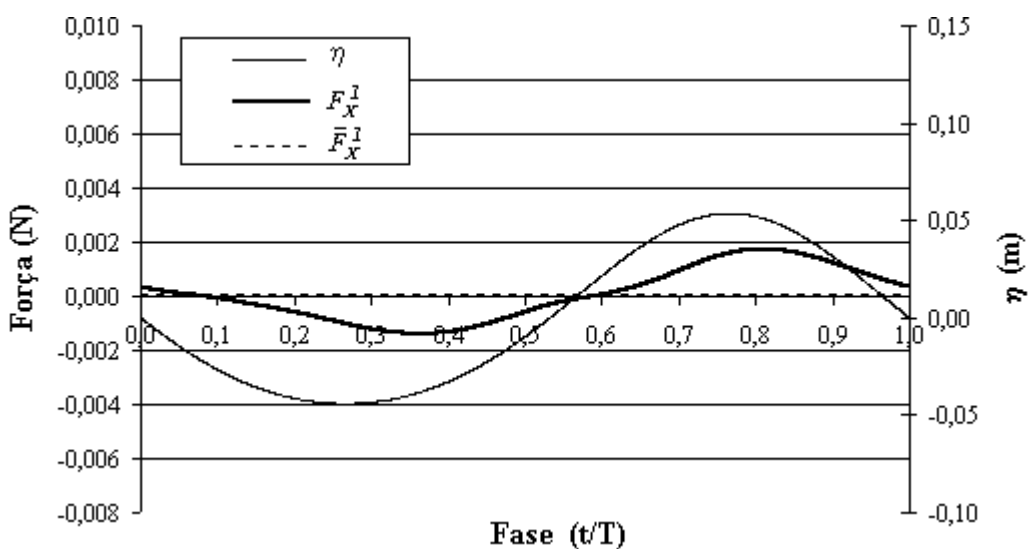


Figura D.9 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 21-1h.

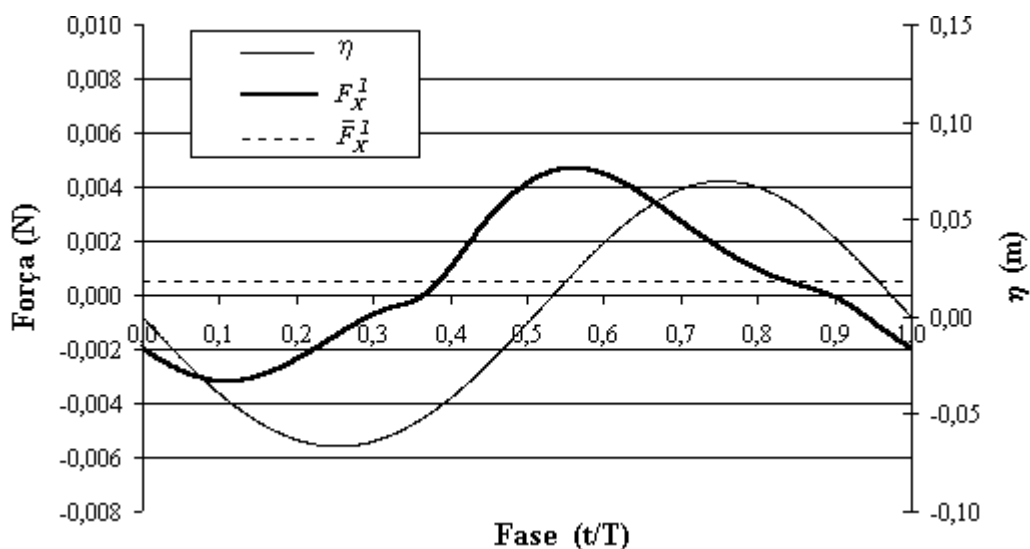


Figura D.10 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 22-1h.

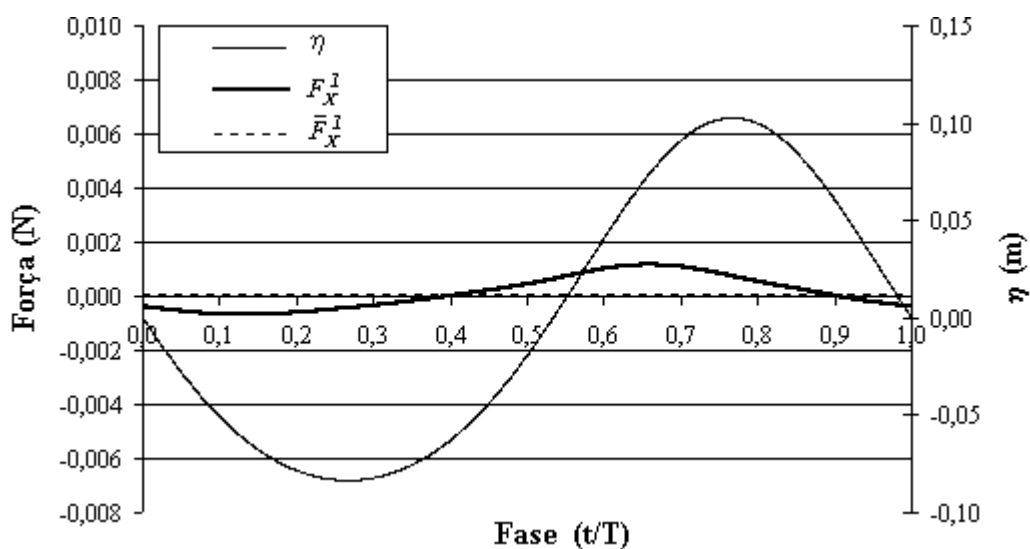


Figura D.11 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 23-1h.

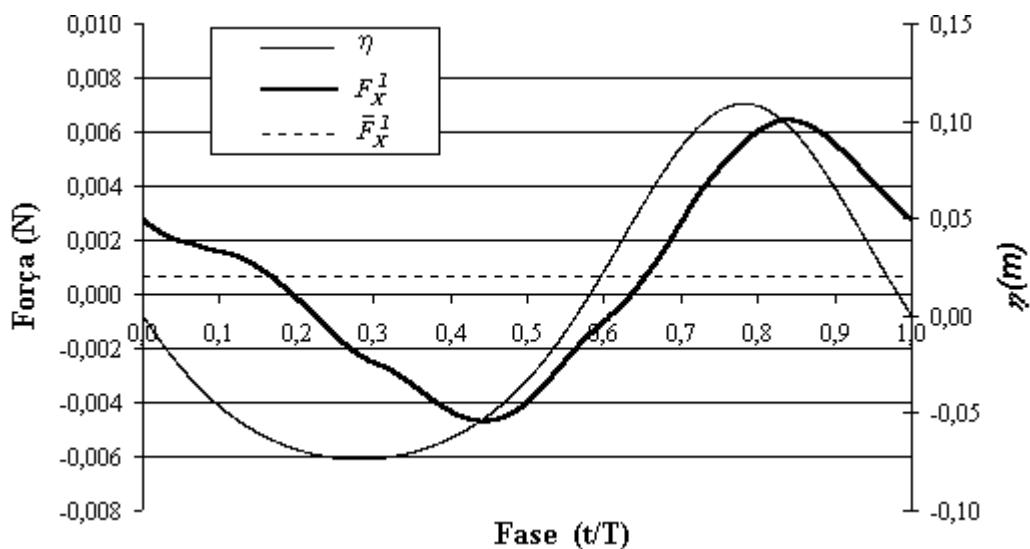


Figura D.12 - Força exercida sobre a haste durante a passagem da onda 24-1h.

Apêndice E

AMORTECIMENTO DE ONDA AO LONGO DO CAMPO DE HASTES

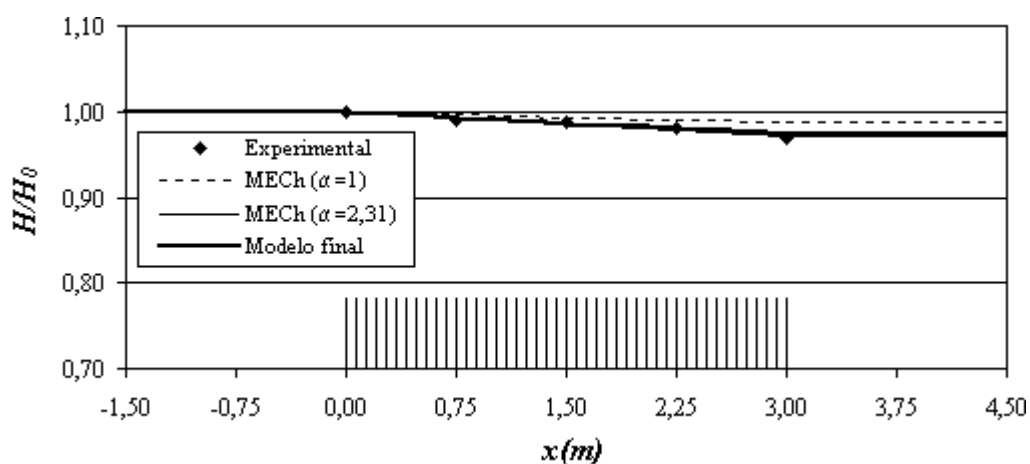


Figura E.1 - Altura relativa de onda medida e calculada para 01-Ch ($E_v=0,050m$).

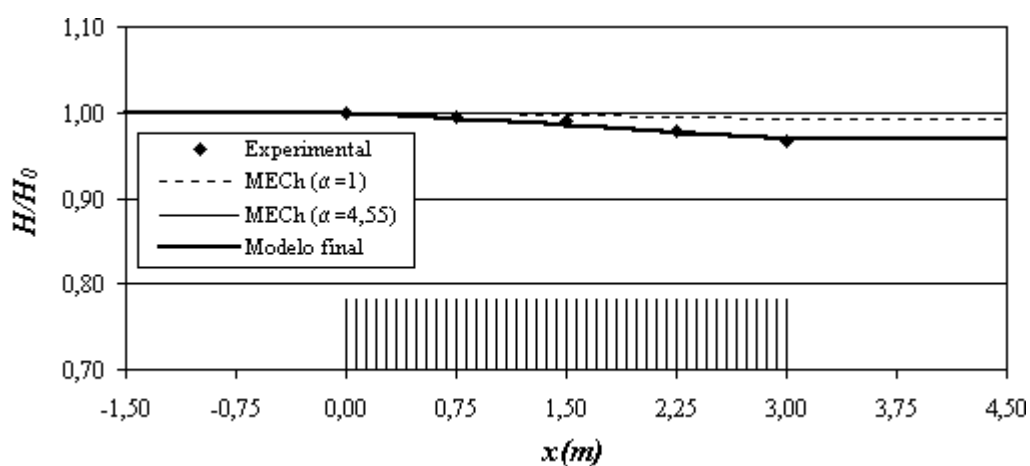


Figura E.2 - Altura relativa de onda medida e calculada para 02-Ch ($E_v=0,050m$).

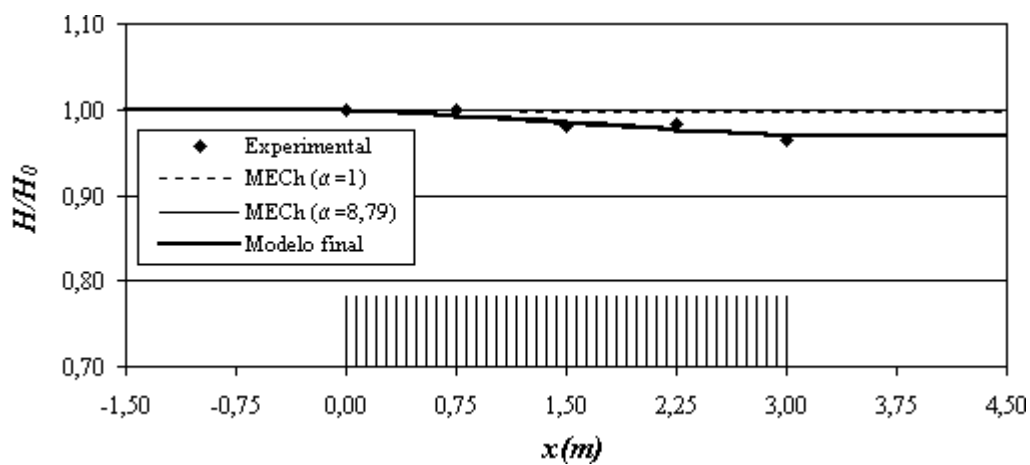


Figura E.3 Altura relativa de onda medida e calculada para 03-Ch ($E_v=0,050m$).

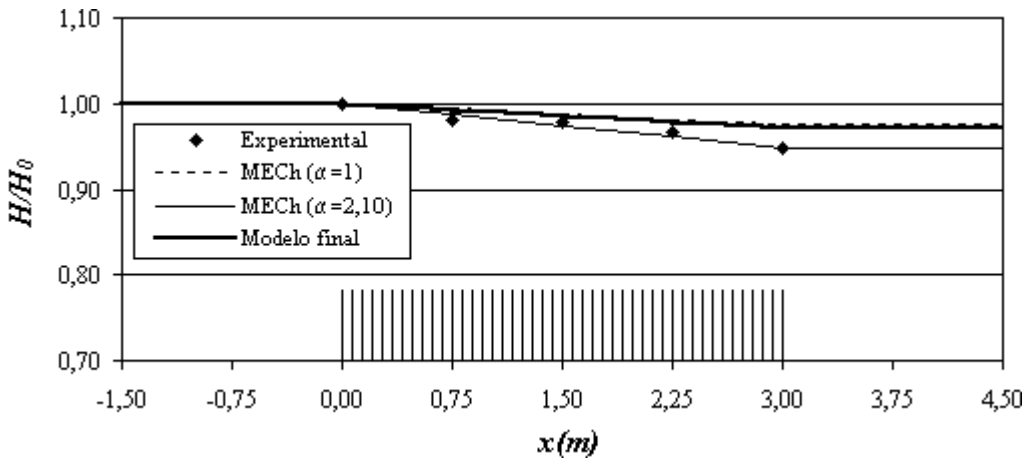


Figura E.4 Altura relativa de onda medida e calculada para 04-Ch ($E_v=0,050m$).

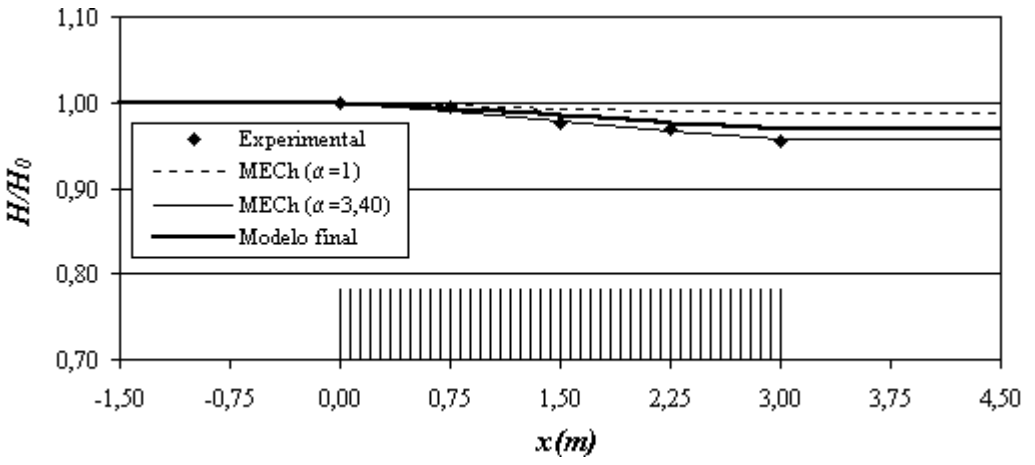


Figura E.5 Altura relativa de onda medida e calculada para 05-Ch ($E_v=0,050m$).

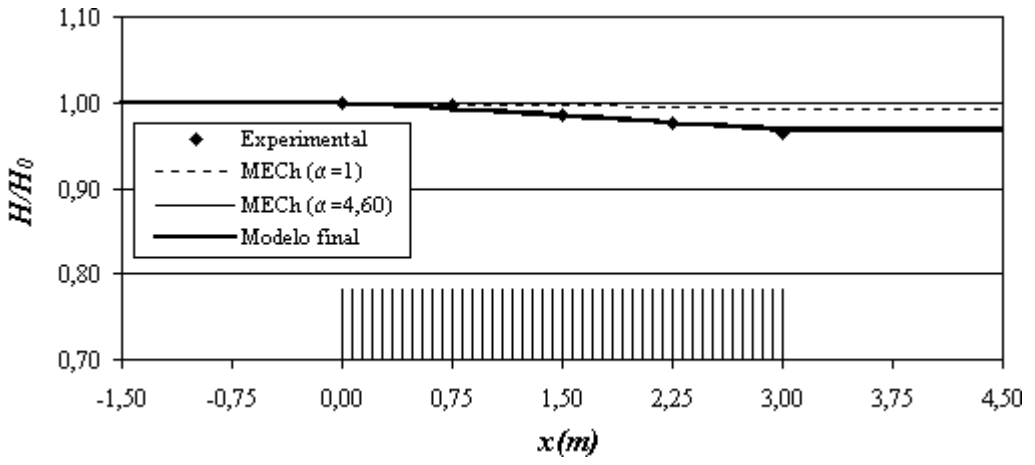


Figura E.6 - Altura relativa de onda medida e calculada para 06-Ch ($E_v=0,050m$).

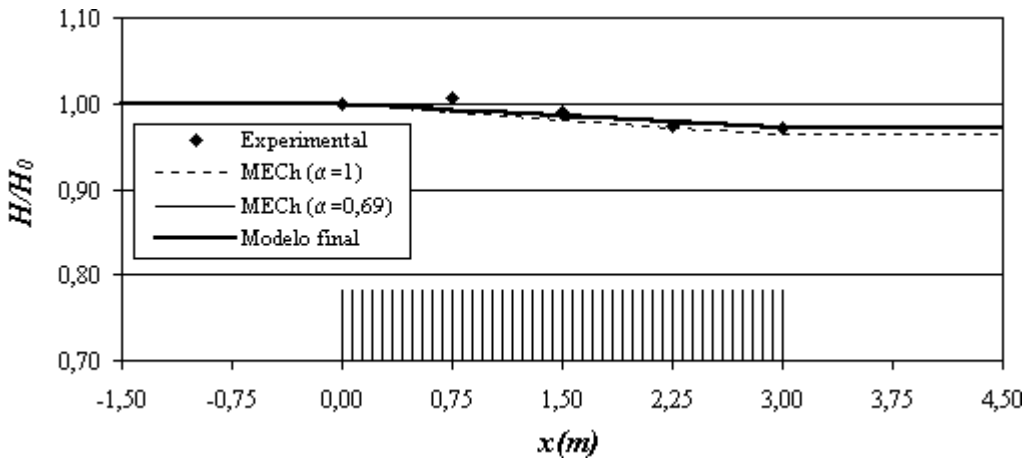


Figura E.7 - Altura relativa de onda medida e calculada para 07-Ch ($E_v=0,050m$).

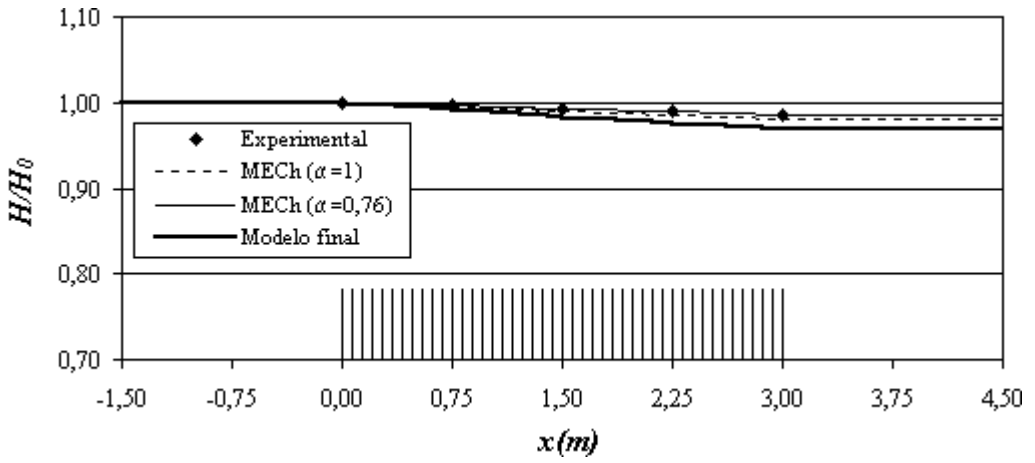


Figura E.8 - Altura relativa de onda medida e calculada para 08-Ch ($E_v=0,050m$).

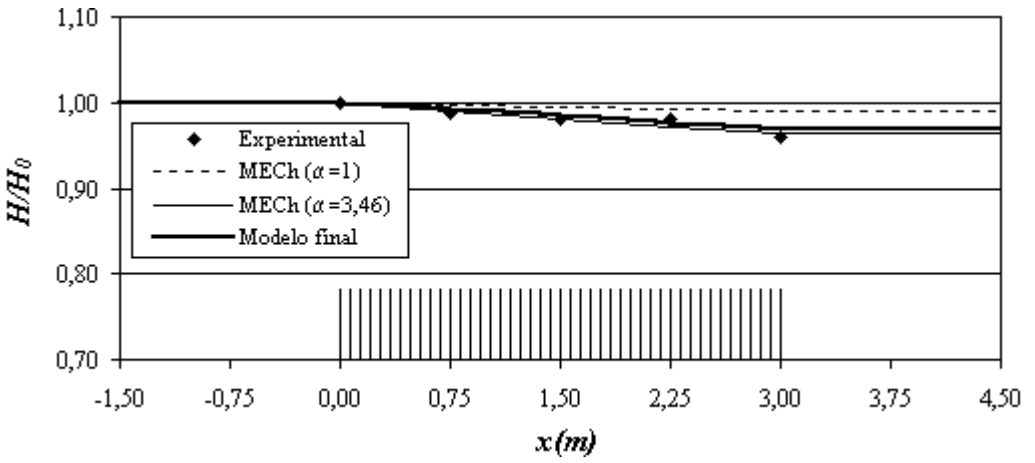


Figura E.9 - Altura relativa de onda medida e calculada para 09-Ch ($E_v=0,050m$).

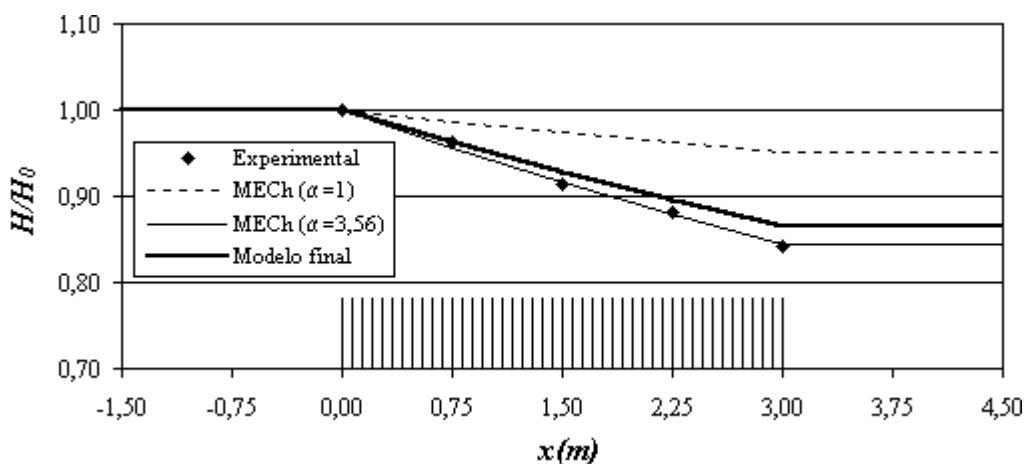


Figura E.10 - Altura relativa de onda medida e calculada para 01-Ch ($E_v=0,025m$).

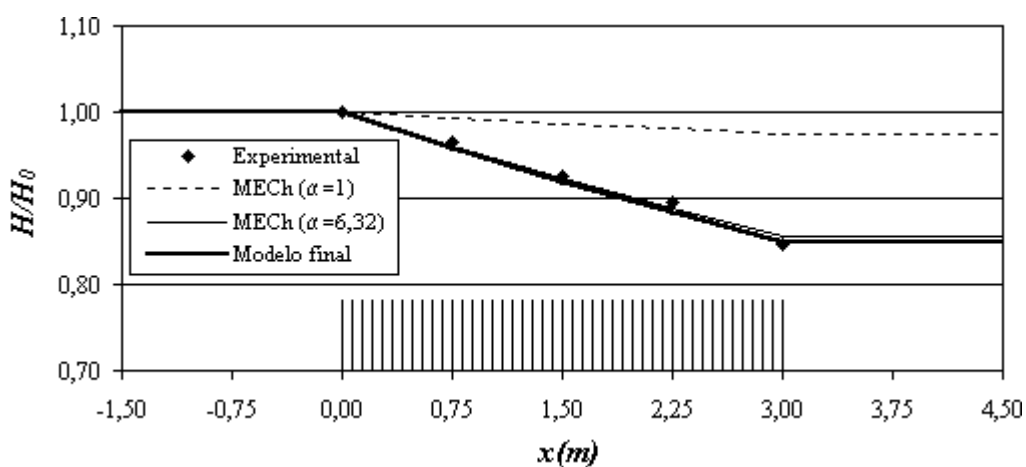


Figura E.11 - Altura relativa de onda medida e calculada para 02-Ch ($E_v=0,025m$).

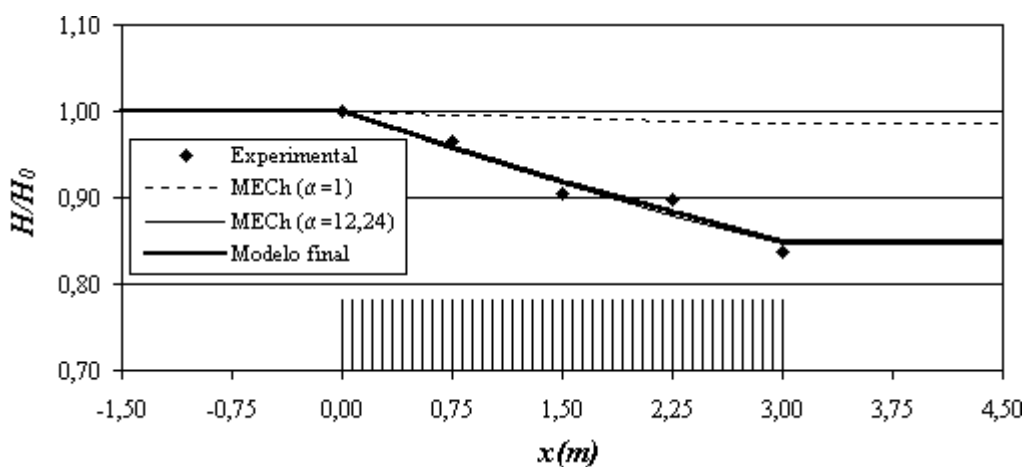


Figura E.12 - Altura relativa de onda medida e calculada para 03-Ch ($E_v=0,025m$).

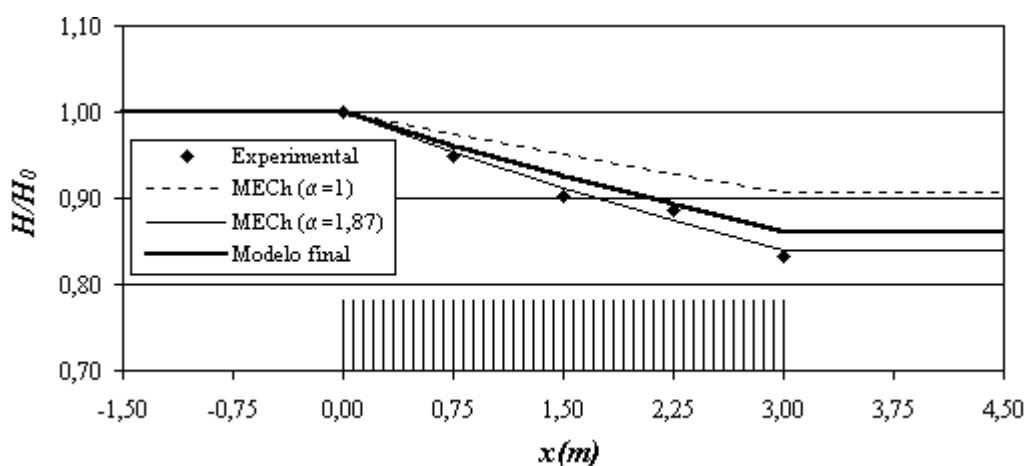


Figura E.13 - Altura relativa de onda medida e calculada para 04-Ch ($E_v=0,025m$).

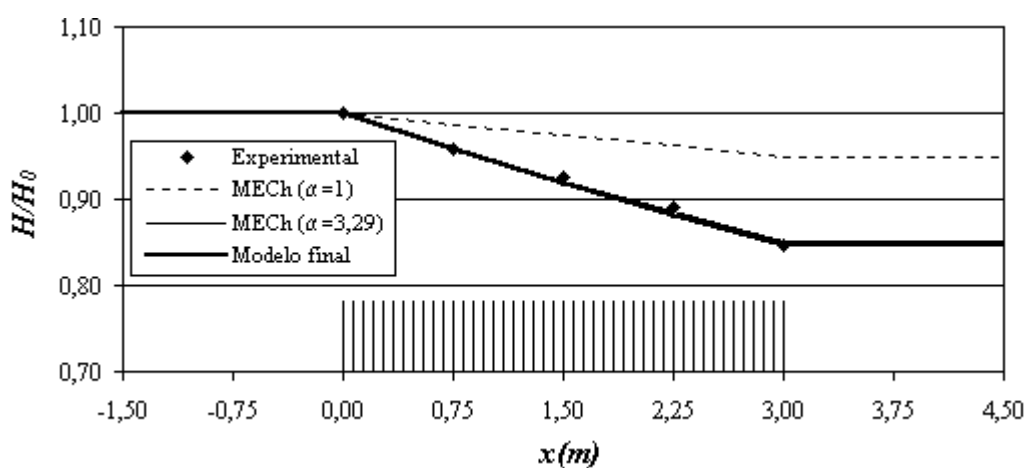


Figura E.14 - Altura relativa de onda medida e calculada para 05-Ch ($E_v=0,025m$).

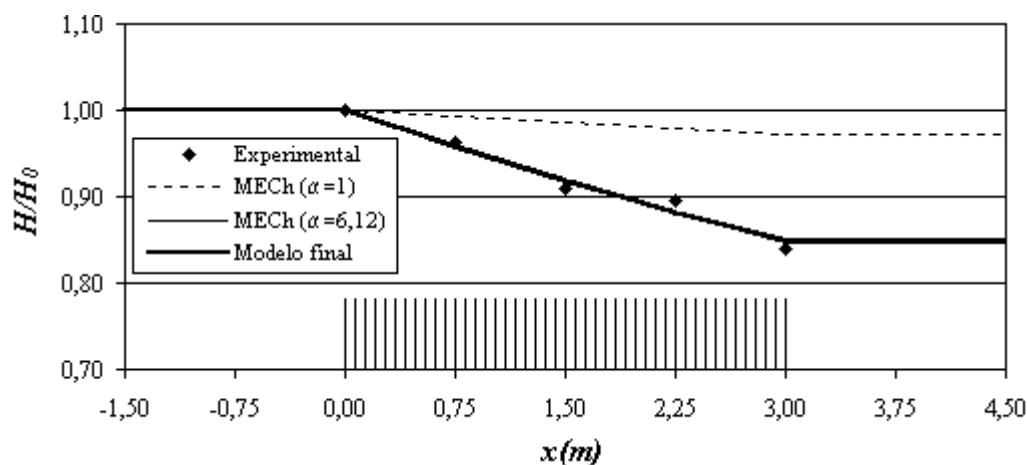


Figura E.15 - Altura relativa de onda medida e calculada para 06-Ch ($E_v=0,025m$).

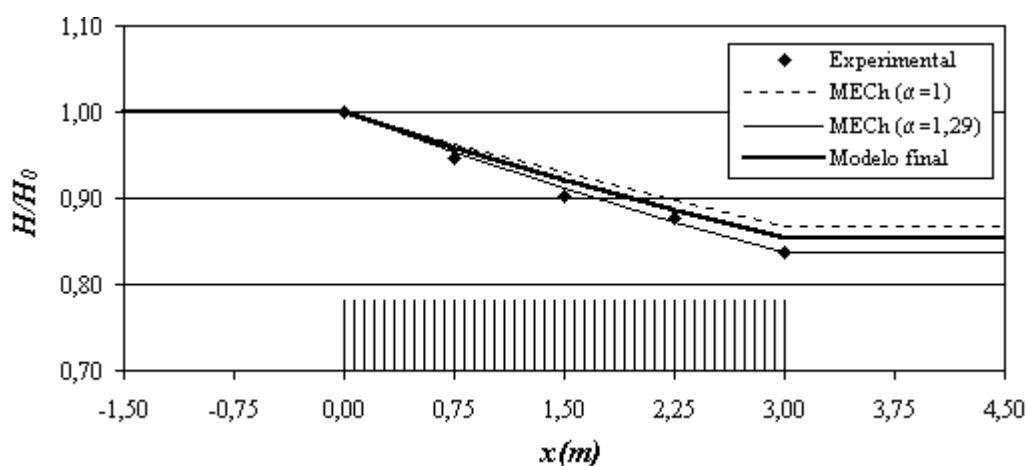


Figura E.16 - Altura relativa de onda medida e calculada para 07-Ch ($E_v=0,025m$).

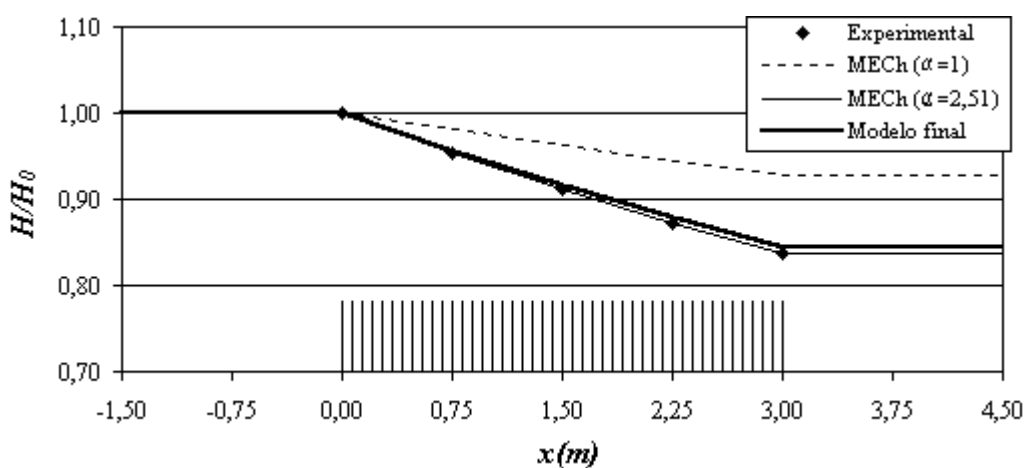


Figura E.17 - Altura relativa de onda medida e calculada para 08-Ch ($E_v=0,025m$).

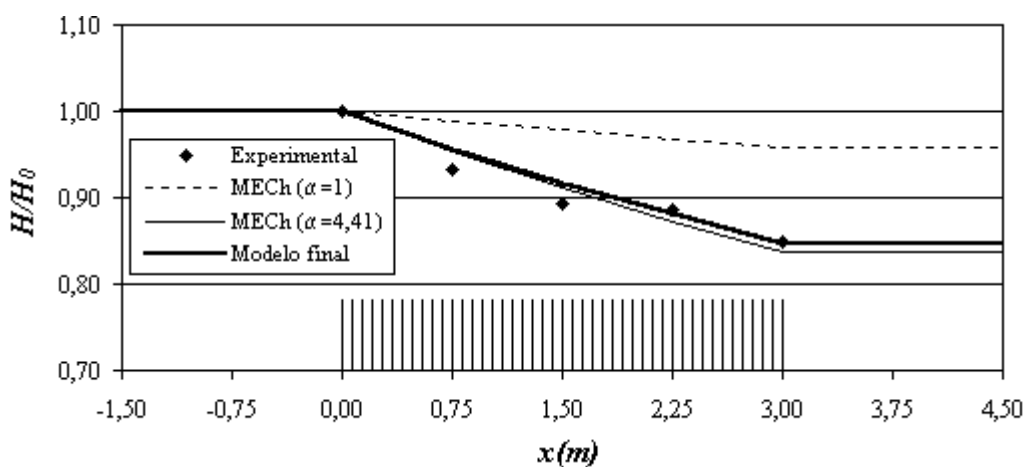


Figura E.18 - Altura relativa de onda medida e calculada para 09-Ch ($E_v=0,025m$).

REFERÊNCIAS

- BORGES, C. F. P., 2001, *Um experimento sobre transporte litorâneo em uma praia da Lagoa de Araruama, RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BREBBIA, C.A., WALKER, S., 1979, *Dynamic analysis of offshore structures*. 1 ed. London, Newnes-Butterworths.
- BRUNO, J. F., KENNEDY, C. W., 2000, "Patch-size dependent habitat modification and facilitation on New England cobble beaches by *Spartina alterniflora*". *Oecologia*, v. 122, pp. 98-108.
- CAMFIELD, F. E., 1983, "Wind-wave growth with high friction". *Journal of Waterways, Port., Coastal and Ocean Engineering*, v. 109, n. 1, pp. 115-117.
- CARBONARI, C.A., MARTINS, D. TERRA, M.A., 2003, "Controle de *Brachiaria subquadripara* e *Brachiaria mutica* através de diferentes herbicidas aplicados em pós-emergência". *Planta Daninha*, v.21, Edição Especial, pp.79-84.
- CHAKRABARTI, S. K., 1987, *Hydrodynamics of offshore structures*. 1 ed. New York, Springer-Verlag.
- COOPS, H. GEILEN, N. VERHEIJ, H. J., BOETERS, R., VELDE, G., 1996, "Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: an experimental study in a wave tank". *Aquatic Botany*, v. 53, pp. 187-198.
- DALRYMPLE, R. A., KIRBY, J. T., HWANG, P.A., 1984, "Wave refraction due to areas of energy dissipation". *Journal of Waterways, Port., Coastal and Ocean Engineering*, v. 110, n. 1, pp. 67-79.
- DEAN, R. G., 1968, *Relative validities of water wave theories*. In: Technical Progress Report No. 16, University of Florida, Gainesville.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A., 1984, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 1 ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc.
- DENNY, M. W., GAYLORD, B., COWEN, B., 1997, "Flow and flexibility II. the roles of size and shape in determining wave forces on the bull kelp *nereocystis luetkeana*". *The Journal of Experimental Biology*, v. 200, pp. 3165-3183.
- DENNY, M., 1999, "Are there mechanical limits to size in wave-swept organisms ?". *The Journal of Experimental Biology*, v. 202, pp. 3463-3467.

- DENNY, M., GAYLORD, B., 2002, "The mechanics of wave-swept algae". *The Journal of Experimental Biology*, v. 205, pp. 1355-1362.
- ELWANY, M. H. S., O'REILLY, W. C., GUZA, R. T., FLICK, R. E., 1995, "Effects of southern California kelp beds on waves". *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.*, v. 121, pp. 143-150.
- GAYLORD, B., DENNY, M. W., 1997, "Flow and flexibility I. Effects of size, shape and stiffness in determining wave forces on the stipitate kelps *Eisenia arborea* and *Pterygophora californica*". *The Journal of Experimental Biology*, v. 200, pp. 3141-3164.
- GAYLORD, B., DENNY, M. W., KOEHL, M. A. R., 2003, "Modulation of wave forces on kelp canopies by alongshore currents". *Limnology and Oceanography*, v. 48, n. 2, pp. 860-871.
- IRGANG, B. E. e GASTAL Jr., C. V. de S., 1996, *Macrófitas aquáticas da planície costeira do Rio Grande do Sul*. 1 ed. Porto Alegre, Edição dos autores.
- JOLY, A. B., OLIVEIRA FILHO, E. C., 1967, *Two Brazilian Laminariales*. In: Publicação especial, Instituto de Pesquisas do Mar, pp. 1-13.
- KOBAYASHI, N., RAICHLIN, A. W., ASANO, T., 1993, "Wave attenuation by vegetation". *Journal of Waterways, Port., Coastal and Ocean Engineering*, v. 119, n. 1, pp. 30-48.
- LIMA, S. F., NASCIMENTO, M. F., UAISSONE, A. J. R., NEVES, C. F., 2003, "Estimativa das maiores ondas geradas pelo vento no reservatório de Ilha Solteira". In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, CD-ROM, Curitiba/PR.
- MADSEN, J. D., CHAMBERS, P. A., JAMES, W. F., KOCH, E. W., WESTLAKE, D. F., 2001, "The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes". *Hidrobiologia*, v. 444, pp. 71-84.
- MENDEZ, F. J., LOSADA, I. J., LOSADA, M. A., 1999, "Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field". *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C8, pp. 18383-18396.
- MENDEZ, F. J., LOSADA, I. J., 2004, "An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields". *Coastal Engineering*, v. 51, pp. 103-118.
- MORK, M., 1996, *Wave attenuation due to bottom vegetation*. In: Waves and nonlinear processes in hydrodynamics, Kluwer Academic Publishers, pp. 371-382.

- NEVES, C. F., 1987, *A particular rotational wave theory*. Ph.D. dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
- OLIVEIRA, E. C., CORBISIER, T.N., ESTON, V.R., AMBROSIO JR. O., 1997, "Phenology of a seagrass (*Halodule wrightii*) bed on the southeast coast of Brazil". *Aquatic Botany*, v. 56, pp. 25-33.
- OLIVEIRA, E. C., HORTA, P. A., AMANCIO, C. E., SANT' ANNA C. L., 1999, *Algas e angiospermas marinhas bêmicas do litoral brasileiro*. In: workshop para avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da zona costeira e marinha, Fundação BIO RIO, Porto Seguro/BA.
- PHILLIPS, O. M., 1977, *The dynamics of the upper ocean*. 2 ed. Cambridge, Cambridge University Press.
- PRICE, W. A., TOMLINSON, K. W., HUNT, J. N., 1968, "The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches". In: *Proceedings of the 11^o Coastal Engineering Conference*, v. 1, pp. 570-578.
- SEYMOUR, R. J., 1996, Discussion of "Effects of southern California kelp beds on waves", ELWANY, H. S., O'REILLY, W. C., GUZA, R. T., FLICK, R. E. on J. Waterw. Port Coast Ocean Eng. v. 122, n. 4, pp. 207-208.
- STEPHAN, C. D., BIGFORD, T.E., 1997, *Atlantic Coastal Submerged Aquatic Vegetation: A Review of its Ecological Role, Anthropogenic Impacts State Regulation, and Value to Atlantic Coastal Fish Stocks*. In: Habitat Management Series #1, Atlantic States Marine Fisheries Commission, Washington, D.C.
- TEETER, A.M.; JOHNSON, B.H.; BERGER, C.; STELLING, G.; SCHEFFNER, N.W.; GARCIA, M.H. e PARCHURE, T.M., 2001, "Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons)". *Hydrobiologia*, v. 444, pp. 1-23.