



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Daniel Spinola Clemente

Energia das Ondas:

Metodologia de Ensaios em Modelos Reduzidos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração:

Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Orientador:

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Co-orientador:

Prof. Dr. Claudio Freitas Neves

Março de 2013

Itajubá – MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

C626e

Clemente, Daniel Spinola

Energia das ondas: metodologias de ensaios de modelos redu_ zidos / Daniel Spinola Clemente. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013. 123 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Freitas Neves.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Canal de ondas. 2. Energia das ondas. 3. Modelos físicos reduzidos. 4. Medidores acústicos de velocidade por efeito Dop_ pler(ADV). I. Tiago Filho, Geraldo Lúcio, orient. II. Neves, Cláu_ dio Freitas, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, que acreditam realmente em mim, até hoje!

Agradeço à minha irmã, Sara.

Também a todos da minha família – avó, avô, tio, tia, primo, prima, todo mundo...

Agradeço ao meu orientador Professor Tiago, que desde o estágio da graduação que vem me dando as mais distintas oportunidades.

Ao Professor Cláudio, pela co-orientação e dedicação, nos mais variados locais e horários.

À Rede Cooperativa Amigos de Boussinesq e a CAPES/PROCAD que possibilitaram a construção do laboratório, realização de cursos e do mestrado sanduiche.

Ao Professor Edival, coordenador do projeto CAPES/PROCAD em Itajubá.

Ao Professor Endres, coordenador do projeto CAPES/PROCAD em Porto Alegre.

À família da República Monstro.

Resumo:

Em 2011 foi construído o laboratório para estudo da energia das ondas na Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, localizado no Instituto de Recursos Naturais – IRN. O laboratório conta com um canal de ondas que simula a agitação marítima e sua propagação em duas dimensões. Nesse canal é possível testar modelos reduzidos de dispositivos e estruturas que funcionarão na costa ou em mar aberto. Foram realizados os primeiros testes nesse canal que são aqui publicados. Testes adicionais foram realizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, laboratório tradicional, que possui um ótimo comportamento de suas ondas geradas, sendo possível realizar uma comparação entre a qualidade das ondas produzidas no canal do IRN e do IPH, com intuito de avaliar e aprimorar o funcionamento do novo canal.

Uma fundamentação teórica é apresentada sobre a propagação de ondas, sobre a modelagem física e relações de escalas, sobre instrumentação de canais de ondas e sobre o aproveitamento energético das ondas.

Uma proposta de metodologia de testes em modelos reduzidos é apresentada onde uma placa atenuadora é testada utilizando-se de uma nova técnica de processamento de dados obtidos por meio de medidores acústicos de velocidade (ADV). Medidores resistivos de altura de onda utilizados de forma convencional foram usados em paralelo aos ADVs para uma comparação dos resultados.

Palavras-chave: Canal de ondas; Energia das ondas; Modelos físicos reduzidos; Medidores acústicos de velocidade por efeito Doppler (ADV);

Abstract:

In 2011 a wave energy laboratory was built at the Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, in the Instituto de Recursos Naturais - IRN. The laboratory has a wave flume that emulates the sea waves and their propagation in two dimensions. In this flume one can test scale models of devices and structures that work on or offshore. The first tests were carried out in this flume. Additional tests were performed at the Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, in their traditional lab, where the generated waves behave optimally. It is then possible to make a comparison between the quality of waves produced in the two different flumes, with the aim of evaluating and improving the operation of the newly built wave flume.

A theoretical framework is presented on the propagation of waves, the modeling and physical relationships between different scales, the instrumentation of wave flumes and on the harnessing of wave energy.

A methodology is proposed for scale model testing, where an attenuation plate is tested using a new technique for processing data obtained by means of Acoustic Doppler Velocimeters (ADV). Results between wave height meters used in a conventional manner, as well as in parallel to the ADVs, are collected for comparison.

Keywords: Wave flume, wave energy, physical scale models, Acoustic Doppler Velocimeter (ADV);

Lista de Símbolos:

A	- Amplitude de Onda;
A	- Raio da Elipse na direção horizontal;
ADV _i	- Acoustic Doppler Velocimeters;
B	- Raio da Elipse na direção vertical;
C	- Celeridade da Onda;
C _g	- Celeridade do Grupo de Ondas;
C _r	- Coeficiente de Reflexão;
C _s	- Velocidade do Som;
E	- Energia Total da Onda progressiva;
EC	- Energia Cinética da Onda Progressiva;
E _L	- Energia por Comprimento de Onda;
EP	- Energia Potencial da onda progressiva;
EP _{S/O}	- Energia Potencial do fluido sem a onda;
EP _T	- Energia Potencial Total (da onda e do fluido sem a onda);
F	- Frequência da Onda;
F	- Fluxo de Energia (Potência);
F _{doppler}	- Frequência alterada pelo Efeito Doppler;
F _{fonte}	- Frequência original transmitida pela fonte;
F _u	- Função de Transferência para Velocidade Horizontal;
G	- Aceleração da Gravidade;
H	- Altura de Onda;
H	- Profundidade;
h _{adv0}	- Altura do ADV0 com relação ao fundo;
h _{adv1}	- Altura do ADV1 com relação ao fundo;
H _{advi}	- Altura de Onda calculada através dos dados dos ADVs;
H _s	- Altura de Onda Significativa;
K	- Número de Onda
L	- Comprimento de Onda;
L ₀	- Comprimento de Onda aproximado para Águas Profundas;
m _a	- Massa da Placa Atenuadora;
m _b	- Massa da Placa Atenuadora + Massa do Tijolo;
m _c	- Massa da Placa Atenuadora + Peça de Aço;
m _d	- Massa da Placa Atenuadora + Massa do Tijolo + Tijolo;
N	- Fator de Águas Profundas/Rasas;
N _g	- Escala de Aceleração da Gravidade entre Modelo e Protótipo;
N _L	- Escala de Comprimento (Geométrica) entre Modelo e Protótipo;
N _t	- Escala de Tempo entre Modelo e Protótipo;

N_V	- Escala de Velocidade entre Modelo e Protótipo;
pc_i	- Elevações de Calibração dos Sensores Resistivos;
P_i	- Posições de montagem dos sensores;
S	- Curso do Batedor de Ondas (na linha d água);
s_i	- Sensores de Altura de Onda Resistivos;
S_iP_i	- Pontos de funcionamento do Canal de Ondas do IRN-UNIFEI (P p/ períodos e S para cursos);
T	- Período da Onda;
T	- Tempo;
T_iS_i	- Pontos de Funcionamento do Canal de Ondas do IPH-UFRGS (T p/ períodos e S para cursos);
U	- Velocidade horizontal das partículas de água;
V	- Velocidade;
$V_{10\text{filt}}$	- Velocidade Transversal (à propagação das ondas) Filtrada e Corrigida quanto as direções principais (ADV0);
$V_{20\text{filt}}$	- Velocidade Vertical Filtrada e Corrigida quanto às direções principais (ADV0);
$V_{30\text{filt}}$	- Velocidade Horizontal Filtrada e Corrigida quanto as direções principais (ADV0);
V_{x0}	- Velocidade Vertical Bruta (ADV0);
$V_{x0\text{filt}}$	- Velocidade Vertical Filtrada (ADV0);
V_{y0}	- Velocidade Horizontal Bruta (ADV0);
$V_{y0\text{filt}}$	- Velocidade Horizontal Filtrada (ADV0);
V_{z0}	- Velocidade Transversal (a propagação das ondas) Bruta (ADV0);
$V_{z0\text{filt}}$	- Velocidade Transversal (à propagação das ondas) Filtrada (ADV0);
V_r	- Velocidade relativa entre fonte e receptor;
W	- Velocidade vertical das partículas de água;
X	- Direção Vertical;
X	- Distâncias na direção vertical;
Y	- Direção Horizontal;
Y	- Distâncias na direção horizontal;
Z	- Direção Transversal (à propagação das ondas);
Z	- Distâncias na direção transversal (à propagação das ondas);
Z	- Deslocamento das Partículas na direção horizontal;
H	- Elevação da Superfície Livre;
Ξ	- Deslocamento das Partículas na direção vertical;
P	- Massa Específica da Água;
Φ	- Potencial de Velocidades;
Ω	- Frequência Angular;

Sumário

1. Introdução.....	7
2. Objetivos.....	9
3. Fundamentos Teóricos	10
3.1. Propriedades das Ondas.....	10
3.1.1. Teorias das Ondas.....	11
3.1.2. Teoria das Ondas de Pequena Amplitude (Teoria Linear de Ondas).....	13
3.1.2.1. Cinemática das partículas para ondas Progressivas.....	16
3.1.2.2. Componentes da velocidade das partículas	17
3.1.2.3. Deslocamento das Partículas	18
3.1.2.4. Energia	20
3.1.2.5. Fluxo de Energia (Potência).....	24
3.2. Aproveitamento Energético das Ondas	25
3.2.1. Tipos de Dispositivos	27
3.2.2. Energia das Ondas no Brasil.....	31
3.2.2.1. Estimativa dos Recursos Brasileiros de Energia das Ondas	32
3.3. Modelagem Física	34
3.3.1. Critérios de Semelhança	35
3.3.1.1. Semelhança Pelo Critério de Froude	35
3.3.2. Efeitos de Escala e de Laboratório	37
3.3.3. Batedores de Ondas	38
3.3.4. Curva do Batedor.....	40
3.3.5. Reflexão de Ondas.....	40
3.4. Instrumentação	42
3.4.1. Sensores de Altura de Onda.....	42
3.4.2. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV.....	43
3.4.2.1. ADVs Utilizados	45
3.5. Análise das Ondas – Análise Temporal e Espectral	46
4. Procedimentos Experimentais.....	47
4.1. Ensaio 1: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IPH-UFRGS	48
4.1.1. Procedimentos de Calibração do Sistema da Medição da Altura de Onda	52
4.1.2. Ensaio para caracterização do funcionamento de Canal de Ondas	53

4.1.3.	Análise dos Dados e Resultados	54
4.1.3.1.	Onda Incidente	57
4.1.3.2.	Resultado da Análise Temporal	61
4.1.3.3.	Velocidades das Partículas de Água.....	62
4.1.3.4.	Cálculo da Altura de Onda	70
4.1.3.5.	Curva do Batedor de Ondas do IPH.....	74
4.1.3.6.	Frequência do Motor	75
4.1.3.7.	Coeficientes de Reflexões para o Canal de Ondas do IPH.....	76
4.2	Ensaio 2: Ensaio de Modelo Reduzido de uma Placa Atenuadora.....	77
4.2.1	Condições dos Testes.....	77
4.2.2.	Resultados.....	80
4.3.	Ensaio 3: Ensaio no IRN- UNIFEI.....	86
4.3.1.	Ensaio para caracterização do funcionamento do Canal de Ondas	86
4.3.2.	Análise dos Dados e Resultados	87
5.	Conclusões	98
5.1.	Metodologia de Ensaio em Modelos Reduzidos (Objetivo 1).....	99
5.1.1.	Ensaio da Placa Atenuadora	99
5.2.	Cálculo das alturas de ondas através de medidas de velocidade (Objetivo 2).....	100
5.3.	Comparação entre os canais de ondas do IRN e do IPH (Objetivo 3)	101
5.3.1.	Melhorias para o Canal de Ondas IRN-UNIFEI.....	103
6.	Referências Bibliográficas	106
Anexo 1 – Pacote de Softwares SAM.....		108
Anexo 1.1. MOD-5-Análise da Reflexão.....		108
Anexo 1.2. MOD-6-Análise Temporal.....		110
Anexo 2 – Descrição do Canal de Ondas do IRN/UNIFEI.....		111

1. Introdução

Com a construção do laboratório de estudos de propagação de ondas na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, inaugurado em 2011, iniciou-se uma nova linha de pesquisa nessa Universidade. Localizado no Instituto de Recurso Naturais – IRN, no âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia, estabeleceu-se o objetivo de pesquisar as energias oceânicas, mais especificamente a energia das ondas.

As tecnologias de aproveitamento energético das ondas vêm se desenvolvendo desde a década de 70, com altos e baixos do ponto de vista de apoio político e econômico. No começo da década de 80, com o fim da crise do petróleo, viu-se boa parte dos projetos serem abandonados, mas a partir dos anos 2000, impulsionadas pela busca europeia de troca da matriz energética por fontes renováveis, as pesquisas sobre esse tipo de energia retornaram com vigor.

Diversas teorias foram desenvolvidas para descrever a hidrodinâmica marítima. Desde o século XVIII, vem evoluindo e diversificando o estudo do comportamento das ondas. Neste trabalho apresenta-se a aplicabilidade de cada uma dessas teorias e descreve-se o equacionamento de algumas grandezas físicas através da Teoria das Ondas de Pequena Amplitude (ou Teoria Linear).

Projetos eletromecânicos e estruturais que pretendem funcionar no ambiente marítimo têm as dificuldades técnicas aumentadas devido aos riscos que essas regiões oferecem. Tecnologias herdadas da indústria do petróleo tendem a resolver esses problemas, mas seus custos trazem limitações aos empreendimentos. Com isso, muito estudo ainda é necessário para a obtenção de conhecimentos definitivos sobre como aproveitar a energia das ondas de forma eficiente e economicamente viável.

O laboratório do IRN-UNIFEI conta com um Canal de Ondas que simula a agitação marítima propagando-se bidimensionalmente. Nesse canal é possível a realização de testes de modelos reduzidos de dispositivos e estruturas que funcionarão na costa ou em mar aberto. O Canal possui um dispositivo para geração das ondas conhecido como Batedor de Ondas, o qual dispõe de um controle de período e de curso de excitação. Um dos objetivos desse trabalho é o prognóstico de funcionamento deste controle.

Para uma análise comparativa do funcionamento do Canal de Ondas do IRN foram realizados testes adicionais no Canal de Onda do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, canal que possui um ótimo comportamento das ondas geradas servindo como um bom padrão de referência para a avaliação e aprimoramento do canal do IRN.

Foram executados também ensaios de um modelo reduzido de uma placa atenuadora de ondas, aplicando-se a metodologia desenvolvida para o ajuste de período e curso do atuador. Criou-se a modelagem física reduzida, utilizando-se o critério de semelhança dinâmica de Froude, e atentando-se para os efeitos de escala e de efeitos de laboratório presentes durante a realização dos ensaios.

Na realização dos testes foram utilizados sensores resistivos de altura de ondas e medidores acústicos de velocidade por efeito Doppler (ADV). Os ADVs oferecem mais informações sobre o comportamento das ondas do que as medidas de altura de onda dos sensores resistivos, porque medem o comportamento tridimensional da água, no interior da onda, e não somente a elevação da superfície livre. Contudo, apresentam altos níveis de distorção das leituras a são influenciados pelas concentrações de sedimentos no fluido. Com isso uma nova proposta de processamento dos dados dos ADVs foi utilizada, aplicando-se uma metodologia de filtragem e correção dos valores lidos.

2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- 1- Desenvolver uma metodologia de utilização de canais de ondas para testes de modelos físicos reduzidos de estruturas e componentes de dispositivos de conversão da energia das ondas, definindo relações de escala Modelo x Protótipo e as faixas de períodos e de alturas de onda dos canais de ondas utilizados;
- 2- Comparar o funcionamento e metodologias de análise de dois sistemas de instrumentação: Medidores de Altura de Onda Resistivos e Medidores Acústicos de Velocidade por Efeito Doppler (ADV – *Acoustic Doppler Velocimeter*);
- 3- Comparar o comportamento operacional dos canais de ondas do IPH-UFRGS e do IRN-UNIFEI.

3. Fundamentos Teóricos

3.1. Propriedades das Ondas

As ondas são flutuações do nível d'água, acompanhadas de velocidades e acelerações locais e flutuações locais de pressão. Sua forma mais simples é senoidal (Figura 1) e partindo disso definem-se as propriedades mais básicas das ondas (KAMPHUIS, 2000).

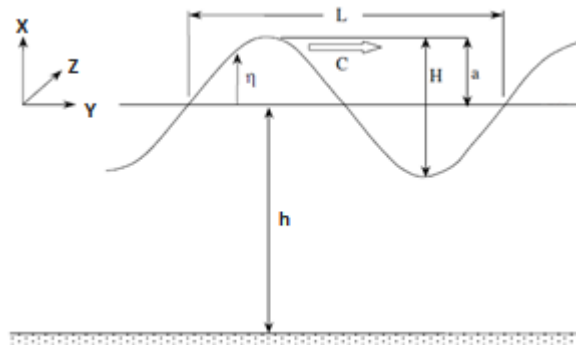


Figura 1 – Simbologia Básica para Ondas (KAMPHUIS, 2000, adaptada).

Os níveis d'água mais altos são chamados de cristas, e os mais baixos, os cavados. A distância vertical entre a crista e o cavado é a altura de onda H . A distância na qual a forma de onda se repete é o comprimento de onda L . As ondas se propagam com a velocidade C , chamada de celeridade, e o tempo requerido para a onda percorrer todo seu comprimento é o período T . O inverso do período é a frequência f .

O fenômeno das ondas nos oceanos ocorre em muitas faixas de períodos, desde ondas capilares com períodos muito pequenos (na ordem de 0,1 segundos) até tsunamis (ondas geradas por terremotos) e marés, com períodos expressos em minutos e horas. As alturas das ondas também variam de milímetros nas ondas capilares até metros nas ondas maiores, de tempestade.

A Figura 2 relaciona os fenômenos atuantes na geração das ondas (ventos, terremotos, tempestades e forças gravitacionais do Sol e da Lua; fenômenos de atenuação das ondas: tensão superficial, gravidade e força de Coriolis) com a energia nelas contida. Também apresenta uma classificação quanto a faixas de período: ondas capilares, ondas de ultra-gravidade, ondas gravitacionais, ondas de infra-gravidade e ondas longas. As ondas de interesse nesse trabalho são as ondas de gravidade.

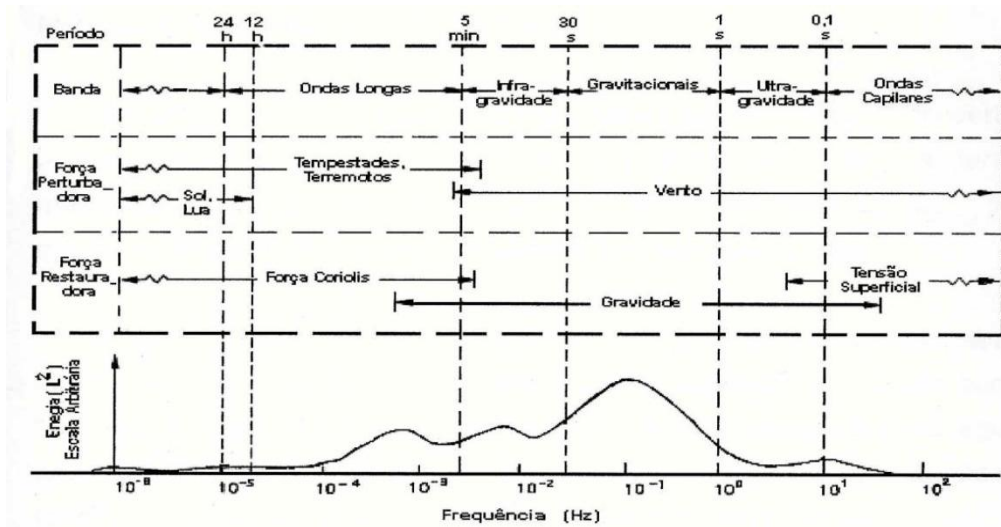


Figura 2- Distribuição da energia das ondas em função dos fenômenos atuantes (MARTINS, 2003).

As ondas de gravidade são geradas pela ação dos ventos. A geração se dá mais eficientemente quando o vento está na mesma direção de propagação da onda. Mas normalmente, o vento encontra-se mais veloz que a onda, criando um ângulo entre a direção da propagação do vento e a direção de propagação da onda. Boa parte da energia do vento é passada para pequenas ondas, que se formam sobre a superfície de ondas maiores. Essas ondas menores, de mais alta frequência, transferem energia para as ondas de mais baixa frequência (KAMPHUIS, 2000).

3.1.1. Teorias das Ondas

Historicamente as ondas geradas pelos ventos têm sido abordadas por diversas teorias. As aproximações mais comuns usam as equações de movimento e da continuidade para fluidos ideais com condições de contorno definidas.

Se a condição de que a altura de onda é infinitesimalmente menor que outros comprimentos envolvidos – comprimento de onda e profundidade – trata-se da Teoria das Ondas de Pequena Amplitude, discutida pela primeira vez por Airy (1845), sendo posteriormente descrita como a aproximação de primeira ordem da teoria de Stokes (1847).

A Teoria Cnoidal da Onda é derivada das equações de Korteweg de Vries descritas em Korteweg de Vries (1985), Svendsen (1974) e Isobe (1985).

Válida para águas muito rasas tem-se a Teoria da Onda Solitária, desenvolvida por Boussinesq (1872), McCowan (1891, 1894) e outros, ficando popular em Munk (1949), como uma aproximação para ondas quase quebrando.

A suposição de fluido ideal (sem atrito) pressupõe que a Teoria de Stokes seja melhor para águas profundas. Sendo a Teoria das Ondas de Pequena Amplitude empregadas nas menores ondas em águas profundas enquanto para maiores ondas usam-se aproximações de maiores ordens.

Já para águas rasas aplica-se a Teoria Cnoidal, que considera a interferência com o fundo. Quando a onda está a ponto de quebrar pode ser usada a Teoria da Onda Solitária. A aplicabilidade das diversas teorias é apresentada na Figura 3.

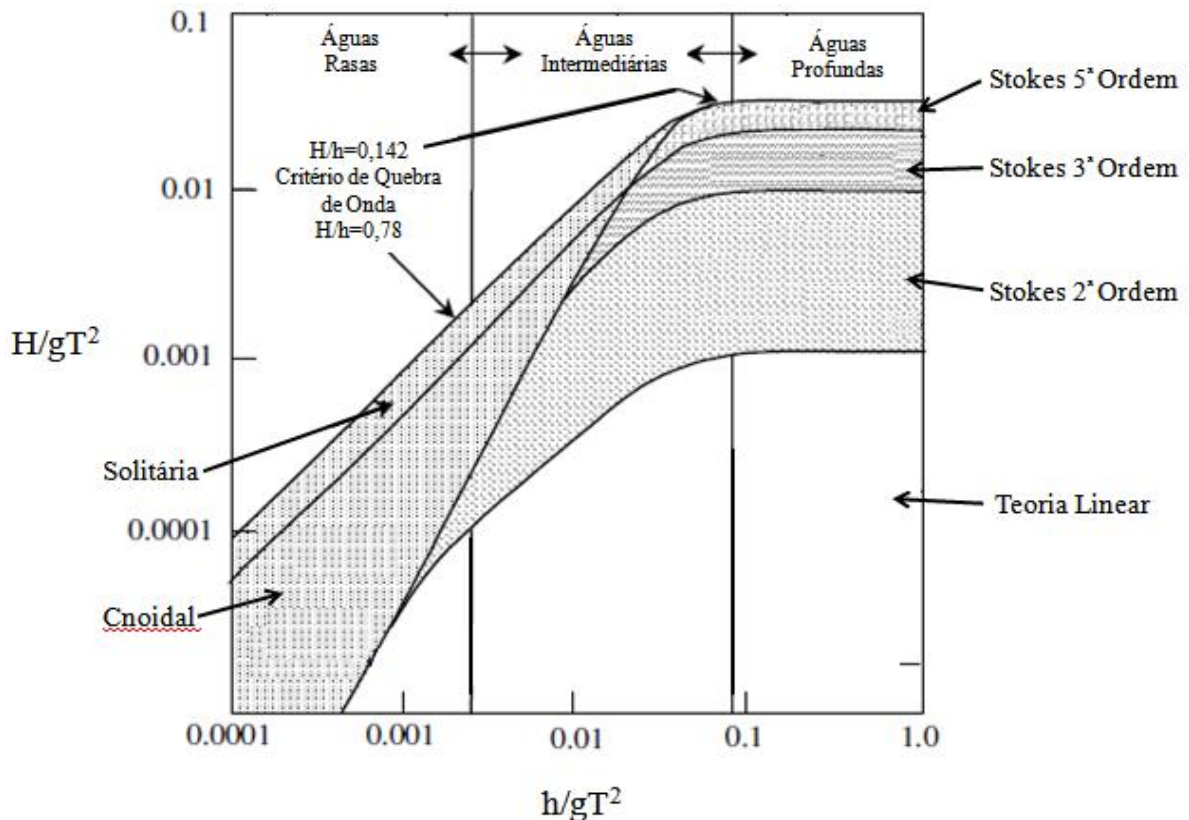


Figura 3 – Aplicação das Várias Teorias de Ondas (KAMPHUIS, 2000, adaptada).

Muitas simplificações são feitas nas teorias descritas acima. Para se descrever ondas mais precisamente podem-se utilizar métodos numéricos. A melhor nesse caso é a Teoria da Função de Corrente de Dean (1974). Recentes pesquisas também mostram resultados muito interessantes para o uso das Equações de Boussinesq em uma grande gama de ondas e profundidades.

3.1.2. Teoria das Ondas de Pequena Amplitude (Teoria Linear de Ondas)

Para as mais diversas aplicações, é muito usada a Teoria das Ondas de Pequena Amplitude, ou Teoria Linear. Abaixo são apresentadas as expressões comuns da Teoria Linear, baseando-se em Kamphuis (2000).

A superfície livre, senoidal, entre a água e o ar é descrita por:

$$\eta = a \cos(ky - \omega t) = a \cos\left(\frac{2\pi y}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$$

Eq. 1

onde a é amplitude da onda ($a = H/2$), y a distância na direção da propagação de onda, t é o tempo, k é o número de onda, ω é a frequência angular, L o comprimento de onda, T o período e:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Eq. 2

A relação entre a altura de onda e o comprimento de onda H/L é chamada esbeltez da onda. A celeridade da onda é:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh kh = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh kh}$$

Eq. 3

Uma onda é dita de águas profundas quando:

$$h/L \geq 0,5$$

Eq. 4

$$\tanh kh \geq 0,996$$

Eq. 5

e de águas rasas quando:

$$h/L \leq 0,05$$

Eq. 6

$$\tanh kh \leq 0,302$$

Eq. 7

$$kh \leq 0,312$$

Eq. 8

Entre essas condições diz-se que a onda situa-se em águas intermediárias.

Para se obter o comprimento de onda L devem-se ser utilizados métodos numéricos ou utilizar-se a Tabela 1, publicada por USA-CE (1984) e Wiegel (1964), que apresenta soluções para L e outras importantes características das ondas. Para usá-la deve-se primeiro se calcular o comprimento de onda aproximado para ondas profundas:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Eq. 9

Depois usá-lo para calcular h/L_0 e então utilizar a Tabela 1.

A Eq. 3 indica que ondas com longos períodos viajam mais rápido que ondas de períodos menores. Um trem de ondas real possui ondas, de diferentes períodos, e com o tempo elas se dispersão. As ondas maiores, mais rápidas, se distanciam das menores, mais lentas. Então essa equação é chamada *Equação de Dispersão*. As ondas com períodos próximos viajam próximas, e se interferem entre si, formando os grupos de onda (Figura 4).

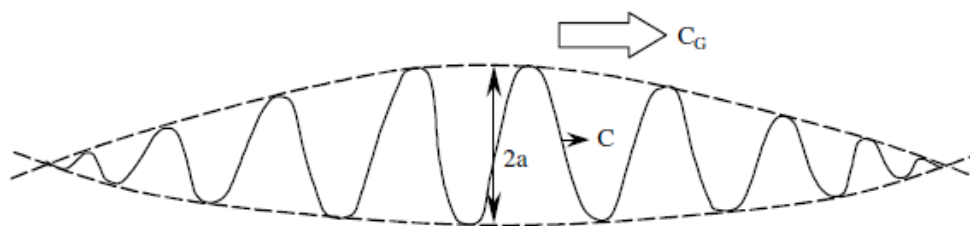


Figura 4- Grupo de Onda (KAMPHUIS, 2000).

h/L_0	$\tanh kh$	h/L	kh	$\sinh kh$	$\cosh kh$	n	h/L_0	$\tanh kh$	h/L	kh	$\sinh kh$	$\cosh kh$	n
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,220	0,909	0,242	1,520	2,180	2,400	0,646
0,002	0,112	0,018	0,112	0,113	1,010	0,996	0,230	0,918	0,251	1,570	2,310	2,520	0,635
0,004	0,158	0,025	0,159	0,160	1,010	0,992	0,240	0,926	0,259	1,630	2,450	2,650	0,626
0,006	0,193	0,031	0,195	0,197	1,020	0,998	0,250	0,933	0,268	1,680	2,600	2,780	0,616
0,008	0,222	0,036	0,226	0,228	1,030	0,983	0,260	0,940	0,277	1,740	2,750	2,930	0,608
0,010	0,248	0,040	0,253	0,256	1,030	0,979	0,270	0,956	0,285	1,790	2,920	3,090	0,599
0,015	0,302	0,050	0,312	0,317	1,050	0,969	0,280	0,952	0,294	1,850	3,100	3,250	0,592
0,020	0,347	0,058	0,362	0,370	1,070	0,959	0,290	0,957	0,303	1,900	3,280	3,430	0,585
0,025	0,386	0,065	0,407	0,418	1,080	0,949	0,300	0,961	0,312	1,960	3,480	3,620	0,578
0,030	0,420	0,071	0,448	0,463	1,100	0,939	0,310	0,965	0,321	2,020	3,690	3,830	0,571
0,035	0,452	0,078	0,487	0,506	1,120	0,929	0,320	0,969	0,330	2,080	3,920	4,050	0,566
0,040	0,480	0,083	0,523	0,548	1,140	0,919	0,330	0,972	0,339	2,130	4,160	4,280	0,560
0,045	0,507	0,088	0,558	0,588	1,160	0,910	0,340	0,975	0,349	2,190	4,410	4,530	0,555
0,050	0,531	0,094	0,592	0,627	1,180	0,900	0,350	0,978	0,358	2,250	4,680	4,790	0,550
0,055	0,554	0,099	0,624	0,665	1,200	0,891	0,360	0,980	0,367	2,310	4,970	5,070	0,546
0,060	0,575	0,104	0,655	0,703	1,220	0,880	0,370	0,983	0,377	2,370	5,280	5,370	0,542
0,065	0,595	0,109	0,686	0,741	1,240	0,872	0,380	0,984	0,386	2,430	5,610	5,700	0,538
0,070	0,614	0,114	0,716	0,779	1,260	0,863	0,390	0,986	0,395	2,480	5,960	6,040	0,535
0,075	0,632	0,119	0,745	0,816	1,290	0,853	0,400	0,988	0,405	2,540	6,330	6,410	0,531
0,080	0,649	0,123	0,774	0,854	1,310	0,845	0,410	0,989	0,415	2,600	6,720	6,800	0,529
0,085	0,665	0,128	0,803	0,892	1,340	0,836	0,420	0,990	0,424	2,660	7,150	7,220	0,526
0,090	0,681	0,132	0,831	0,929	1,370	0,827	0,430	0,991	0,434	2,730	7,600	7,660	0,523
0,095	0,695	0,137	0,858	0,968	1,390	0,819	0,440	0,992	0,443	2,790	8,070	8,140	0,521
0,100	0,709	0,141	0,886	1,010	1,420	0,810	0,450	0,993	0,453	2,850	8,590	8,640	0,519
0,110	0,735	0,150	0,940	1,080	1,480	0,794	0,460	0,994	0,463	2,910	9,130	9,180	0,517
0,120	0,759	0,158	0,994	1,170	1,540	0,778	0,470	0,995	0,472	2,970	9,710	9,760	0,516
0,130	0,780	0,167	1,050	1,250	1,600	0,762	0,480	0,995	0,482	3,030	10,300	10,400	0,514
0,140	0,800	0,175	1,100	1,330	1,670	0,747	0,490	0,996	0,492	3,090	11,000	11,000	0,513
0,150	0,818	0,183	1,150	1,420	1,740	0,733	0,500	0,996	0,502	3,150	11,700	11,700	0,512
0,160	0,835	0,192	1,200	1,520	1,820	0,718	0,750	1,000	0,746	4,690	54,500	54,500	0,501
0,170	0,850	0,200	1,260	1,610	1,900	0,705	1,000	1,000	0,981	6,160	269,500	269,500	0,500
0,180	0,864	0,208	1,310	1,720	1,990	0,692							
0,200	0,888	0,225	1,410	1,940	2,180	0,668							
0,210	0,899	0,234	1,470	2,050	2,280	0,656							

Tabela 1 – Tabela de Ondas (KAMPHUIS, 2000, adaptada).

Há a superposição de duas ondas, com duas velocidades distintas: uma para as ondas menores:

$$C = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{(k_1 - k_2)}$$

Eq. 10

e outra para o grupo de ondas:

$$C_g = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{(k_1 - k_2)}$$

Eq. 11

que também é definida por:

$$C_g = n \cdot C$$

Eq. 12

$$n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2 kh}{\sinh 2 kh} \right)$$

Eq. 13

O fator n assume para águas profundas o valor de $1/2$ e para águas rasas 1.

3.1.2.1. Cinemática das partículas para ondas Progressivas

Ondas se propagam com celeridade (velocidade) C , mas as partículas individuais de água se movem em órbitas. Essas órbitas são circulares para águas profundas e se tornam elípticas para águas rasas. O raio da órbita também aumenta com a profundidade (Figura 5).

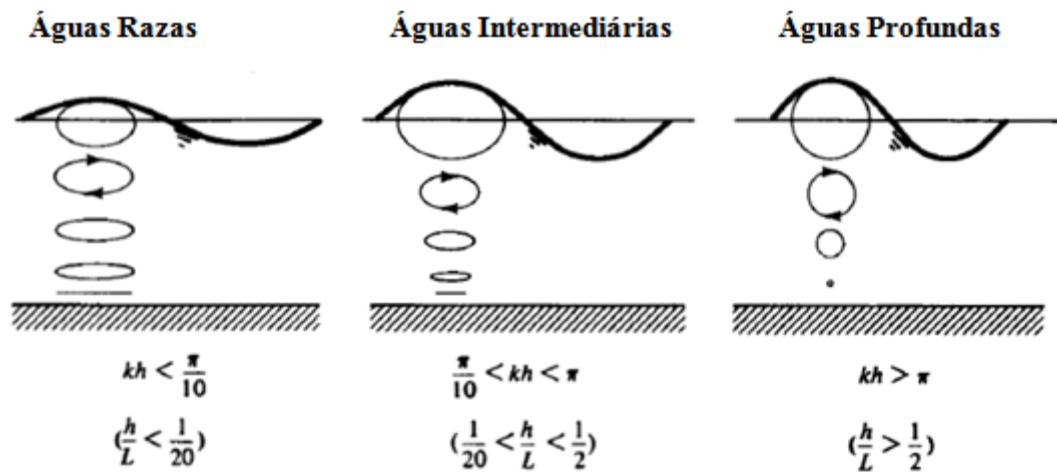


Figura 5 - Trajetórias da partícula em ondas progressivas para diferentes profundidades relativas (DEAN & DALRYMPLE, 1984, adaptada).

Dean & Dalrymple (1984) apresentam o desenvolvimento da cinemática das partículas para ondas progressivas, descrito a seguir.

O deslocamento da superfície livre da água em ondas progressivas é dado pela Eq. 1.

O potencial de velocidades é:

$$\phi = -\frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh k(h+x)}{\cosh kh} \sin(ky - \omega t)$$

Eq. 14

Introduzindo a relação de dispersão:

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

Eq. 15

o potencial de velocidades pode se reescrito como:

$$\phi = -\frac{H}{2} C \frac{\cosh k(h+x)}{\sinh kh} \sin(ky - \omega t)$$

Eq. 16

3.1.2.2. Componentes da velocidade das partículas

A velocidade horizontal das partículas é dada por:

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+x)}{\sinh kh} \cos(ky - \omega t)$$

Eq. 17

ou

$$u = \frac{gHk}{2\omega} \frac{\cosh k(h+x)}{\cosh kh} \cos(ky - \omega t)$$

Eq. 18

A aceleração horizontal local é:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh k(h+x)}{\sinh kh} \sin(ky - \omega t)$$

Eq. 19

A velocidade vertical das partículas é:

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+x)}{\sinh kh} \cos(ky - \omega t)$$

Eq. 20

e a aceleração vertical local:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\sinh k(h+x)}{\sinh kh} \cos(ky - \omega t)$$

Eq. 21

3.1.2.3. Deslocamento das Partículas

As partículas de água com posições (y_1, x_1) são deslocadas pelas pressões induzidas pela onda e às posições são adicionados os deslocamentos (ζ, ξ) , fazendo-se $(y_1 + \zeta, x_1 + \xi)$ (Figura 6).

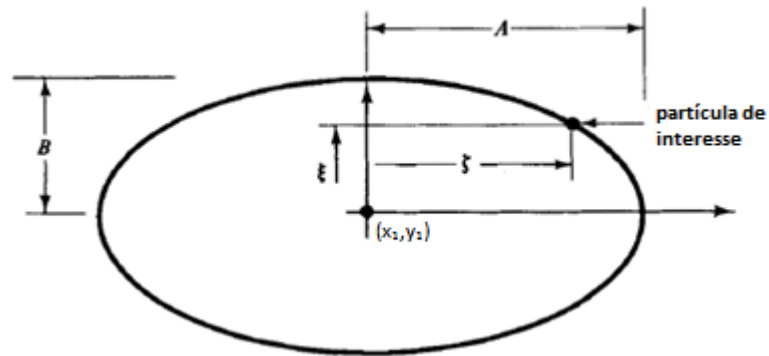


Figura 6: Forma elíptica do deslocamento da partícula (DEAN & DALRYMPLE, 1984, adaptada).

Integrando-se as velocidades no tempo, encontram-se os valores de (ζ, ξ) .

$$\zeta(y_1, x_1, t) = \int u(y_1 + \zeta, x_1 + \xi) dt$$

Eq. 22

$$\xi(y_1, x_1, t) = \int w(y_1 + \zeta, x_1 + \xi) dt$$

Eq. 23

Integrando as equações temos:

$$\zeta = -\frac{H}{2} \frac{gk \cosh k(h+x_1)}{\omega^2 \cosh kh} \text{sen}(ky_1 - \omega t)$$

Eq. 24

ou

$$\zeta = -\frac{H \sinh k(h + x_1)}{2 \sinh kh} \cos(ky_1 - \omega t)$$

Eq. 25

e do mesmo modo:

$$\xi = \frac{H \sinh k(h + x_1)}{2 \sinh kh} \cos(ky_1 - \omega t)$$

Eq. 26

Os deslocamentos ζ e ξ podem ser reescritos como sendo:

$$\zeta(y, x_1, t) = -A \sin(ky_1 - \omega t)$$

Eq. 27

$$\xi(y_1, x_1, t) = B \cos(ky_1 - \omega t)$$

Eq. 28

e a seguinte relação pode ser feita:

$$\left(\frac{\zeta}{A}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{B}\right)^2 = 1$$

Eq. 29

Águas Rasas

Em águas rasas ($h/L < 0,05$) pode-se introduzir a relação $L = CT = \sqrt{gh} T$, então se tem:

$$A = \frac{H \cosh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} = \frac{H}{2} \frac{1}{kh} = \frac{HL}{4\pi h} = \frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}$$

Eq. 30

$$B = \frac{H \sinh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z_1}{h}\right)$$

Eq. 31

Águas Profundas

Para águas profundas ($h/L \geq 0,5$) simplifica-se para:

$$A = \frac{H e^{kh} e^{kx_1}}{2 e^{kh}} = \frac{H}{2} e^{kx_1}$$

Eq. 32

$$B = \frac{H}{2} e^{kx_1} = A$$

Eq. 33

A Figura 5 ilustra esses comportamentos das partículas.

3.1.2.4. Energia

O total de energia contida na onda é dividido em dois tipos: energia potencial, resultante dos deslocamentos verticais da superfície livre, e energia cinética, proveniente dos movimentos das partículas do fluido (DEAN & DALRYMPLE, 1984).

Energia Potencial

A energia potencial é resultante do deslocamento de massa de água de uma posição de equilíbrio para uma contra o campo gravitacional. É descrita como a diferença entre a energia potencial do fluido com, e sem, a presença da onda.

$$EP = EP_T - EP_{S/o}$$

Eq. 34

EP – Energia Potencial da Onda Progressiva;

EP_T – Energia Potencial Total, da onda e do fluido sem a onda;

EP_{S/o} – Energia Potencial sem a Onda.

Considerando a Figura 7 temos a energia potencial para uma coluna de fluido infinitesimalmente pequena:

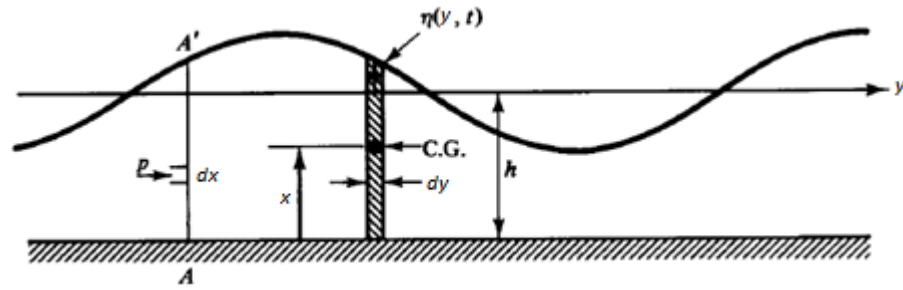


Figura 7 – Esquema para Determinação da Energia Potencial (DEAN & DALRYMPLE, 1984, adaptada).

$$dEP = dm gx$$

Eq. 35

onde x é altura do centro de gravidade da massa, dado por:

$$x = \frac{h + \eta}{2}$$

Eq. 36

e o diferencial de massa por unidade de comprimento:

$$dm = \rho(h + \eta)dy$$

Eq. 37

A energia potencial total do fluido em um comprimento de onda para uma onda progressiva de altura H é então:

$$\begin{aligned} EP_T &= \frac{1}{L} \int_y^{y+L} dEP = \frac{1}{L} \int_y^{y+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dy \\ &= \frac{\rho g}{L} \int_y^{y+L} \left[\frac{1}{2} (h^2 + 2\eta h + \eta^2) \right] dy \end{aligned}$$

Eq. 38

para:

$$\eta = \left(\frac{H}{2} \right) \cos(ky - \omega t)$$

Eq. 39

A energia potencial fica:

$$EP_T = \frac{\rho g}{L} \left(\frac{1}{2} h^2 L + h \int_y^{y+L} \eta \, dy + \frac{1}{2} \int_y^{y+L} \eta^2 \, dy \right)$$

Eq. 40

A integração é simples, chegando-se em:

$$EP_T = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16}$$

Eq. 41

A parcela que representa a energia potencial do fluido sem a presença da onda é:

$$EP_{S/o} = \rho g \frac{h^2}{2}$$

Eq. 42

Finalmente, a energia potencial da onda progressiva:

$$EP = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

Eq. 43

Energia Cinética

A energia cinética é proveniente do movimento das partículas de água. A energia cinética associada a uma parcela infinitesimalmente pequena de fluido com massa dm é:

$$d(EC) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho \, dy \, dx \frac{u^2 + w^2}{2}$$

Eq. 44

Deve-se integrar $d(EC)$ quanto à profundidade e quanto ao comprimento de onda:

$$EC = \frac{1}{L} \int_y^{y+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} \, dx \, dy$$

Eq. 45

Através da Eq. 17 e da Eq. 20, a integral pode ser escrita como:

$$EC = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{gHk}{2\omega} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_y^{y+L} \int_{-h}^{\eta} [\cosh^2 k(h+x) \cos^2(ky - \omega t) + \sinh^2 k(h+x) \sin^2(ky - \omega t)] dx dy$$

Eq. 46

Usando identidades trigonométricas:

$$EC = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{gHk}{2\omega} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_y^{y+L} \int_{-h}^{\eta \approx 0} \frac{1}{2} [\cosh 2k(h+x) + \cos 2(ky - \omega t)] dx dy$$

Eq. 47

Integrando e simplificando chegamos em:

$$EC = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

Eq. 48

A energia cinética tem magnitude igual à energia potencial, o que é característica de sistemas conservativos (não-dissipativos).

Energia Total

A energia total da onda progressiva é então dada por:

$$E = EP + EC$$

Eq. 49

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

Eq. 50

A energia total por onda por unidade de comprimento é:

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

Eq. 51

3.1.2.5. Fluxo de Energia (Potência)

As ondas de pequena amplitude não transmitem massa quando se propagam pelo fluido, já que suas trajetórias são fechadas. Contudo elas transmitem energia. A taxa de transferência de energia de um ponto y_1 para um ponto y_2 é chamada *fluxo de energia* F e é dado por:

$$F = E \cdot C_g$$

Eq. 52

Onde C_g é a velocidade de grupo:

$$C_g = n \cdot C$$

Eq. 53

$$n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2 kh}{\sinh 2 kh} \right)$$

Eq. 54

O fator n assume então para águas profundas o valor de $1/2$ e para águas rasas 1. Isso quer dizer que em águas profundas a energia é transmitida à metade da celeridade das ondas, enquanto em águas rasas a energia viaja à mesma velocidade das ondas.

3.2. Aproveitamento Energético das Ondas

A ideia de se aproveitar a energia das ondas não é nova, sendo de 1799 umas das primeiras patentes conhecidas, quando M. Girard usou navios atracados para mover bombas e moinhos. Contudo, o maior uso até hoje dessa energia foi para abastecimento de boias para sinalização para navegação (ESTEFEN, 2003)..

As pesquisas sobre energia das ondas começaram de forma efetiva nos anos 1970, quando a crise do petróleo promoveu um aumento do interesse sobre as energias renováveis. Uma grande variedade de dispositivos de energia das ondas foram propostos e desenvolvidos, mas o sucesso foi, nesse momento, muito abaixo das expectativas. Em muitos casos, as forças destrutivas das ondas do mar foram subestimadas, e prematuros dispositivos de conversão de energia mostraram resultados insatisfatórios. Como consequência, quando a crise de energia chegou ao fim, o interesse na energia das ondas diminuiu, e no início dos anos 1980 viram-se muitos dos testes chegarem ao fim (ESTEFEN, 2003)..

As pesquisas que continuaram levaram à instalação de protótipos de dispositivos na linha de costa, isso em meados dos anos 80. A evolução das tecnologias permaneceu lenta até o início do novo século, seguindo as novas diretrizes com relação às energias renováveis. A energia das ondas experimentou um renascimento significativo desde os anos 2000, como uma consequência da busca europeia do aumento substancial do nível de oferta de energias renováveis. O sucesso do setor de energia eólica contribuiu, certamente, para permitir uma nova oferta de conversão de energia das ondas (ESTEFEN, 2003)..

As condições físicas (por exemplo, a profundidade da água, nível de potência, direção, e hidrodinâmica) são relevantes para a conversão de energia, e são diferentes de acordo com a profundidade da água e da distância da costa. As ondas viajam em águas profundas, quase sem perda de energia através do oceano e por isso tecnologias flutuantes ancoradas em águas profundas deverão ter o maior potencial de implementação em larga escala. Profundidades típicas para tecnologias off-shore estão na faixa de 50m. Em águas mais rasas, as ondas sofrem cada vez mais com atrito no fundo, tornando tais locais menos interessantes do ponto de vista energético. No entanto, como estes são mais perto da costa, os custos de conexão e de ancoragem diminuem, e podem se mostrar viáveis. Os dispositivos instalados nas margens, que são tipicamente integrados na costa ou em uma estrutura de defesa costeira artificial, têm níveis mais baixos de

energia incidente, mas possuem um acesso facilitado e diferentes soluções estruturais podem ser empregadas (CRUZ E SARMENTO, 2004).

A geração de energia elétrica a partir das ondas do mar tem sido caracterizada pelo uso de pequenas unidades geradoras entre 50 kW e 750 kW, agrupadas em “fazendas”, ou em unidades isoladas com potência entre 500 kW e 4 MW (ESTEFEN, 2003).

A diversidade de conceitos e da necessidade de equipamentos extremamente eficientes, duráveis, de mecanismos que estão sujeitos a ocasionalmente muito alta, com cargas extremas e muitos ciclos operacionais, não permite intercâmbio com outras tecnologias. Embora muitos materiais e questões de durabilidade para as tecnologias de energia das ondas sejam semelhantes à indústria off-shore de petróleo e gás, o resultado da aplicação das soluções existentes se mostram proibitivamente caras, levando as soluções para o campo de desenvolvimento de novas metodologias e materiais alternativos. Este aspecto tem atrasado significativamente o desenvolvimento, e contribuiu para a cautela com que os grandes industriais têm lidado com o seu envolvimento com a energia das ondas (ESTEFEN, 2003).

Pode esperar-se que, pelo menos, duas ou três das várias tecnologias consigam prova de que o conceito em fase de protótipo está em um nível apto para entrada em escala comercial em um futuro próximo. Uma tecnologia "vencedora", exclusiva, como foi o caso da energia eólica, não é necessariamente esperada, devido ao local e variabilidade da demanda, bem como aos diversos esforços simultâneos regionais para trazer um determinado conceito à frente (MME/EPE, 2010).

A viabilidade econômica deve ser alcançada a partir de 2015 e países com elevado potencial energético e programas governamentais de incentivo deverão ter participação significativa da geração a partir das ondas a partir de 2025. A Figura 8 apresenta as perspectivas para o desenvolvimento de energias alternativas na Europa. No Brasil um mapeamento conciso do potencial energético gerado pelas ondas de gravidade precisa ser elaborado (MME/EPE, 2010).

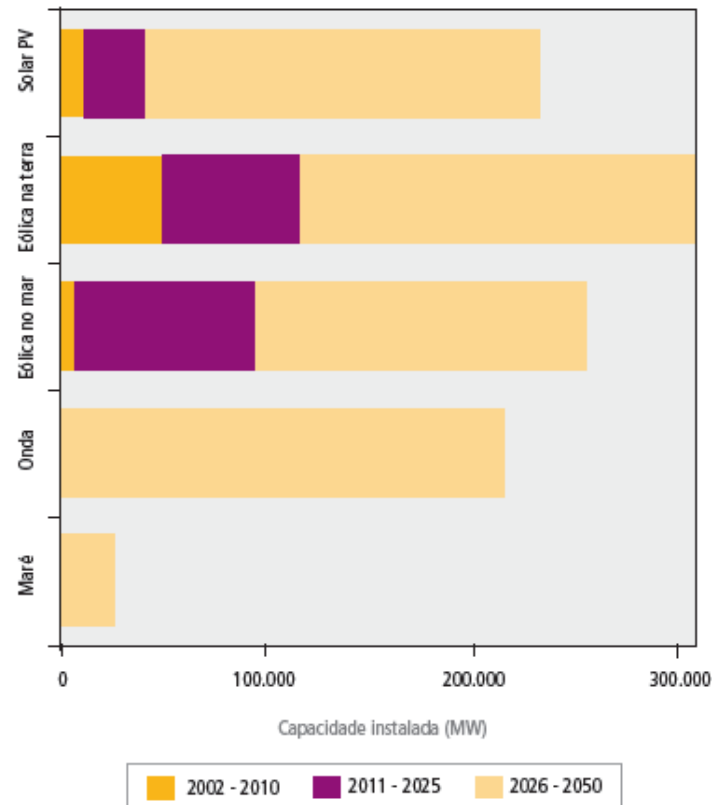


Figura 8 – Projeção da capacidade Instalada na Europa (MME/EPE, 2010)

3.2.1. Tipos de Dispositivos

Atenuadores:

Atenuadores são longos dispositivos flutuantes alinhados perpendicularmente à frente de onda. O dispositivo flutua sobre as ondas e capta a energia quando as ondas passam por ele. Flexionando devido ao movimento progressivo que estas provocam ao longo do seu comprimento. O exemplo mais desenvolvido dessa tecnologia é o Pelamis (AQUA-RET, 2012).

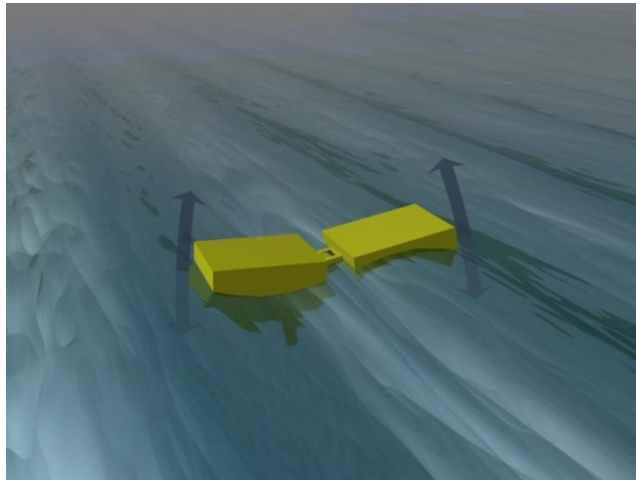


Figura 9 - Dispositivo tipo Atenuador (AQUA-RET, 2012).

Absorvedores Pontuais:

Absorvedores Pontuais são estruturas flutuantes que absorvem a energia das ondas em todas as direções devido à força dos movimentos das ondas próximos à superfície da água. Estes sistemas oscilantes são de pequenas dimensões se comparados aos comprimentos de ondas típicos. Exemplos: OPT PowerBuoy (Ocean Power Technologies, EUA / Reino Unido), Wavebob (Wave Bob Ltd, da Irlanda), AquaBuoy (Finavera Ltd, Irlanda) e OE Buoy (OE Ocean Energy Ltd, Ireland) (AQUA-RET, 2012).

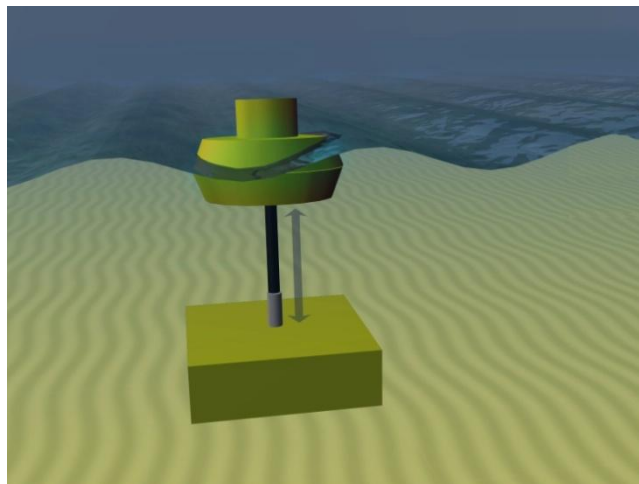


Figura 10 – Dispositivo tipo Absorvedor Pontual (AQUA-RET, 2012).

Placa Oscilante Submersa:

Os dispositivos tipo Placa Oscilante Submersa possuem sua parte inferior instalada no fundo do mar, onde há um pivotamento, e a parte superior atinge níveis próximos à superfície. Funciona como um pêndulo invertido, acionado pelos movimentos das partículas de água (AQUA-RET, 2012). Exemplo: Oyster 800 Project, Orkney, 2012.

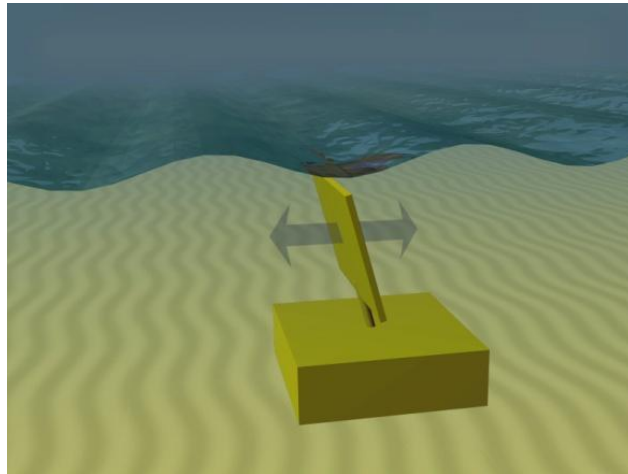


Figura 11 – Dispositivo tipo Placa Submersa (AQUA-RET, 2012).

Coluna de Água Oscilante

Dispositivos tipo Coluna de Água Oscilante são estruturas ocas, parcialmente submersas, com abertura para o mar abaixo da superfície da água, de forma que o ar contido no seu interior seja comprimido pela coluna de água quando há a sua entrada, conduzindo um fluxo para uma turbina de ar, e quando há a saída da água, ar é succionado para dentro da câmara, também através da turbina. É a tecnologia mais investigada e frequentemente instalada até o momento. Protótipos em escala real com capacidade instalada da ordem de várias dezenas a centenas de quilowatts (kW) foram construídos e testados em condições reais do mar na Noruega (Toftestallen, 1985), Japão (Sanze, Niigata, Kujukuri, Sakata, 1985-1990), Índia (Vizhinjam, 1990), Portugal (Pico / Açores, 1999), e Reino Unido (Islay, 1986; LIMPET, 2000, ilha de Islay, Scotland) (AQUA-RET, 2012).

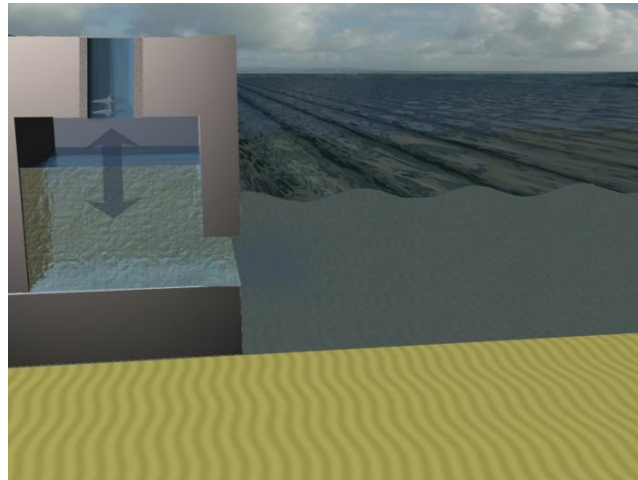


Figura 12 – Dispositivo tipo Coluna de água Oscilante (AQUA-RET, 2012).

Dispositivos de Galgamento:

Dispositivos de Galgamento consistem numa rampa que é galgada pelas ondas e num reservatório de armazenamento que recolhe a água das ondas. A água que entra no reservatório está em um nível mais alto do que o do mar. Essa água retorna ao mar passando por uma turbina convencional de baixa queda. Exemplo: Wave Dragon, desenvolvido pela Wave Dragon ApS - Dinamarca. Gradualmente a experiência de escala reduzida (Nissum Bredning / Dinamarca) tem avançado para os testes atuais em escala real, pré-comercial do projeto, demonstrado no País de Gales, com uma capacidade nominal de 5-7MW (AQUA-RET, 2012).

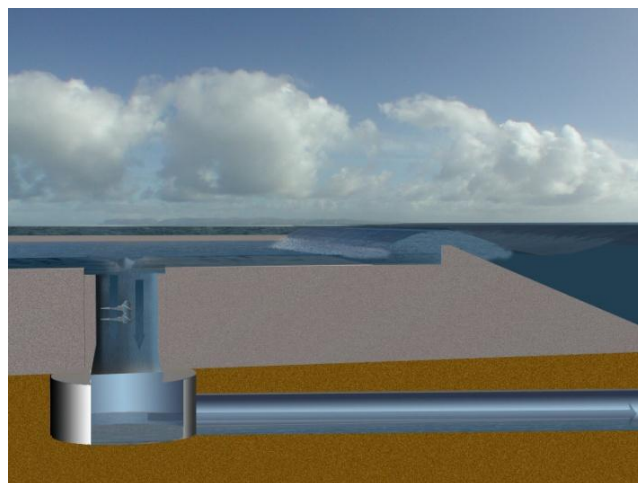


Figura 13 – Dispositivo tipo Galgamento (AQUA-RET, 2012).

Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão:

Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão são normalmente instalados perto da costa e apoiados no fundo do mar. O movimento das ondas provoca a subida e descida do nível da água acima do dispositivo, induzindo uma diferença de pressão que provoca o movimento do dispositivo. Exemplo: Archimedes Wave Swing – AWS, inventado e desenvolvido pela empresa holandesa Teamwork Technology desde os meados dos anos noventa, agora é promovido pela empresa escocesa AWS Ocean Ltd (AQUA-RET, 2012).

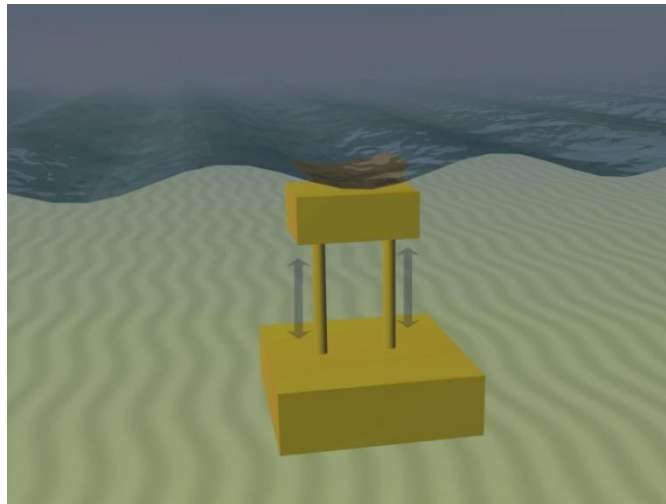


Figura 14 - Dispositivo tipo Submerso de Diferença de Pressão (AQUA-RET, 2012).

3.2.2. Energia das Ondas no Brasil

Países como Portugal, Irlanda, Reino Unido, Dinamarca e Noruega, têm mapeado e publicado seus potenciais energéticos, tanto aquele derivado das marés e correntes marinhas, quanto das ondas de gravidade. No Brasil, exceto por ações pontuais de algumas instituições, não há um levantamento sistemático de informações necessárias à estimação do potencial energético do mar. As informações se resumem a publicações do Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha, destinadas à navegação, insuficientes para a condução de estudos de potencial energético (MME/EPE, 2010).

O Ministério de Minas e Energia do Brasil apresenta no Plano Decenal de Expansão de Energia 2019 uma perspectiva de expansão média anual de 13% das fontes alternativas de energia no período de 2010 a 2019. A Figura 15 mostra uma pequena retomada da participação das fontes renováveis na matriz elétrica a partir do ano de 2014, em detrimento das fontes

baseadas em combustíveis fósseis. As usinas nucleares mantêm sua representatividade de 2% do SIN, com a entrada de Angra III em 2015.

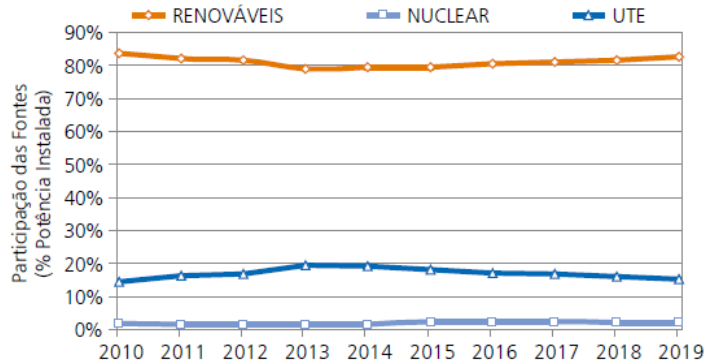


Figura 15 – Evolução da Participação das Fontes de Produção na Capacidade Instalada do Sistema Integrado Nacional (MME/EPE, 2010).

Este é um cenário favorável para a entrada da energia das ondas na matriz energética nacional. Contudo, as tecnologias não se mostram plenamente desenvolvidas, mesmo em termos globais. Ainda assim, a projeção do crescimento do setor de energias renováveis é importante para o desenvolvimento da energia das ondas.

A primeira usina piloto do Brasil, está instalada no Ceará, no quebra mar do Porto de Pecém, onde estudos da COPPE indicam valor médio de 7,7 kW/m para as ondas da região. Apesar do baixo valor energético, tem-se a vantagem da regularidade das ondas motivada pela constância dos ventos alísios. A usina, em fase de testes, tem a potência instalada de 50kW. O processo envolve a movimentação de flutuadores pelas ondas do mar que, por meio de braços mecânicos, acionam bombas hidráulicas. Essas bombas captam água tratada de um reservatório, através de uma tubulação em circuito fechado, alimentando um vaso de pressão, com acumulador hidropneumático. Esse conjunto fornece um jato d'água numa pressão equivalente à de uma queda d'água de 500m e aciona uma turbina hidráulica convencional, acoplada a um gerador. A tecnologia é 100% nacional (ESTEFEN, 2003).

3.2.2.1. Estimativa dos Recursos Brasileiros de Energia das Ondas

Estefen (2003) apresenta a avaliação do recurso energético das ondas marítimas ao largo da costa Sudeste brasileira para seis regiões compreendidas entre o paralelo 19°S (Caravelas) e a fronteira do Uruguai, paralelo 33°S.

Medições dos altímetros do satélite TOPEX - Poseidon realizadas entre setembro de 1992 a março de 1996, e de fevereiro de 1999 a setembro de 2000 foram utilizadas para a estimativa desse potencial energético das ondas. O radar altímetro pode também medir a velocidade do vento na superfície da água, mas não medir o período das ondas. Uma estimativa do período médio pode ser obtida a partir do coeficiente de retro-dispersão do altímetro através do Algoritmo de Davis et al. (1998).

As regiões estudadas são adequadas à geração próxima à costa (*nearshore*), se comparadas a outras regiões estudadas no exterior, mostrando que em direção ao sul do país a intensidade energética das ondas aumenta (ESTEFEN, 2003).

Na região de Vitória, Espírito Santo, a permanência de ondas com potencial igual ou acima de 10 kW/m é superior a 65% do tempo e o potencial médio mensal é de 15,5 kW/m. As ondas de maior potencial são geradas entre o início de abril e meados de maio (ESTEFEN, 2003).

A região na latitude de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, detém as ondas de maior intensidade energética do país. A frequência das ondas com potencial igual ou acima de 10 kW/m supera 79% do tempo. O menor potencial médio mensal registrado é de cerca de 20 kW/m e a média mensal alcança 32 kW/m. As ondas de maior potencial médio mensal são geradas a partir de abril, estendendo-se até agosto (ESTEFEN, 2003).

A Tabela 2 apresenta os resultados de período médio de altura significava de onda para as seis regiões do estudo em questão. A altura significava é a média da terça parte das ondas com maior altura registradas durante o tempo considerado.

Área (referência da latitude)	Latitude (°S)	Longitude (°N)	T (s)	Hs (m)	Pot (kW/m)
São Mateus - Vitória	19 – 21	37,59 – 38,94	8,35	1,81	15,55
Fundão - Campos	20 – 22	37,66 – 40,84	8,43	1,89	16,95
Rio de Janeiro	23 – 23,5	42,14 – 42,88	8,55	1,90	19,05
Santos - Curitiba	24 – 26	45,35 – 47,80	8,35	1,74	15,20
Florianópolis – Caxias do Sul	27 – 29	46,82 – 47,82	8,64	2,07	22,70
Porto Alegre – Rio Grande	30 – 32	48,32 – 49,40	8,93	2,37	32,50

Tabela 2 - Estimativa das propriedades físicas das ondas do litoral do Sudeste brasileiro. (ESTEFEN, 2003).

3.3. Modelagem Física

Modelos físicos são reproduções, usualmente em tamanho menor, dos sistemas físicos onde as forças dominantes representam, proporcionalmente, o sistema físico real. Em paralelo com os modelos físicos existem os modelos numéricos, que são a representação matemática dos sistemas físicos (HUGHES, 1993).

Os modelos estudados neste trabalho são os modelos físicos costeiros, ou marítimos, limitados ao estudo das ondas bidimensionais de laboratórios (canais de ondas). Os modelos físicos marítimos ainda podem ser tridimensionais (bacia ou tanque de ondas).

Os canais de ondas são utilizados para ensaios de estruturas e equipamentos que funcionam nas áreas oceânicas e costeiras. Usualmente, esses canais são extensos, com capacidade de simular alguns fenômenos marítimos, fundamentalmente as ondas geradas pelo vento. São necessárias instalações bastante específicas com a capacidade de gerar, propagar e absorver a energia advinda das ondas. A fidelidade da simulação é associada à qualidade da onda gerada, que depende diretamente do batedor de ondas. O batedor de ondas é uma das peças-chave do sistema que compõe o tanque e pode ser de vários tipos e configurações (MARTINS, 2003).

No desenvolvimento da Engenharia de Energia das Ondas, os modelos reduzidos dos dispositivos de extração de energia das ondas são testados em modelos marítimos (assim como na engenharia naval, onde modelos reduzidos de navios são testados em canais de ondas). Através desses modelos físicos pode-se prever o comportamento das obras e equipamentos associados ao empreendimento, em diversas situações de funcionamento. Outra grande finalidade dos modelos físicos é prover subsídios para modelos numéricos, ou ainda simular situações onde a modelagem numérica não oferece confiabilidade.

Os modelos simulam algumas condições naturais, mas não são uma cópia fiel de todos os processos físicos existentes no protótipo: devem ser escolhidos os agentes dominantes no processo físico e ignorados outros menos importantes.

3.3.1. Critérios de Semelhança

Os modelos podem ter *Semelhança Geométrica*, *Semelhança Cinemática* ou *Semelhança Dinâmica*.

Semelhança Geométrica – Na semelhança geométrica procura-se manter as mesmas proporções entre os diversos elementos geométricos, no modelo e no protótipo.

Semelhança Cinemática – A semelhança cinemática procura estabelecer relações entre espaço e tempo, onde a escala do tempo está atrelada à escala geométrica;

Semelhança Dinâmica – É o tipo mais importante de semelhança para fins de construção de modelos para usos nas engenharias. Neste caso, impõem-se simultaneamente relações de escalas geométricas, cinemáticas e de forças (dinâmicas). São identificados diversos números adimensionais, os quais podem ser interpretados como uma razão entre efeitos ou forças. Dois exemplos desses números são *Número de Reynolds*, que representa as forças de inércia e as forças viscosas, e o *Número de Froude*, que relaciona as forças de inércia e às forças gravitacionais. Nos modelos marítimos normalmente procura-se estabelecer igualdade entre o *Número de Froude* no modelo e no protótipo, visto que os efeitos gravitacionais são os mais relevantes comparados aos efeitos viscosos.

3.3.1.1. Semelhança Pelo Critério de Froude

O *Número de Froude* expressa a influência relativa entre forças inerciais e forças gravitacionais. Representa a importância das forças inerciais para uma determinada massa de fluido. É dado por:

$$\sqrt{\frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Gravitacionais}}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Eq. 55

Onde :

V = velocidade;

L = comprimento;

g = aceleração da gravidade.

A semelhança pelo critério de Froude leva a uma situação onde o *Número de Froude* no modelo e no protótipo deva ser o mesmo:

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_m$$

Eq. 56

o que leva a:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\left(\frac{g_p}{g_m}\right)\left(\frac{L_p}{L_m}\right)}$$

Eq. 57

Expressando em termos de fatores de escala N_i e fazendo os rearranjos necessários chega-se à expressão:

$$\frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = 1$$

Eq. 58

onde:

$N_V =$ Escala de Velocidades entre modelo e protótipo;

$N_L =$ Escala de Comprimentos entre modelo e protótipo;

$N_g =$ Escala de Gravidade entre modelo e protótipo.

Como para a maioria dos propósitos as *Escala de Gravidade* entre modelo e protótipo são consideradas iguais a 1, a Eq. 58 é reduzida à relação entre a *Escala de Tempo* e a *Escala Geométrica*, Eq. 59.

$$N_t = \sqrt{N_L}$$

Eq. 59

Isto quer dizer que, exemplificando, um modelo reduzido com *Escala Geométrica* 1:2, terá metade da dimensão física do protótipo, enquanto os tempos envolvidos serão reduzidos pela *Escala de Tempo* $1:\sqrt{2}$, ou seja, aproximadamente, 1:1,41.

3.3.2. Efeitos de Escala e de Laboratório

Efeitos de Escala

Em modelos reduzidos alguns fenômenos físicos não respeitam a escala escolhida, e são, por isso, normalmente negligenciados. Modelos que adotam o critério de semelhança de Froude aumentam a importância da viscosidade e da tensão superficial.

As espumas e formação de bolhas resultantes da arrebentação da onda, e a forma de arrebentação, por exemplo, não reproduzem no modelo a arrebentação na natureza.

As diferenças entre água salgada e água doce, normalmente também não são consideradas. As bolhas são menores em água salgada, o que faz com que elas permaneçam mais tempo em suspensão no mar, provocando correntes ascendentes, fenômeno que nos modelos físicos reduzidos não atende a nenhuma das escalas utilizadas.

Efeitos de Laboratório

Uma outra classe de efeitos surge em laboratório, consequência da imposição de limites ou de condições que não existem na natureza. Não se pode confundi-los com os efeitos de escala.

Quando as ondas atingem os limites sólidos do modelo elas são refletidas, retornam em direção ao batedor de ondas, onde são novamente refletidas. Essa reflexão múltipla das ondas é um efeito existente somente em laboratório, sem nenhum paralelo na natureza.

Instabilidades no batedor de ondas também podem gerar efeitos indesejados nas ondas criadas, como ondas capilares que venham a afetar as medidas e a correta representação dos fenômenos a serem estudados. As ondas podem também não serem devidamente geradas, quando há a existência de componentes transversais ao canal, que conceitualmente deve ter apenas ondas bidimensionais.

Ainda, em canais há a elevação no *nível do zero central* (elevação no nível médio do zero central entre a amplitude do cavado e da crista das ondas geradas) em direção à praia de dissipação, devido ao fato de não haver o espraimento lateral, encontrado nas praias reais, entre outros efeitos que podem ocorrer em instalações laboratoriais.

3.3.3. Batedores de Ondas

Os batedores de onda podem ser dos seguintes tipos: Pneumático, Cunha Oscilante (Plunger Type), Placa Basculante (Flap Type), Pistão (Piston Type), exemplificados na Figura 16, e podem também ser dos tipos: Flap Flexível e Flap Bi-articulado, ilustrados na Figura 17 e Figura 18.

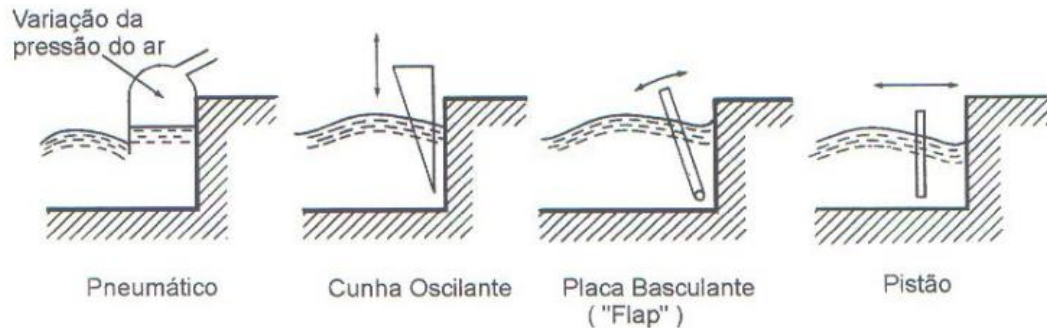


Figura 16 - Tipos de Batedores de Ondas (BHATTACHARYYA, 1978, adaptada).

O batedor tipo pneumático não possui partes mecânicas móveis em contato direto com a água e por isso é chamado de atuador passivo. As ondas por ele formadas se originam da variação alternada da pressão do ar dentro de uma câmara na forma de um domo, que é parcialmente imerso na água. Devido às limitações da válvula que controla a passagem do ar, o batedor pneumático não é adequado para a passagem de grandes volumes de ar em frequências acima de 1Hz, o que limita sua aplicação (MICHIMA, 2007).

As ondas geradas pelo atuador do tipo cunha surgem do movimento oscilatório vertical, em torno da linha d'água, de um corpo em forma de cunha. Devido ao fato de o movimento ser realizado na vertical, é necessário um espaço acima da parede do tanque para a estrutura de suporte e do sistema de acionamento maior do que o espaço requerido pelos demais sistemas. (MICHIMA, 2007). Os primeiros geradores desse tipo utilizavam uma seção triangular que, posteriormente, foi substituída por um seção parabólica, para uma melhor qualidade da onda gerada (QUADRANTE, 2001).

O atuador do tipo placa basculante (ou articulado no fundo) é constituído de uma chapa lisa e plana, estruturalmente rígida, apoiada em articulações dentro do tanque e parcialmente imersa na água. A geração de ondas se dá pela oscilação dessa placa em torno do ponto articulado. Esse tipo de atuador tem uma boa resposta ao sinal de entrada e sua capacidade de

geração de ondas é melhor para frequências altas. Atuadores desse tipo formam ondas com menos excitação na massa de água perto do fundo do que na superfície, sendo mais indicados para simulação de ondas em águas profundas. A potência de acionamento a ser instalada é uma das menores, pois, dado que todo o peso é apoiado no mancal, nenhuma estrutura de sustentação é necessária, tornando sua inércia baixa (MICHIMA, 2007).

Com o princípio de funcionamento análogo ao do atuador de placa basculante, o atuador do tipo pistão difere pelo movimento horizontal puro. Com a altura da placa abrangendo desde a superfície da lâmina d'água até o fundo, esse atuador não é adequado para ondas de águas profundas, uma vez que o deslocamento horizontal uniforme por toda a profundidade do tanque não representa o movimento real das partículas fluidas nessa condição de onda. Este sistema exige maior força física para deslocamento da massa fluida além de um sistema de guia para placa atuadora (MICHIMA, 2007).

Uma variação do tipo com placa basculante é a com placa flexível (Figura 17), que provoca o decaimento de velocidade da placa da mesma forma como ocorre no perfil de velocidades horizontal do fluido. Com isso não são geradas perturbações indesejadas, como ondas evanescentes (ondas capilares geradas pelo batedor que se dissipam durante a propagação das ondas no canal). Porém o mecanismo de atuação do *flap*, assim como a estrutura flexível, tornaram-se bastante complexos e conseqüentemente caros (QUADRANTE, 2001).

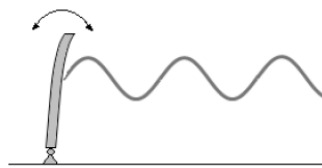


Figura 17 - Batedor tipo Flap-Flexível (QUADRANTE, 2001).

Outra variação do tipo placa basculante é o tipo Flap Bi-articulado (Figura 18), composto por dois flaps ligados por barras rígidas, porém apenas uma deles em contato com a água e possui uma guia na parte inferior, havendo portando velocidade na parte inferior, para casos em que elas não são desprezíveis. Seus mecanismos também são complexos dificultando sua aplicação prática (QUADRANTE, 2001).

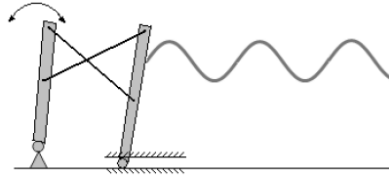


Figura 18 - Batedor tipo Flap Bi-articulado (QUADRANTE, 2001).

3.3.4. Curva do Batedor

A curva do batedor relaciona as diversas grandezas envolvidas da geração das ondas e nas ondas geradas. São plotadas as duas grandezas adimensionais H/S x h/gT^2 (onde S é o curso do batedor na linha d'água). Através dela pode-se analisar o funcionamento do batedor de ondas e prever futuras configurações de funcionamento e comportamento das ondas a serem geradas.

Dean e Dalrymple (1984), Kamphuis (2000) e Hughes (1993) apresentam o desenvolvimento da equação para obtenção dos valores de H/S , na linha d'água, para batedores tipo placa basculante, considerando-se o pivotamento da placa no fundo do canal (Eq. 60).

$$\frac{H}{S} = 4 \left(\frac{\sinh kh}{kh} \right) \frac{kh \sinh kh - \cosh kh + 1}{\sinh 2kh + 2kh}$$

Eq. 60

Contudo, o que se tem na prática, na maioria dos canais de ondas, é o pivotamento apoiado em um suporte ou degrau, elevando-se a cota do pivotamento. Essa variação de cota ΔV do pivotamento é considerada na Eq. 61, desenvolvida por Cerdeira (2006).

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \tanh kh \left[\sinh kh + \frac{\cosh \Delta V - \cosh kh}{kh} \right] \cosh kh}{2kh + \sinh 2kh}$$

Eq. 61

3.3.5. Reflexão de Ondas

Quando a onda encontra uma parede vertical, rígida e impermeável, ela é quase completamente refletida. Após algum tempo, sob condições controladas, as ondas refletidas e incidentes juntas formam uma onda estacionária (Figura 19).

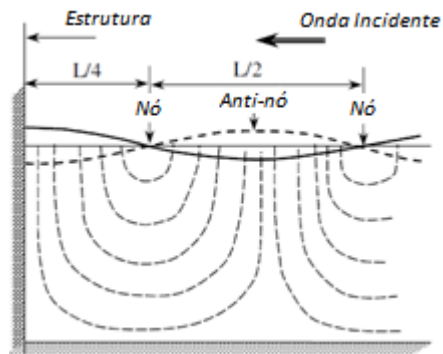


Figura 19 – Ondas estacionárias (KAMPHUIS, 2000, adaptada).

Por outro lado, se a onda incide sobre uma superfície inclinada, flexível, ou porosa, ela será parcialmente refletida. Isso leva a uma onda estacionária que varia sua altura com a distância. O formato resultante da onda pode ser usado para estimar o coeficiente de reflexão e altura de onda incidente (KAMPHUIS, 2000).

Quando são realizados ensaios em canais de ondas verifica-se que as ondas refletidas nos modelos e na praia de absorção sobrepõem-se à incidente (reflexão). Quando as ondas refletidas atingem o batedor de ondas, essas são refletidas novamente (re-reflexão). Isto não tem semelhança com a natureza, onde a agitação refletida é perdida ao largo (CAPITÃO, 2001).

Os canais de ondas podem ser equipados com absorvedores de ondas do tipo passivo (praias de absorção) compostos de brita, ou de superfícies lisas ou porosas, de madeira, alvenaria ou outro material, inclinadas como rampas planas ou parabólicas. Podem, também, ser equipados com absorvedores do tipo ativo, que funcionam em sincronismo com o batedor de onda, movimentando-se com a mesma amplitude e período do batedor, mas com defasamento de 180° (ou outro que venha ser conveniente).

Em casos de ensaios com dispositivos de conversão de energia, será importante extrair-se a agitação incidente da medida em frente ao modelo, para obtenção da relação entre a energia incidente e energia aproveitada. Capitão (2001) apresenta a descrição completa do *Método das M Sondas*, utilizado no algoritmo do SAM-MOD-5 para a separação do espectro incidente e refletido. SAM-MOD-5 é empregado neste trabalho para cálculo dos coeficientes de reflexão. No

Anexo 1 – Pacote de Softwares SAM, Anexo 1.1. MOD-5-Análise da Reflexão, está descrita a forma de manipulação do software.

3.4. Instrumentação

3.4.1. Sensores de Altura de Onda

O funcionamento dos sensores de altura de onda é baseado na medida da condutividade entre dois eletrodos paralelos (rígidos, finos, em aço inoxidável) parcialmente imersos na água. A variação do nível d água em contato com as hastes provoca a variação da condutividade elétrica. As sondas estão conectadas ao amplificador de sinais, com a saída em voltagem, proporcional ao nível da superfície livre da água. Esses sensores são sensíveis a sujeira, temperatura e à formação de meniscos por tensão superficial. Devem ser limpos e calibrados sempre.

O sinal em volts é enviado para uma placa de aquisição de dados que digitaliza a variação da voltagem a uma taxa escolhida no software, a critério do usuário. A Figura 20 ilustra o esquema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.



Figura 20 – Esquema da instrumentação utilizada (sondas resistivas).

Os sensores utilizados são do fabricante DHI, sendo as sondas do tipo 202. As sondas são conectadas a módulos amplificadores, DHI-102E, e esses a uma placa de aquisição de dados National Instruments USB 6008. O software utilizado para aquisição dos dados foi o National Instruments LabView Signal Express. A partir desse software gera-se planilha no formato Microsoft Excel, onde é realizado o pós-processamento dos dados, confecção de gráficos e exportação dos dados utilização dos módulos SAM, onde as dados são analisados.

Foi utilizado também um sensor fabricado no IPH conectado a um amplificador Delft Hydraulics Laboratory Holland.

3.4.2. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV

Os Medidores Acústicos de Velocidade por Efeito Doppler (ADV) usam o Efeito Doppler para medir velocidade. Esse efeito acontece quando uma fonte sonora está se movendo com relação a um receptor, e a frequência do som no receptor muda segundo a equação (SONTEK, 1999):

$$F_{doppler} = -F_{fonte}(V_r/C_s)$$

Onde:

$F_{doppler}$ = Frequência alterada pelo Efeito Doppler;

F_{fonte} = Frequência original transmitida pela fonte;

V_r = Velocidade relativa entre a fonte e o receptor;

C_s = Velocidade do Som.

Os ADVs promovem medições precisas, rápidas e tridimensionais em um volume de controle posicionado a 5 cm do transmissor. Não são necessárias calibrações e apresentam ótimos resultados para escoamentos lentos, que é o caso das ondas em um canal (SONTEK, 1999).

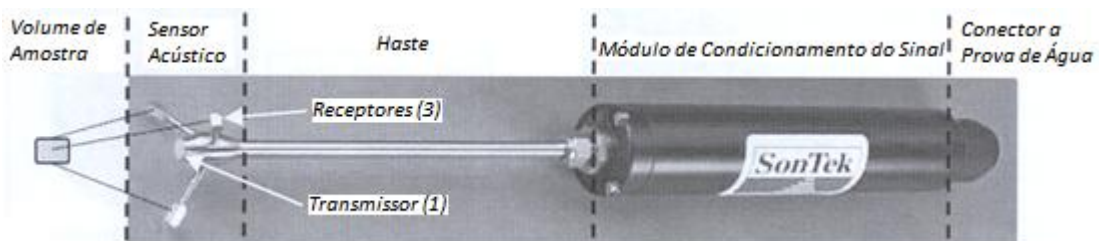


Figura 21 - ADV Sontek. (SONTEK, 1999) adaptado.

O transmissor emite dois pulsos de som a uma frequência e com uma defasagem conhecidas. Os pulsos se propagam através da água na direção do volume de controle de medição. Neste ponto a energia acústica é refletida em todas as direções pelas partículas na água (sedimento, traçadores, pequenos organismos, bolhas, etc). Uma porção da energia encontra os

receptores que processam eletronicamente a diferença de fase e de frequência entre os pulsos, que é proporcional à velocidade das partículas na água (SONTEK, 1999).

Faixa de velocidades

Um dos parâmetros mais importantes a serem escolhidos na preparação para as medições é a faixa de velocidades, que determina a maior velocidade que pode ser lida pelo aparelho. Em geral escolhe-se a menor faixa onde o maior valor esperado esteja contido. Isso porque o ruído resultante nos dados será proporcional à faixa de velocidades. Grandes faixas de velocidades gerarão altos valores de ruídos. Nos ADVs utilizados neste trabalho as faixas de velocidades podem ser ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , e ± 250 cm/s. Esses valores são nominais, os valores máximos de pico dependem da direção do escoamento em relação ao sensor. A Tabela 3 apresenta as recomendações do fabricante *Sontek* (SONTEK, 1999).

Faixa de Velocidades	Velocidade Horizontal Máxima	Velocidade Vertical Máxima
± 3 cm/s	± 30 cm/s	± 8 cm/s
± 10 cm/s	± 60 cm/s	± 15 cm/s
± 30 cm/s	± 120 cm/s	± 30 cm/s
± 100 cm/s	± 300 cm/s	± 75 cm/s
± 250 cm/s	± 360 cm/s	± 90 cm/s

Tabela 3 – Recomendações de faixas de velocidades (SONTEK, 1999).

Precisão

A precisão dos ADVs com a calibração de fábrica é de $\pm 1\%$ da velocidade medida. Isso representa os limites dos procedimentos de calibração para determinar o alinhamento do transmissor e dos receptores acústicos (SONTEK, 1999).

Dois fatores podem influenciar a precisão: a velocidade do som, que é um dado de entrada no software dos ADVs e a geometria dos receptores/transmissor, que sendo acidentalmente alterada, perde-se a calibração de fábrica (SONTEK, 1999).

SNR- Signal to Noise Ratio

Signal to Noise Ratio – SNR – é um parâmetro que permite verificar se há partículas suficientes na água para que haja a reflexão dos pulsos acústicos. Para medidas de alta resolução (25Hz) é recomendado que se mantenha o SNR no mínimo de 15 dB. Para baixas frequências (0,5Hz) SNR é aceitável em torno de 5 dB. Em situações onde os sedimentos são conhecidos, este parâmetro pode ser usado para medida de concentração (SONTEK, 1999).

COR – Correlação

Correlação – COR – também é um parâmetro que permite avaliar a qualidade das medidas realizadas. São calculados automaticamente pelo software dos ADVs três valores de COR, um para cada componente da velocidade nas direções XYZ, expressos em porcentagem:

- Perfeita Correlação de 100% indica medida confiável, com baixo nível de ruído;
- 0% indica que todo o sinal é ruído.

Os valores de COR recomendados devem ficar entre 100% e 70%. Valores abaixo de 70% indicam que o ADV está operando em uma situação de difícil medição: o sensor está fora d água, os valores de SNR estão muito baixos ou há algum problema nos aparelhos (SONTEK, 1999).

3.4.2.1. ADVs Utilizados

Foram Utilizados dois MicroADV's Sontek de 10MHz do Tipo ADVLab que são conectados internamente ao CPU, cada um com uma placa tipo ISA. Um ADV é do tipo *Down Look* e o outro *Side Look*. O Volume de medição encontra-se a 5cm do transmissor acústico.

Os ADVs estão conectados ao computador através de duas placas internas, fornecidas juntamente com os sensores. O software usado para aquisição de dados é o ADVLab software, também fornecido juntamente com os equipamentos. Após gravados os dados são lidos pelo software WinADV32, que oferece opções de filtragem e exibições gráficas, porém nenhum filtro foi utilizado nesse momento, sendo esse software utilizado somente para conversão dos dados para que possam ser pós-processados no Microsoft Excel.

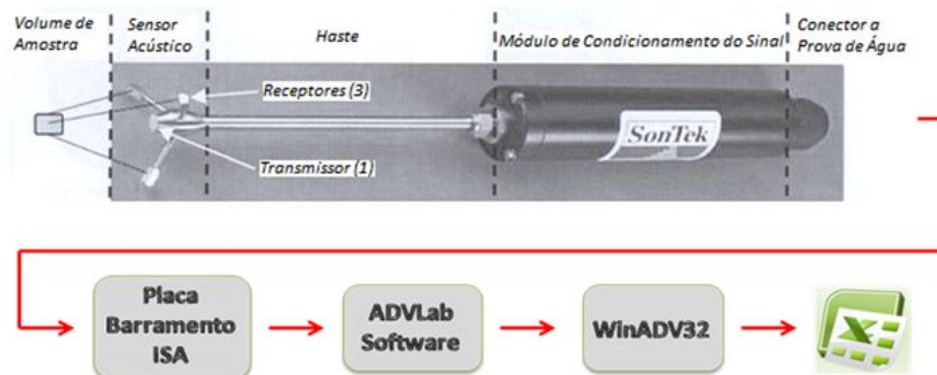


Figura 22 – Esquema da instrumentação utilizada (ADV's) (SONTEK, 1999).

3.5. Análise das Ondas – Análise Temporal e Espectral

Dados de ondas, numericamente gerados, coletados na natureza ou em modelos físicos em canais e tanques devem ser analisados por meio de *Análises Temporais* ou *Análises Espectrais*. O método de análise no tempo começa definindo-se as ondas individualmente, utilizando um certo critério de definição de onda, e depois calcula-se uma série de valores estatísticos sobre todo o registro. Por outro lado, uma abordagem completamente diferente é realizada fazendo-se a análise espectral das séries temporais. O espectro do registro, que representa a maneira como a energia das ondas é distribuída ao longo de uma gama de componentes de frequência, é calculado. A partir dele uma série de parâmetros pode ser determinada (ENDRES & CAPITÃO, 2010).

A análise temporal de uma amostra depende principalmente do critério de definição do que é a onda nas oscilações observadas da superfície livre da água, $\eta(t)$. O critério pode ser de *zero ascendente* ou de *zero descendente*, que consiste em identificar duas passagens consecutivas do nível da água pelo nível médio, zero, no sentido escolhido, ascendente ou descendente. A Figura 23 apresenta o critério utilizado nesse trabalho, o *zero ascendente*.

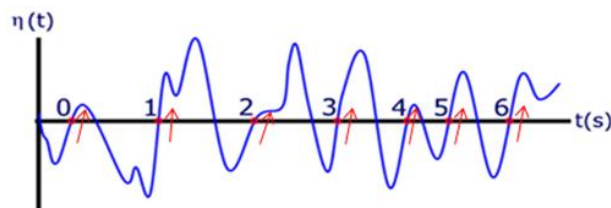


Figura 23 - Exemplo do critério de Zero Ascendente

A análise espectral é a conversão das funções temporais em funções de frequências, usando-se a *Transformada de Fourier*. Os parâmetros espectrais são calculados baseados nos momentos de ordem n do espectro (ENDRES & CAPITÃO, 2010).

4. Procedimentos Experimentais

Três ensaios foram realizados:

- 1- Ensaio 1: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IPH-UFRGS, onde são definidas as faixas de períodos e alturas de onda das ondas geradas no canal do IPH através de medidas de altura de onda e de velocidade das partículas de água. São obtidas as curvas para o batedor de ondas e os coeficientes de reflexão no canal.
- 2- Ensaio 2: Ensaio de modelo reduzido de placa atenuadora, realizado no IPH-UFRGS. A curva do batedor é aplicada para se obter o ajuste do curso e da frequência do batedor de ondas, para se obter a onda dimensionada através das escalas de Modelo x Protótipo. Uma placa de madeira e isopor é posicionada no canal de forma a funcionar como uma placa atenuadora de ondas. As ondas incidentes na placa e as ondas que atravessam a placa (ondas transmitidas) são medidas.
- 3- Ensaio 3: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IRN-UNIFEI. São obtidas as faixas de períodos e alturas de onda geradas no canal do IRN através de medidores de altura de onda. São obtidas as curvas para o batedor de ondas.

4.1. Ensaio 1: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IPH-UFRGS

Foram utilizados quatro medidores de altura e dois ADVs. A Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 apresentam as posições P_0 , P_1 , P_2 e P_3 , onde estão montados os sensores s_0 , s_1 , s_2 e s_3 , respectivamente. Nas posições P_1 e P_2 estão montados o ADV_0 e o ADV_1 , respectivamente. A profundidade durante os ensaios foi mantida como $h = 0,36\text{ cm}$, na parte rasa, e $h = 0,78\text{ cm}$, na parte profunda.

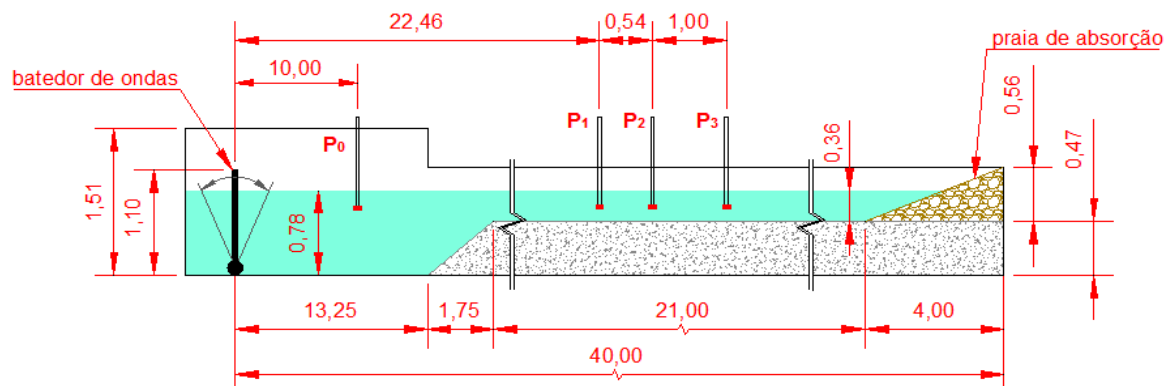


Figura 24 – Esquema de montagem dos sensores.

O medidor de altura s_0 tem o objetivo de medir a altura de onda na parte profunda do canal, enquanto os sensores s_1 , s_2 e s_3 medem na região mais rasa. Portanto é possível estudar a transformação que ocorre na onda quando há a redução da profundidade. Posicionados na mesma seção transversal dos medidores s_1 e s_3 estão o ADV_0 e o ADV_1 , respectivamente. A Figura 27 mostra os sensores montados. Pode-se observar nas figuras Figura 27 e Figura 28 os lançadores de traçador, para os ADVs, que dependem de certa opacidade da água para funcionarem corretamente.

O traçador utilizado foi uma mistura homogênea uma parte de Hidróxido de Magnésio para oito partes de água. O Hidróxido de Magnésio é comercialmente encontrado em farmácias e conhecido pelo nome de Leite de Magnésia.

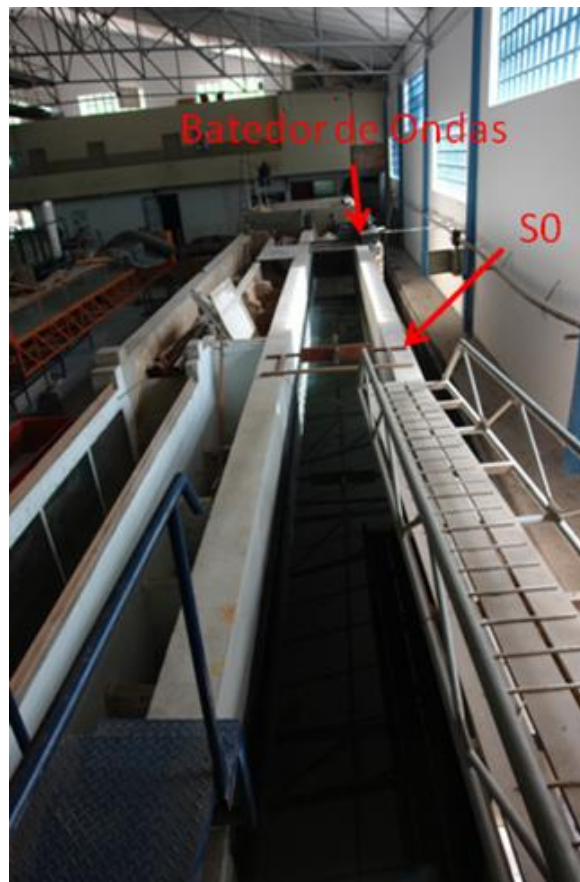


Figura 25 – Rampa de acesso, sensor S0 e batedor de ondas ao fundo.



Figura 26 – Sensores montados, canal em funcionamento.

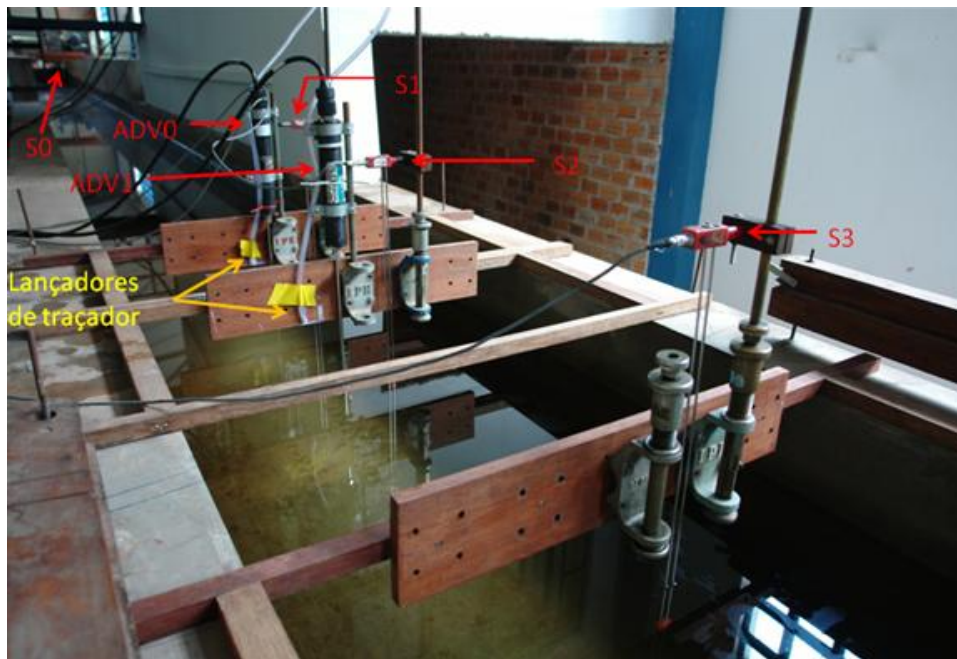


Figura 27 – Montagem dos sensores e mangueiras de traçador.

Os sensores são conectados a computadores instalados na cabine de medidas e estão apresentados nas figuras Figura 29 e Figura 29.



Figura 28 - Cabine de Medidas e Lançadores de Traçador.

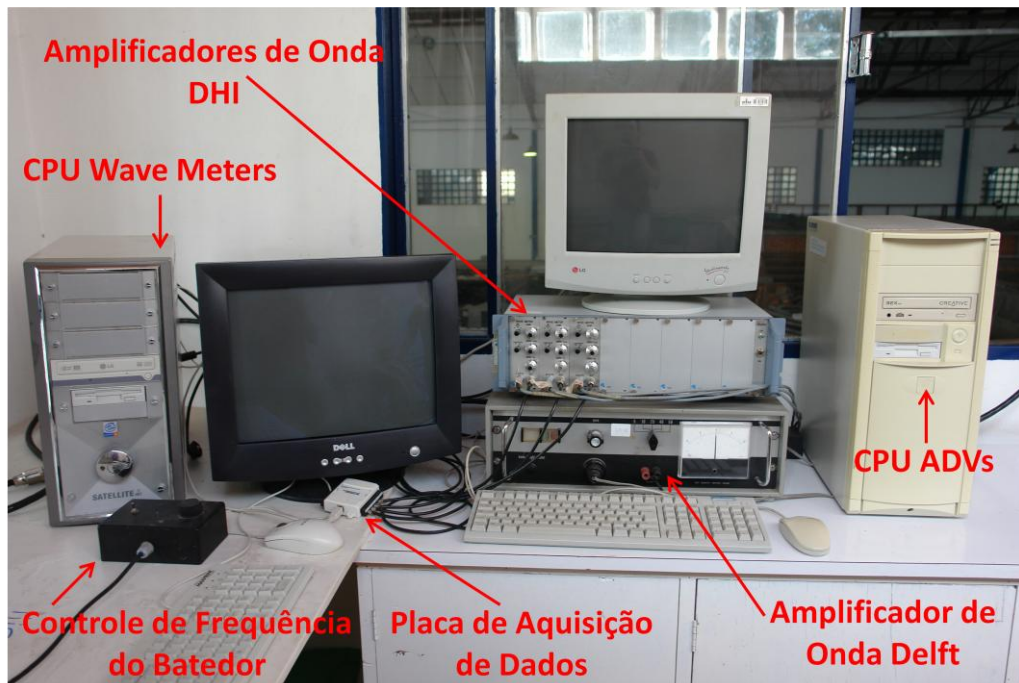


Figura 29 – Equipamentos na cabine de medições.

O controle da velocidade do batedor é obtido pelo dispositivo apresentado na Figura 29, que é conectado diretamente a um inversor de frequência, que controla a rotação de um motor elétrico (Figura 30)

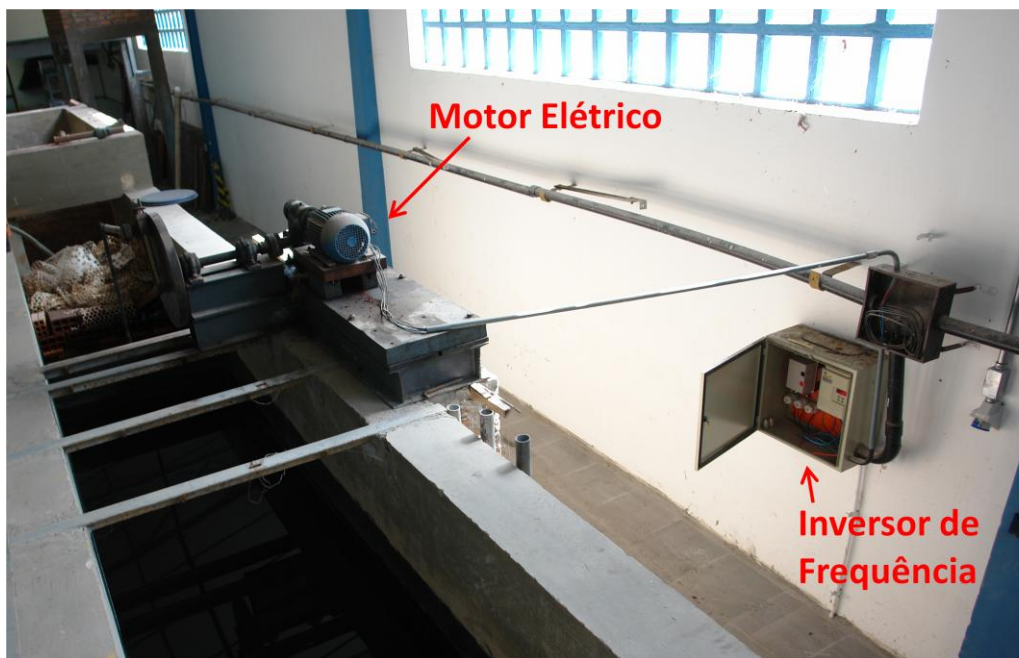


Figura 30 – Batedor de Ondas do IPH (a).

4.1.1. Procedimentos de Calibração do Sistema da Medição da Altura de Onda

Os sensores de duplo eletrodo metálicos são altamente suscetíveis às mudanças de temperatura, com conseqüente variação da leitura da condutividade elétrica. Quando os ensaios são demasiadamente longos, se estendendo ao longo do dia, ou quando há grandes variações da temperatura ambiente, mais de uma calibração pode ser necessária.

O procedimento de calibração em todos os ensaios realizados foi, com a água completamente em repouso, variar a imersão dos sensores em três posições: um zero central, uma posição acima e uma posição abaixo do zero central. Os suportes dos sensores possuem uma haste móvel, milimetrada, que permitem essa variação da altura dos sensores. O tempo de aquisição foi dez segundos e a uma taxa de aquisição 50Hz. (Figura 27).

Os pontos para calibração foram então padronizados e escolhidos como:

pc₁ - Posição do zero central: para s₀ em 15cm e para s₁, s₂ e s₃ em 55cm;

pc₂- Descem-se as sondas até as posições: para s₀ em 5cm e para s₁, s₂ e s₃ em 45cm;

pc₃- Elevam-se as sondas para: s₀ em 25cm e para s₁, s₂ e s₃ até 60cm;

pc₄- Retornam-se à posição central.

A resposta desses sensores é linear, e uma reta é esperada a partir da relação *Tensão x Comprimento*. O uso de quatro pontos se justifica porque muitas vezes não se consegue retornar aos valores originais de tensão do zero central, ou em alguns pontos pode ocorrer algum tipo de erro de leitura, o que pode ser facilmente verificado em um gráfico como o da Figura 31, que é um exemplo para o ensaio T1S1, sonda 1. Deve-se avaliar se os quatro pontos estão realmente alinhados através do parâmetro R² que deve apresentar valor 1 ou muito próximo de 1.

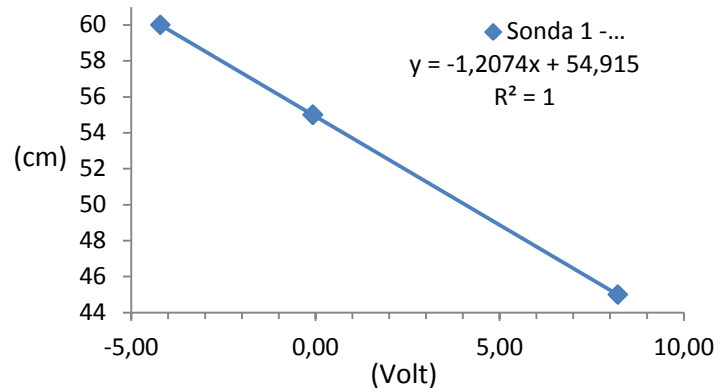


Figura 31 - Calibração da Sonda 1 ensaio T1S1.

4.1.2. Ensaio para caracterização do funcionamento de Canal de Ondas

Para a obtenção da curva do batedor foram medidas ondas de 4 períodos diferentes:

$$T_1 = 1,51s \pm 0,01; \quad T_2 = 1,38s \pm 0,01; \quad T_3 = 2,16 \pm 0,01s; \quad T_4 = 2,18 \pm 0,01s.$$

Fixando-se o período variou-se o curso do batedor. 4 cursos foram utilizados:

$$S_1 = 0,4m; \quad S_2 = 0,3m; \quad S_3 = 0,2m; \quad S_4 = 0,1m.$$

Com isso 16 pontos de funcionamento do batedor de ondas foram ensaiados, e as nomenclaturas para esse pontos são:

$$T_1S_1, T_1S_2, T_1S_3, T_1S_4; \quad T_2S_1, T_2S_2, T_2S_3, T_2S_4;$$

$$T_3S_1, T_3S_2, T_3S_3, T_3S_4; \quad T_4S_1, T_4S_2, T_4S_3, T_4S_4.$$

As variações de período são obtidas atuando-se no Controle de Velocidade do Batedor, apresentado na Figura 29. As variações de curso são obtidas movimentando-se o dispositivo instalado no batedor, apresentado na Figura 32.

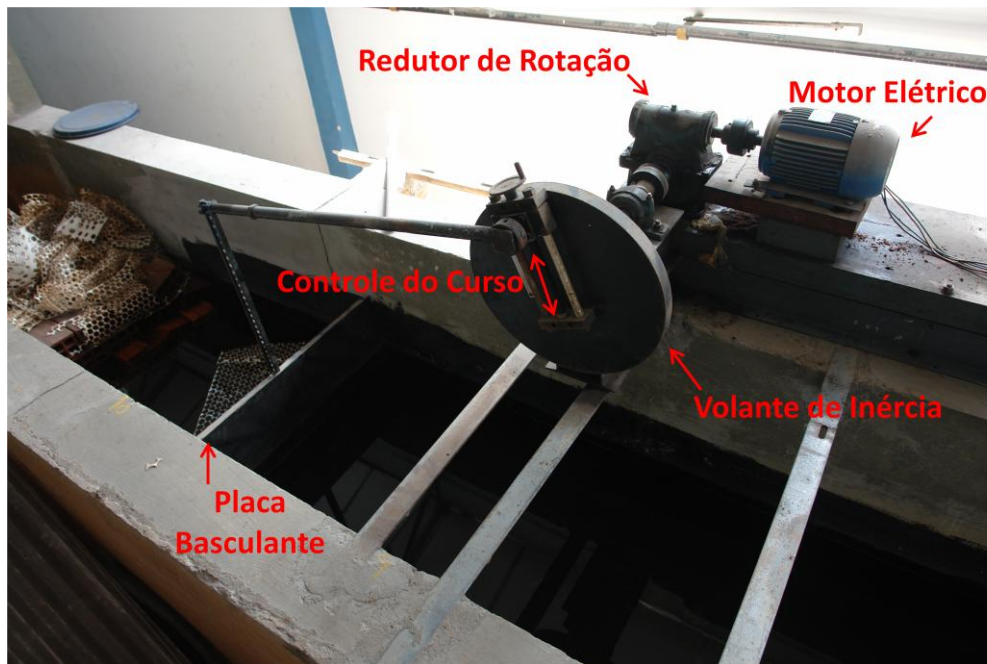


Figura 32 - Batedor de Ondas IPH (b).

Em todos os pontos ensaiados foram aquiritados dados por 180 segundos, ligando-se o batedor e iniciando-se as aquisições nos dois computadores no mesmo momento. Como não há um sincronismo automático entre os três acionamentos (batedor, CPU1 e CPU2) buscou-se um sincronismo manual. Aos 150 segundos de ensaio desligou-se o batedor. Registra-se, portanto, todo o desenvolvimento das ondas, desde o estado de repouso e depois com a hidrodinâmica desenvolvida. Após o desligamento do batedor registra-se o decaimento das ondas.

Em todos os ensaios atentou-se por aguardar um tempo de tranquilização total da agitação do canal, adotado como 5 minutos, definido por um critério visual. Isso é muito importante para que reflexões de um ensaio anterior não influenciem no ensaio posterior.

4.1.3. Análise dos Dados e Resultados

A seguir são apresentadas as amostras temporais obtidas através da aquisição de dados do sensor de altura de ondas s1 (Figura 33 até a Figura 47). Nessas figuras podem se observar os transientes no começo da formação das ondas, quando o batedor de ondas começa a atuar. Quando as ondas atingem a altura máxima elas se propagam sem sofrer a ação de reflexões (ondas incidentes) por um tempo em torno de 10 segundos, variando com o período. Por fim há o

transiente de atenuação das ondas através da gravidade, quando há o desligamento do batedor de ondas. Os gráficos foram gerador no SAM-MOD-6.

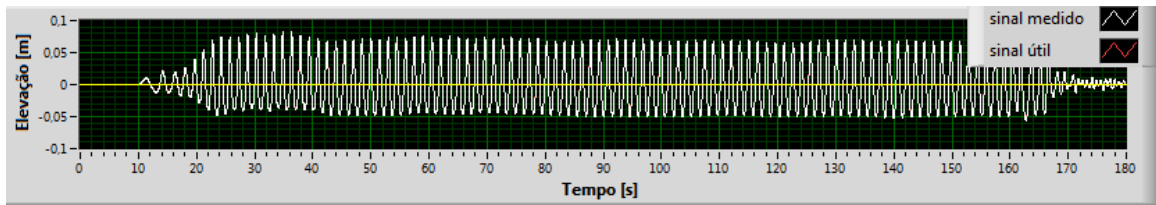


Figura 33 – Amostra temporal completa - T1S1 – $H_s = 0,118\text{m}$; $T = 1,517\text{s}$

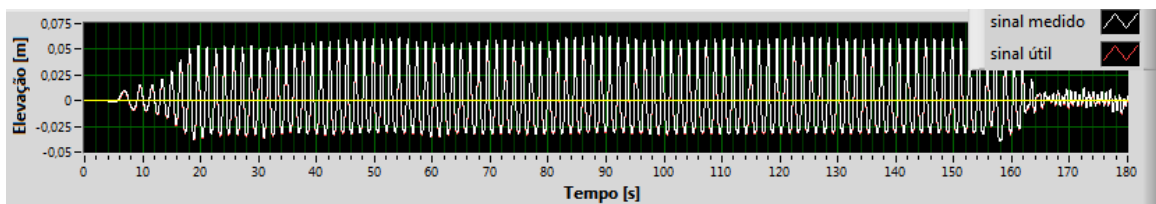


Figura 34 – Amostra temporal completa - T1S2 – $H_s = 0,0866\text{m}$; $T = 1,516\text{s}$

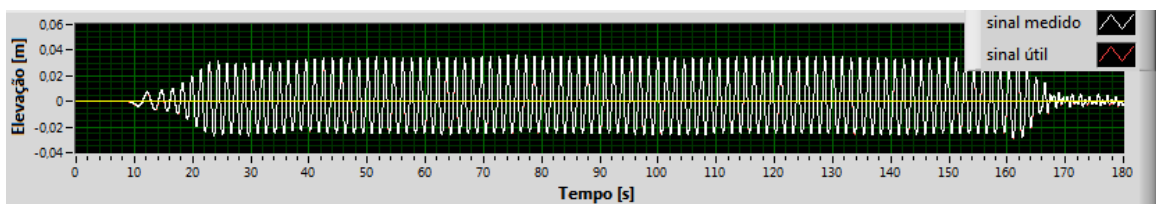


Figura 35 – Amostra temporal completa - T1S3 – $H_s = 0,0568\text{m}$; $T = 1,503\text{s}$

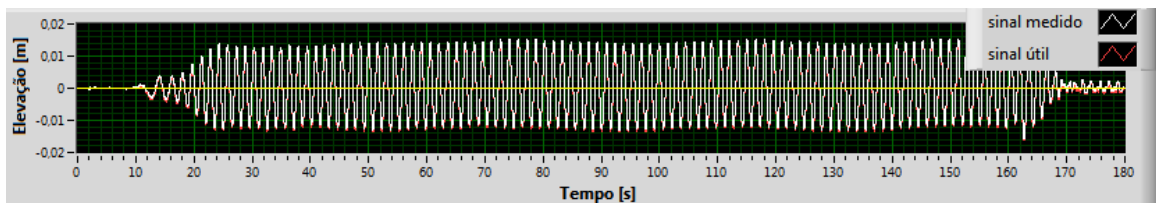


Figura 36 – Amostra temporal completa - T1S4 – $H_s = 0,0245\text{m}$; $T = 1,52\text{s}$

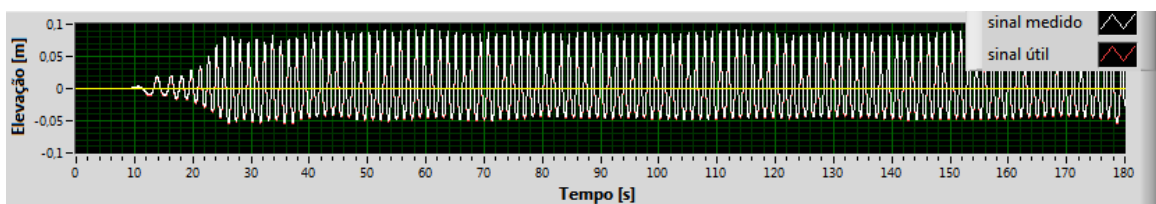


Figura 37 – Amostra temporal completa - T2S1 – $H_s = 0,129$; $T = 1,383\text{s}$

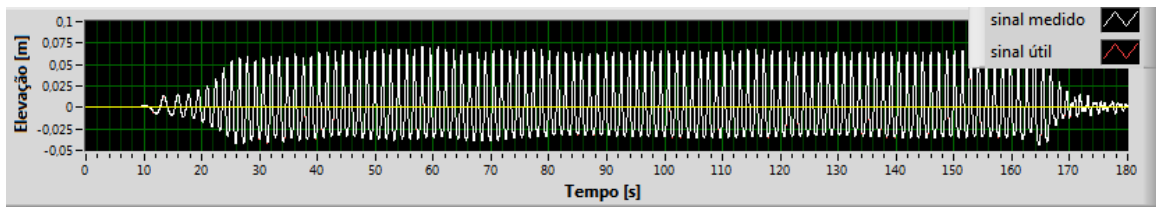


Figura 38 – Amostra temporal completa - T2S2 – $H_s = 0,0997\text{m}$; $T = 1,377\text{s}$

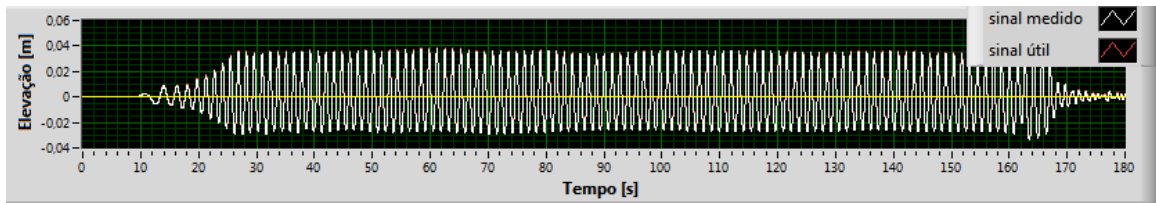


Figura 39 – Amostra temporal completa - T2S3 – $H_s = 0,0628\text{m}$; $T = 1,377\text{s}$

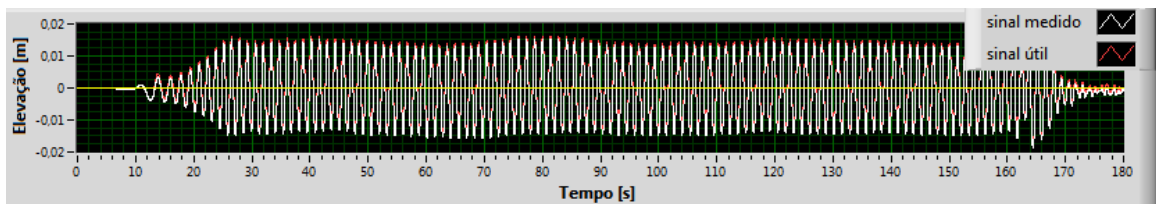


Figura 40 – Amostra temporal completa - T2S4 – $H_s = 0,0282\text{m}$; $T = 1,37\text{s}$

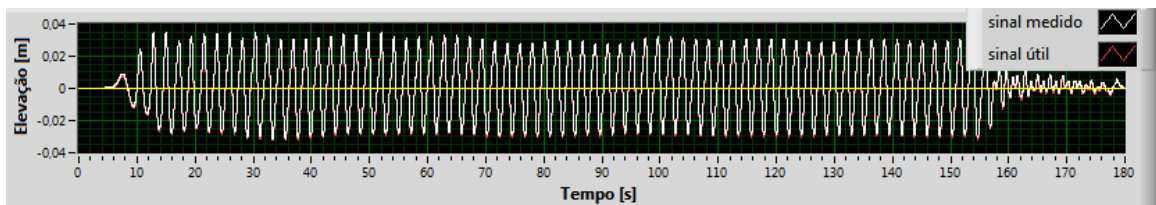


Figura 41 – Amostra temporal completa - T3S1 – $H_s = 0,061\text{m}$; $T = 2,14\text{s}$

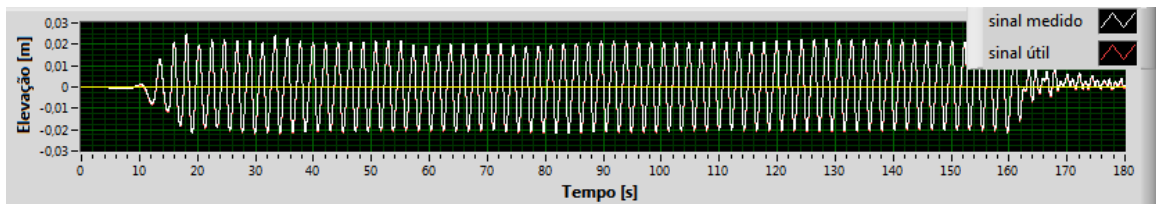


Figura 42 – Amostra temporal completa - T3S2 – $H_s = 0,0427\text{m}$; $T = 2,145\text{s}$

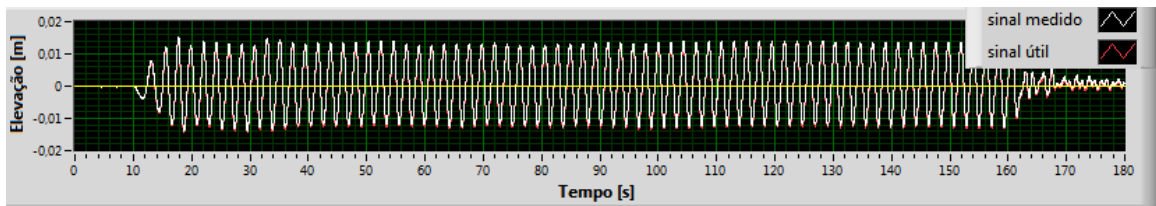


Figura 43 – Amostra temporal completa - T3S3 – $H_s = 0,0266\text{m}$; $T = 2,153\text{s}$

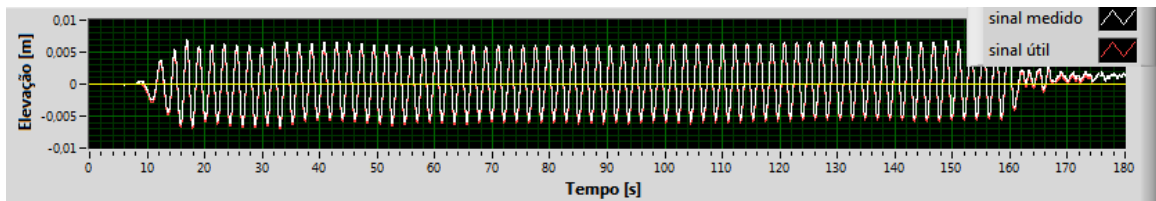


Figura 44 – Amostra temporal completa - T3S4 – $H_s = 0,0123\text{m}$; $T = 2,185\text{s}$

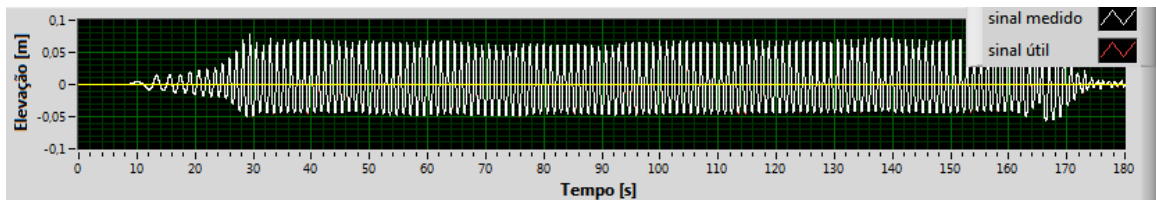


Figura 45 – Amostra temporal completa - T4S2 – $H_s = 0,114\text{m}$; $T = 1,177\text{s}$

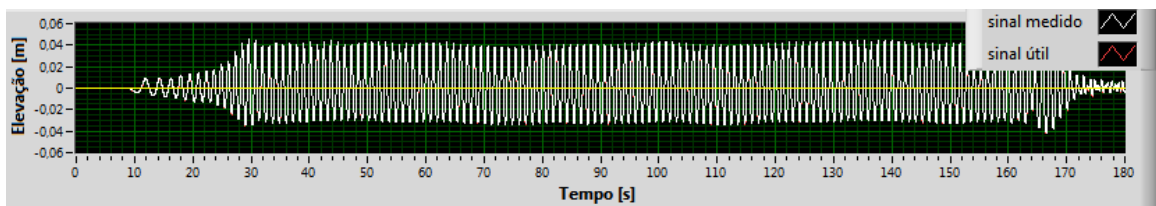


Figura 46 – Amostra temporal completa - T4S3 – $H_s = 0,0735\text{m}$; $T = 1,18\text{s}$

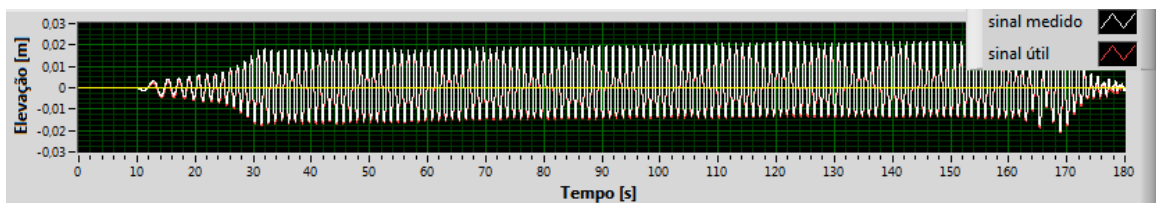


Figura 47 – Amostra temporal completa - T4S4 – $H_s = 0,0341\text{m}$; $T = 1,174\text{s}$

4.1.3.1. Onda Incidente

Uma vez que o canal de ondas possui dimensões limitadas, as ondas que nele propagam estão sob a ação de reflexões em suas extremidades. Para interpretar as ondas geradas em um canal é interessante poder ter acesso às ondas incidentes, antes que haja a ocorrência de qualquer

reflexão. Para tanto deve-se conhecer as celeridades de propagação das ondas e dos grupos de ondas. Aqui foi calculada a celeridade C_g do grupo de ondas através da Eq. 12. Pode-se então determinar qual o tempo necessário para as ondas alcançarem os sensores, e posteriormente, o tempo necessário para que a onda reflita na praia de absorção e volte a atingir os sensores. A situação mais crítica é a do sensor 3, que está posicionado numa maior distância do batedor, levando mais tempo para que a onda incidente o atinja, e mais próximo da praia de absorção, tendo-se o menor tempo até que a ação das reflexões estejam ocorrendo nessa posição. A Figura 48 apresenta os tempos os quais as ondas levam para atingir o sensor 3, a partir do momento da partida do batedor de ondas, assim como os tempos que decorrem até que as ondas refletidas voltam até essa mesma posição. Com isso é possível definir, para todos os períodos ensaiados, qual é a janela temporal na qual as ondas não estão sob a ação de reflexões, para todos os sensores, já que a posição do sensor 3 é a mais crítica. Entre as duas curvas de tempos limite apresentadas as ondas são puramente incidentes, sem reflexões. Com o intuito de simplificar a análise de dados definiu-se a janela temporal de duração de 10 segundos para todos os períodos e sensores.

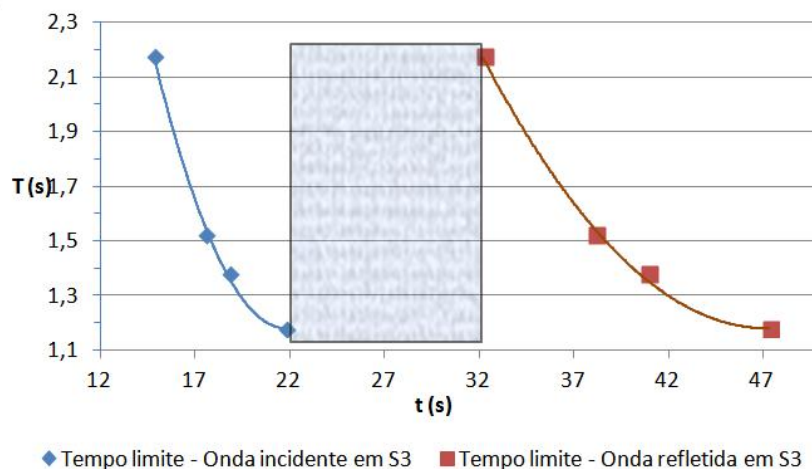


Figura 48 - Janela Temporal de Onda Incidente

Da Figura 49 até Figura 63 tem-se apresentadas as amostras de onda incidente selecionadas para o sensor de altura de onda s_1 . A seleção foi feita também para os sensores s_0 , s_2 e s_3 , para que pudesse ser feita a correta análise temporal das ondas registradas.

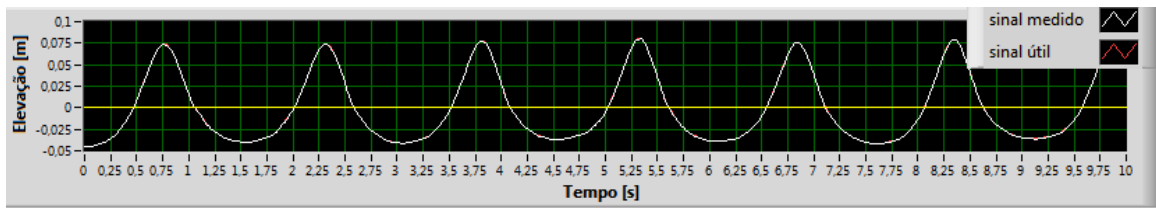


Figura 49 – Amostra de onda incidente - T1S1 – $H_s = 0,118\text{m}$; $T = 1,517\text{s}$

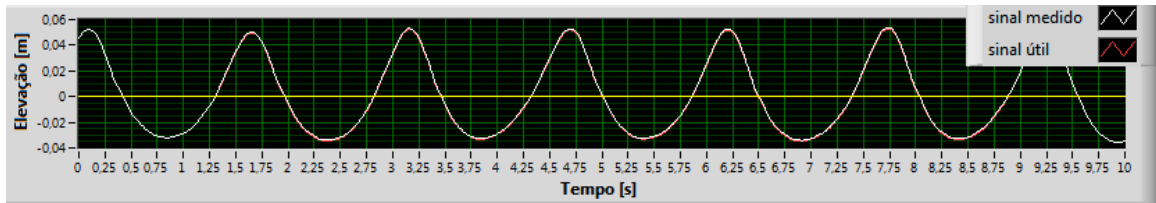


Figura 50 – Amostra de onda incidente - T1S2 – $H_s = 0,0866\text{m}$; $T = 1,516\text{s}$

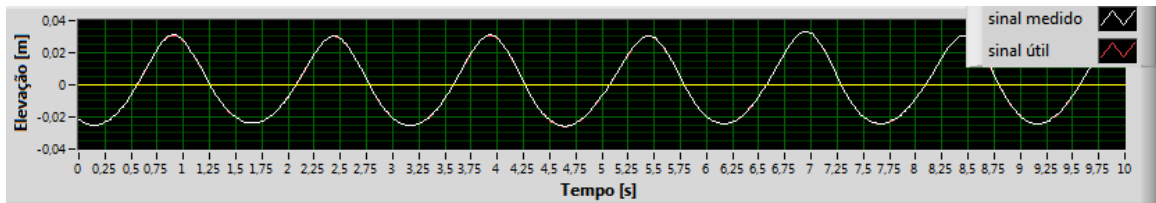


Figura 51 – Amostra de onda incidente - T1S3 – $H_s = 0,0568\text{m}$; $T = 1,503\text{s}$

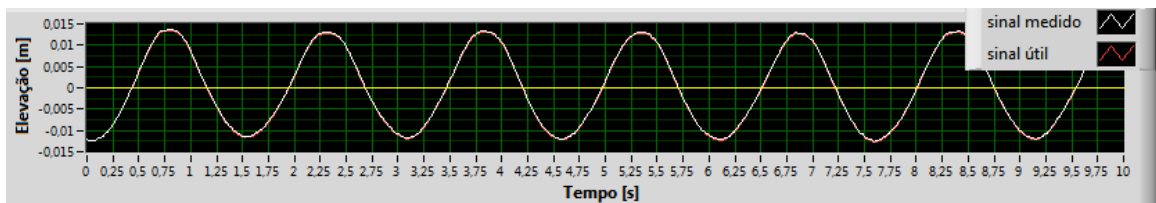


Figura 52 – Amostra de onda incidente - T1S4 – $H_s = 0,0245\text{m}$; $T = 1,52\text{s}$

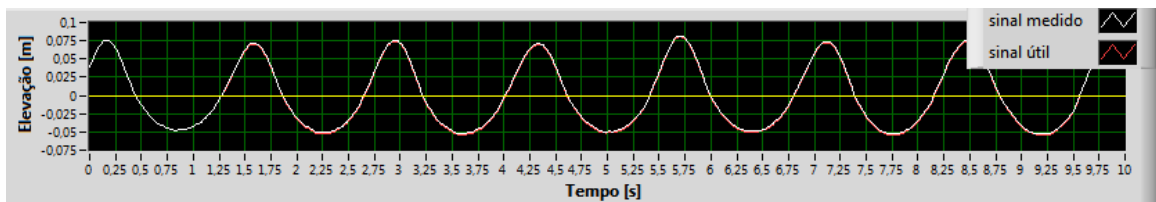


Figura 53 – Amostra de onda incidente - T2S1 – $H_s = 0,129$; $T = 1,383\text{s}$

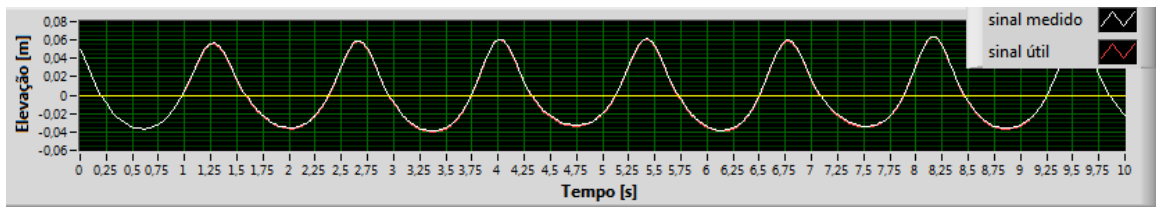


Figura 54 – Amostra de onda incidente - T2S2 – $H_s = 0,0997\text{m}$; $T = 1,377\text{s}$

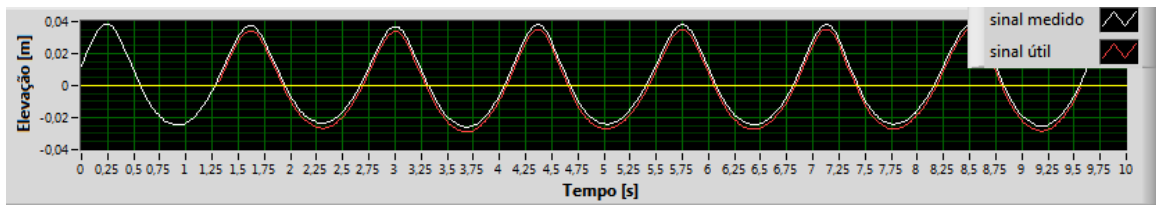


Figura 55 – Amostra de onda incidente - T2S3 – $H_s = 0,0628\text{m}$; $T = 1,377\text{s}$

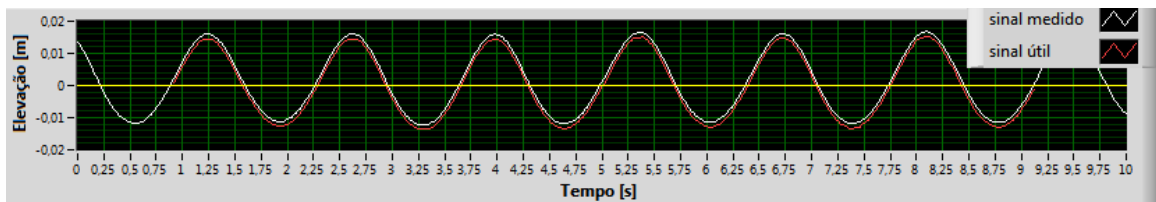


Figura 56 – Amostra de onda incidente - T2S4 – $H_s = 0,0282\text{m}$; $T = 1,37\text{s}$

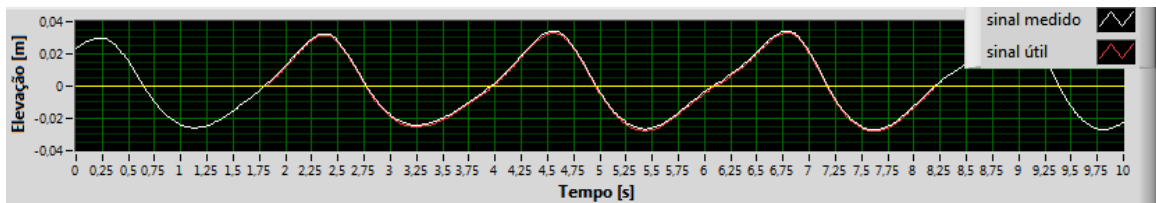


Figura 57 – Amostra de onda incidente - T3S1 – $H_s = 0,061\text{m}$; $T = 2,14\text{s}$

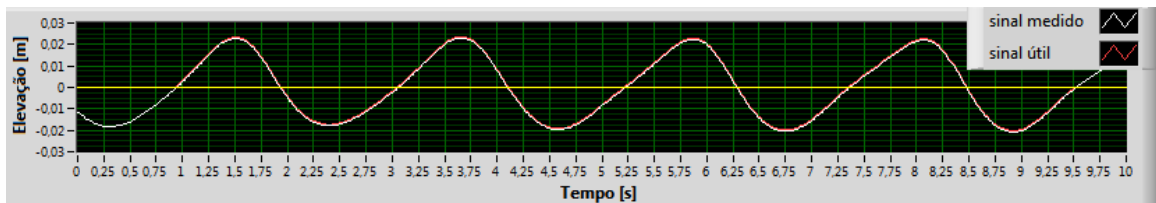


Figura 58 – Amostra de onda incidente - T3S2 – $H_s = 0,0427\text{m}$; $T = 2,145\text{s}$

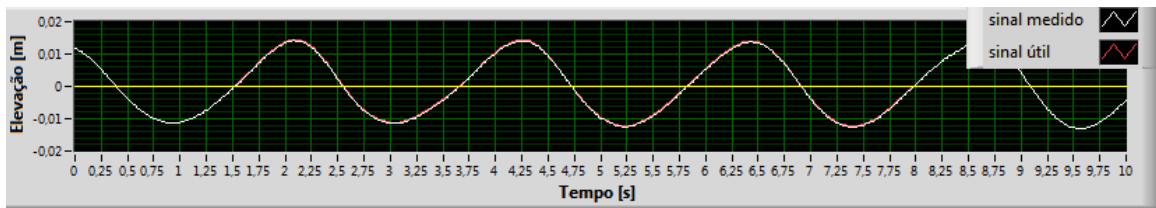


Figura 59 – Amostra de onda incidente - T3S3 – $H_s = 0,0266\text{m}$; $T = 2,153\text{s}$

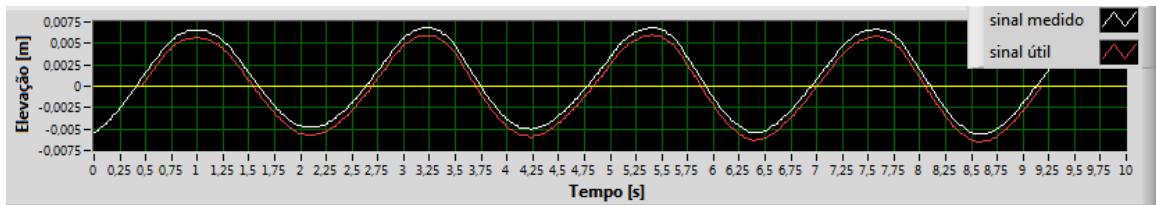


Figura 60 – Amostra de onda incidente - T3S4 – $H_s = 0,0123\text{m}$; $T = 2,185\text{s}$

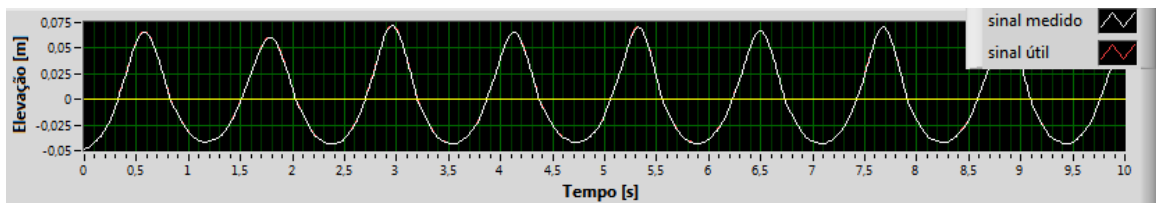


Figura 61 – Amostra de onda incidente – T4S2 - $H_s = 0,114\text{m}$; $T = 1,177\text{s}$

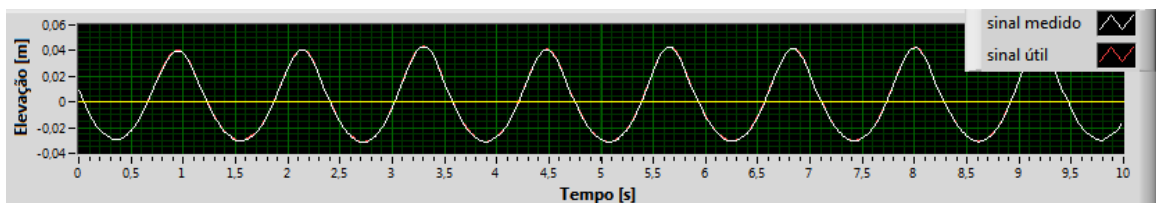


Figura 62 – Amostra de onda incidente - T4S3 – $H_s = 0,0735\text{m}$; $T = 1,18\text{s}$

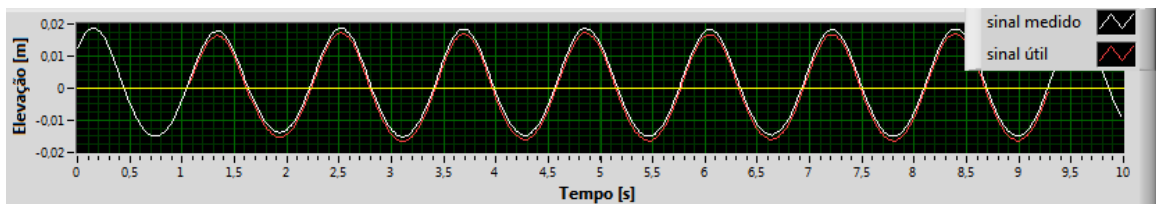


Figura 63 – Amostra de onda incidente - T4S4 – $H_s = 0,0341\text{m}$; $T = 1,174\text{s}$

4.1.3.2. Resultado da Análise Temporal

Com a seleção das amostras de onda incidente, fez-se a análise temporal SAM-MOD-6 buscando-se os valores de Altura Significativa de Onda (H_s) e Período médio (T). A Tabela 4

apresenta os resultados dessa análise, com a apresentação dos valores médios calculados para os três sensores. A energia e a potência das ondas forma calculados a partir das equações Eq. 51 e Eq. 52. Os comprimentos de onda foram calculados implicitamente no software Excel.

	Hs s_1 (m)	Hs s_2 (m)	Hs s_3 (m)	Hs médio (m)	T s_1 (s)	T s_2 (s)	T s_3 (s)	T médio (s)	L médio (m)	E média (J)	F médio (W)
T1S1	0,118	0,112	0,119	0,116	1,52	1,51	1,51	1,51	2,558	42,46	22,63
T1S2	0,0866	0,0846	0,0862	0,0858	1,52	1,52	1,52	1,52	2,565	23,14	12,32
T1S3	0,0569	0,0546	0,0562	0,0559	1,50	1,50	1,50	1,50	2,535	9,71	5,20
T1S4	0,0254	0,0259	0,0255	0,0256	1,52	1,52	1,52	1,52	2,565	2,06	1,10
T2S1	0,129	0,129	0,128	0,129	1,38	1,39	1,39	1,39	2,286	46,50	26,00
T2S2	0,100	0,098	0,099	0,0989	1,38	1,37	1,38	1,38	2,265	27,18	15,25
T2S3	0,0629	0,0633	0,0630	0,0631	1,38	1,38	1,37	1,38	2,266	11,05	6,20
T2S4	0,0283	0,0291	0,0285	0,0286	1,37	1,37	1,37	1,37	2,251	2,26	1,27
T3S1	0,0610	0,0546	0,0599	0,0585	2,14	2,17	2,14	2,15	3,849	16,18	6,77
T3S2	0,0428	0,0394	0,0422	0,0414	2,15	2,15	2,15	2,15	3,847	8,11	3,39
T3S3	0,0266	0,0256	0,0263	0,0262	2,15	2,18	2,16	2,16	3,877	3,26	1,35
T3S4	0,0123	0,0121	0,0123	0,0122	2,19	2,17	2,18	2,18	3,907	0,717	0,297
T4S2	0,114	0,114	0,115	0,114	1,18	1,18	1,18	1,18	1,837	29,35	17,61
T4S3	0,0735	0,0740	0,0733	0,0736	1,18	1,18	1,18	1,18	1,838	12,20	7,32
T4S4	0,0341	0,0334	0,0336	0,0337	1,17	1,17	1,18	1,17	1,829	2,55	1,53

Tabela 4 – resultado da Análise Temporal para s_1 , s_2 e s_3 (IPH).

4.1.3.3. Velocidades das Partículas de Água

Filtragem dos Dados

As medidas realizadas com os ADVs são muito suscetíveis às variações da densidade de partículas em suspensão na água durante os ensaios. Com isso, as medidas apresentam muita distorção e ruído, que não representam nenhum fenômeno físico de interesse, quando o objetivo é a leitura limpa das velocidades. Por este motivo aplica-se uma técnica de filtragem da amostra temporal das velocidades. A Figura 64 apresenta os dados brutos do ADV0 (V_{x0} , V_{y0} , V_{z0}) e após a aplicação do filtro (V_{x0} filt, V_{y0} filt, V_{z0} filt).

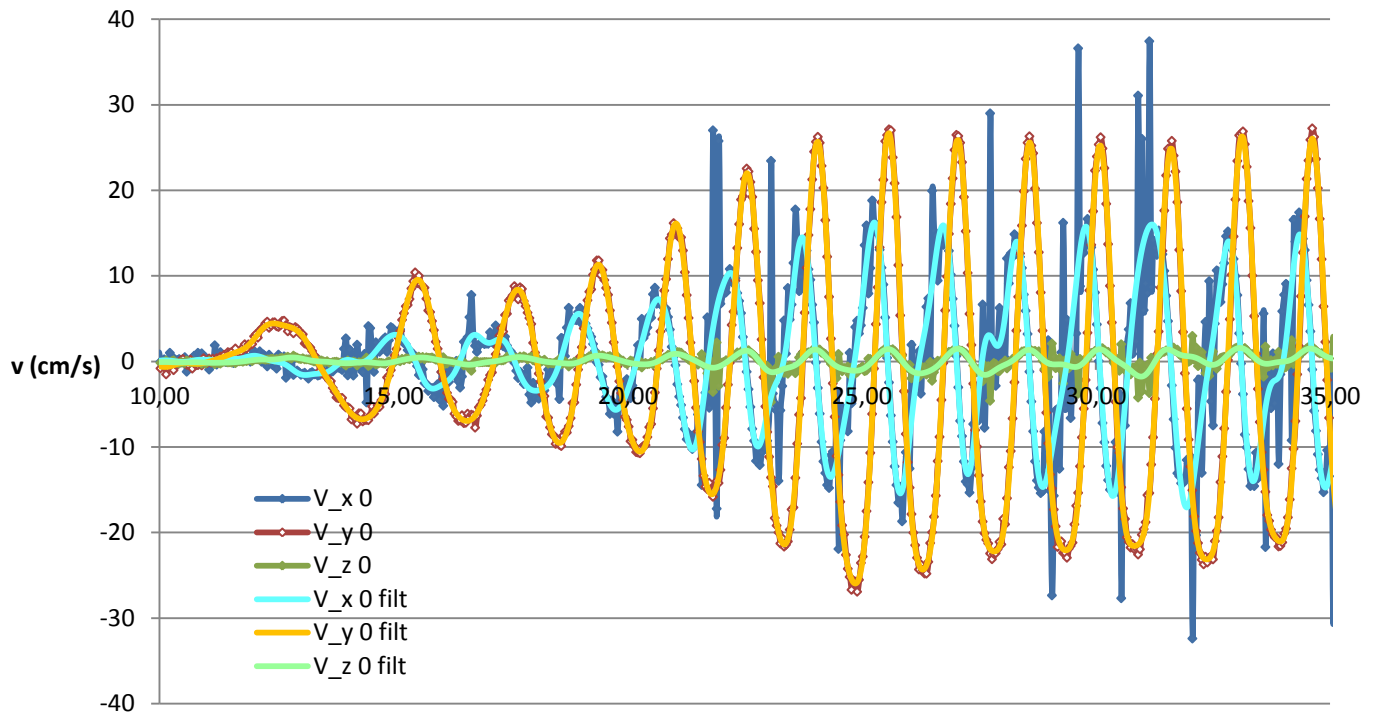


Figura 64 – Amostra do ADV – bruta e filtrada.

Para a criação dos filtros foi utilizado o programa desenvolvido por C. F. Neves para a obtenção do *Filtro de Thompsom*, em função dos períodos de corte superior e inferior, número de pesos e frequência dos dados.

Utilizando o diagrama da Figura 3 para classificar as condições dos ensaios, obtém-se a Figura 65, onde é possível perceber que as ondas em questão estão em sua maioria na região de aplicabilidade da teoria de Stokes de 2ª Ordem, o que indica a existência de componentes relevantes de segunda ordem, mas não apresentam componentes de terceira ordem.

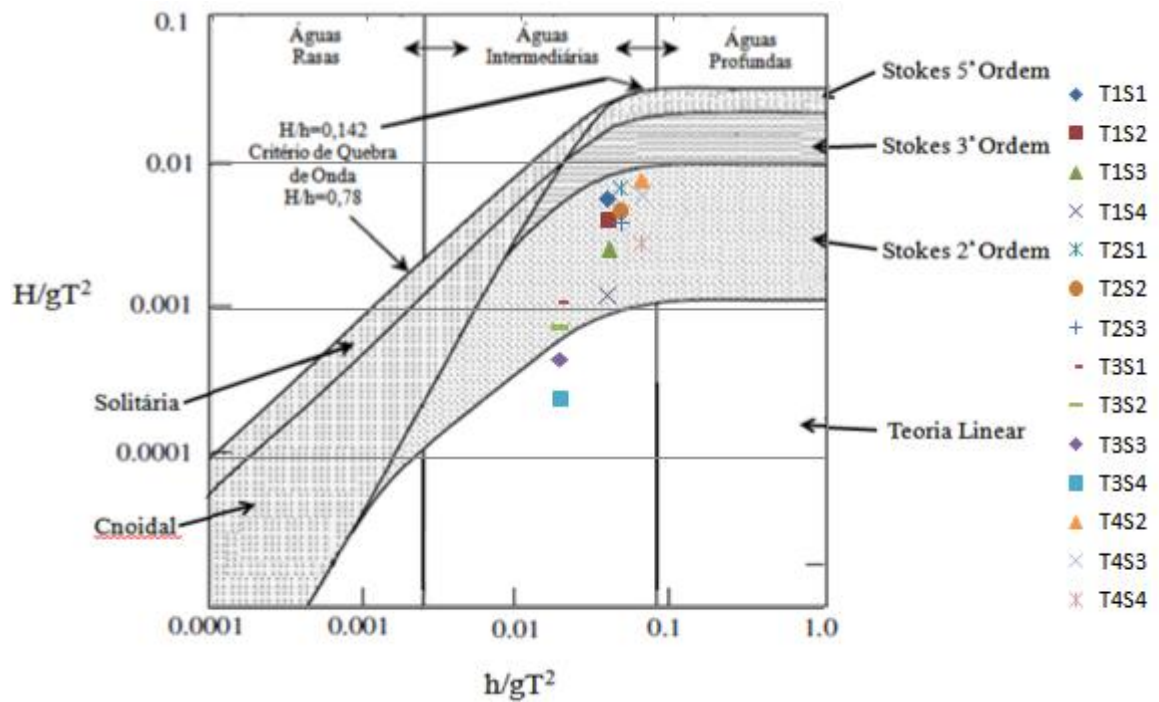


Figura 65 – Ondas ensaiadas apresentam componentes de primeira e segunda ordem (KAMPHUIS, 2000, adaptada)

Então se pode definir uma metodologia para aplicação de filtros, onde permite-se a passagem dos períodos maiores que o período do segundo harmônico, com decaimento até o corte total dos períodos menores que o pico do terceiro harmônico, eliminando os efeitos de terceira ordem em diante. A Figura 66 apresenta os quatro filtros utilizados.

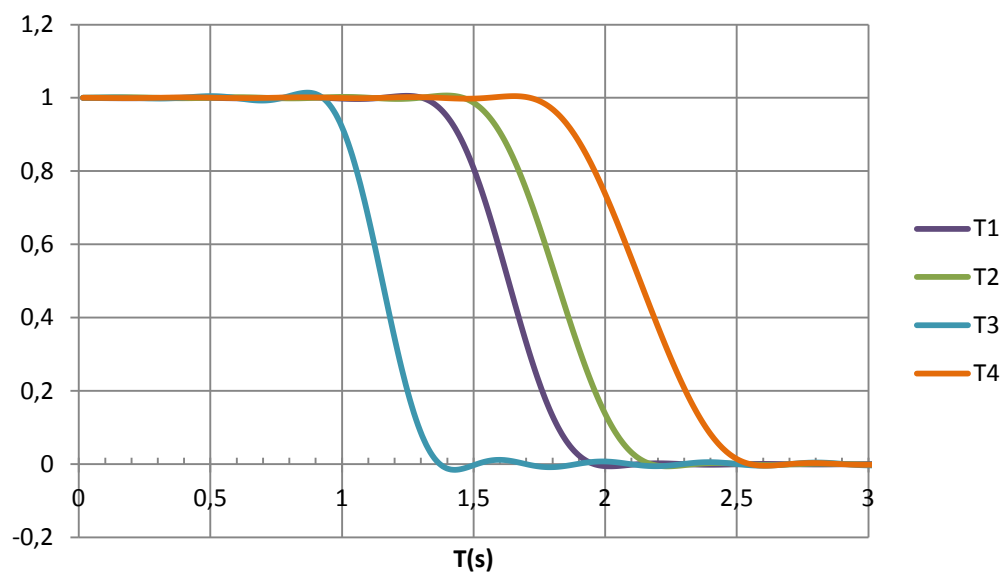


Figura 66 – Filtros passa-baixa utilizados.

Direções Principais

Analisando a componente $V_{z0 \text{ filt}}$, da Figura 64, percebe-se um sinal periódico, crescente, desta componente de velocidades. Se um canal de ondas não pode apresentar componentes transversais de velocidades, esse comportamento de $V_{z0 \text{ filt}}$ deve ser atribuído à problemas do canal ou batedor, ou a um posicionamento errado do ADV. No caso destes experimentos os suportes foram adaptados para o uso com ADVs, e a única forma de alinhá-los aos eixos principais do canal é visualmente. Isso se leva a crer na existência de erros de posicionamento, devida a grande dificuldade de se obter o posicionamento perfeito para os ADVs. Desta forma, estão as velocidades principais, verticais e horizontais, decompostas em uma componente transversal,

Uma solução matemática é proposta por Neves et al. (2012) para corrigir este problema projetando as velocidades nas direções principais do canal de ondas. Uma amostra é apresentada a seguir (Figura 67) com as velocidades filtradas $V_{x0 \text{ filt}}$, $V_{y0 \text{ filt}}$, $V_{z0 \text{ filt}}$ e as velocidades filtradas e projetadas nas direções principais $V_{2 \text{ filt}}$, $V_{3 \text{ filt}}$, $V_{1 \text{ filt}}$, que correspondem às direções X, Y, Z, respectivamente.

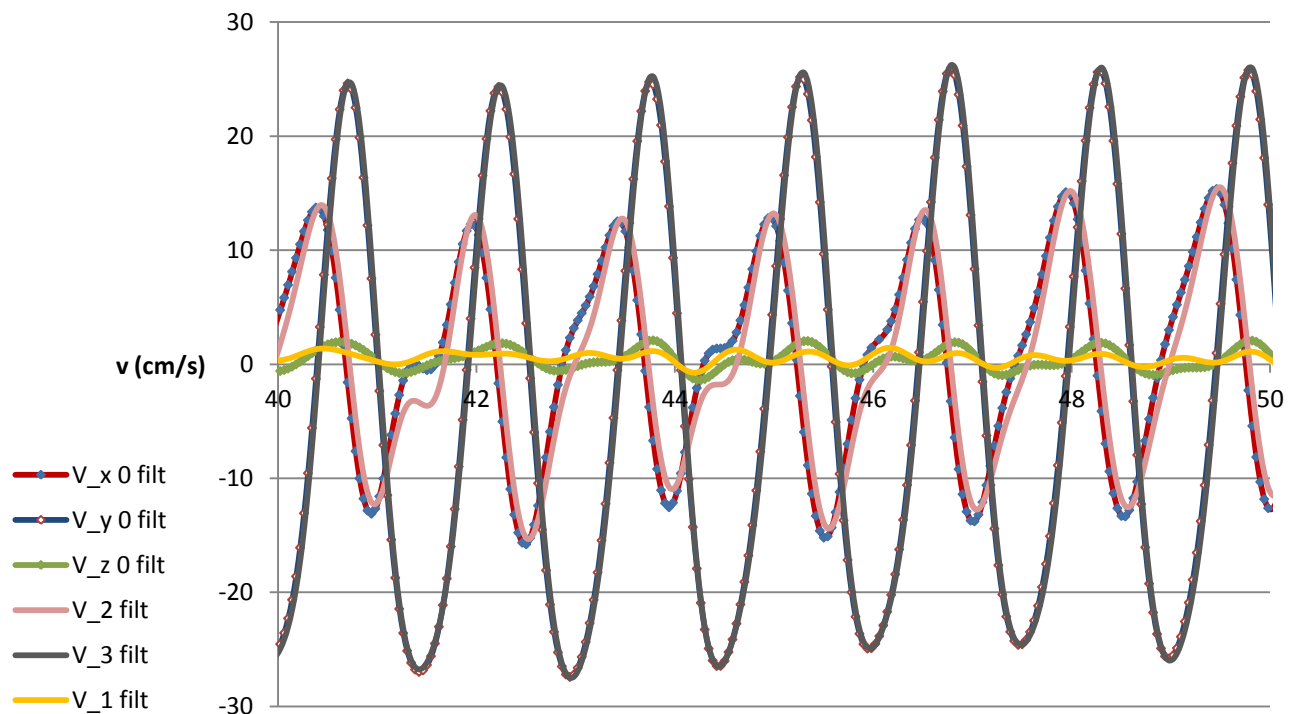


Figura 67 – Velocidades filtradas com e sem projeções nas direções principais.

Amostras das Velocidades

Foram, para todos os ensaios, realizados os processos de filtragem e correção para as projeções principais dos dados. A seguir são apresentadas as amostras das velocidades utilizadas para a análise do campo de velocidades geral do canal de ondas e para o cálculo de alturas de ondas. É utilizado o mesmo critério de definição de onda incidente e são analisados os mesmos 10 primeiros segundos da onda desenvolvida. Da Figura 69 até a Figura 83 a são apresentadas as amostras, sendo que apenas os valores filtrados e com as direções principais corrigidas são apresentados. Deve-se notar que as velocidades horizontais possuem magnitude superior às velocidades verticais, e que mesmo com a correção das velocidades para as direções principais, observam-se algumas variações nas velocidades transversais.

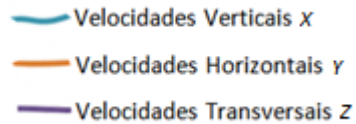


Figura 68 – Legenda para as Figura 69 até Figura 83.

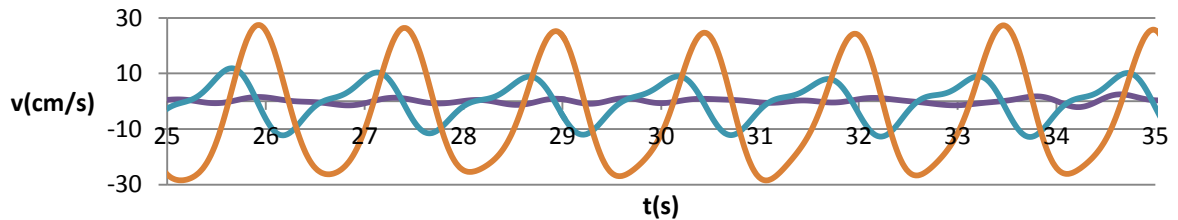


Figura 69 – Campo de velocidades - T1S1

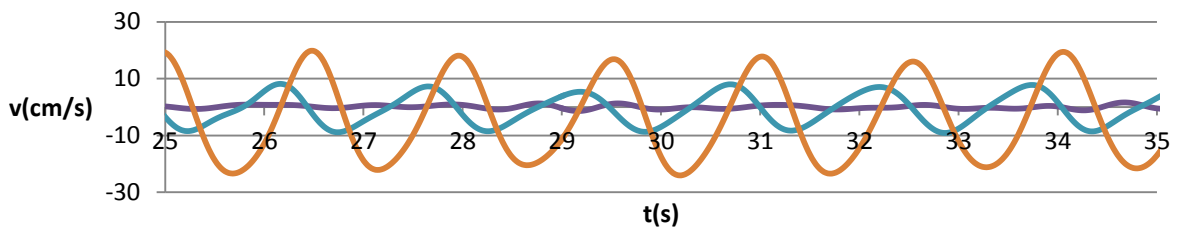


Figura 70 – Campo de velocidades - T1S2

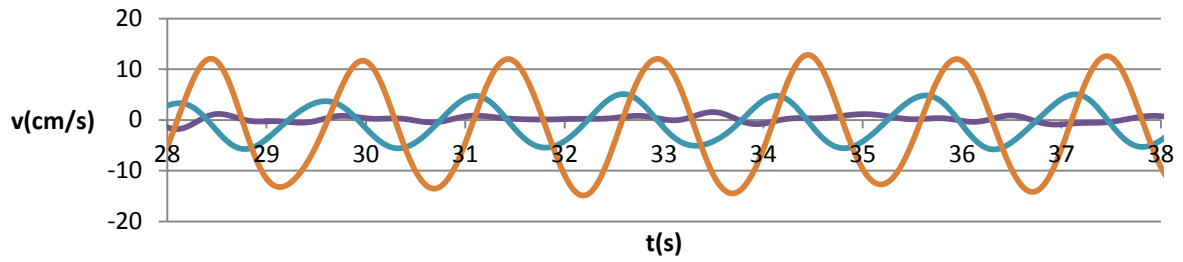


Figura 71 – Campo de velocidades - T1S3

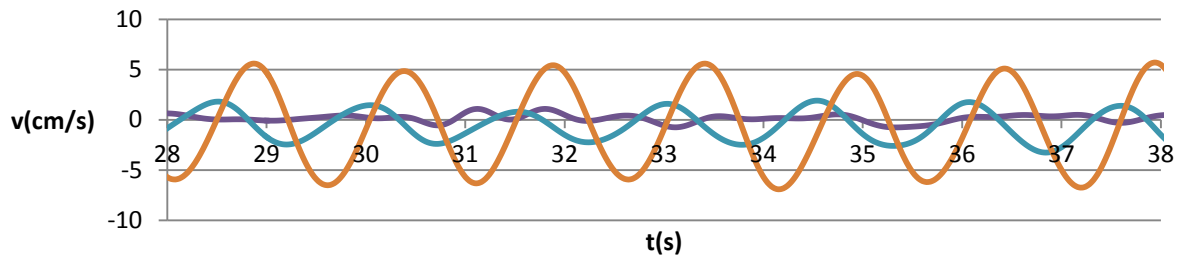


Figura 72 – Campo de velocidades - T1S4

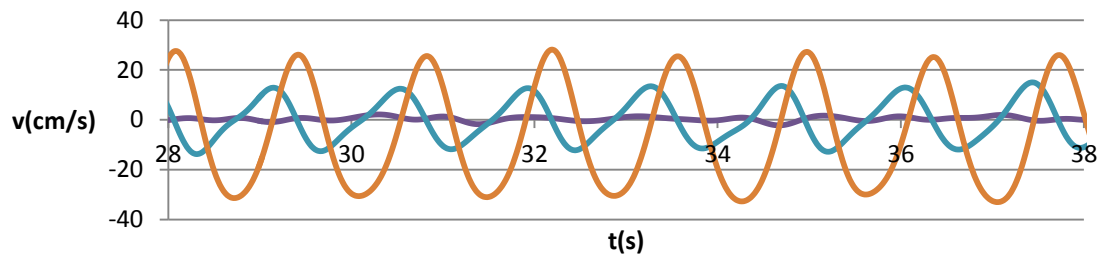


Figura 73 – Campo de velocidades - T2S1

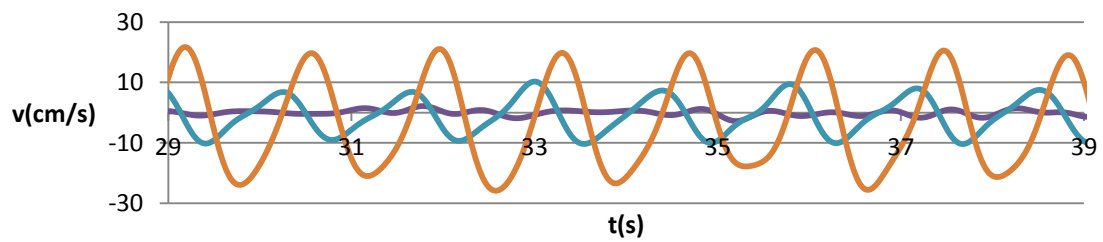


Figura 74 – Campo de velocidades - T2S2

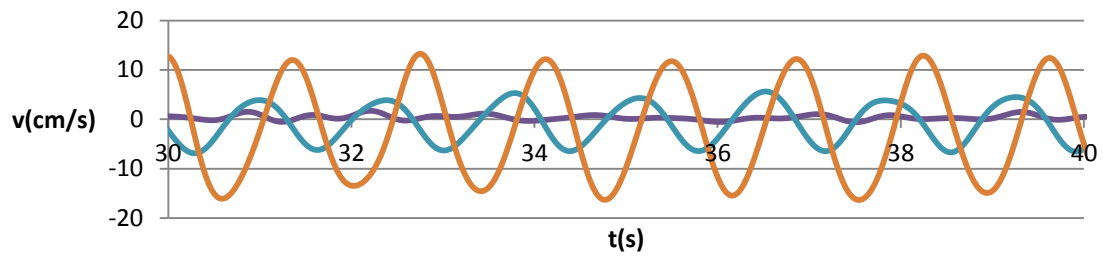


Figura 75 – Campo de velocidades - T2S3

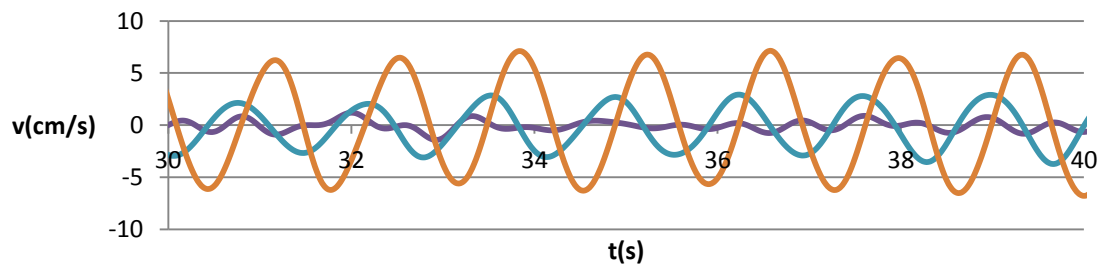


Figura 76 – Campo de velocidades - T2S4

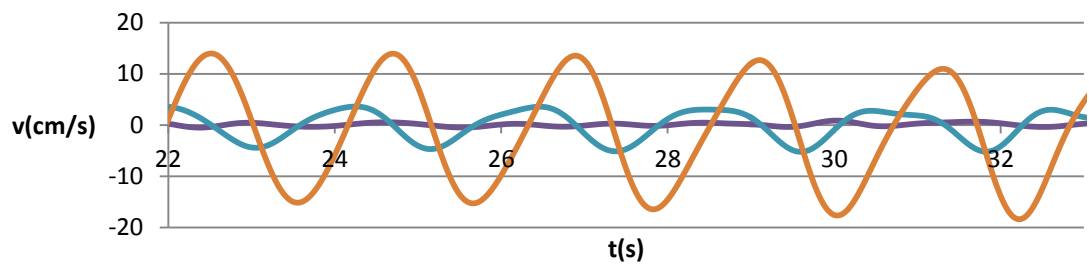


Figura 77– Campo de velocidades - T3S1

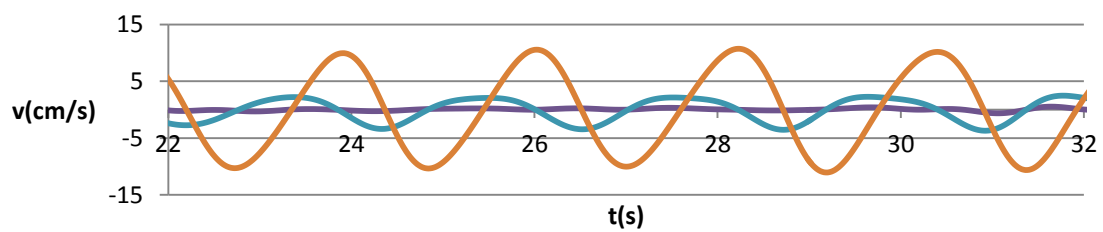


Figura 78 – Campo de velocidades - T3S2

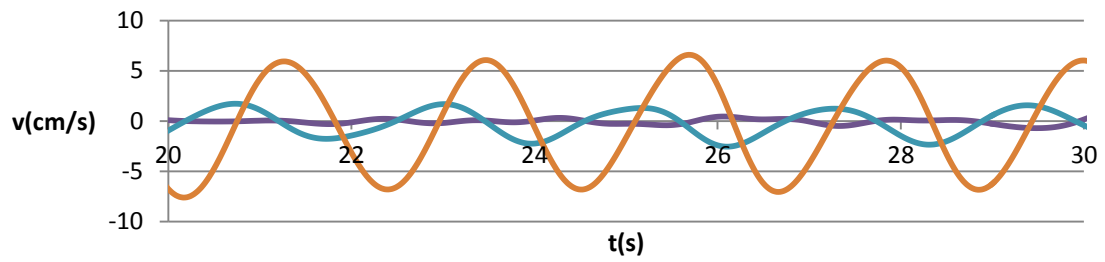


Figura 79 – Campo de velocidades - T3S3

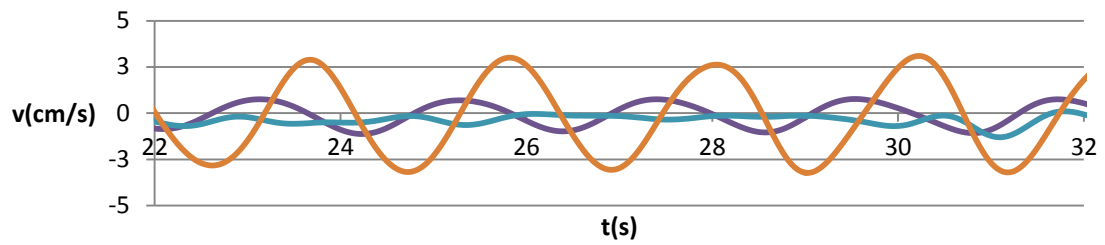


Figura 80 – Campo de velocidades - T3S4

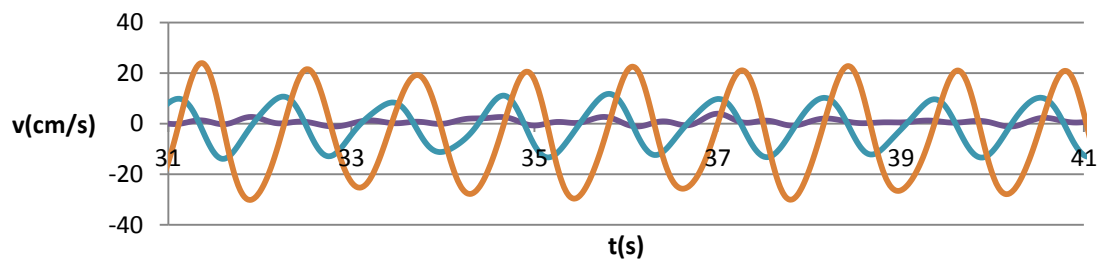


Figura 81 – Campo de velocidades - T4S2

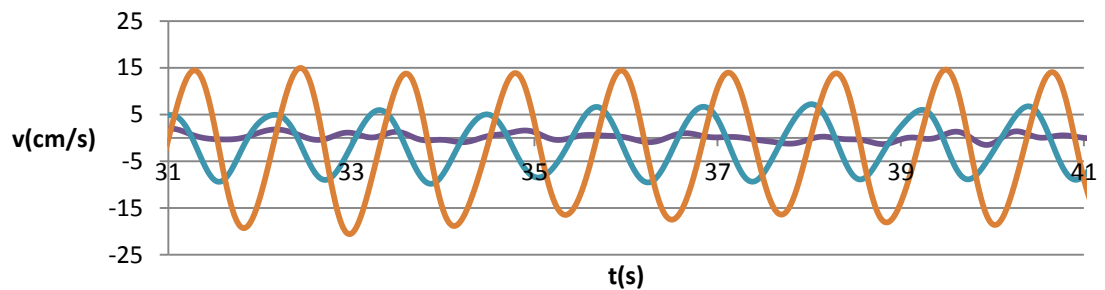


Figura 82 – Campo de velocidades - T4S3

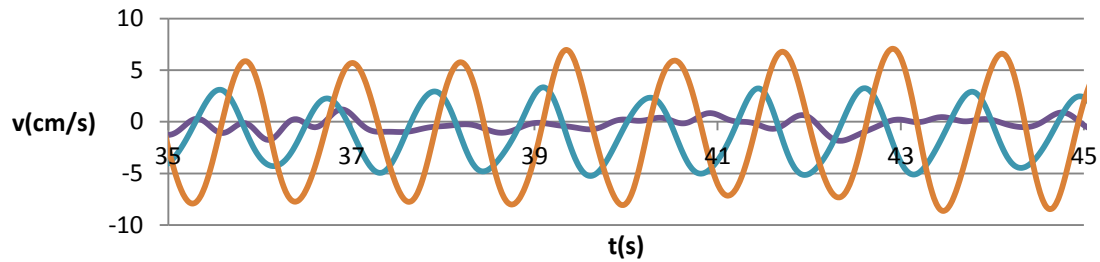


Figura 83 – Campo de velocidades - T4S4

4.1.3.4. Cálculo da Altura de Onda

As equações Eq. 17, Eq. 18 e Eq. 20 relacionam as velocidades orbitais das partículas a com a altura de onda, podendo-se estimar as alturas de onda através das medidas de velocidade. Como as medidas dos ADVs e dos medidores de altura de onda estão posicionados na mesma seção transversal do canal, pode-se comparar altura de onda medida com a altura de onda calculada através dos dados de velocidade dos ADVs.

As medições das velocidades horizontais apresentaram menores perturbações do que as velocidades verticais quando ocorriam momentos de baixa correlação durante a aquisição de dados dos ADVs, portanto, elas foram escolhidas para o cálculo da altura de onda.

A Eq. 17 apresenta a velocidade horizontal u , que pode ser também descrita por:

$$u = F_u \cdot H$$

Eq. 62

Utilizando-se da Eq. 17 e Eq. 62 define-se a função de transferência F_u na Eq. 63.

$$F_u = \frac{2\pi}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi h_{adv}}{L}}{\sinh kh}$$

Eq. 63

onde h_{adv} é altura do ADV em relação ao fundo do canal. As alturas foram $h_{adv0} = 23,00$ cm e $h_{adv1} = 19,76$ cm.

Então se tem a Eq. 64 para a obtenção das alturas estimadas:

$$H_{adv} = \frac{u}{F_u}$$

Eq. 64

Análise da Altura de Onda Calculada

A Figura 84 exemplifica, para uma amostra de onda incidente, os resultados obtidos para o cálculo das alturas de onda. Percebem-se como a curva calculada representa muito bem o comportamento da curva medida com os sensores de altura e onda. Percebem-se também a importância do uso dos filtros.

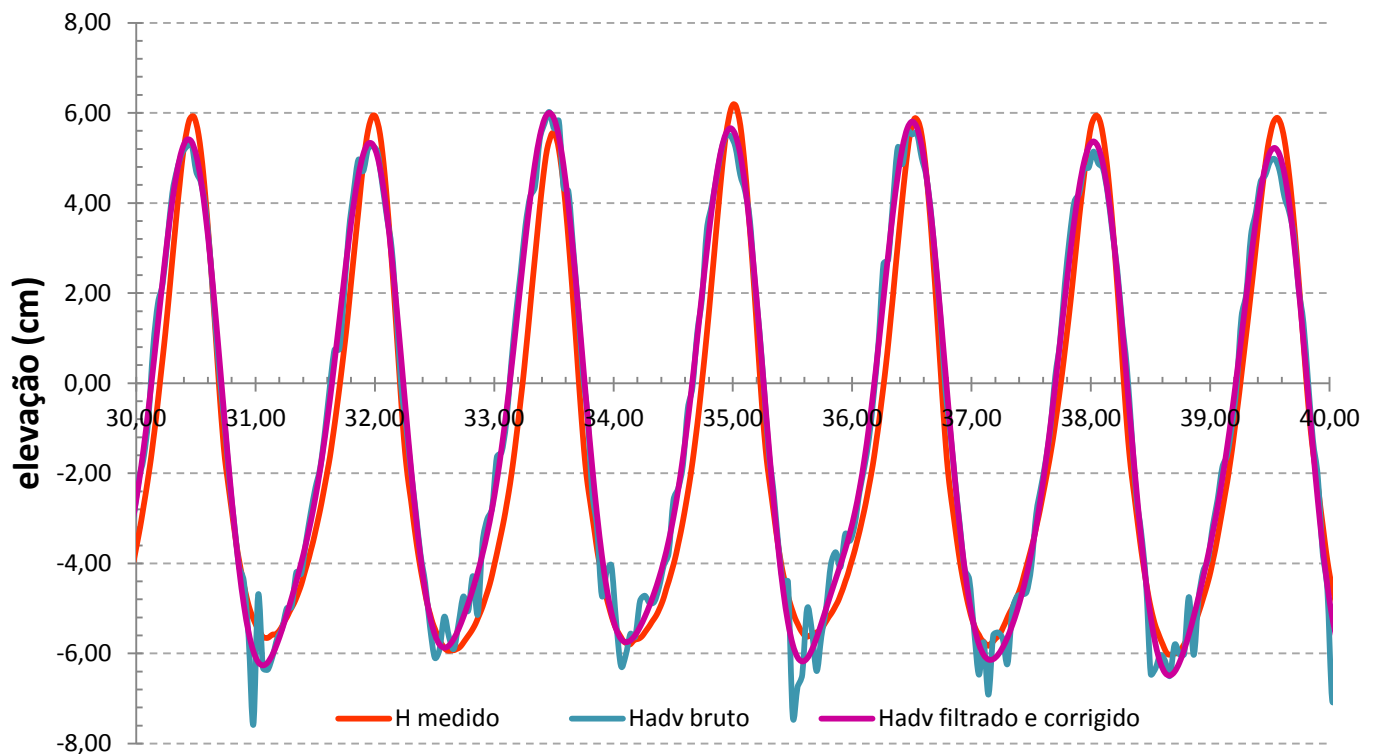


Figura 84 – Amostra de altura de onda calculada, com e sem filtro, e medida.

Os ADVs (ADV_0 e ADV_1) estão montados na mesma seção transversal dos sensores de altura de onda s_1 e s_2 , respectivamente. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam os valores de altura de onda significava, obtidos através da análise temporal das amostras, seguido o critério de onda incidente exposto no item 4.1.3.1, para os quatro sensores. Pode-se então avaliar a possibilidade de se calcular a altura de onda através dos dados obtidos pelos ADVs comparando-os com os dados medidos diretamente pelas sondas de altura de onda. A comparação também pode ser

realizada através da Figura 85 e da Figura 86. Percebem-se diferenças entre os valores calculados e medidos de até -13,15% no ADV_1 , e 16,01% no ADV_2 . Diferenças mínimas percentuais mínimas de -0,04 e -0,06, para ADV_1 e ADV_2 , respectivamente.

	HsADVO (cm)	Hs s_1	Diferença (cm)	Diferença (%)
T1S1	10,68	11,81	-1,13	-9,53
T1S2	8,23	8,66	-0,43	-5,01
T1S3	5,59	5,685	-0,10	-1,76
T1S4	2,54	2,54	0,00	-0,04
T2S1	11,90	12,93	-1,03	-7,94
T2S2	9,19	9,975	-0,78	-7,86
T2S3	5,98	6,285	-0,31	-4,85
T2S4	2,70	2,825	-0,13	-4,46
T3S1	6,39	6,1	0,29	4,67
T3S2	4,46	4,275	0,19	4,33
T3S3	2,71	2,66	0,04	1,69
T3S4	1,29	1,23	0,06	5,20
T4S2	9,91	11,41	-1,50	-13,15
T4S3	6,71	7,347	-0,64	-8,72
T4S4	3,24	3,413	-0,18	-5,19

Tabela 5 – Comparação entre os valores de altura de onda lidos (s_1) e calculados (através do ADV0).

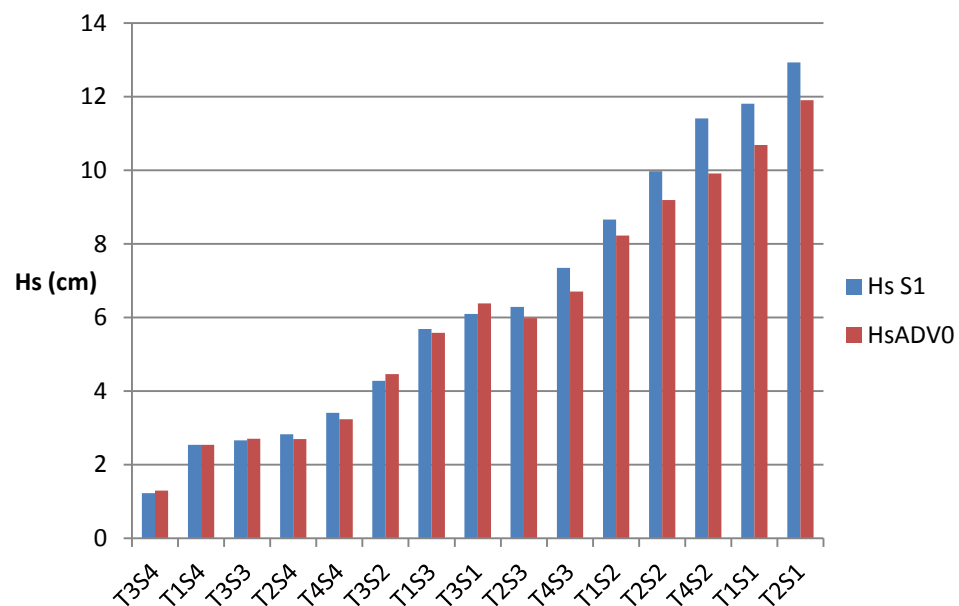


Figura 85 - Comparação entre os valores de altura de onda lidos (s_1) e calculados (através do ADV0).

Na Figura 85 as diferenças entre $H_{s\ s1}$ e $H_{s\ ADV0}$ vão aumentando com o aumento da altura de onda, já na Figura 86, para o ADV_1 , esse comportamento não é apresentado.

	HsADV1 (cm)	Hs s_2	Diferença (cm)	Diferença (%)
T1S1	11,79	11,85	-0,06	-0,51
T1S2	9,04	8,615	0,42	4,89
T1S3	5,84	5,62	0,22	3,97
T1S4	2,68	2,545	0,14	5,42
T2S1	12,88	12,797	0,08	0,65
T2S2	10,17	9,925	0,24	2,42
T2S3	6,30	6,3	0,00	-0,06
T2S4	2,95	2,85	0,09	3,33
T3S1	6,64	5,99	0,65	10,83
T3S2	4,89	4,215	0,68	16,01
T3S3	2,97	2,63	0,34	12,78
T3S4	1,36	1,23	0,13	10,41
T4S2	11,14	11,48	-0,34	-2,93
T4S3	7,25	7,333	-0,09	-1,19
T4S4	3,35	3,363	-0,01	-0,39

Tabela 6 – Comparação entre os valores de altura de onda lidos (s_2) e calculados (através do ADV1).

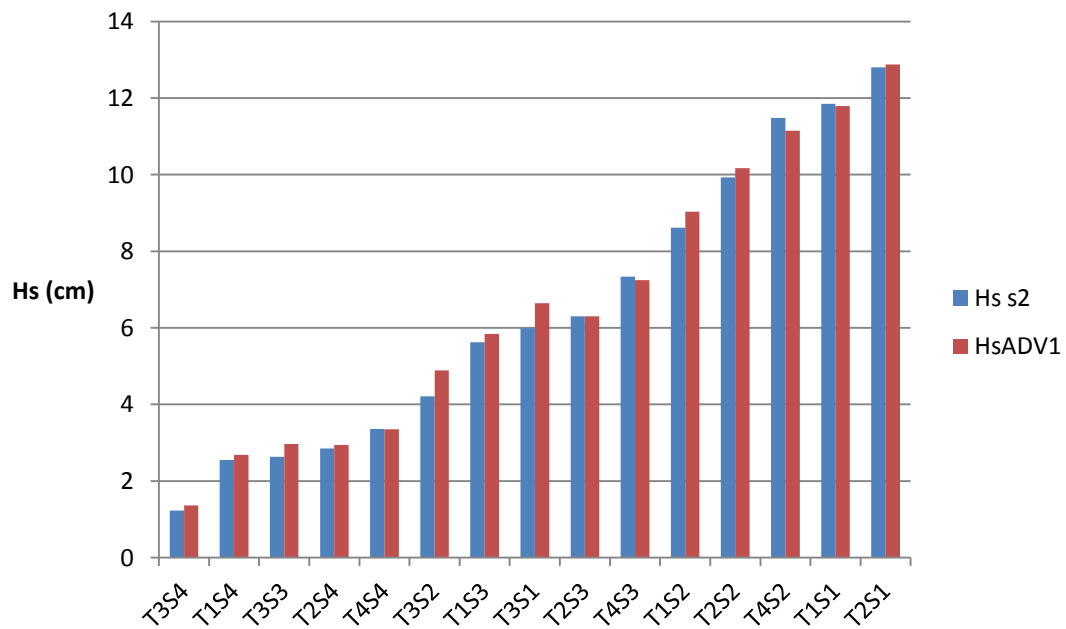


Figura 86 - Comparação entre os valores de altura de onda lidos (s_2) e calculados (através do ADV1).

4.1.3.5. Curva do Batedor de Ondas do IPH

Curvas para o bater de ondas do IPH foram levantadas a partir dos dados de altura de onda medidos e também calculados através da metodologia apresentada no item 4.1.3.4, para se observar sua aplicabilidade. A Figura 87 apresenta as curvas obtidas para todos os sensores e ainda as curvas calculadas segundo as equações Eq. 60 e Eq. 61. As curvas obtidas experimentalmente apresentam comportamentos semelhantes, sendo, portanto, os resultados muito satisfatórios. As curvas calculadas segundo as equações Eq. 60 e Eq. 61 apresentam resultados muito semelhantes entre si, mas com uma dissiparidade com relação às curvas empíricas. Essas curvas teóricas mostram uma previsão da geração de ondas maiores para um mesmo determinado curso de atuação, comprovando a necessidade da obtenção das curvas de bateres para sua correta utilização.

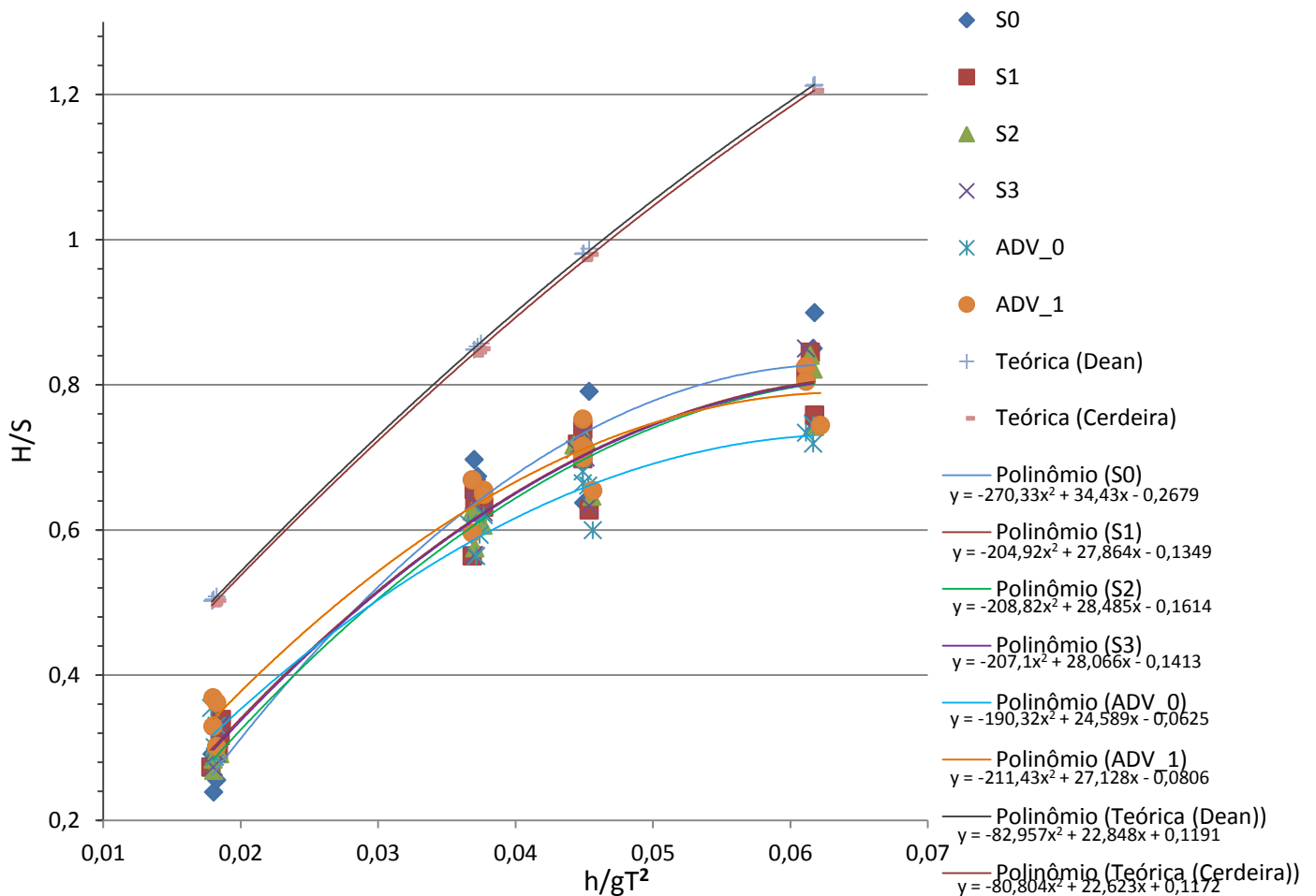


Figura 87 – Curvas para o bater de ondas do IPH

Finalmente pode-se apresentar a Curva do Batedor Média, utilizando os valores da Tabela 4.

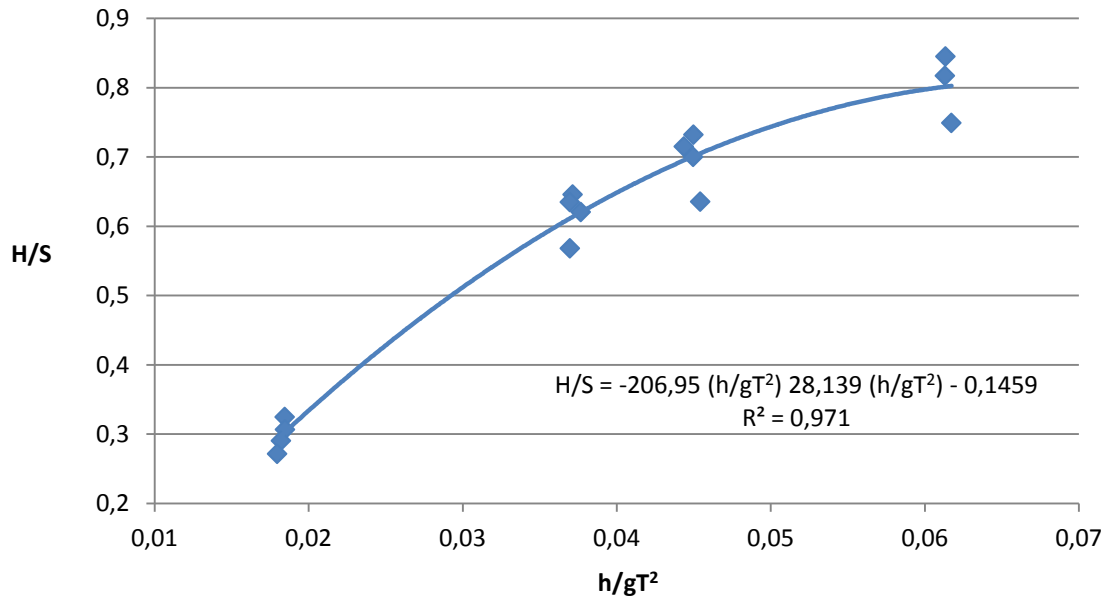


Figura 88 – Curva do Batedor Média (IPH).

4.1.3.6. Frequência do Motor

Através das leituras feitas pode-se também relacionar os períodos das ondas com o valor da frequência do motor que é apresentada no inversor de frequência, onde é ajustada a velocidade de rotação do motor (Figura 89).

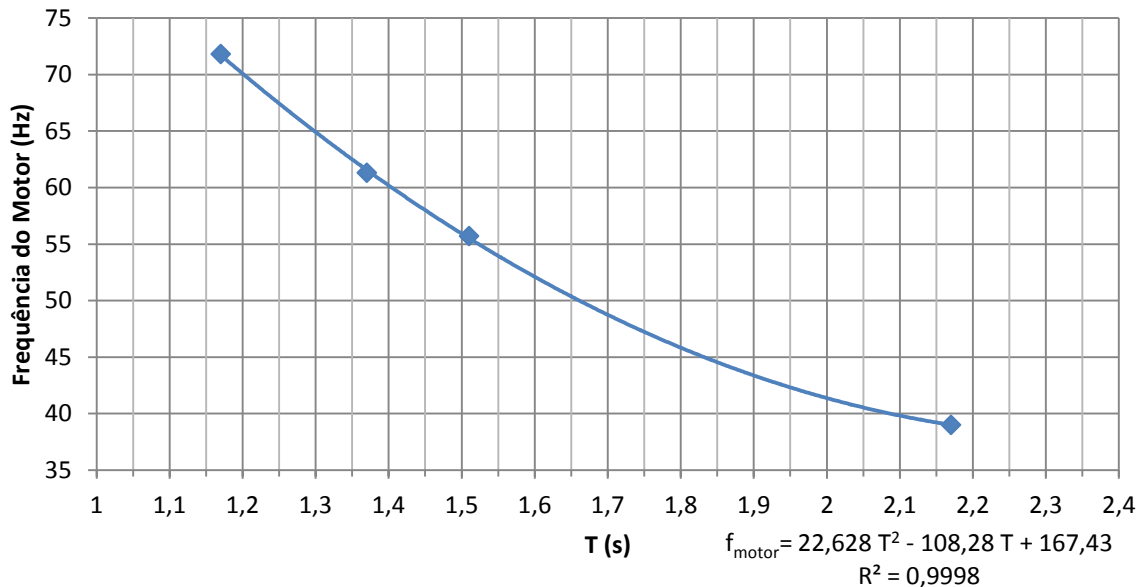


Figura 89 – Frequência do Motor

4.1.3.7. Coeficientes de Reflexões para o Canal de Ondas do IPH

Os coeficientes de reflexão para diversos pontos de operação do canal de ondas do IPH foram obtidos através da análise espectral das amostras temporais obtidas nos experimentos discutidos anteriormente. A análise espectral, assim como a separação do espectro incidente do espectro refletido, são obtidas através do uso do software SAM-MOD-5. Maiores detalhes sobre o SAM são encontrados no Anexo 1.

A Figura 90 apresenta os coeficientes de reflexão em função da altura de onda, e agrupados em períodos. Percebem-se que os coeficientes de reflexão se mantêm virtualmente constantes para os menores períodos $T=1,17s$; $T=1,38s$ e $T=1,52s$, aproximadamente 0,47, 0,31 e 0,42, respectivamente. Enquanto para $T=2,17s$ os coeficientes variam de 0,24 até 0,50.

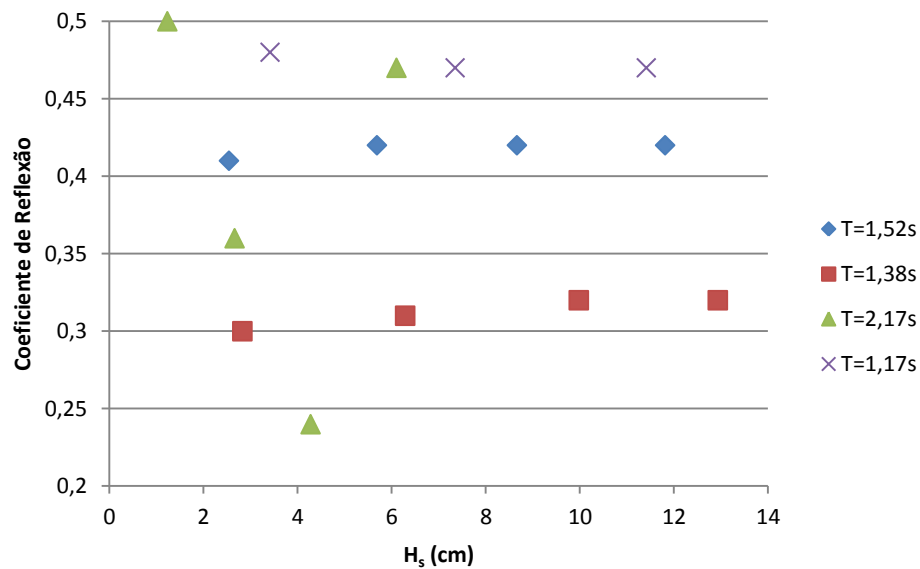


Figura 90 - Coeficientes de reflexão (IPH) em função das alturas de ondas.

4.2 Ensaio 2: Ensaio de Modelo Reduzido de uma Placa Atenuadora

Dispositivos para captação da energia das ondas podem ter diversos princípios de operação, como exemplificado das Figura 9 até Figura 14. Aqui serão apresentados os testes realizados em uma placa atenuadora, componente integrante de dispositivos tipo atenuador (Figura 9).

O objetivo dos testes realizados no IPH é obter as alturas das ondas incidentes sobre a estrutura, as alturas das ondas que atravessam a estrutura e atingem a praia absorvedora de ondas, chamadas ondas transmitidas, e o quanto as ondas incidentes são refletidas pela placa.

Para medir-se as alturas de onda utilizou-se o mesmo sistema de aquisição de dados apresentado no item 3.4, com o uso de sondas resistivas e ADVs, assim como os procedimentos de calibração do item 4.1.1. Também foram seguidos todos os procedimentos descritos no item 4.1.3.4 para o cálculo das alturas de onda através das leituras dos ADVs.

4.2.1 Condições dos Testes

Foi adotada a escala geométrica **1:40** entre modelo e protótipo e semelhança pelo Critério de Froude, sendo, portanto, a escala de tempo definida pela Eq. 59. As características físicas da onda protótipo foram adotadas a partir da análise da Tabela 2, optando-se por ondas típicas das regiões Sul e Sudeste do Brasil e profundidade adotada de 14,60 metros. A Tabela 7 apresenta as características das ondas protótipo e modelo.

	H (m)	T (s)	h (m)
Protótipo	2,05	8,30	14,6
Modelo (1:40)	0,051	1,31	0,365

Tabela 7 – Características físicas das ondas modelo e protótipo.

As dimensões da placa atenuadora estão apresentadas na Tabela 8.

	Largura (m)	Comprimento (m)
Protótipo	39,60	16,00
Modelo (1:40)	0,99	0,40

Tabela 8 – Dimensões da placa atenuadora

A Figura 91 e a Figura 92 apresentam o modelo de Placa Atenuadora, feito de compensado naval e isopor.

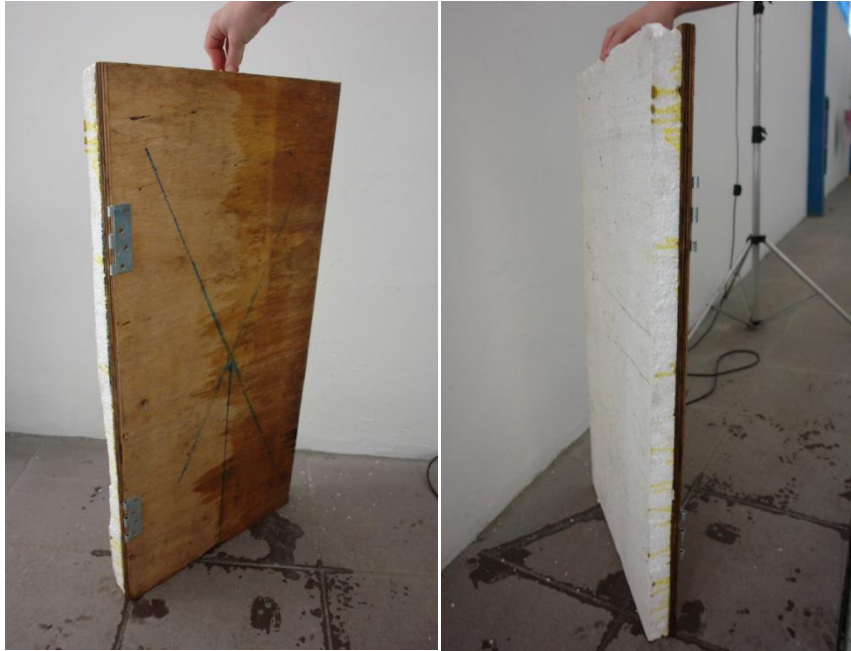


Figura 91 – Placa Atenuadora.



Figura 92 – Placa Atenuadora montada na janela do canal.

Para definição do curso do batedor de ondas e da frequência do motor utilizam-se os gráficos da Figura 88 e Figura 89, respectivamente. O curso obtido é 14,00 cm, e frequência

64,41 Hz. A Figura 93 mostra o curso selecionado. A régua do curso do batedor indica o raio, portanto, selecionou-se 7,00 cm.



Figura 93 – Ajuste do curso do atuador.

A Figura 94 indica as posições onde os sensores foram montados (posições P_1 , P_2 , P_3 e P_5 , onde em P_2 e P_5 foram montados, além dos sensores resistivos de altura de onda, os ADVs) e onde a placa foi posicionada (posição P_4). Os ADVs foram montados nas profundidades $h_{adv0} = 21,00$ cm e $h_{adv1} = 19,24$ cm.

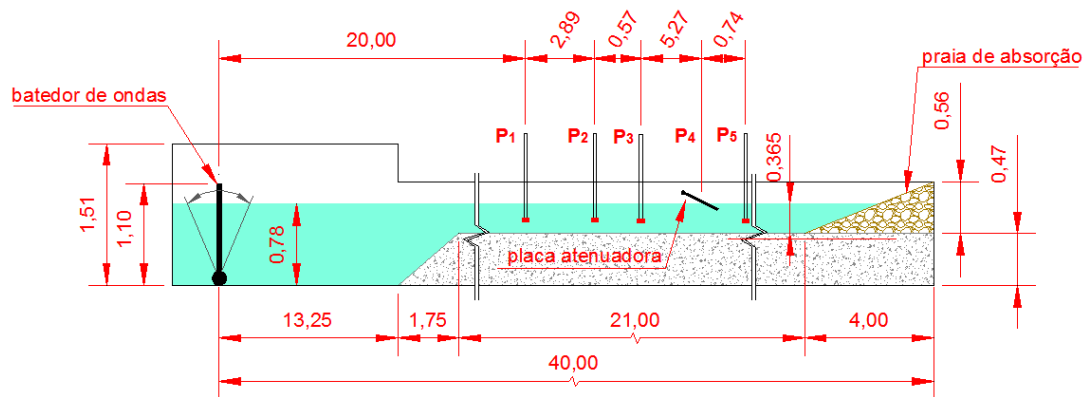


Figura 94 – Esquema de testes da placa atenuadora.

Foram ensaiadas quatro situações diferentes do funcionamento, alterando-se a massa da placa (Figura 95). Para cada situação foram repetidos três vezes os ensaios obtendo-se como resultado final das medidas de altura de onda e período a média entre os três ensaios, apresentados na Tabela 9 até Tabela 12.

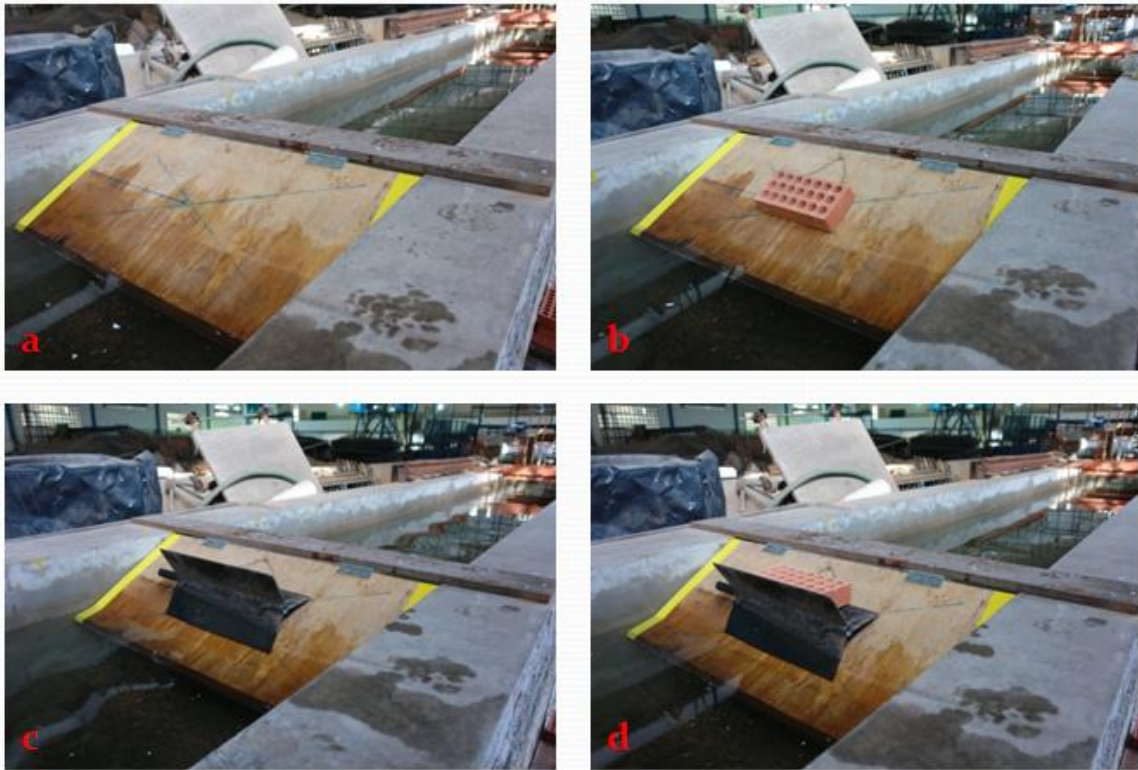


Figura 95 – Placa atenuadora – a) Apenas Placa; b) Placa+Tijolo; c) Placa + Peça de Aço; d) Placa + Peça de Aço + Tijolo.

As massas são:

a) Placa = $m_a = 5223,2 \text{ g}$;

b) Tijolo = $1669,4 \text{ g}$;

Placa + Tijolo = $m_b = 6892,6 \text{ g}$;

c) Peça de Aço = $4841,1 \text{ g}$;

Placa + Peça de Aço = $m_c = 10064,3 \text{ g}$;

d) Placa + Peça de Aço + Tijolo = $m_d = 11733,7 \text{ g}$;

4.2.2. Resultados

Para as quatro situações ensaiadas, apresentadas na Figura 95, foram feitas três repetições dos testes. Os dados foram analisados temporalmente no software SAM-MOD-6. As amostras temporais das ondas incidentes e transmitidas são apresentadas da Figura 95 até a Figura 103, e os resultados das análises da Tabela 9 até a Tabela 12.

Ondas Incidentes

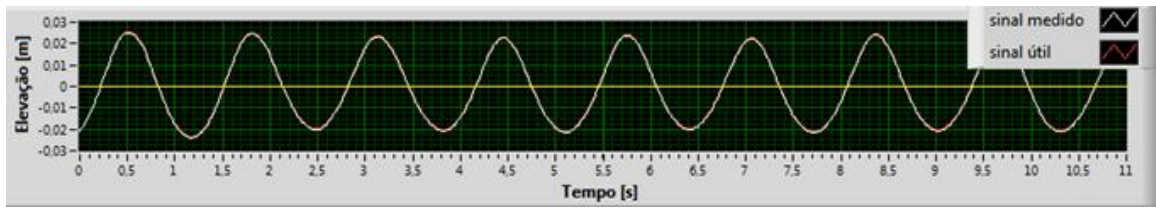


Figura 96 - Onda Incidente - Apenas Placa – $m_a = 5223,2$ g.

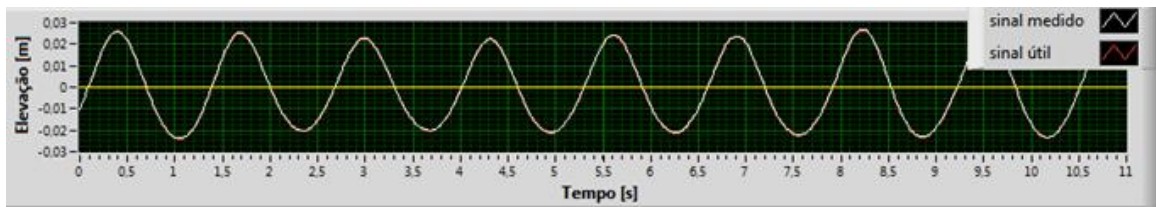


Figura 97 - Onda Incidente – Tijolo – $m_b = 6892,6$ g.

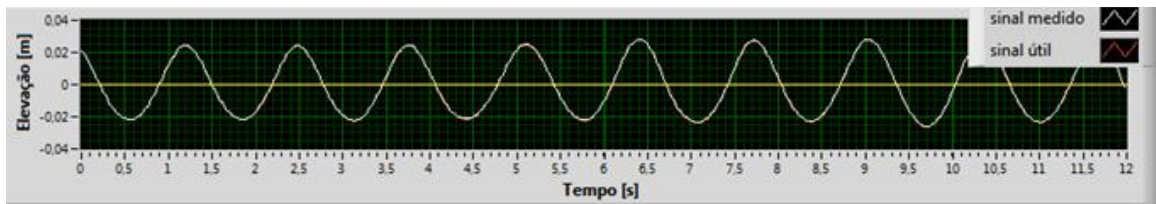


Figura 98 - Onda Incidente - Peça de Aço – $m_c = 10064,3$ g.

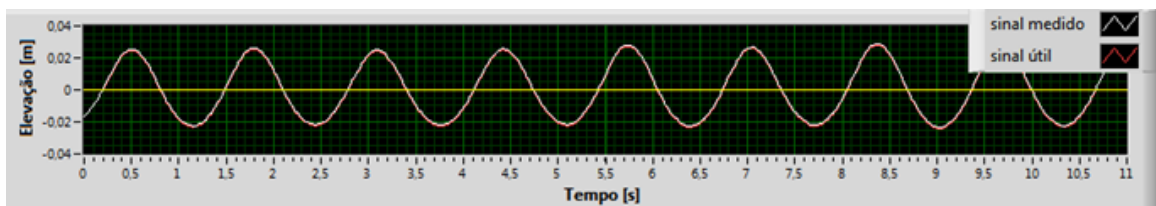


Figura 99 - Onda Incidente - Peça de Aço + Tijolo – $m_d = 11733,7$ g.

Ondas Transmitidas

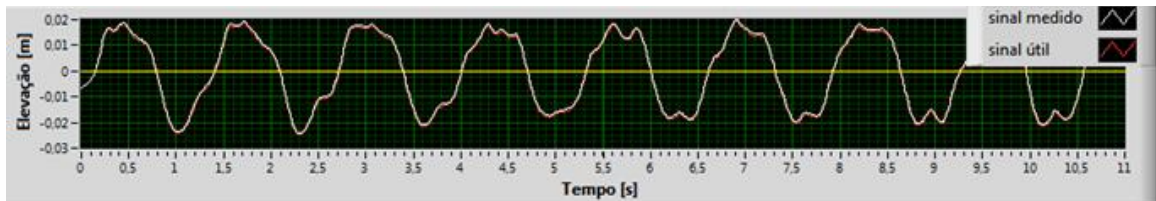


Figura 100 - Onda Transmitida - Apenas Placa – $m_a = 5223,2$ g.

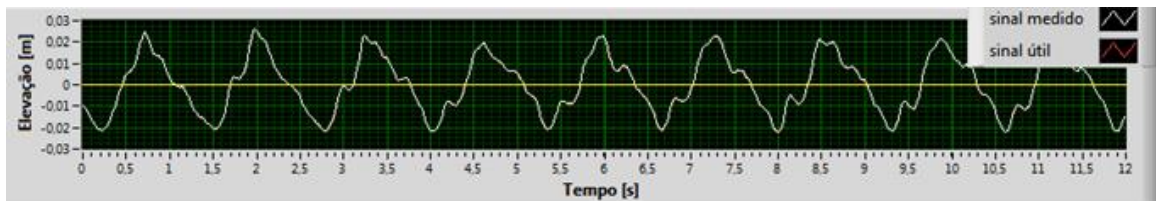


Figura 101 - Onda Transmitida – Tijolo – $m_b = 6892,6$ g.

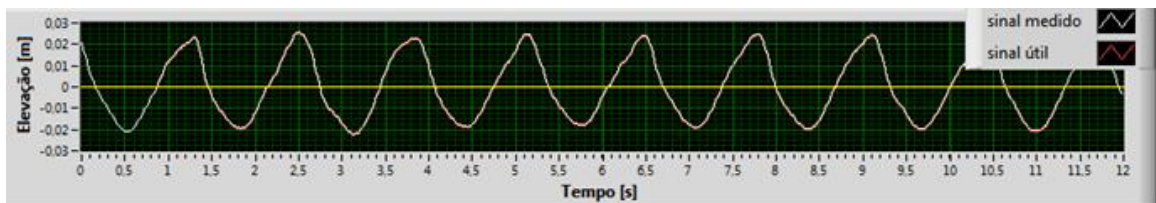


Figura 102 - Onda Transmitida - Peça de Aço – $m_c = 10064,3$ g.

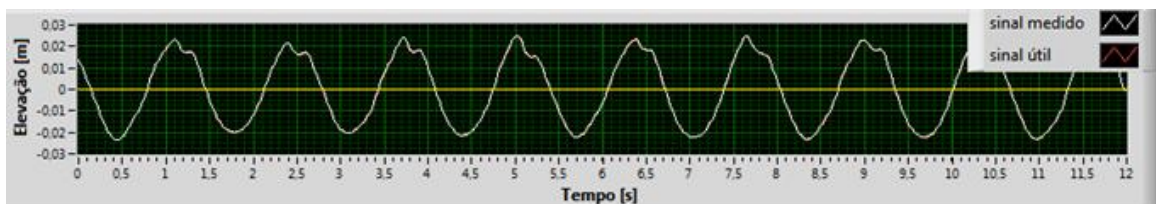


Figura 103 - Onda Transmitida - Peça de Aço + Tijolo – $m_d = 11733,7$ g.

Notar que as ondas incidentes para os quatro testes apresentam comportamentos muito próximos, ao passo que as ondas transmitidas diferem entre si devido aos diferentes comportamentos da placa, conforme se varia a massa sobre o dispositivo. Notam-se nas ondas transmitidas diferentes formatos de onda que vêm a incidir sobre a praia absorvedora de ondas. Essa deformação das ondas, em escala real, acarretariam, entre outros fenômenos, em impactos sobre o meio ambiente costeiro, que estaria sobre a ação de ondas diferentes das naturais.

Tabelas de Resultados

A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam os resultados obtidos das leituras das sondas resistivas, enquanto a Tabela 11 e Tabela 12 os resultados de altura de onda calculada através das leituras dos ADVs.

	Onda Incidente							
	Hs 1 (m)	Hs 2 (m)	Hs 3 (m)	Hs média (m)	T 1 (s)	T 2 (s)	T 3 (s)	T média (s)
Apenas Placa	0,047	0,046	0,047	0,047	1,31	1,31	1,31	1,31
Tijolo	0,048	0,050	0,049	0,049	1,31	1,30	1,31	1,31
Peça de Aço	0,052	0,053	0,052	0,052	1,31	1,31	1,31	1,31
Peça de Aço + Tijolo	0,050	0,051	0,049	0,050	1,31	1,31	1,31	1,31

Tabela 9 – Ondas Incidentes – Sondas Resistivas

	Onda Transmitida							
	Hs 1 (m)	Hs 2 (m)	Hs 3 (m)	Hs média (m)	T 1 (s)	T 2 (s)	T 3 (s)	T média (s)
Apenas Placa	0,043	0,041	0,042	0,042	1,31	1,31	1,30	1,31
Tijolo	0,048	0,048	0,046	0,047	1,32	1,32	1,31	1,32
Peça de Aço	0,046	0,046	0,046	0,046	1,31	1,31	1,31	1,31
Peça de Aço + Tijolo	0,046	0,048	0,048	0,047	1,31	1,31	1,32	1,31

Tabela 10 – Ondas Transmitidas – Sondas Transmitidas

	Onda Incidente ADV0							
	Hs 1 (m)	Hs 2 (m)	Hs 3 (m)	Hs média (m)	T 1 (s)	T 2 (s)	T 3 (s)	T média (s)
Apenas Placa	0,049	0,047	0,047	0,048	1,32	1,32	1,31	1,32
Tijolo	0,047	0,046	0,048	0,047	1,32	1,32	1,32	1,32
Peça de Aço	0,043	0,042	0,043	0,043	1,32	1,32	1,31	1,31
Peça de Aço + Tijolo	0,042	0,044	0,043	0,043	1,31	1,31	1,32	1,31

Tabela 11 – Ondas Incidentes - ADVs

	Onda Transmitida ADV1							
	Hs 1 (m)	Hs 2 (m)	Hs 3 (m)	Hs média (m)	T 1 (s)	T 2 (s)	T 3 (s)	T média (s)
Apenas Placa	0,039	0,037	0,039	0,038	1,32	1,31	1,31	1,31
Tijolo	0,035	0,035	0,035	0,035	1,32	1,30	1,31	1,31
Peça de Aço	0,037	0,043	0,041	0,040	1,31	1,32	1,31	1,31
Peça de Aço + Tijolo	0,045	0,045	0,044	0,045	1,31	1,31	1,31	1,31

Tabela 12 – Ondas Transmitidas - ADVs

A Tabela 13 apresenta uma comparação entre as alturas de onda medidas e calculadas. A Figura 104 e a Figura 105 apresentam graficamente essas divergências.

	Incidente				Transmitida			
	Hs Sonda (m)	Hs ADV0 (m)	Diferença (m)	Diferença (%)	Hs Sonda (m)	Hs ADV1 (m)	Diferença (m)	Diferença (%)
Apenas Placa	0,047	0,049	-0,002	-4,26	0,043	0,039	0,004	9,30
Apenas Placa	0,046	0,047	-0,001	-2,17	0,041	0,037	0,004	9,76
Apenas Placa	0,047	0,047	0,000	0,00	0,042	0,039	0,003	7,14
Tijolo	0,048	0,047	0,001	2,08	0,048	0,035	0,013	27,08
Tijolo	0,050	0,046	0,004	8,00	0,048	0,035	0,013	27,08
Tijolo	0,049	0,048	0,001	2,04	0,046	0,035	0,011	23,91
Peça de Aço	0,052	0,043	0,009	17,31	0,046	0,037	0,009	19,57
Peça de Aço	0,053	0,042	0,011	20,75	0,046	0,043	0,003	6,52
Peça de Aço	0,052	0,043	0,009	17,31	0,046	0,041	0,005	10,87
Peça de Aço + Tijolo	0,050	0,042	0,008	16,00	0,046	0,045	0,001	2,17
Peça de Aço + Tijolo	0,051	0,044	0,007	13,73	0,048	0,045	0,003	6,25
Peça de Aço + Tijolo	0,049	0,043	0,006	12,24	0,048	0,044	0,004	8,33

Tabela 13 – Diferenças entre alturas de ondas incidentes e transmitidas.

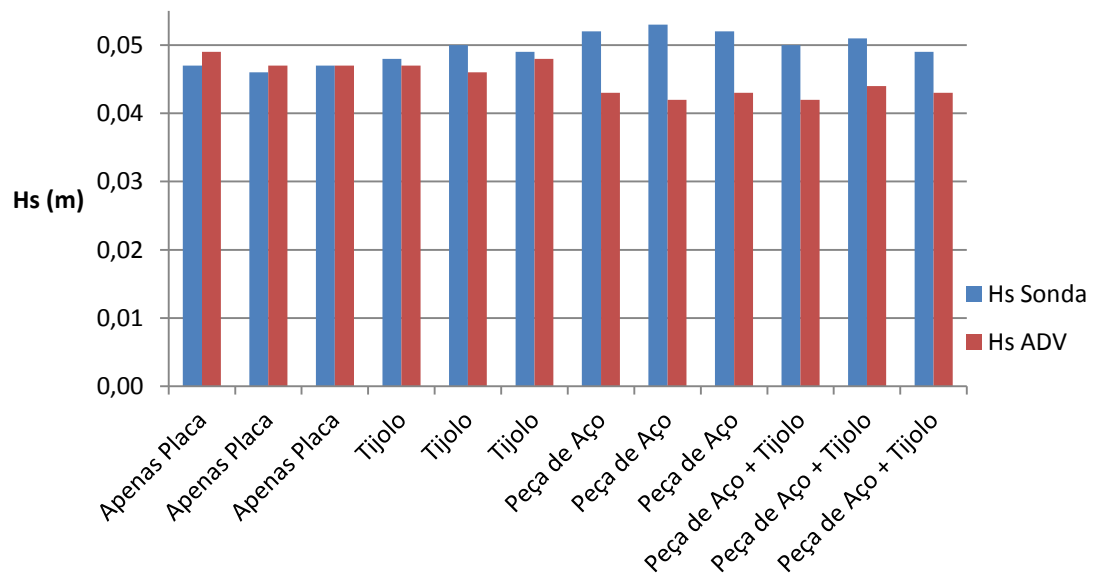


Figura 104 - Diferença entre Onda Incidente medida e calculada

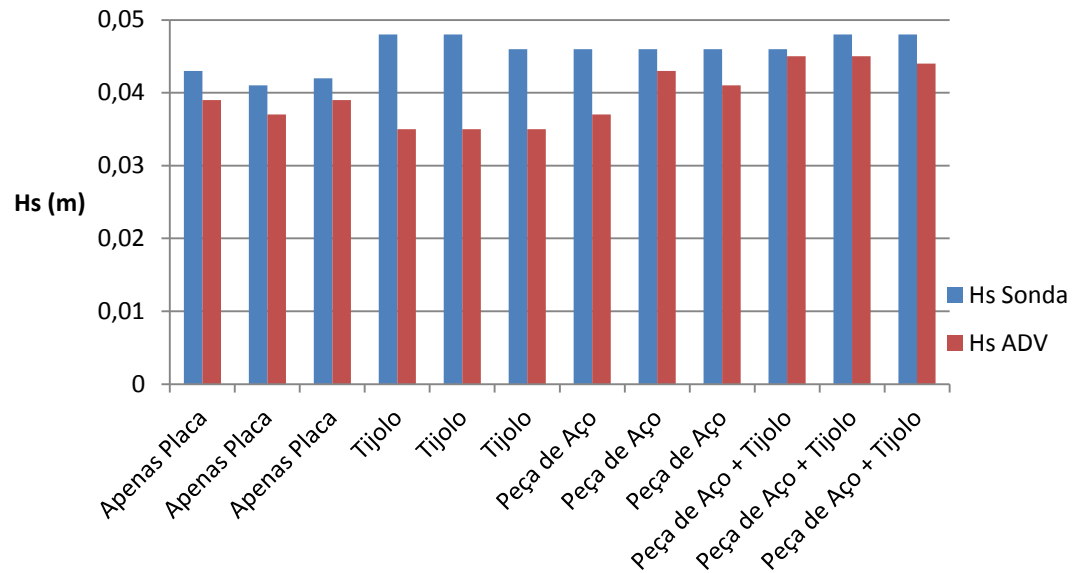


Figura 105 - Diferença entre Onda Transmitida calculada e medida.

Coefficientes de Reflexão

A Tabela 14 mostra os resultados da separação dos espectros de onda incidentes e refletidos, obtidos através do uso do software SAM-MOD-5. Também foi feita a média entre os três coeficientes de reflexão obtidos, chegando-se a um coeficiente de reflexão médio pra cada teste realizado.

	Cr 1	Cr 2	Cr 3	Cr média
Apenas Placa	0,43	0,43	0,43	0,43
Tijolo	0,46	0,46	0,46	0,46
Peça de Aço	0,40	0,40	0,39	0,40
Peça de Aço + Tijolo	0,37	0,36	0,36	0,36

Tabela 14 – Coeficientes de Reflexão.

4.3. Ensaio 3: Ensaio no IRN- UNIFEI

Os ensaios aqui apresentados foram os primeiros testes realizados no Canal de Ondas do IRN-UNIFEI. Servirão pra nortear seu uso e o aprimoramento do laboratório. Os testes realizados são similares aos executados no IPH, apresentados no capítulo anterior, e no fim deste trabalho uma comparação do funcionamento dos canais é realizada. Foi utilizada a mesma instrumentação para medir alturas de onda: sensores resistivos DHI. Nesses testes não foram utilizados ADVs.

4.3.1. Ensaio para caracterização do funcionamento do Canal de Ondas

Foram medidas as alturas de ondas H para 18 pontos de funcionamento do gerador de ondas. A aquisição de dados foi por meio de 3 sondas resistivas de nível d água a uma frequência de 25Hz. Para os 18 ensaios foram usados o tempo de aquisição de 120 segundos.

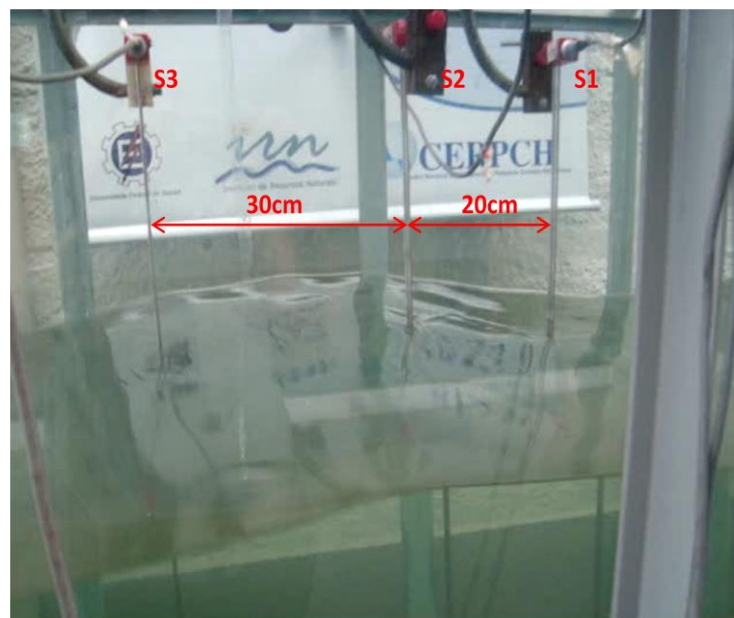


Figura 106 – Montagem dos sensores de altura de onda no IRN.

Foram estipulados para os ensaios os cursos de acionamento do pistão pneumático:

$$S_1 = 41\text{mm}; \quad S_2 = 63\text{mm}; \quad S_3 = 126\text{mm};$$

$$S_4 = 186\text{mm}; \quad S_5 = 251\text{mm}; \quad S_6 = 316\text{mm};$$

Para cada curso foram ajustados 3 períodos diferentes do gerador de ondas. Os cursos são definidos atuando-se os sensores de fim de curso do cilindro pneumático e os períodos através da

abertura ou fechamento das válvulas de passagem de ar localizados nas extremidades do cilindro, como indica a Figura 107.

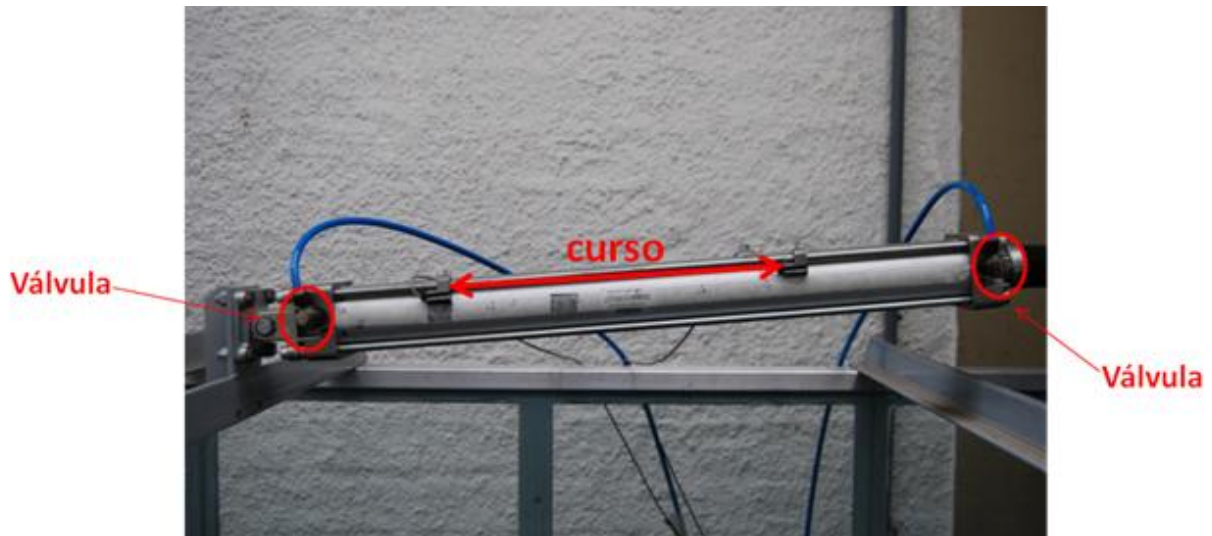


Figura 107 - Cilindro Pneumático - atuação da extensão do curso e dos períodos

A nomenclatura adotada para os 18 ensaios são:

S ₁ P ₁ ;	S ₁ P ₂ ;	S ₁ P ₃ ;
S ₂ P ₁ ;	S ₂ P ₂ ;	S ₂ P ₃ ;
S ₃ P ₁ ;	S ₃ P ₂ ;	S ₃ P ₃ ;
S ₄ P ₁ ;	S ₄ P ₂ ;	S ₄ P ₃ ;
S ₅ P ₁ ;	S ₅ P ₂ ;	S ₅ P ₃ ;
S ₆ P ₁ ;	S ₆ P ₂ ;	S ₆ P ₃ .

4.3.2. Análise dos Dados e Resultados

Analisando-se as amostras de altura de onda no software SAM-MOD-6 pode-se apresentar as amostras temporais completas para um sensor (s_1) da Figura 108 até a Figura 143. Nota-se que não há uma regularidade das alturas de onda e em algumas amostras há distorção do formato das ondas.

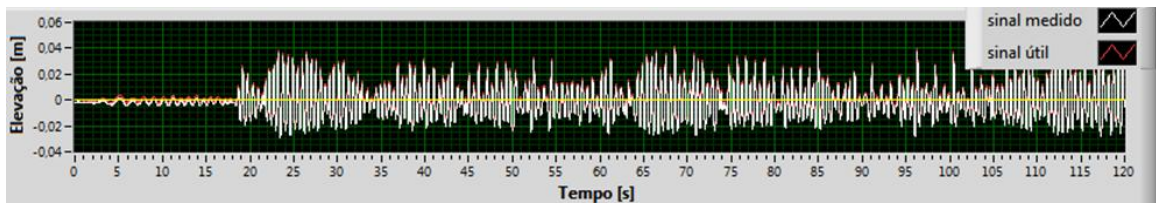


Figura 108 – S1P1 – $H_s=0,059\text{m}$; $T=0,524\text{s}$.

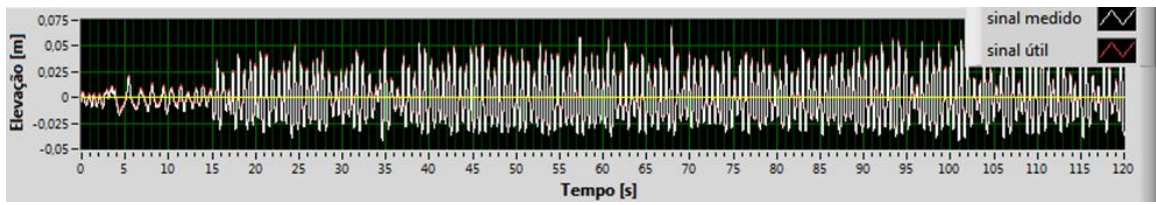


Figura 109 – S1P2 – $H_s=0,073\text{m}$; $T=0,645\text{s}$.

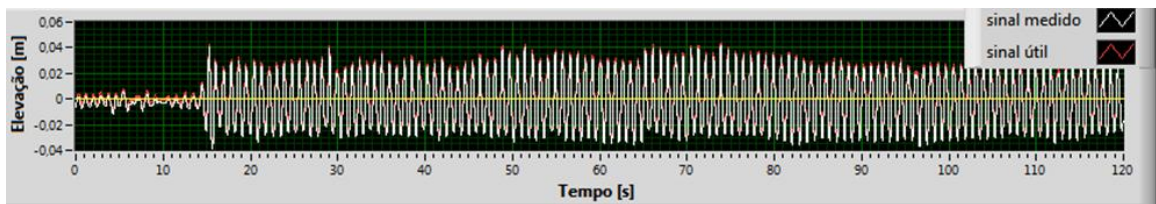


Figura 110 – S1P3 – $H_s=0,057\text{m}$; $T=0,865\text{s}$.

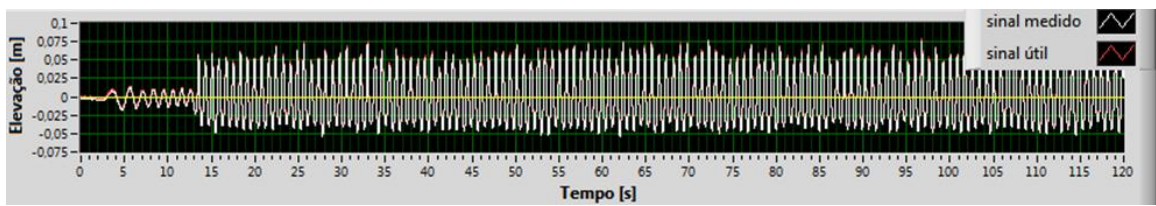


Figura 111 – S2P1 – $H_s=0,103\text{m}$; $T=0,817\text{s}$.

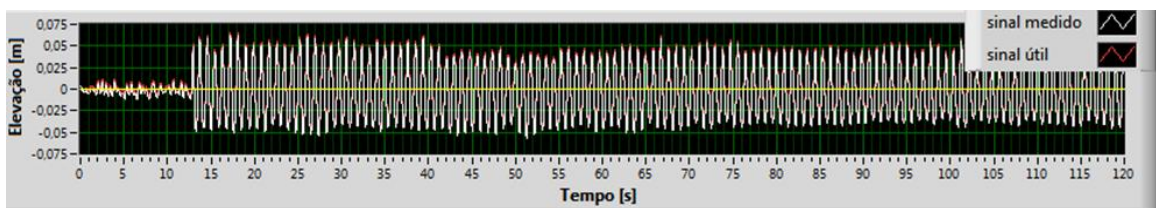


Figura 112 – S2P2 – $H_s=0,107\text{m}$; $T=0,887\text{s}$.

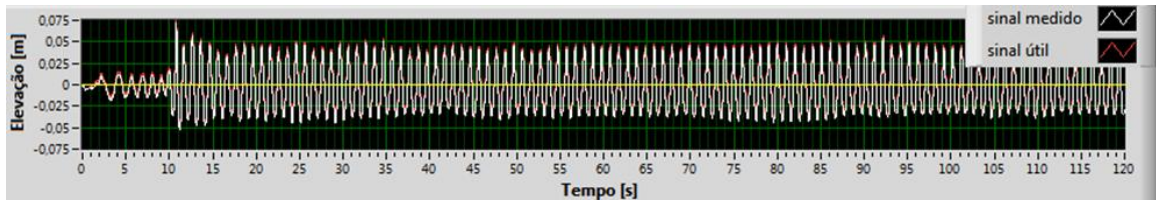


Figura 113 – S2P3 – $H_s=0,089\text{m}$; $T=1,0\text{s}$.

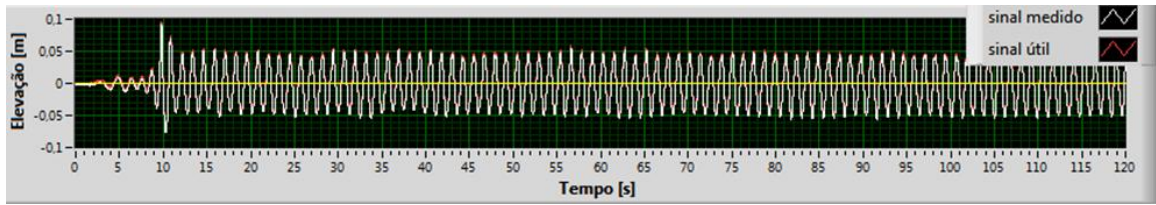


Figura 114 – S3P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,24\text{s}$.

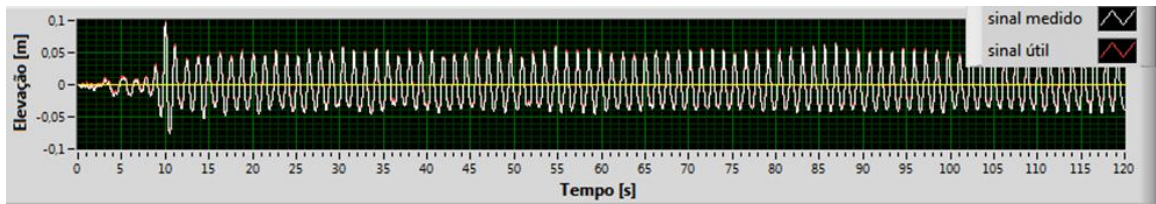


Figura 115 – S3P2 – $H_s=0,093\text{m}$; $T=1,284\text{s}$.

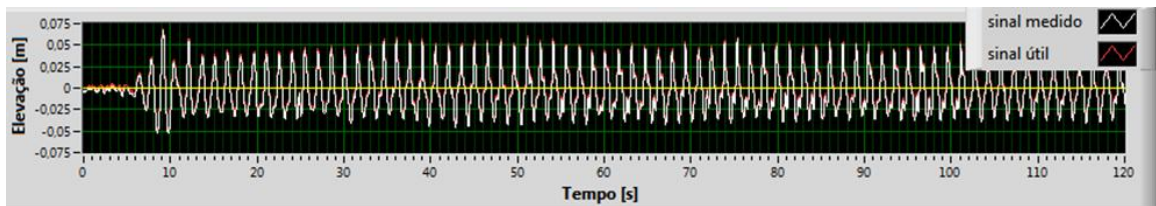


Figura 116 – S3P3 – $H_s=0,077\text{m}$; $T=1,497\text{s}$.

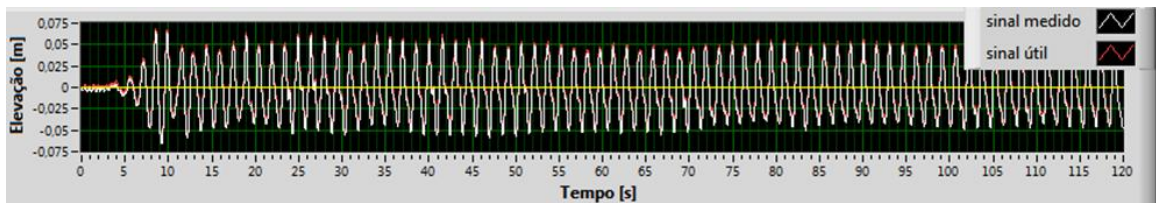


Figura 117 – S4P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,52\text{s}$.

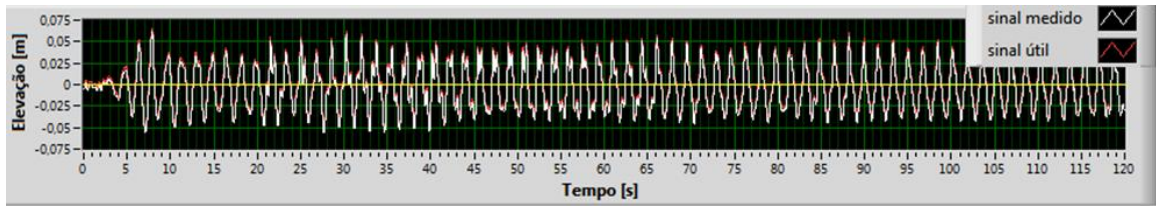


Figura 118 – S4P2 – $H_s=0,082\text{m}$; $T=1,72\text{s}$.

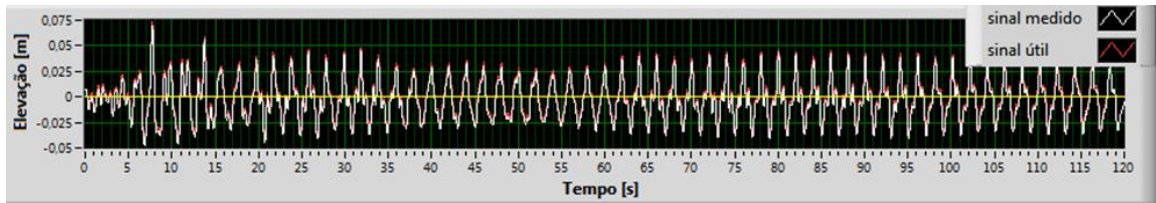


Figura 119 – S4P3 – $H_s=0,083\text{m}$; $T=1,727\text{s}$.

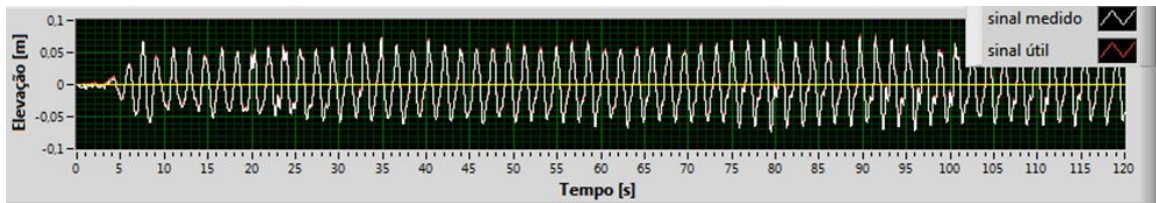


Figura 120 – S5P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,84\text{s}$.

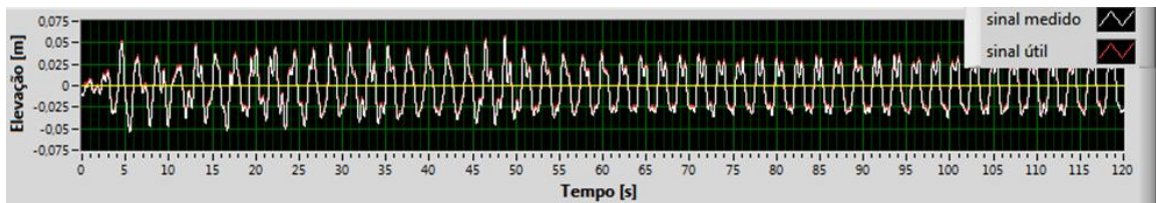


Figura 121 – S5P2 – $H_s=0,089\text{m}$; $T=2,232\text{s}$.

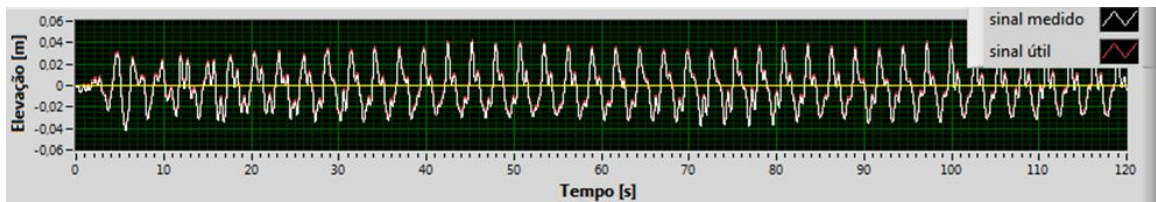


Figura 122 – S5P3 – $H_s=0,057$; $T=2,77\text{s}$.

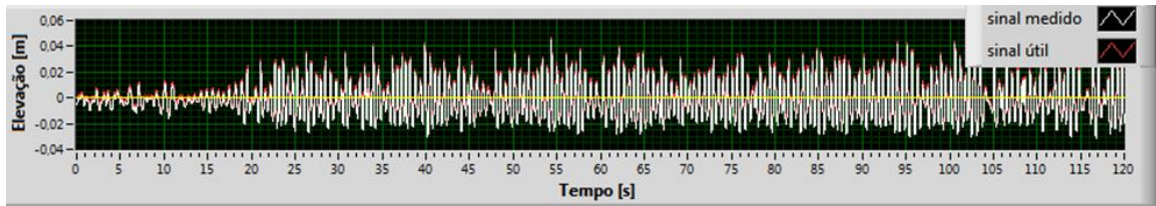


Figura 123 – S6P1 – $H_s=0,051\text{m}$; $T=0,538\text{s}$.

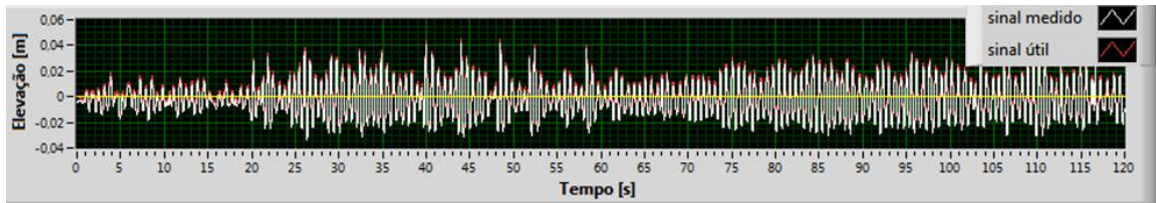


Figura 124 – S6P2 – $H_s=0,059\text{m}$; $T=0,619\text{s}$.

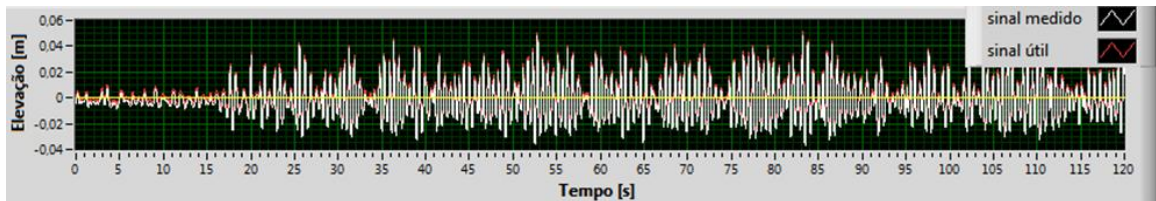


Figura 125 – S6P3 – $H_s=0,057\text{m}$; $T=0,567\text{s}$.

Onda Incidente

Seguindo os mesmos critérios apresentados no item 4.1.3.1 define-se as onda incidente, apresentado-se as amostras na Figura 126 até a Figura 143. Mais uma vez podem-se ser notadas variações das alturas de ondas, que não se mantém constantes, e alguns casos de distorção do formato de onda.

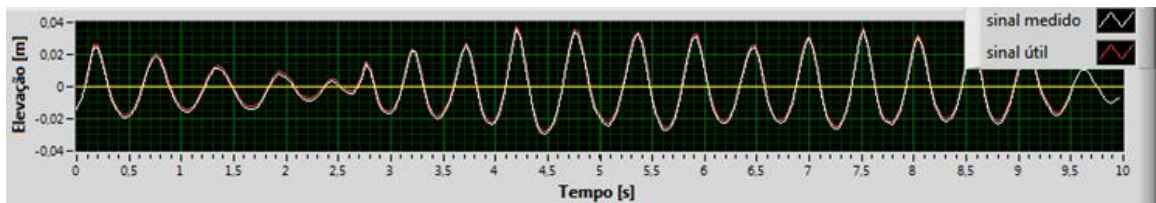


Figura 126 - S1P1 – $H_s=0,059\text{m}$; $T=0,524\text{s}$.

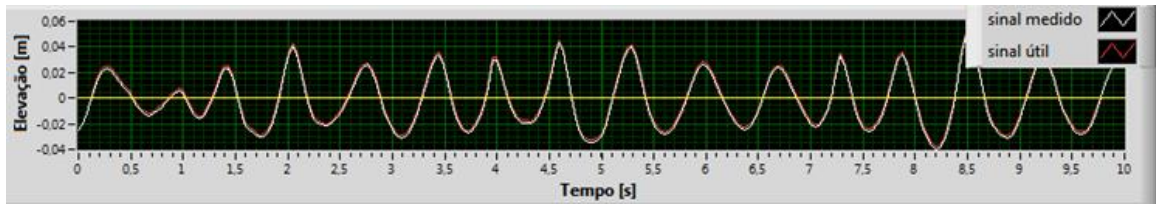


Figura 127 – S1P2 – $H_s=0,073\text{m}$; $T=0,645\text{s}$.

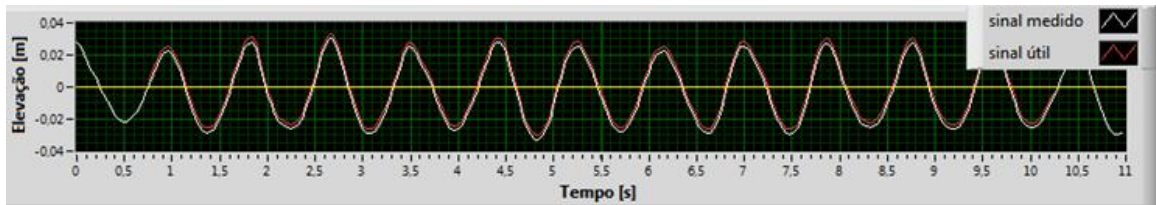


Figura 128 – S1P3 – $H_s=0,057\text{m}$; $T=0,865\text{s}$.

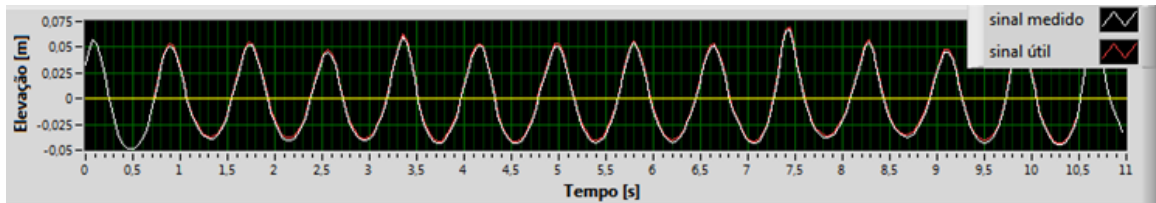


Figura 129 – S2P1 – $H_s=0,103\text{m}$; $T=0,817\text{s}$.

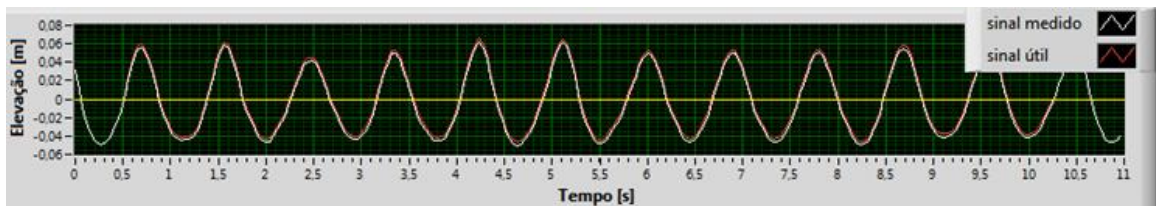


Figura 130 – S2P2 – $H_s=0,107\text{m}$; $T=0,887\text{s}$.

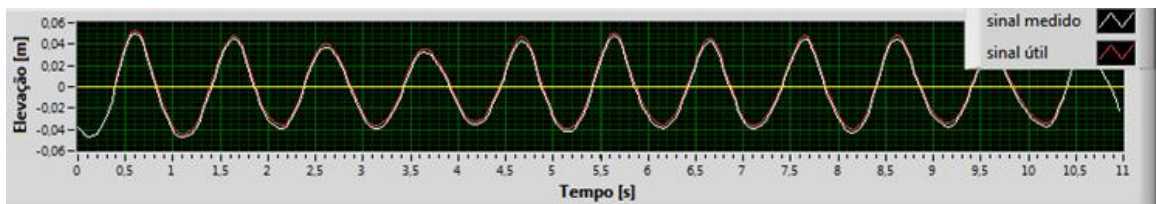


Figura 131 – S2P3 – $H_s=0,089\text{m}$; $T=1,0\text{s}$.

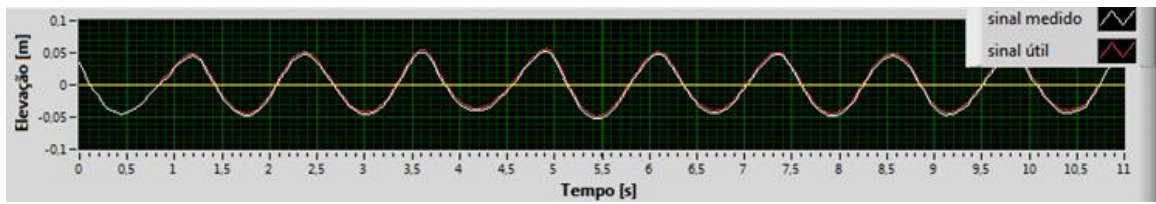


Figura 132 – S3P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,24\text{s}$.

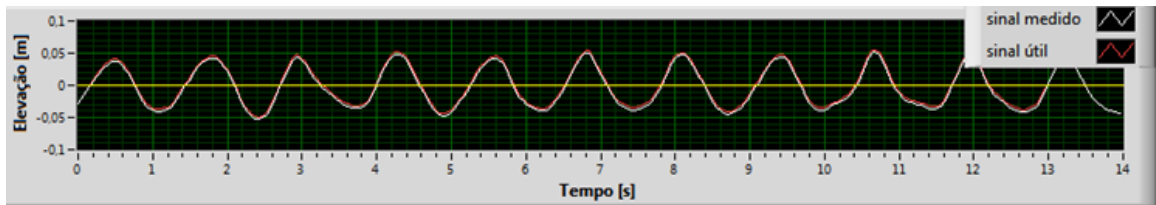


Figura 133 – S3P2 – $H_s=0,093\text{m}$; $T=1,284\text{s}$.

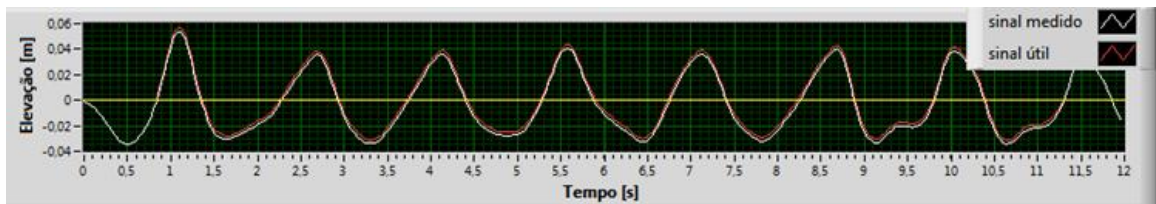


Figura 134 – S3P3 – $H_s=0,077\text{m}$; $T=1,497\text{s}$.

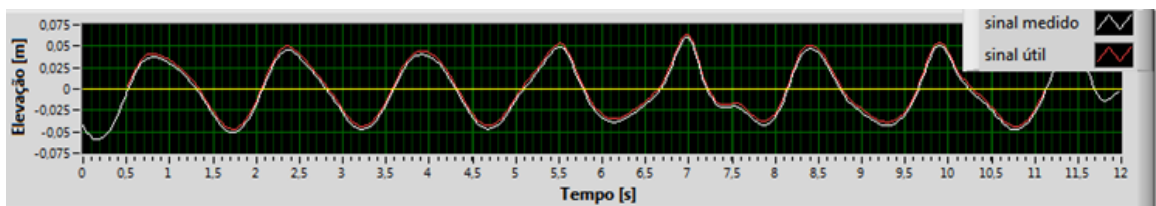


Figura 135 – S4P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,52\text{s}$.

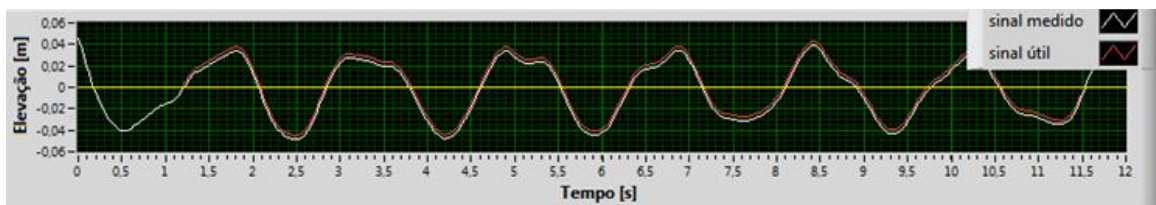


Figura 136 – S4P2 – $H_s=0,082\text{m}$; $T=1,72\text{s}$.

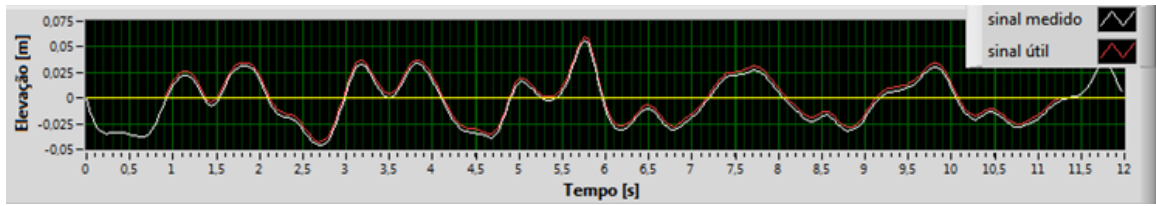


Figura 137 – S4P3 – $H_s=0,083\text{m}$; $T=1,727\text{s}$.

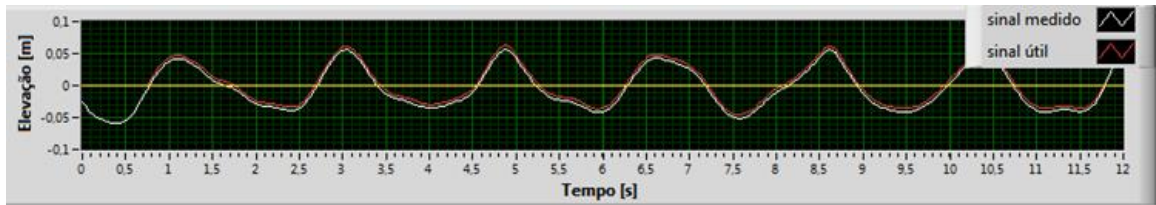


Figura 138 – S5P1 – $H_s=0,098\text{m}$; $T=1,84\text{s}$.

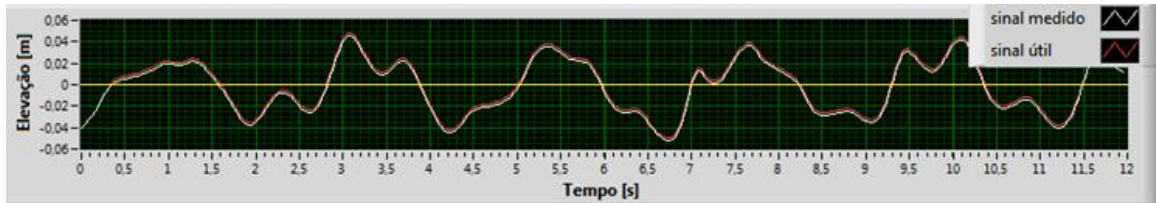


Figura 139 - S5P2 – $H_s=0,089\text{m}$; $T=2,232\text{s}$.

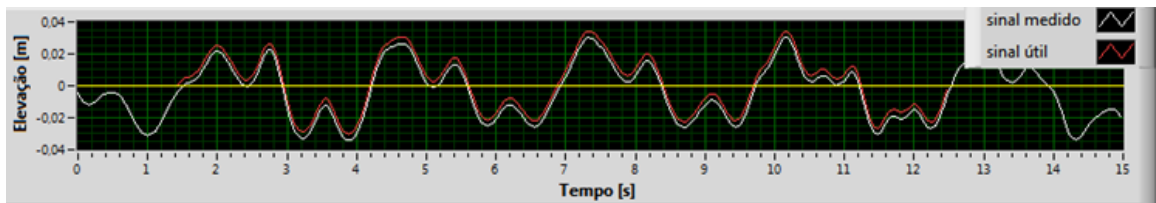


Figura 140 – S5P3 – $H_s=0,057$; $T=2,77\text{s}$.

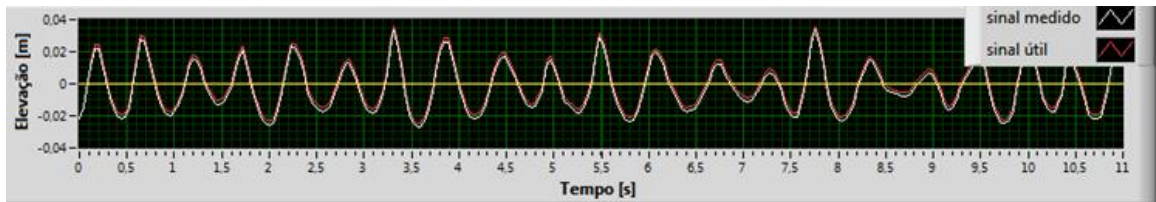


Figura 141 – S6P1 – $H_s=0,051\text{m}$; $T=0,538\text{s}$.

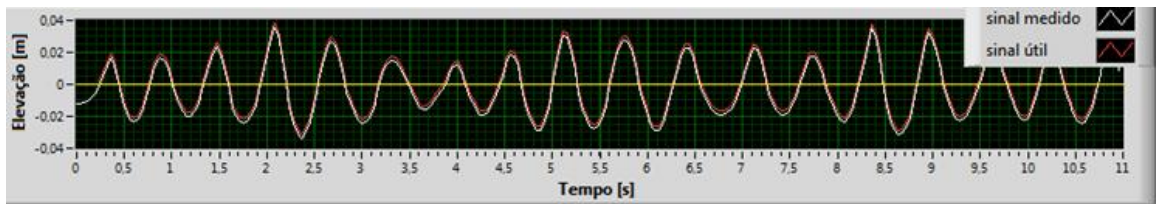


Figura 142 – S6P2 – $H_s=0,059\text{m}$; $T=0,619\text{s}$.

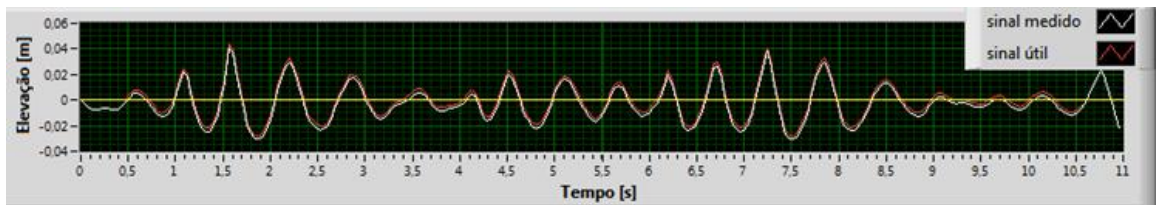


Figura 143 – S6P3 – $H_s=0,057\text{m}$; $T=0,567\text{s}$.

Fazendo-se as análises temporais das amostras de onda incidente podem-se apresentar os resultados na Tabela 15.

	H_s S1(m)	H_s S2 (m)	H_s S3 (m)	H_s médio (m)	T S1 (s)	T S2 (s)	T S3 (s)	T médio (s)	L médio (m)	E média (J)	F médio (W)
S1P1	0,0590	0,0520	0,0560	0,0418	0,524	0,518	0,520	0,521	0,4287	1,63	1,56
S1P2	0,0730	0,0660	0,0690	0,0520	0,645	0,643	0,643	0,644	0,6495	3,84	2,97
S1P3	0,0570	0,0608	0,0610	0,0447	0,865	0,870	0,863	0,866	1,167	5,09	2,96
S2P1	0,103	0,106	0,106	0,0788	0,817	0,817	0,817	0,817	1,042	14,09	8,64
S2P2	0,107	0,106	0,104	0,0793	0,887	0,887	0,887	0,887	1,227	16,80	9,55
S2P3	0,0890	0,0960	0,0960	0,0703	1,00	0,996	0,996	0,997	1,553	16,73	8,62
S3P1	0,0980	0,1010	0,1020	0,0753	1,24	1,24	1,23	1,24	2,315	28,58	13,21
S3P2	0,0930	0,0960	0,0980	0,0718	1,28	1,28	1,28	1,28	2,458	27,60	12,61
S3P3	0,0770	0,0830	0,0810	0,0603	1,50	1,50	1,49	1,49	3,149	24,95	10,92
S4P1	0,0980	0,106	0,109	0,0783	1,52	1,49	1,50	1,50	3,223	43,11	18,79
S4P2	0,0820	0,0920	0,0880	0,0655	1,72	1,70	1,69	1,70	3,855	36,13	15,10
S4P3	0,0830	0,0710	0,0840	0,0595	1,73	1,72	1,47	1,64	3,877	30,08	12,55
S5P1	0,0980	0,0930	0,1030	0,0735	1,84	1,32	1,82	1,66	4,226	49,86	20,26
S5P2	0,0890	0,0950	0,0920	0,0690	2,23	1,62	1,90	1,92	5,406	56,15	20,60
S5P3	0,0590	0,0480	0,0550	0,0405	2,77	1,43	1,39	1,86	6,970	25,10	7,96
S6P1	0,0510	0,0490	0,0450	0,0363	0,538	0,543	0,538	0,540	0,4519	1,30	1,21
S6P2	0,0590	0,0670	0,0620	0,0470	0,619	0,607	0,609	0,612	0,5982	2,89	2,33
S6P3	0,0570	0,0650	0,0660	0,0470	0,562	0,567	0,572	0,567	0,4931	2,38	2,12

Tabela 15 - resultado da Análise Temporal para S1, S2 e S3 (IRN).

O diagrama da Figura 144 indica os tipos de ondas gerados, predominantemente de segunda ordem, e ainda situações de ondas com componentes de terceira e quinta ordem.

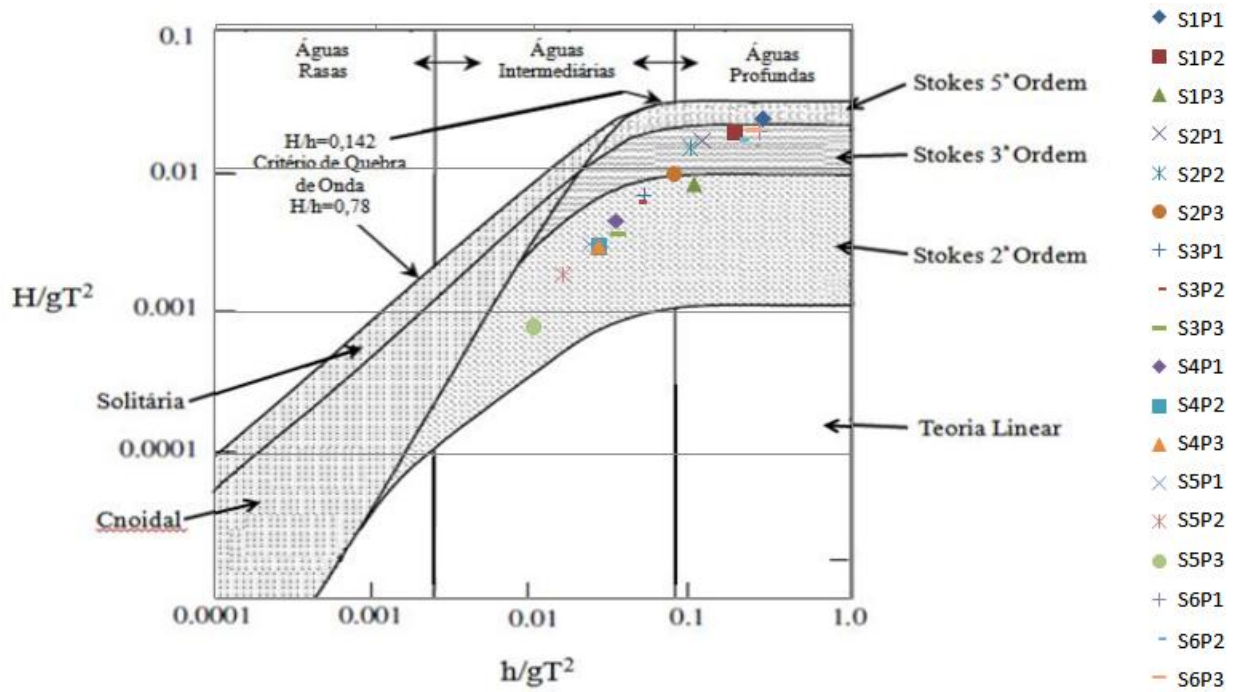


Figura 144 – Ondas ensaiadas apresentam componentes de até quinta ordem (KAMPHUIS, 2000, adaptada).

Curva do Batedor de Ondas da UNIFEI

Através da Tabela 15 podem-se gerar as curvas do bateror para cada um dos sensores, e ainda as curvas obtidas através da Eq. 60 e Eq. 61.

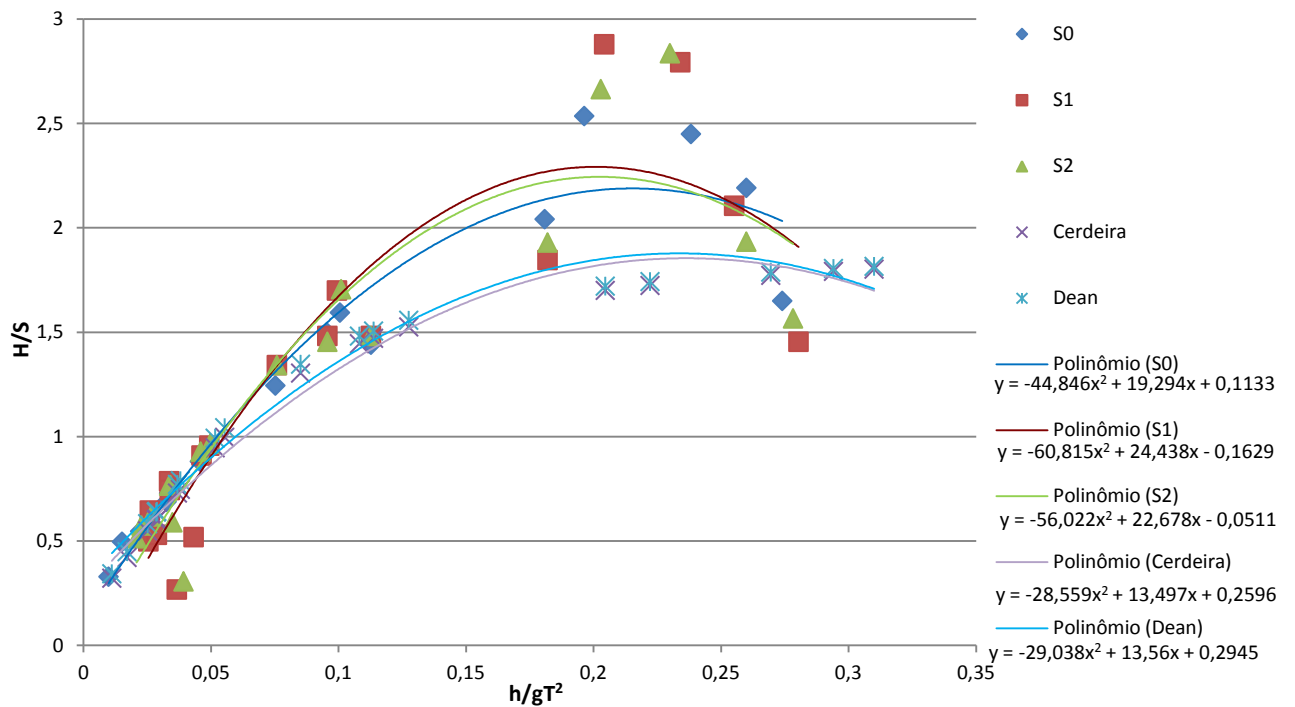


Figura 145 – Curvas do Batedor do IRN.

As curvas obtidas experimentalmente apresentam resultados semelhantes entre si, assim como os resultados muito próximos das duas curvas teóricas. Mais uma vez, assim como nos experimentos realizados no IPH, as curvas teóricas não coincidem perfeitamente com as obtidas empiricamente. Contudo, desta vez, as curvas teóricas apresentam uma previsão de ondas menores às realmente obtidas nos experimentos.

5. Conclusões

Este trabalho teve três objetivos:

Objetivo 1:

Desenvolver uma metodologia de utilização de canais de ondas para testes de modelos físicos reduzidos de estruturas e componentes de dispositivos de conversão da energia das ondas, definindo relações de escala Modelo x Protótipo e as faixas de períodos e de alturas de onda do canal de ondas utilizado. Para tanto, foram realizados os Ensaios 1 e 2:

Ensaio 1: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IPH-UFRGS, onde são definidas as faixas de períodos e alturas de onda das ondas geradas no canal do IPH através de medidas de altura de onda e de velocidade das partículas de água. São obtidas as curvas para o batedor de ondas e os coeficientes de reflexão no canal.

Ensaio 2: Ensaio de modelo reduzido de placa atenuadora, realizado no IPH-UFRGS. A curva do batedor é aplicada para se obter o ajuste do curso e da frequência do batedor de ondas, para se obter a onda dimensionada através das escalas de Modelo x Protótipo.

Objetivo 2:

Comparar o funcionamento e metodologias de análise de dois sistemas de instrumentação: Medidores de Altura de Onda Resistivos e Medidores Acústicos de Velocidade por Efeito Doppler (ADV – *Acoustic Doppler Velocimeter*). Utilizou-se os Ensaios 1 e 2

Objetivo 3:

Comparar o comportamento operacional dos canais de ondas do IPH-UFRGS e do IRN-UNIFEI. Comparando os resultados dos Ensaios 1 e 3:

Ensaio 3: Caracterização do funcionamento do Canal de Ondas do IRN-UNIFEI. São obtidas as faixas de períodos e alturas de onda geradas no canal do IRN através de medidores de altura de onda. São obtidas as curvas para o batedor de ondas.

5.1. Metodologia de Ensaio em Modelos Reduzidos (Objetivo 1)

Para a realização de testes em modelos reduzidos em canais de ondas ficam definidos alguns critérios importantes:

1 – Utiliza-se o Critério de Froude para as relações de escala. Isto é:

$$N_t = \sqrt{N_L}$$

Eq. 59

2 – Deve-se obter a curva empírica do batedor. As curvas teóricas não descrevem perfeitamente os comportamentos dos batedores.

3 – Deve ser definido e respeitado o *Tempo de Tranquilização* entre os testes. O que leva a ensaios mais limpos e previsíveis. A não espera de um tempo adequando pode resultar na geração de ondas de terceira e quinta ordens. O tempo utilizado nos Ensaios 1 e 2 foi de 5 minutos. No Ensaio 3 não foi definido nenhum *Tempo de Tranquilização*, o que prejudicou muito o ensaio.

5.1.1. Ensaio da Placa Atenuadora

A medição das ondas antes e aos do modelo (incidente e transmitida), apresentam boas possibilidades de análises. Uma medida faltante nesse trabalho, que deveria ser obtida em próximos trabalhos é a dos movimentos da placa atenuadora. Tal informação seria muito útil no processo de desenvolvimento do dispositivo testado.

A Figura 146 facilita a observação dos formatos de onda decorrentes da passagem das ondas pela placa atenuadora, sobre a ação das quatro cargas diferentes utilizados nos testes. Diversas análises podem ser efetuadas através dessas informações, como previsão da interação com o ambiente dessas ondas distorcidas pelo dispositivo, a disponibilidade energética das ondas que passam pelo dispositivo, entre outras.

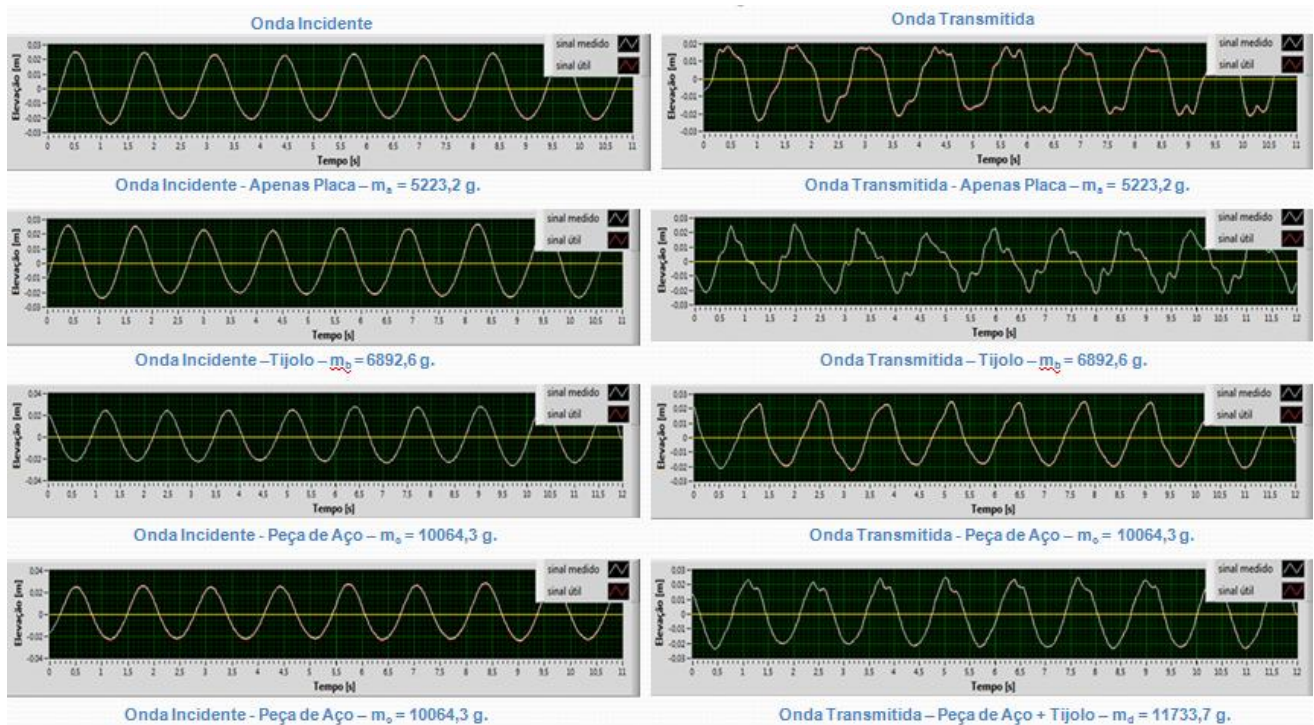


Figura 146 – Ondas Incidentes e Transmitidas – Ensaio 3 – Placa Atenuadora.

5.2. Cálculo das alturas de ondas através de medidas de velocidade (Objetivo 2)

Sensores de velocidade do tipo acústico (ADV) produzem informações muito mais completas sobre as ondas do que os comumente utilizados sensores resistivos, contudo, toda a formulação teoria parte do uso da grandeza *altura de onda* para a obtenção de resultados para outras informações físicas. Por isso, apesar da complexidade dos dados obtidos dos ADVs, a obtenção da altura de onda é muito importante, e sendo possível obter-se as alturas através dos ADVs, no futuro, todo o sistema tradicional resistivo pode ser dispensado.

A metodologia para obtenção das alturas de onde segue os seguintes passos:

- 1- Medição tridimensional de velocidades;
- 2- Filtragem dos dados usando filtro de Thompson;
- 3- Projeção das amostras nas direções principais de propagação;
- 4- Cálculo das alturas de ondas através do equacionamento da teoria linear;
- 5- Análise temporal ou espectral dos resultados.

Como nos testes realizados foram montados sensores resistivos paralelos aos ADVs a diferença entre os resultados pôde ser obtido e foram expostos graficamente nas Figura 85 e Figura 86, nos ensaios para obtenção da curva do batedor, e nas Figura 104 e Figura 105 nos testes da placa atenuadora.

A metodologia atendeu as expectativas apresentando diferenças máximas entre os valores medidos e calculados de 27% e mínimos de 0%. As maiores diferenças são de origem desconhecida devendo ser mais investigada, mas podem ser atribuídas às instabilidades do fluxo físico das ondas e à instabilidades numéricas, nos processos de filtragem e correção dos dados. Os resultados calculados expressam perfeitamente o comportamento físico das ondas. Um programa pode ser elaborado para a automação dos procedimentos de filtragem e correção permitindo uma aplicação mais usual dos ADVs.

5.3. Comparação entre os canais de ondas do IRN e do IPH (Objetivo 3)

Testes de todo o campo operativo foram realizados nos dois canais utilizados, podendo-se fazer uma comparação entre eles. As Figura 33 até a Figura 47 podem ser comparadas com as Figura 108 até a Figura 125. Assim como as Figura 49 até a Figura 63 podem ser comparadas com as Figura 126 até a Figura 143. Pode-se observar que as ondas geradas no canal do IPH possuem grande regularidade (e previsibilidade, comprovada no teste da placa atenuadora). As ondas do canal do IRN não mantêm as alturas de onda constantes, com grandes deformações no formato de onda.

Uma comparação de amostras de períodos semelhantes pode ser feita. Na Figura 147 podem-se comparar ondas com períodos em torno de 2,5s. Nota-se o formato da onda do IRN completamente destorcido. Isso se deve a falta de rigidez do batedor de ondas e a falta da espera do correto *Tempo de Tranquilização*.

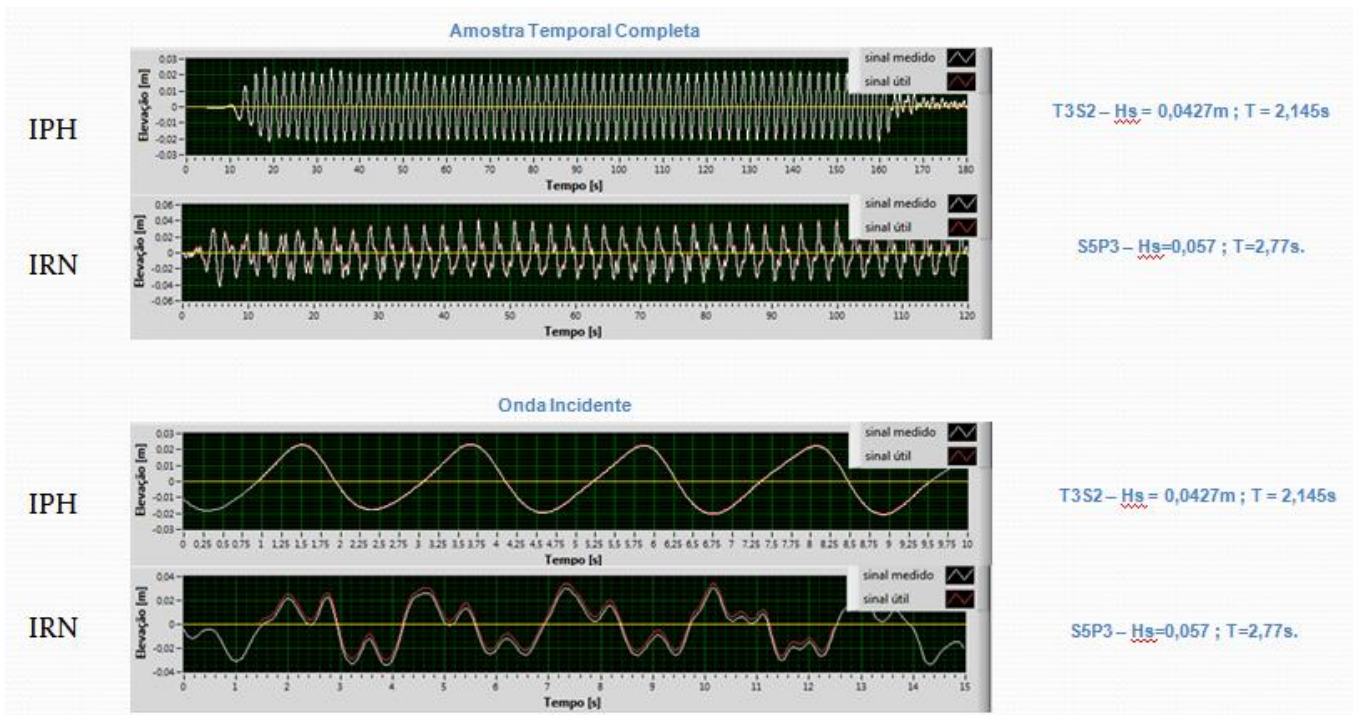


Figura 147 - Comparação IPH/IRN, $T \approx 2,5s$.

O mesmo acontece na figura Figura 148, para ondas de períodos em torno de 1,6s, onde há muita deformação nas ondas do IRN.

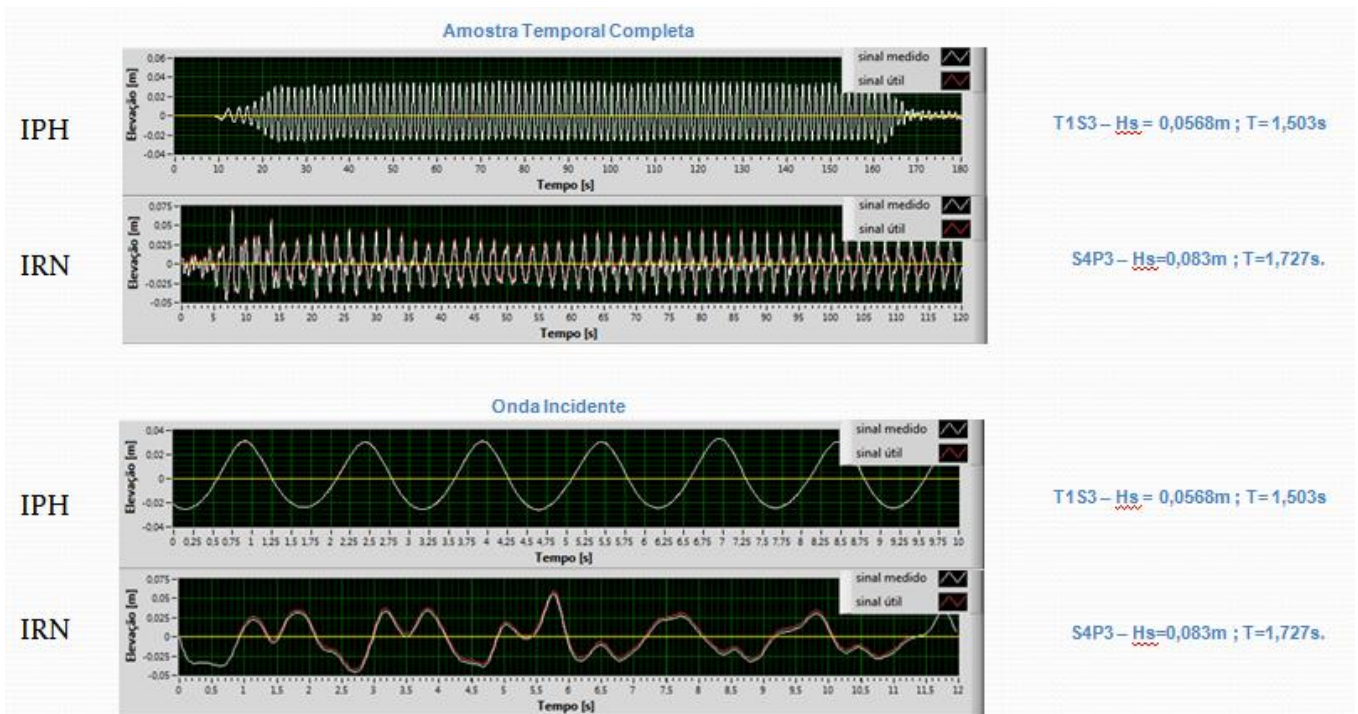


Figura 148 - Comparação IPH/IRN, $T \approx 1,6s$.

Para períodos menores a distorção é menor mas ainda há variabilidade das alturas de onda, como exemplifica a Figura 149, para período em torno de 1,2s.

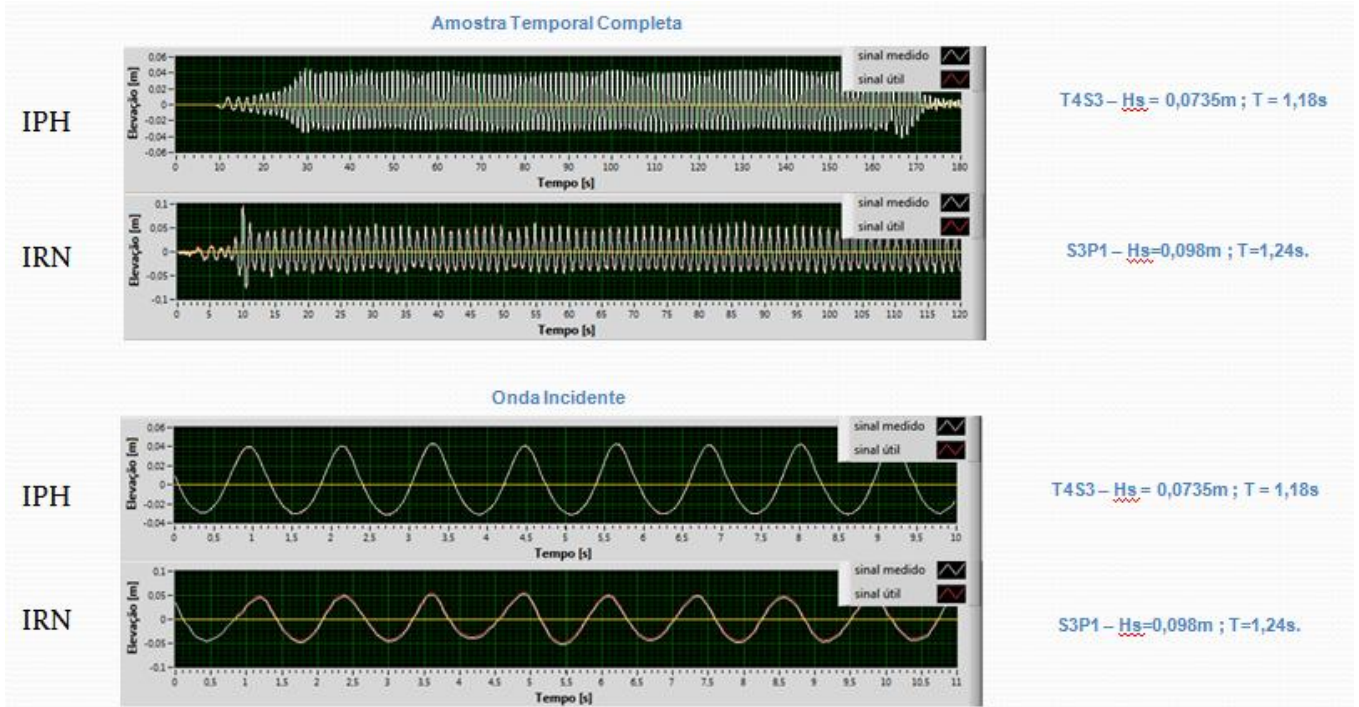


Figura 149 - Comparação IPH/IRN, $T \approx 1,2s$.

5.3.1. Melhorias para o Canal de Ondas IRN-UNIFEI

A Placa Basculante do Canal de Ondas do IRN deve ser trocada. Ela apresenta diversos problemas como flambagem, vibração em torno do atuador e falta de uma fixação adequada ao fundo do canal. A Figura 150 ilustra esses problemas:

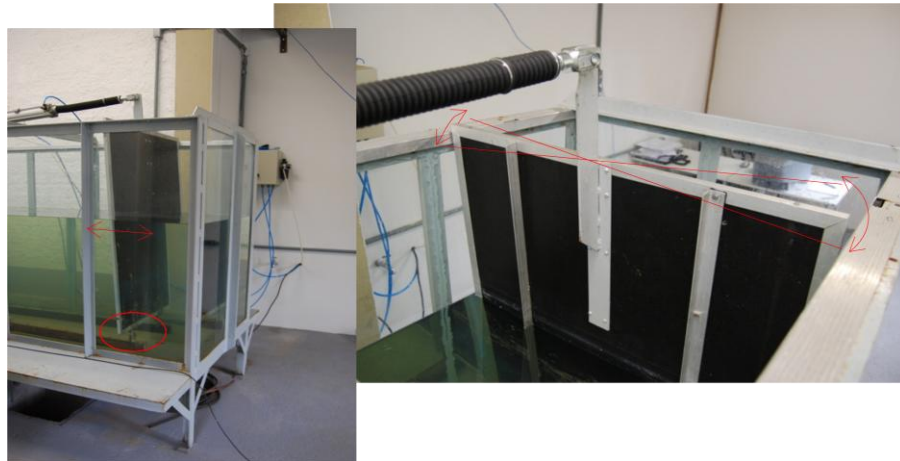


Figura 150 – Batedor de Ondas IRN – Problemas de vibração, flambagem e de fixação.

Uma nova placa basculante deve ser montada no canal, onde aqui é sugerida a utilização da placa basculante do canal do IPH como molde construtivo (Figura 151). Todo em aço, bem reforçado, e com o pivotamento ao fundo do canal, engastado rigidamente.



Figura 151 – Placa Basculante – Batedor IPH – Vista frontal e traseira.

O sistema de ar comprimido deve ser revisado, com a eliminação de todos os pontos de vazamento. Um sistema de controle e automação pode se elaborado, mapeando-se os períodos, alturas de onda, cursos e aberturas das válvula do pistão cilíndrico. Desta forma, parece ser possível a geração de diversos tipos de ondas com esse batedor, com previsibilidade. No entanto, para geração de ondas simples, mais sinodais possíveis, um sistema giratório, acêntrico, como do IPH, se mostra a solução mais simples e eficaz.

Por fim, uma melhoria no sistema de absorção de ondas também é desejável, já que são utilizadas superfícies totalmente planas de madeiras, podendo-se utilizar uma cobertura mais rugosa, o que melhoraria a absorção de ondas. Também o sistema inteiro permite um movimento das placas, devendo ser mais rigidamente fixado, além do vão entre as duas placas, e entre a placa inferior e o fundo do canal, que devem ser vedados, pois permitem a recirculação da água, gerando um fluxo indesejado (Figura 152).

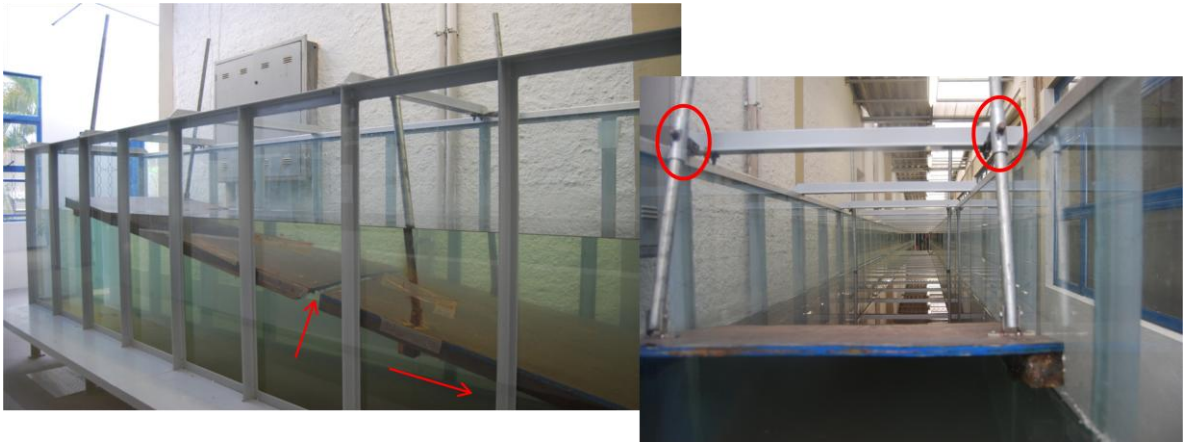


Figura 152 – Pontos problemático do Absorvedor de Ondas – IRN.

6. Referências Bibliográficas

AQUA-RET, Project - <http://www.aquaret.com>, 2012 ;

BHATTACHARYYA, R. – “Dynamics of marine vehicles” – EUA, New York: John Willey & Sons, 1978;

CAPITÃO, Rui Jorge Pereira – “Modelagem estocástica numérica e física da agitação marítima” – Tese (Doutorado) - Instituto Superior técnico – IST/LNEC, Lisboa, 2001;

CARNEIRO, Mario Luis – “Desenvolvimento de um dispositivo de geração e absorção ativa para tanque de ensaios de estruturas oceânicas” – Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007, 98 p.;

CERDEIRA, Victor da Silva Rego – “Estudo sobre as características físicas de um canal de ondas” – Dissertação (Mestrado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006, 149 p.;

CHAKRABARTI, S.K. – “Offshore structure modeling” - Singapore - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1994. 470p. (Advanced series on ocean engineering, v. 9);

CRUZ E SARMENTO – “Energia das Ondas” – Instituto de Ambiente - Alfragide, 2004, 96 p;

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. – “Water wave mechanics for engineers and scientists” - 2nd ed. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1991. (Advanced series on ocean engineering, v. 2);

ENDRES, L., CAPITÃO, R. J. P. – “A comparison of time and spectral analyses on numerical and flume simulatios of wave records”- Proceedings on the Third International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Barcelona, 2010;

ESTEFEN, Segen Farid - “Energia das Ondas”. In: Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Ed. Interciência - Rio de Janeiro, 2003;

HUGHES, Steven A. – “Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering” – New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1993, (Advanced series on ocean engineering, v. 7);

KAMPHUIS, J. Wiliam - "Introduction to Coastal Engineering and Management" - Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2000, 437 p. (Advanced series on ocean engineering, v. 16);

MARTINS, J. A. de A.. "Análise de ondas em tanque de dimensões reduzidas com vistas à engenharia oceânica". Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP-São Paulo, 2003. 188 p.;

MICHIMA, Paula Suemy dos Santos – "Estudo de um absorvedor ativo para tanques didático" – Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP-São Paulo, 2007, 113 p.;

MME/EPE – "Plano Decenal de Expansão de Energia 2019" - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2010, 330 p.;

NEVES, F. N., Endres, L., Fortes, C. J., Clemente, D. S. – "The use of adv in flumes: getting more information about waves", ICCE Proceedings, Espanha, 2012;

QUADRANTE, Luís Antônio Rodrigues – "Desenvolvimento de um simulador simplificado para estudo de geração de ondas em tanques dotados de geradores segmentados"- Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP - São Paulo, 2001, 106 p.;

ROSA, Paula Bastos Garcia – "Controle e otimização de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica" – Dissertação (Mestrado) - UFRJ – Rio de Janeiro, 2008, 112p.;

SONTEK, "Acoustic Doppler Velocimeter - User`s Manual"- San Diego, USA, 1999;

THORPE, T. W. – "An overview of wave energy Technologies: Status, performance and costs"- Wave Power: Moving towards Commercial Viability, Broadway House, Westminster, London, 1999;

USACE - Coastal Engineering Manual (CEM). Washington, DC 20314-1000: U.S. Army Corps of Engineers, 1984;

Anexo 1 – Pacote de Softwares SAM

SAM, acrônimo de Simulação da Agitação Marítima, é um pacote de software integrado para modelação de agitação marítima, através de simulação numérica, geração física e aquisição de dados de modelos físicos marítimos. É composto de nove módulos, cada um destinado a certa tarefa. São utilizados nesse trabalho o SAM-MOD-5-Análise da Reflexão e SAM-MOD-6-Análise Temporal. A seguir expõem-se as interfaces dos módulos empregados assim como considerações sobre seus usos.

Anexo 1.1. MOD-5-Análise da Reflexão

SAM-MOD -5 faz a análise de reflexões separando o espectro da onda incidente do espectro da onda refletida pelo método de *N Sondas*, calculando o coeficiente de reflexão para uma determinada amostra. Deve-se entrar com os dados de 3 sondas em arquivo texto tipo *.txt, tabulado, e realizar os ajustes nos parâmetros citados a seguir para a correta resposta do software:

f_d = *frequência de digitalização* – Nos ensaios realizados a frequência de digitalização, ou frequência de aquisição de dados foi $f_d = 50$ Hz (para IPH) e $f_d = 25$ Hz (para IRN);

K_{si} = *constantes características* de cada sonda – Utilizadas para ajuste do ganho do sinal de cada sonda para calibração ou como aqui foram utilizadas, para converter o sinal de entrada de centímetros para metro (a calibração foi feita anteriormente), usado-se então $K_{si} = 0,010000$;

d = *profundidade do canal* – Dada em metro, em todos os casos foi $d = 0,365$ m;

$X_{i,i+1}$ = *distância entre sondas* – Em metros, $X_{1,2}$ é a distância da sonda 1 à sonda 2, $X_{1,3}$ a distância da sonda 1 à sonda 3 e $X_{1,4}$ a distância da sonda 1 à sonda 4 se houver.

$f_{c_{min}}$ e $f_{c_{max}}$ = *frequências mínima e máxima* – Estabelece frequências de corte caso ocorram instabilidades numéricas no calculo dos espectros. Deve-se usar sempre o mínimo de corte possível partindo-se de $f_{c_{min}} = 0$ Hz e $f_{c_{Max}} = 2$ Hz.

NJ Bartlett – Número de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento dos espectros. Para todos os testes usou-se NJ Bartlett = 8;

Esc = *escala entre modelo/protótipo* - Não foi usado, mantendo-se 1/1.

A Figura 153 apresenta a tela de uso do MOD-5, usando-se do exemplo de um dos ensaios (T1C1). Nota-se uma instabilidade numérica em baixa frequência, abaixo da frequência fundamental, que deve se cortada através do parâmetro $f_{c\min}$.

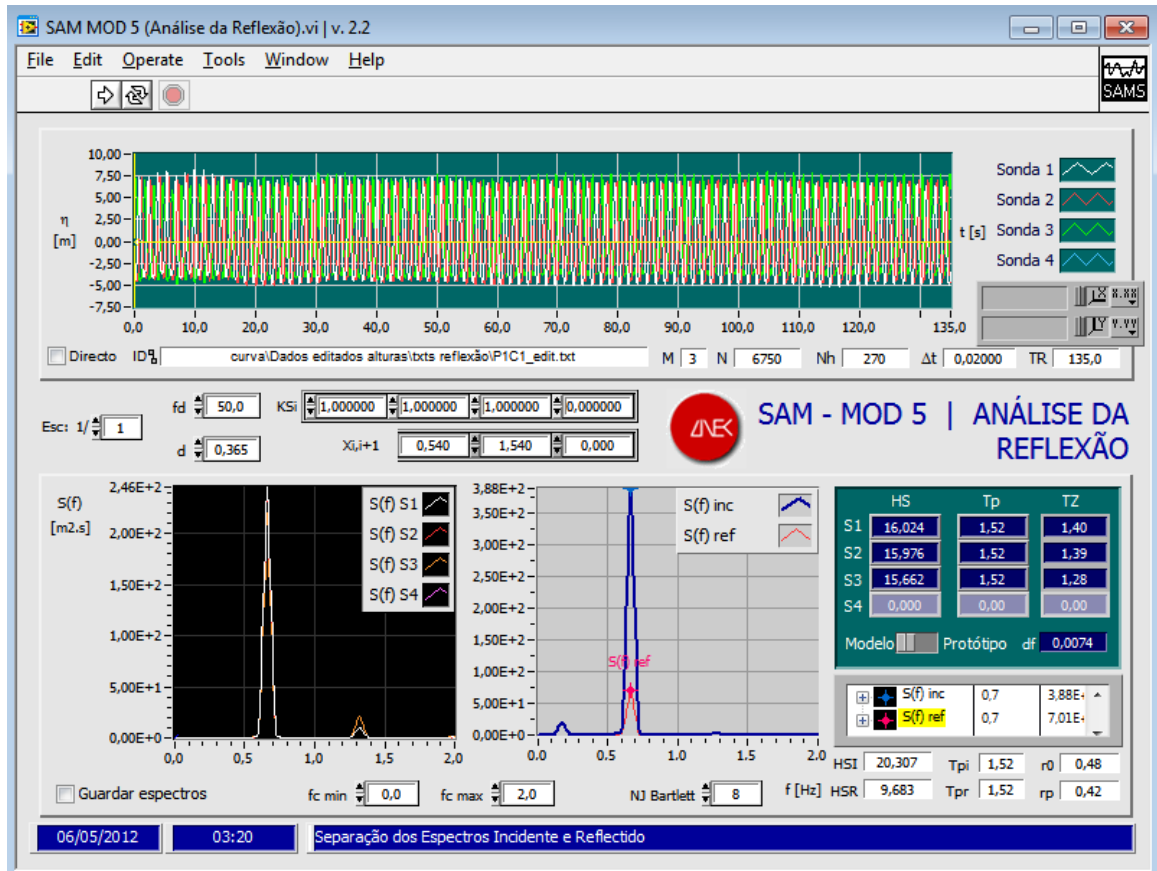


Figura 153 – Tela SAM-MOD-5.

Anexo 1.2. MOD-6-Análise Temporal

SAM-MOD-6 faz a análise temporal das amostras. Deve-se entrar com os dados de 1 sonda em arquivo texto tipo *.txt, e realizar os ajustes nos parâmetros citados a seguir para a correta resposta do software:

$f_d = \text{frequência de digitalização}$ – Nos ensaios realizados a frequência de digitalização, ou frequência de aquisição de dados foi $f_d = 50 \text{ Hz}$ (para IPH) e $f_d = 25 \text{ Hz}$ (para IRN);

$K_{si} = \text{constantes características}$ de cada sonda – Utilizadas para ajuste do ganho do sinal de cada sonda para calibração ou como aqui foram utilizadas, para converter o sinal de entrada de centímetros para metro (a calibração foi feita anteriormente), usado-se então $K_{si} = 0,010000$;

Deve-se optar pelo critério de cruzamento por zero, que no caso desse trabalho foi sempre o de *Zero Ascendente 2* (um ponto antes e outro depois do zero).

Opta-se pelos valores a se descartar no início e fim da amostra, para que se possa analisar somente o trecho de interesse.

A Figura 154 exemplifica o uso do SAM-MOD-6.

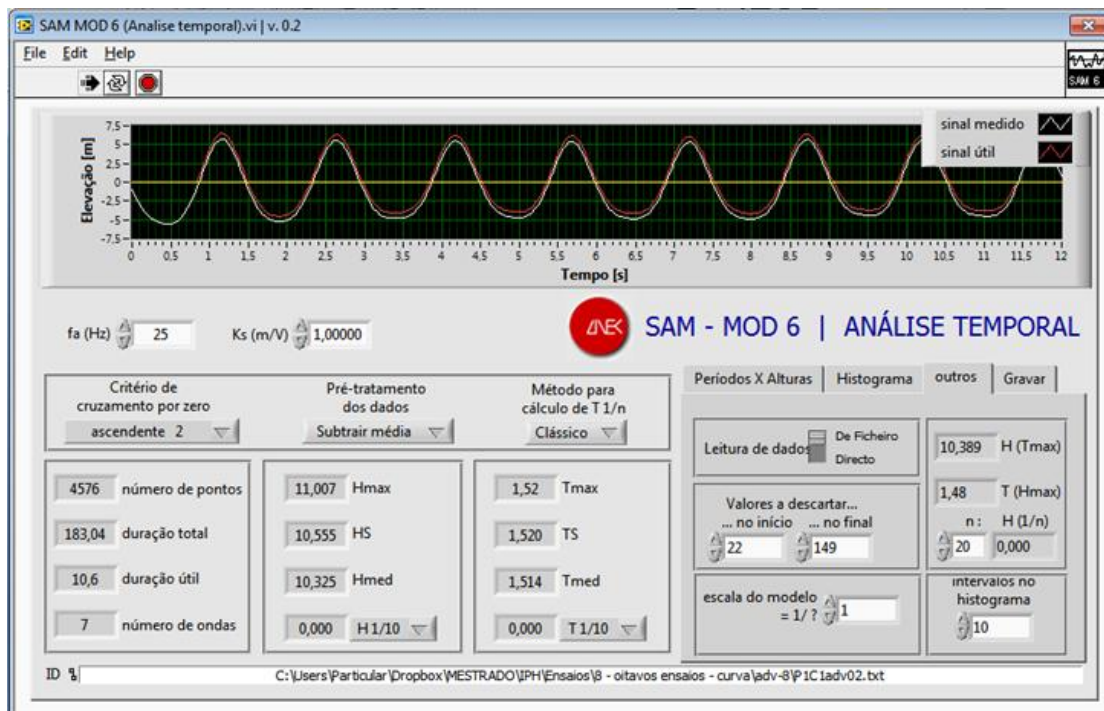


Figura 154 – Tela SAM-MOD-6.

Anexo 2 – Descrição do Canal de Ondas do IRN/UNIFEI

O laboratório onde foi instalado o Canal de Ondas era uma antiga área de servidão, muito pouco usada, entre o Instituto de Recursos Naturais – IRN e a Oficina Mecânica da UNIFEI.

A adequação dessa área compreendeu a construção das paredes exibidas na Figura 155, Figura 156, Figura 157 e Figura 158, a cobertura de toda a área, piso de concreto usinado para suportar o peso do Canal de Ondas, pintura e instalação elétrica.



Figura 155 – Vista frontal do laboratório de ondas.



Figura 156 – Vista lateral do laboratório de ondas.



Figura 157 – Vista traseira do laboratório de ondas



Figura 158 – Vista lateral traseira do laboratório de ondas

A cobertura possui telhas translúcidas e quatro aberturas para iluminação e ventilação naturais (Figura 159).



Figura 159 – Vista interna do laboratório de ondas.

O Canal de Ondas possui 24 metros de comprimento, 0,80 metro de largura e 1,20 metro de profundidade, estrutura em aço tratado contra a corrosão e as laterais em lâminas de vidro temperado.

Foi fabricado em 6 módulos de 4 metros de comprimento em oficina apropriada e unido por parafusos na montagem no local definitivo (Figura 160 e Figura 161).

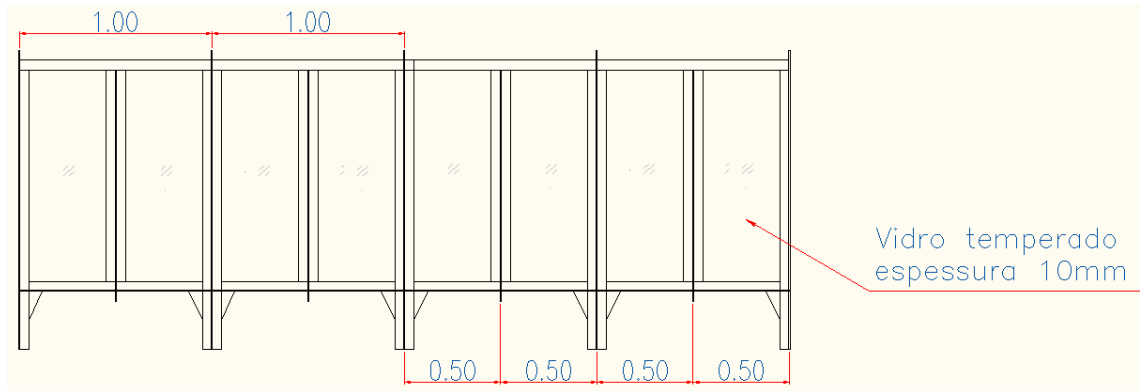


Figura 160 – Um módulo do canal de ondas – vista lateral

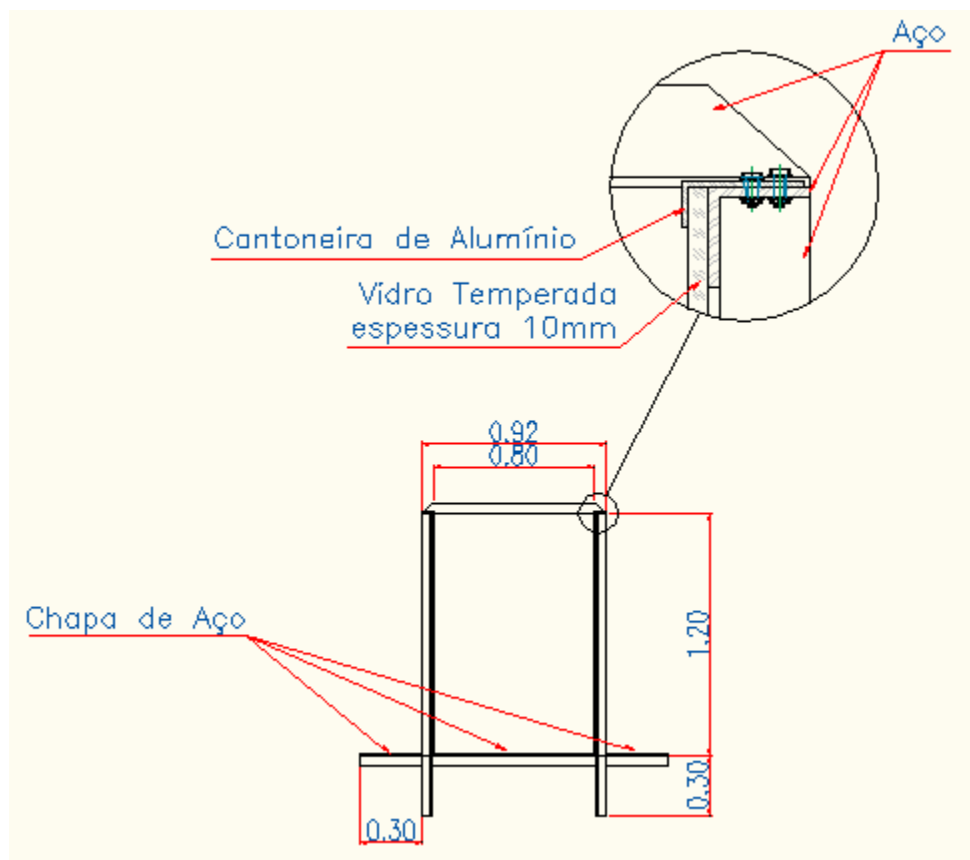


Figura 161 – Um módulo do canal de ondas – vista frontal

Nas extremidades do Canal de Ondas estão instalados os sistemas de geração e de absorção de ondas.

O Gerador de Ondas é do tipo Placa Basculante (“Flap”). Constituído de uma chapa lisa de compensado naval reforçado com esquadria de alumínio (Figura 163, Figura 164), apoiada em articulações dentro do tanque e parcialmente imersa na água. A geração de ondas se dá pela oscilação dessa placa em torno do ponto articulado. O acionamento é por meio de um sistema eletro pneumático (Figura 164, Figura 165, Figura 166, Figura 167).



Figura 162 – Batedor de ondas – vista lateral

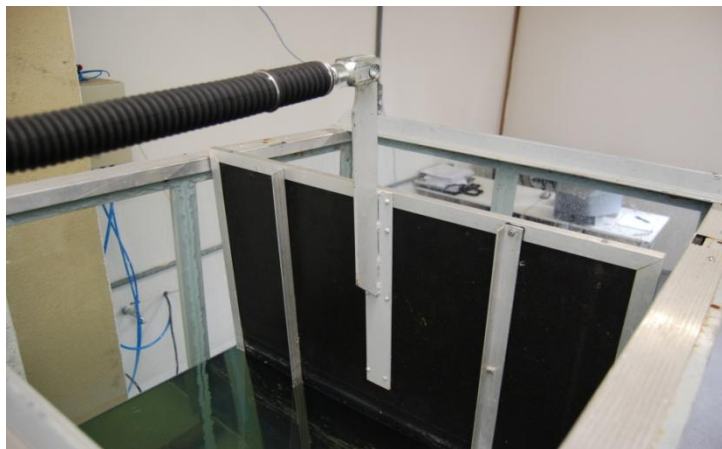


Figura 163 – Batedor de ondas – reforço em alumínio



Figura 164 – Cilindro pneumático do baterador de ondas



Figura 165 – Unidade de controle e preparação do ar comprimido

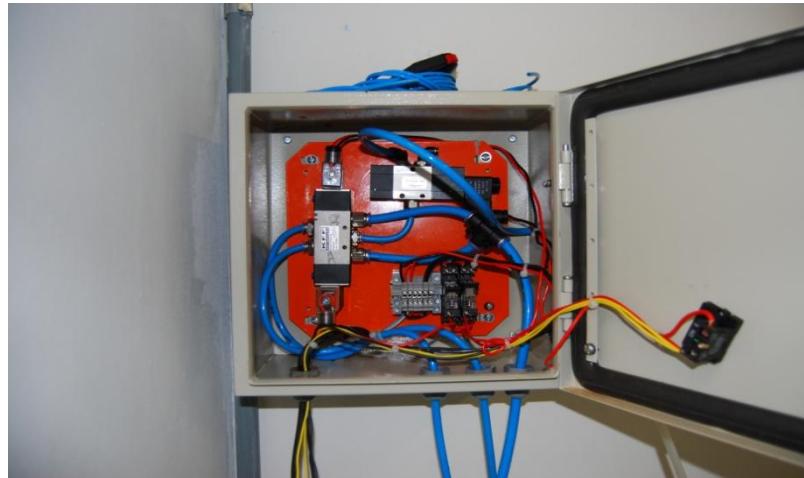


Figura 166 – Sistema de controle eletro-pneumático.

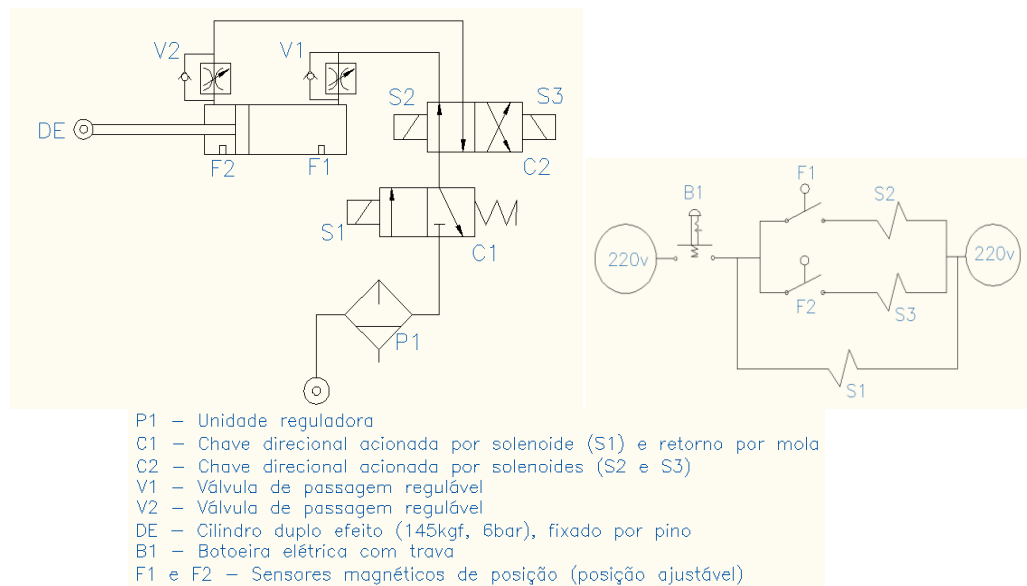


Figura 167 – Circuito eletro-pneumático

O Sistema de absorção de ondas é constituído de uma rampa de compensado naval de 4,40 metros de comprimento, articulada nas extremidades e no meio. As articulações permitem a variação da inclinação da rampa simulando-se diversos perfis de praias (Figura 168, Figura 169 e Figura 170).



Figura 168 – Absorvedor de ondas – vista 1.



Figura 169 – Absorvedor de ondas – vista 2.



Figura 170 – Absorvedor de ondas – vista 3.

