



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Influência de estruturas costeiras na altura da superfície livre e campo de velocidades**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

**Mário Jorge Martins Castro**

Orientador

**Maria Rita Lacerda Morgado Fernandes de Carvalho**

**Colaboração institucional:**



**Laboratório Nacional de Engenharia Civil**  
**Eng. Juana Fortes**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2015**

## AGRADECIMENTOS

À Professora Rita Carvalho, pela oportunidade que deu ao realizar esta dissertação e pelo voto de confiança que depositou em mim. Agradeço pela paciência para esclarecer todas as dúvidas e pelos ensinamentos que me proporcionou sobre os mais variados assuntos, quer relacionados ou não com o trabalho realizado. Agradeço pela capacidade de orientação e pela habilidade de ensinar, que me proporcionou uma grande aprendizagem no decurso deste processo.

À Doutora Juana Fortes, pela flexibilidade e disponibilidade durante todo tempo de ensaios, à simpatia e forma calorosa com que me acolheu e apresentou às várias pessoas integrantes do LNEC - Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas.

Ao Rui Reis, agradeço por toda a ajuda inicial que me deu na aprendizagem do *software* de funcionamento de toda a instrumentação do canal de ensaios.

A todos os funcionários do LNEC, do Departamento de Hidráulica e Ambiente – Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, agradeço pela amabilidade, recetividade e ajuda que me deram no tempo que passei lá.

Agradeço também aos meus colegas mais próximos da Universidade, em especial ao grupo “*Società Della Notte*”, por todo o apoio, amizade e aprendizagem que me proporcionaram durante os anos de curso fazendo-me prometer uma frase especial nos agradecimentos desta dissertação, “Amo o Benfica!”.

Por fim, um sincero obrigado aos meus amigos mais chegados, aos meus pais e avó Lurdes, que sempre me apoiaram e contribuíram para a pessoa que sou hoje, refletindo-se também neste trabalho.

## RESUMO

As estruturas costeiras de proteção portuária são muito comuns em Portugal e frequentemente necessitam de manutenção e reparação durante a sua vida de projeto. O conhecimento do campo de escoamento decorrente da interação das ondas com a estrutura costeira é fundamental para a compreensão dos fenómenos que ocorrem durante a vida útil das estruturas. Na prática é feito uma manutenção baseada em planos de observação das estruturas.

O conhecimento do campo de velocidade ao longo do tempo, nas imediações da estrutura costeira, torna-se crucial para a compreensão dos processos físicos envolvidos e para validação de qualquer modelo matemático e/ou numérico a ser aplicado no projeto destas estruturas.

Neste trabalho procedeu-se à medição das grandezas relevantes para a caracterização do campo de escoamento em redor de uma estrutura com perfil tipo de um quebra-mar e colocada num canal de ondas. Mediu-se a elevação da superfície livre ao longo do eixo longitudinal do canal e do tempo e o campo de velocidades ao longo do tempo e em diversos pontos ao longo do eixo longitudinal e para vários pontos ao longo da vertical, através de sondas resistivas e através do *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*. Os estudos experimentais foram realizados no canal de ondas irregulares, COI3, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, simulando três diferentes condições de agitação regular incidentes. As dimensões do modelo utilizado tiveram em atenção não só as limitações físicas e de escala, como também a possível aplicação em futuros ensaios, de forma a efetuar análises comparativas.

Os resultados permitiram identificar fenómenos complexos no campo de velocidades decorrente de fenómenos de empolamento, rebentação e reflexão causados pela presença da estrutura e verificar o aumento dos efeitos tridimensionais com a proximidade da estrutura.

.

## **ABSTRACT**

Coastal structures are very common in Portugal and they often require maintenance and reparation during their project's lifetime. The behaviour of a coastal structure depends on the flow characteristics which is influenced by wave and their interaction with the structure. For practical engineering, it is required a monitoring program based on measurement of relevant parameters that defined changes along the lifetime.

The knowledge of both the water height and velocity fields close to the coastal structure, becomes crucial for understanding the physical processes that are involved and also for the validation of any mathematical and / or numerical model to be applied in the design of these structures.

In this work, we looked at water depth and velocities along time in the vicinity of the structure, constructed with a typical slope of a rubble mound breakwater and implemented on a wave flume. We measured free surface elevation and velocities by means resistive probes and Acoustic Doppler Velocimeter. Experimental studies were carried out in the irregular waves' channel, COI3 of the "Laboratório Nacional de Engenharia Civil" – LNEC where three different waves were produced. Regarding the model's dimensions, physical limitations and the scale were taken into account as well as the possible use in future tests, in order to perform comparative analysis.

The results enable the identification of complex phenomena in velocity field and several changes in the velocity field and height of the free surface caused by set-up, reflexion and wave breaking due to the presence of structure. The increase of three-dimensional effects in the vicinity of the structure was also verified.

.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	3
2.1 Considerações .....	3
2.2 Teoria Linear das Ondas.....	4
2.2.1 Relações básicas.....	5
2.2.2 Energia das Ondas .....	7
2.2.3 Movimento orbital das partículas das ondas .....	8
2.2.4 Águas profundas vs. Águas pouco profundas .....	9
2.3 Interação entre a agitação marítima, os fundos e as estruturas costeiras.....	12
2.3.1 Conjunto de ondas simples .....	13
2.3.2 Grupo de Onda e sua velocidade .....	15
2.3.3 Fenómenos de interação.....	16
2.4 Rebentação de Ondas .....	23
2.4.1 Princípios gerais.....	23
2.4.2 Tipos de Rebentação .....	24
2.4.3 Critérios de Rebentação vs número de Iribarren .....	26
2.5 Parâmetros estatísticos das ondas.....	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Ensaio em Modelo Físico .....	29
3.1.1 Introdução .....	29
3.1.2 Canal de Ondas.....	30

---

3.1.3	Estrutura.....	31
3.1.4	Equipamentos de medição.....	32
3.1.5	Sistema de geração de ondas.....	36
3.1.6	Sistema de aquisição de dados .....	37
3.1.7	Plano de ensaios.....	38
3.1.8	Nota dos ensaios .....	41
3.1.9	Tratamento dos dados adquiridos .....	42
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
4.1	Sinal da Onda.....	45
4.1.1	Sem influência da Estrutura .....	45
4.1.2	Com influência da Estrutura .....	46
4.1.3	Com e sem influência da Estrutura vs velocidade.....	48
4.2	Rebentação .....	49
4.3	Análise temporal da série de valores de elevação da superfície livre .....	51
4.3.1	Sem influência da Estrutura .....	51
4.3.2	Com influência da Estrutura .....	53
4.4	Análise temporal da série de valores de velocidade das partículas da onda.....	57
4.4.1	Velocidades das partículas ao longo do eixo longitudinal do canal.....	57
4.4.2	Velocidades das partículas ao longo do eixo longitudinal e em profundidade do canal 64	
5	CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS .....	71
5.1	Conclusões.....	71
5.2	Futuros Trabalhos.....	72
	ANEXO .....	A-1
	ANEXO A – Resultados da análise temporal da série de valores de elevação da superfície livre com influência da estrutura .....	A-1
	ANEXO B – Resultados das velocidades das partículas ao longo do eixo longitudinal em profundidade.....	B-5

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 -Definição dos diferentes tipos de profundidades.....	4
Figura 2.2 - Curva sinusoidal simples. ....	4
Figura 2.3 - Movimento da progressão de uma onda. Treze fotos instantâneas, cada uma com um intervalo de 1/12 do período (Adaptado de Gröen e Dorrestein, 1976). ....	8
Figura 2.4 - Mudança Caminho de uma partícula de água durante dois períodos de onda (Adaptado Laing et al., 1998). ....	9
Figura 2.5 - Trajetórias das partículas de água a várias profundidades, em uma onda em águas profundas (Adaptado Ji, 2008). ....	9
Figura 2.6 - Trajetórias das partículas de água a várias profundidades, em uma onda em águas pouco profundas (Adaptado Ji, 2008). ....	10
Figura 2.7 - Tangente Hiperbólica de função x.....	12
Figura 2.8 – Registo de onda gerado em um oceano (Adaptado Kamphuis, 2000).....	13
Figura 2.9 - Exemplo de uma onda igual à sobreposição de duas ondas (I e II) simples (Adaptado de Laing et al., 1998) .....	14
Figura 2.10 - Superfície do Oceano, obtida pela soma de várias ondas sinusoidais (Adaptado de Pierson et al., 1955). ....	14
Figura 2.11 - Fenómeno de empolamento da agitação (Adaptado Bay, 2005) .....	16
Figura 2.12 - Variação do coeficiente de empolamento com a profundidade relativa (Kamphuis, 2000). ....	17
Figura 2.13 - Vista planimétrica ilustrando a correlação entre ângulo ( $\beta$ ) de aproximação da onda, profundidade ( $d$ ) e comprimento da frente de onda ( $b$ ). As ortogonais (linhas tracejadas) são normais às frentes de onda e são as trajetórias seguidas pelos pontos nas frentes de onda (Alfredini e Arasaki, 2009). ....	18
Figura 2.14 - Dispersão e concentração de energia em baías e cabos respetivamente. (Adaptado marítimas) .....	18
Figura 2.15 - Imagens aéreas da Baía de São Martinho do Porto, Portugal via Google Earth.....	19
Figura 2.16 - Fenómeno de difração das Ondas (Adaptado de Sancho, 2002).....	19
Figura 2.17 - Linhas de corrente na reflexão completa de acordo com a teoria linear. (Kamphuis, 2000). ....	20
Figura 2.18 - Reflexão das ondas (Adaptado de Sancho, 2002).....	20
Figura 2.19 - Exemplo de espraiamento (Adaptado de Bay, 2005). ....	21
Figura 2.20 - Espraiamento sobre estruturas sendo H a altura de onda na base da estrutura (Van der Meer e Stam referido por Sancho, 2002).....	22
Figura 2.21 - Espraiamento e refluxo (Adaptado de CEM, 2008).....	22

Figura 2.22 - Último formato possível da onda antes da rebentação, segundo a Teoria de Stokes (Adaptado de Laing et al., 1998) .....	23
Figura 2.23 - Perfil de onda cicloidal, onde as cristas estão localizadas mais acima do nível médio que as cavas abaixo deste (Adaptado de Laing et al., 1998).....	24
Figura 2.24 - Exemplo de rebentação progressiva (Adaptado de Talley et al., 2011). .....	25
Figura 2.25 - Exemplo de rebentação mergulhante (Adaptado de Talley et al., 2011). .....	25
Figura 2.26 - Exemplo de rebentação por colapso (Adaptado de Kamphuis, 2000).....	26
Figura 2.27 - Exemplo de rebentação oscilante (Adaptado de Talley et al., 2011).....	26
Figura 2.28 - Registo de uma onda marítima (Adaptado Leing et al., 1998) .....	27
Figura 3.1 - Canal sem a implementação da estrutura e com estrutura. ....	29
Figura 3.2 - Vistas do canal de ensaios, COI3. ....	30
Figura 3.3 - Planta do canal de ondas COI3.....	30
Figura 3.4 – Perfil do canal de ondas COI3.....	31
Figura 3.5 - Estrutura e suas dimensões (à esquerda); Estrutura colocada no COI3 (à direita). .....	31
Figura 3.6 - Características geométricas da sonda Wave-Height Sensor (WHS) mark III.....	32
Figura 3.7 - a) Sonda junto ao batedor; b) 8 sondas; c) Sonda junto ao ADV.....	33
Figura 3.8 - Características geométricas do ADV <i>Vectrino</i> .....	34
Figura 3.9 – ADV e as três componentes ortogonais. ....	35
Figura 3.10 - Posicionamento do ADV em planta .....	35
Figura 3.11 - Sistema de geração das ondas: a) Batedor de ondas; b) Computador de geração do sinal (CPU1); c) Painel de atuação do gerador. ....	36
Figura 3.12 - Exemplo de um sinal de geração de ondas em formato ASCII. (Adaptado de Neves et al., 2011a) .....	37
Figura 3.13 - Painel <i>National Instruments™</i> , <i>SPIDER</i> e Condicionador de sinal .....	38
Figura 3.14 – Posições dos equipamentos no canal de ondas sem implementação da estrutura. ....	39
Figura 3.15 - Posições dos equipamentos no canal de ondas com implementação da estrutura.....	40
Figura 3.16 - Verificação da temperatura do motor do gerador de ondas.....	41
Figura 3.17 - Exemplo das Matrizes do programa <i>Matlab®</i> de repouso, calibração e dados puros de um ensaio de uma onda T7H1.25 sem estrutura.....	43
Figura 4.1 - Excertos dos sinais da altura da onda nas posições $x = -1200$ cm, a), $x = -700$ cm, b) e $x = 250$ cm, c), sem estrutura no canal.....	46
Figura 4.2 - Excertos dos sinais da altura da onda nas posições $x = -1200$ cm, a), $x = -700$ cm, b) e $x = 250$ cm, c), com estrutura no canal.....	47
Figura 4.3 – Perfil de altura da onda vs velocidade, sem estrutura no COI3 na posição $x = 250$ cm....	48
Figura 4.4 - Perfil de altura da onda vs velocidade, com estrutura no COI3 na posição $x = 250$ cm. ...	48
Figura 4.5 - Sequência de 12 fotografias aos fenómenos de espriamento e refluxo da onda T7H1.25 sobre o talude da estrutura no canal.....	50
Figura 4.6 - Sequência de 12 fotografias da rebentação mergulhante da onda de geração T11H2, com a estrutura colocada no canal. ....	50
Figura 4.7 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3. ....	51
Figura 4.8 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3. ....	52

Figura 4.9 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T11H2 no COI3. ....	53
Figura 4.10 - Partes exterior e interior da zona de rebentação (Adaptado de Fredsøe e Deigaard, 1992). ....	53
Figura 4.11 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura. ....	54
Figura 4.12 - Zona de instabilidade na localização das 8 sondas com uma onda de geração T7H1.5. .	54
Figura 4.13 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura. ....	55
Figura 4.14 - Altura significativa, $H_s$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura. ....	56
Figura 4.15 – Fotografia do COI3 com estrutura para onda de geração T11H2. ....	57
Figura 4.16 – Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.25 ao longo do eixo x do COI3. ....	58
Figura 4.17 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.5 ao longo do eixo x do COI3.....	59
Figura 4.18 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T11H2 ao longo do eixo x do COI3.....	60
Figura 4.19 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.25 ao longo do eixo x do COI3. ....	61
Figura 4.20 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.5 ao longo do eixo x do COI3.....	62
Figura 4.21 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T11H2 ao longo do eixo x do COI3.....	63
Figura 4.22 - Onda T7H1.25 Velocidade Longitudinal, $V_x$ , em profundidade. ....	65
Figura 4.23 - Onda T7H1.25 Velocidade transversal, $V_y$ , em profundidade. ....	65
Figura 4.24 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade. ....	66
Figura 4.25 - Onda T7H1.5 Velocidade longitudinal, $V_x$ , em profundidade.....	67
Figura 4.26 - Onda T7H1.5 Velocidade transversal, $V_y$ , em profundidade. ....	67
Figura 4.27 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade. ....	68
Figura 4.28 - Onda T11H2 Velocidade longitudinal, $V_x$ , em profundidade.....	68
Figura 4.29 - Onda T11H2 Velocidade transversal, $V_y$ , em profundidade. ....	69
Figura 4.30 - Onda T11H2 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade. ....	70
Figura A.2 - Altura média de 10% das maiores ondas, $H_{10}$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura.....	1
Figura A.3 - Altura máxima do registo, $H_{máx}$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura. .	2
Figura A.4 – Altura de onda média, $H$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura. ....	2
Figura A.5 - Altura média de 10% das maiores ondas, $H_{10}$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura.....	2
Figura A.6 - Altura máxima do registo, $H_{máx}$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura. ...	3
Figura A.7 - Altura de onda média, $H$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.....	3
Figura A.8 - Altura média de 10% das maiores ondas, $H_{10}$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.....	3
Figura A.9 - Altura máxima do registo, $H_{máx}$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura. ....	4
Figura B.10 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical, $V_x$ , em profundidade.....	5

---

Figura B.11 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical, $V_y$ , em profundidade.....	5
Figura B.12 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade.....	5
Figura B.13 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical, $V_x$ , em profundidade.....	6
Figura B.14 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical, $V_y$ , em profundidade.....	6
Figura B.15 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade.....	6
Figura B.16 - Onda T11H2 Velocidade vertical, $V_x$ , em profundidade.....	7
Figura B.17 - Onda T11H2 Velocidade vertical, $V_y$ , em profundidade.....	7
Figura B.18 - Onda T11H2 Velocidade vertical, $V_z$ , em profundidade.....	7

## SIMBOLOGIA

$a$	Amplitude da onda
$b$	Comprimento da frente da onda
$\beta$	Angulo de aproximação da onda
$c$	Celeridade ou velocidade da onda
$C$	Parâmetro determinado experimentalmente varia entre 1.33 e 2.86
$c_0$	Velocidade de fase em águas profundas
$c_{g0}$	Velocidade de grupo em águas profundas
$d$	Profundidade da água
$d_b$	Profundidade da água na rebentação de uma onda
$E$	Energia total da onda
$\xi$	<i>surf similarity parameter</i> ou n° de Iribarren
$g$	Aceleração da gravidade
$\bar{H}$	Altura de onda média
$H_0$	Altura da onda em águas profundas
$H_b$	Altura da onda na rebentação
$H_s$	Altura de onda significativa, referente a 1/3 das maiores ondas
$H_{10}$	Altura média de 10% das maiores ondas
$H_{máx}$	Altura máxima de onda registada
$k$	Número de onda
$k_0$	Número de onda em águas profundas
$K_s$	Coefficiente de empolamento

---

$R$	Espraiamento
$R_c$	Espraiamento superior à altura do bordo livre da estrutura
$R_{2\%}$	Espraiamento máximo excedido por 2% das ondas, para ondas irregulares
$T$	Período da onda
$\tan \theta$	inclinação do talude
$V_x$	Velocidade longitudinal x
$V_y$	Velocidade transversal y
$V_z$	Velocidade vertical z
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_0$	Comprimento de onda em águas profundas
$\delta$	Declive da onda
$\rho_w$	Massa volúmica da água
$\omega$	Frequência angular temporal

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento exponencial da densidade populacional leva a uma maior proximidade entre as frentes urbanas e as zonas costeiras, acompanhada por uma grande evolução do crescimento socioeconómico. Contudo, a linha costeira apresenta grande vulnerabilidade e fragilidade devido aos fenómenos relacionados com a dinâmica costeira, nomeadamente: ventos, ondas, correntes e marés. Estes fenómenos combinados com as alterações antrópicas podem ser prejudiciais uma vez que podem resultar em perdas de bens materiais e vidas devido à ocorrência de problemas, tais como, as inundações, galgamentos e erosão costeira. Desta forma, de modo a evitar este tipo de problemas, é muitas vezes reivindicada, a implementação de estruturas costeiras de proteção, tendo estas como objetivo primordial a criação de zonas abrigadas em áreas costeiras.

Para o pré-dimensionamento, é imperativo o estudo do comportamento hidrodinâmico próximo das estruturas costeiras tornando-se importante a obtenção de conhecimentos sobre as transformações das ondas em zonas costeiras. Com efeito, é crucial analisar as características das ondas à medida que se aproximam de zonas cada vez menos profundas, onde os fenómenos de refração, difração, empolamento e de rebentação se tornam importantes. Para além disso, a incidência da agitação numa estrutura costeira poderá provocar a reflexão da agitação incidente, que irá ser responsável por sua vez de alterações dos principais parâmetros das ondas, como a direção, a velocidade e a altura da onda.

A elevada reflexão provoca uma grande instabilidade nas proximidades das estruturas costeiras, devido à interação das ondas incidentes com as refletidas, tornando-se então, fundamental o estudo do comportamento das características da onda, tais como altura, período, direção e o campo de velocidades.

Atualmente existem dificuldades da representação matemática dos diversos fenómenos que atuam e interagem com as estruturas costeiras. Com efeito, apesar do contínuo aperfeiçoamento e desenvolvimento de formas de simulação do fenómeno de interação onda-estrutura, com recurso a ferramentas informáticas de modelação numérica usando uma calibração baseada na monitorização de estruturas reais, muito está ainda por fazer para uma correta e concisa representação matemática para todos os fenómenos intervenientes.

Posto isto, a presente dissertação tem como principal objetivo um estudo da caracterização da elevação da superfície livre e do campo de velocidades da onda nas proximidades de estruturas

costeiras. Os resultados obtidos servirão para posteriores validações de modelos numéricos deste tipo, próximos a uma estrutura.

Para atingir os objetivos mencionado anteriormente foram realizados ensaios no modelo físico no canal de ondas irregulares, COI3, no pavilhão de Hidráulica Marítima do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Primeiramente foi construída uma estrutura de modo a simular uma estrutura costeira, sendo testadas três condições de agitação regular incidente. Efetuam-se medições da elevação da superfície livre com sondas resistivas e de campos de velocidade um *Acoustic Doppler Velocimeter*, ADV, ao longo do canal.

Para proceder à análise requerida, os equipamentos (sonda e ADV) foram colocados lado a lado de modo a obter uma análise da elevação da superfície livre e do campo de velocidades para o mesmo ponto. Posteriormente, efetuou-se uma comparação e análise dos resultados sendo a variável o canal sem a estrutura colocada, obtendo-se desta forma diferentes valores para a altura da superfície livre e do campo de velocidades.

Em termos de conteúdo, este capítulo apresenta uma introdução ao trabalho desenvolvido.

O capítulo 2, enquadramento, procura dar uma breve introdução à base das teorias das ondas, a Teoria Linear, já que estas podem descrever corretamente alguns fenómenos, desde que, satisfaçam certas condições da sua derivação. Posteriormente descreveram-se os fenómenos que ocorrem quando existe a interação entre a agitação marítima, os fundos e as estruturas costeiras e terminando com os parâmetros mais importantes para análise das variações da superfície livre.

No capítulo 3, metodologia, é efetuada uma descrição e planeamento dos ensaios realizados em modelo reduzido, no canal de ondas irregulares, COI3 e a descrição de todos os equipamentos usados. No deste capítulo final realizou-se a explicação dos métodos usados para tratamento dos dados adquiridos, pelos equipamentos de medição, usando o *software Matlab*® e posteriormente um tratamento em Excel.

O capítulo 4 é na sua totalidade dedicado à apresentação dos resultados obtidos nos ensaios, diferenciando-se os ensaios realizados com a influência da estrutura colocada no COI3 e os sem essa influência.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho realizados onde são discutidos e comparados os resultados dos ensaios. Na fase final do capítulo são referidos alguns desenvolvimentos futuros que se julgam interessantes na temática.

## 2 ENQUADRAMENTO DO TEMA

### 2.1 Considerações

As ondas no oceano apresentam uma variabilidade complexa. O comportamento desta antes de incidir a costa está sujeita a variações de profundidade, onde, e a uma certa altura a profundidade começa a ter influência nas características da onda tendo diferentes comportamentos entre água profundas, intermédias e de pouca profundidade.

As condições de onda são fundamentais na análise do comportamento das ondas próximo de uma estrutura costeira. Para análise destas existem uma série de parâmetros nos quais os principais são (CEM, 2008):

- A altura da onda,  $H$ , é a distância em metros (m), que numa perspetiva geral pode definir-se como a distância vertical entre a elevação mais alta (crista) e mais baixa (cava) da superfície de uma onda;
- O período de onda,  $T$ , é o intervalo de tempo, em segundos (s), medido entre a passagem de duas cristas de onda sucessivas num ponto fixo;
- A frequência,  $f$ , é o número de cristas que passam num ponto fixo, durante 1 segundo. Usualmente vem em Hertz (Hz), e corresponde ao inverso do período, ou seja,  $1/T$ ;
- O comprimento de onda,  $\lambda$ , sendo a distância em metros (m) definida pela distância horizontal entre duas cristas sucessivas;
- A amplitude,  $a$ , é a dimensão máxima do deslocamento vertical da superfície livre da água em relação ao nível médio do mar, as suas unidades vêm em metros (m);
- A celeridade,  $c$ , é a velocidade com que uma crista ou mesmo a onda avançam segundo o eixo horizontal. É referida geralmente como a velocidade da onda ou velocidade de fase e vem geralmente dada em metros por segundo (m/s);
- A declividade de uma onda,  $\delta$ , é o cálculo entre a altura da onda,  $H$ , em função do comprimento de onda,  $\lambda$ .

$$\delta = H/\lambda \quad (1)$$

Importa assim definir a diferença entre águas profundas e pouco profundas, que por definição existem os seguintes limites de transição para as diferentes profundidades, evidenciados na Figura 2.1, onde o parâmetro  $d$  representa a profundidade da água e  $\lambda$  o comprimento de onda.

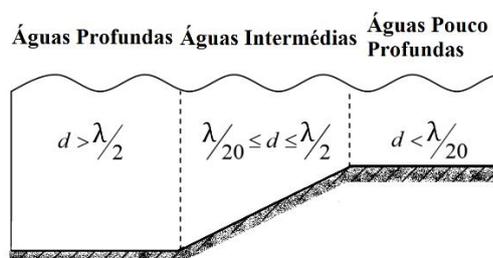


Figura 2.1 -Definição dos diferentes tipos de profundidades.

Na prática corrente assume-se uma abordagem mais acessível em que, e segundo a Teoria Linear das Ondas, o movimento de onda mais simples pode ser representado por uma onda progressiva sinusoidal e com crista longa. Sinusoidal significa que a onda detém uma oscilação periódica, tendo a forma da função seno, como está representado na Figura 2.2. O carácter progressivo advém do movimento onda, que a uma velocidade constante, propaga-se numa direção perpendicular à da crista da onda, sem qualquer alteração da sua forma (CEM, 2008).

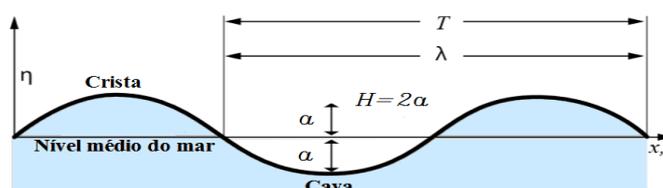


Figura 2.2 - Curva sinusoidal simples.

## 2.2 Teoria Linear das Ondas

No uso da Teoria Linear das Ondas é necessários fazer várias simplificações ao estudo da elevação da superfície do mar. As simplificações dizem respeito tanto às próprias ondas como ao meio em que se propagam, ou seja, a Teoria Linear assume que (Young, 1999):

- A profundidade da água ( $d$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) são constantes;
- Ondas de crista longa e paralelas, com altura constante ao longo desta e equidistantes umas das outras;
- Fluido incompressível – volume específico da água salgada constante;
- Os efeitos de viscosidade, turbulência, tensão superficial e de Coriolis (devido ao movimento de rotação da Terra), são desprezados;
- Altura da onda ( $H$ ) pequena comparada com o seu comprimento ( $\lambda$ ) e a profundidade da água ( $d$ ).

### 2.2.1 Relações básicas

As equações gerais a resolver são as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, recorrendo às simplificações fornecidas anteriormente. A conservação da massa pode ser escrita em termos da equação de Laplace (Young, 1999), com a adoção da função potencial:

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

Em que  $\phi$  representa o potencial da velocidade,  $x$  é coordenada horizontal e  $z$  é a coordenada vertical referenciada para o nível médio do mar, onde acima toma valores positivos e para baixo negativos.

Para a conservação da quantidade de movimento, utiliza-se a Equação de *Bernoulli* Não Estacionária:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (3)$$

A pressão é representada por  $p$ ,  $\rho$  é o volume específico da água e  $g$  a aceleração gravítica.

Para resolver as equações gerais, recorre-se às seguintes condições de fronteira:

- Condição dinâmica da superfície livre que traduz que na superfície livre a pressão atmosférica é nula:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, em z = 0 \quad (4)$$

- Condição cinemática da superfície livre que traduz que não pode haver transporte de fluido através da superfície:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, em z = 0 \quad (5)$$

- Condição cinemática do fundo do mar que traduz que não pode existir escoamento através do fundo do mar:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, em z = -d \quad (6)$$

Destas equações consegue-se deduzir-se a seguinte expressão para a velocidade potencial das ondas lineares para profundidade constante (Newman, 1977),

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag \cosh k(d+z)}{\omega \cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\omega$  é a velocidade angular,  $k$  o número de onda,  $d$  a profundidade da água,  $t$  o tempo e  $a$  a amplitude da onda.

As características da onda representadas na Eq. 7,  $a$ ,  $\omega$  e  $k$ , podem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$a = H/2 \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f \quad (9)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (10)$$

A relação de dispersão em termos de frequência angular  $\omega$  pode-se relacionar com o número de onda  $k$  (Newman, 1977) e é expressa pela equação:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (11)$$

Derivando a Eq. 7 e usando as equações de fronteira quando  $z = 0$ , Eq. 4 e Eq. 5, e inserindo a relação de dispersão, Eq. 11, obtém-se a equação para a elevação da superfície livre:

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t) \quad (12)$$

Na Eq. 12,  $k$  é o número de onda que é uma medida cíclica do número de cristas por cada  $2\pi$  unidades de distância, enquanto que,  $\omega$  é a frequência angular temporal em radianos por segundo. Um ciclo completo de uma onda é  $2\pi$  radianos (CEM, 2008).

Para as ondas progressivas periódicas, isto é, que num período  $T$ , a onda avança o equivalente a um comprimento de onda,  $\lambda$ , a velocidade de fase (ou de propagação), velocidade a que cada fase particular da onda se propaga, é por definição igual a (Kamphuis, 2000):

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (13)$$

A equação da celeridade, Eq.13, agora que  $\omega$  e  $k$  estão definidos nas equações 9 e 10 pode ser exibida como:

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (14)$$

Voltando à Figura 2.2, se considerarmos uma foto instantânea no instante  $t = 0$ , o eixo horizontal é dado por  $x$  e o perfil da onda fica gravado como:

$$\eta(x) = a \sin(kx) \quad (15)$$

No entanto, quando se mede o movimento da onda através de um gravador de ondas colocado na posição  $x = 0$ . O perfil gravado é dado pela equação 16:

$$\eta(t) = a \sin(-\omega t) \quad (16)$$

que descreve o movimento, por exemplo, da subida ou descida de uma boia flutuante, enquanto uma onda passa.

Os parâmetros mais importantes quando se faz a previsão das ondas ou a realização de medições de objetos fixos, tais como instalações *offshore* (boias flutuantes), são, portanto, a altura, o período ou a frequência e a direção da onda. Um observador quando obrigado a dar uma estimativa visual não tem possibilidades de fixar um nível médio do mar como na Figura 2.2 e não pode, portanto, medir a amplitude da onda. Em vez disso, é indicada a distância vertical entre a crista e a cava anterior, isto é, a altura da onda (Laing et al., 1998).

As ondas progressivas sinusoidais não existem na realidade no mar, sendo o caso de uma ondulação (swell) que passe por uma zona sem vento a que mais se aproxima. No entanto, elas constituem as soluções básicas das equações que regem o estudo das ondas do mar, sendo as bases para os campos de ondas reais que ocorrem nos oceanos. As fórmulas derivadas das equações destas ondas são amplamente utilizadas na prática (Laing et al., 1998).

### 2.2.2 Energia das Ondas

O movimento da onda causa perturbações na superfície livre da água e, conseqüentemente, a presença de energia cinética, que está associada à onda e da zona junto a ela, altera-se. Do mesmo modo as ondas também deslocam partículas na vertical, e por isso afetam a energia potencial (Laing et al., 1998).

É importante notar que a energia não se move com a mesma velocidade da onda, a chamada velocidade de fase, isto é, a onda movimenta-se com a velocidade do grupo de ondas. Este conceito de velocidade de grupo irá ser exposto mais adiante, mas é importante assinalar que a velocidade de grupo é igual a metade da velocidade de fase.

Da Teoria Linear da Onda temos que a energia total de uma onda é:

$$E = \frac{\rho_w \cdot g \cdot H^2}{8} \quad (17)$$

onde  $\rho_w$  é a massa volúmica da água.

A energia total é o valor dado pelas parcelas da energia cinética e potencial, de todas as partículas de uma coluna de água para um comprimento de onda (Laing et al., 1998).

### 2.2.3 Movimento orbital das partículas das ondas

É bastante evidente que as partículas de água têm um movimento ascendente e descendente à medida que as ondas viajam pela água. Ao observar-se, cuidadosamente, um pequeno objeto flutuante, pode ser visto que a água também se move para a frente através das cristas e retrocede nas cavas.

Em águas profundas, onde o comprimento é muito pequeno comparado com a profundidade como referido em 2.1.3, durante um ciclo de uma onda sinusoidal simples (isto é, um período de onda) as partículas descrevem a trajetória de um círculo no plano vertical, enquanto que em águas menos profundas, o movimento aproxima-se mais de uma elipse. Na Figura 2.3 está ilustrado o movimento de uma partícula para o caso de uma onda sinusoidal simples, em águas profundas (Laing et al., 1998).

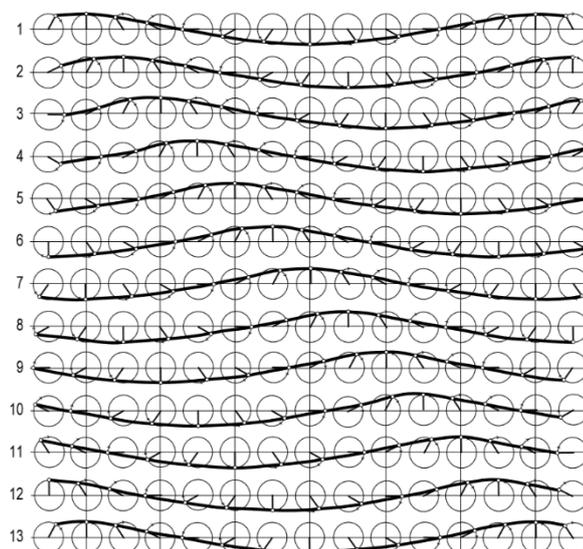


Figura 2.3 - Movimento da progressão de uma onda. Treze fotos instantâneas, cada uma com um intervalo de  $1/12$  do período (Adaptado de Gröen e Dorrestein, 1976).

A velocidade com que uma partícula de água completa o seu trajeto pode ser dada por  $\pi \cdot H/T$ , sendo o maior valor da velocidade alcançado nas cristas. Esta velocidade advém do perímetro da circunferência ser aproximadamente igual a  $\pi \cdot H$  e ser percorrido num intervalo de tempo igual a um período  $T$ . A celeridade é normalmente muito maior que a velocidade da onda, já que é dada por  $\lambda/T$ , e o comprimento de onda é geralmente muito superior a  $\pi \cdot H$ .

Na realidade, a partícula de água não retorna ao ponto exato de partida da sua trajetória, como ilustra a Figura 2.3, dependendo da declividade da onda, a partícula acaba por sofrer um movimento de retorno pela cava ligeiramente menor que o avanço de uma crista, criando assim um posicionamento ligeiramente mais adiante do ponto inicial como está exemplificado na Figura 2.4. Esta diferença aumenta conforme a declividade da onda seja maior (Laing et al., 1998).

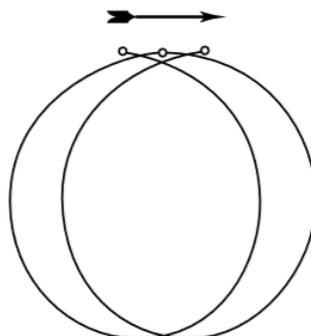


Figura 2.4 - Mudança Caminho de uma partícula de água durante dois períodos de onda (Adaptado Laing et al., 1998).

### 2.2.4 Águas profundas vs. Águas pouco profundas

Em águas profundas à medida que uma onda se propaga, as partículas do fluido percorrem trajetórias em forma de círculos verticais, que se tornam progressivamente menores quanto maior for a profundidade, seguindo um decrescimento exponencial (Ji, 2008), como está exemplificado na Figura 2.5:

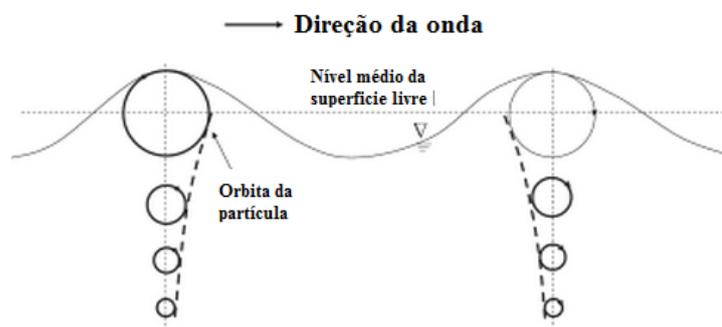


Figura 2.5 - Trajetórias das partículas de água a várias profundidades, em uma onda em águas profundas (Adaptado Ji, 2008).

Quando a profundidade é limitada, os resultados da teoria linear perdem validade e o parâmetro da profundidade da água  $d$  ganha importância. Sendo possível obter simplificações nas situações de águas profundas e pouco profundas. Na passagem de águas profundas para águas intermédias, entre a profundidade  $\lambda/2$  e  $\lambda/20$ , as orbitais tomam formas de círculos e elipses achatadas e a velocidade da onda irá diminuir, as ondas nesta zona são chamadas ondas intermédias. À medida que as ondas entram em águas onde a profundidade é menor que  $\lambda/20$ , as orbitais tomam-se cada vez mais planas ou elípticas, Figura 2.6.

As trajetórias elípticas seguidas pelas partículas de água ficam cada vez mais achatadas à medida que vão chegando perto do fundo, tornando-se mesmo horizontais, onde o fluxo vertical deixa de existir. Ou seja à medida que as órbitas se vão achatando o movimento da água torna-se essencialmente uma oscilação horizontal (Ji, 2008).

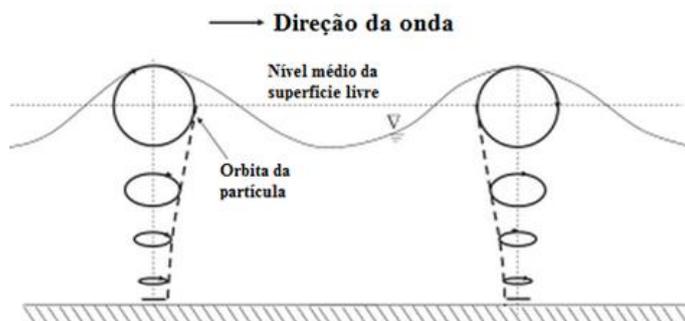


Figura 2.6 - Trajetórias das partículas de água a várias profundidades, em uma onda em águas pouco profundas (Adaptado Ji, 2008).

Quando as ondas se propagam a águas de pequena profundidade, tomando como exemplo a aproximação a costa, quase todas as características mudam, sendo que apenas o período que se mantém constante.

Retomando a Teoria Linear da Onda e substituindo a Eq. 11 na 14 tem-se que:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (18)$$

em que  $g$  é a aceleração gravítica e  $\tanh(x)$  representa a tangente hiperbólica:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (19)$$

Para o comprimento de onda obtém-se a seguinte relação:

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right) \quad (20)$$

Em águas profundas onde a altura é maior que  $\lambda/2$ , o valor da  $\tanh kd$  aproxima-se da unidade, como falaremos posteriormente, e o valor de  $c$  atinge o seu máximo. A Eq. 17 fica assim reduzida a:

$$c^2 = \frac{g}{k} = \frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \quad (21)$$

ou, usando  $\lambda = c \cdot T$ , originário da Eq. 13:

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{g}} \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \quad (20)$$

$$c = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi} = \frac{g}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{g}{\omega} \quad (21)$$

Através da Eq. 18 observa-se que, em águas profundas as ondas propagam-se mais rapidamente que em águas de baixa profundidade.

Expressando em unidades de metro por segundo ao quadrado, o termo  $g/2.\pi$  é aproximadamente igual a  $1.56 \text{ m/s}^2$ , ou seja, neste caso podemos escrever que  $\lambda = 1.56T^2$ , em metros (m) e que  $c = 1.56T$ , em metros por segundo (m/s) (Laing et al., 1998).

Em situações de águas pouco profundas onde a altura de onda é menor que  $\lambda/20$ , a Eq. 19 pode ser simplificada para a seguinte forma:

$$c = \sqrt{g \cdot d} \quad (22)$$

A Eq. 21 destaca maior relevância quando se lida com ondas de período longo e grande comprimento de onda. Quando este tipo de onda se propaga em águas pouco profundas, a velocidade depende apenas da profundidade. Esta relação pode ser usada, por exemplo, para tsunamis para o qual a totalidade do oceano pode ser considerado como pouco profundo (Laing et al., 1998).

Se uma onda viajar em águas de profundidade intermédia, podem-se usar as fórmulas aproximadas para a velocidade de onda e comprimento de onda em águas pouco profundas que são expressas pelas Equações:

$$c = c_0 \sqrt{\tanh k_0 \cdot d} \quad (26)$$

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\tanh k_0 \cdot d} \quad (27)$$

com  $\lambda_0$  e  $c_0$  a corresponderem a velocidade e comprimento de onda em águas profundas, de acordo com as Equações 23 e 24, respetivamente. O valor  $k_0$  corresponde ao número de onda em águas profundas, Eq. 10.

Em relação à altura da onda, a mudança de profundidade também é muito importante. À medida que a onda se aproxima da costa e a profundidade vai diminuindo, a altura da onda vai aumentando, sendo que isto é um resultado das mudanças na velocidade de grupo das ondas (Laing et al., 1998). As ondas ao transportarem energia até à costa, esta tem de ser conservada até pelo menos os efeitos de atrito começarem a ser assinaláveis, de maneira a que se a velocidade de grupo diminuir e o comprimento de onda também, a energia em cada comprimento de onda tem de aumentar. Do valor para a energia indicado em 2.1.3,  $\rho_w \cdot g \cdot H^2/8$ , ou seja se aumenta a energia a altura da onda também vai aumentar.

Como se observa anteriormente, as Equações 11 e 18 dependem de uma função trigonométrica, a tangente hiperbólica referenciada na Eq. 19. A tangente hiperbólica tem o comportamento indicado na Figura 2.7.

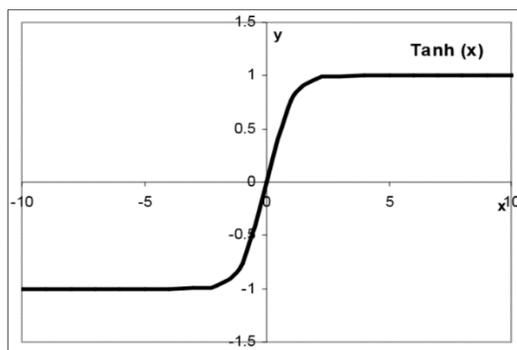


Figura 2.7 - Tangente Hiperbólica de função x.

No enquadramento do tema tem-se que para águas profundas onde  $d \gg \lambda$  e tendo em conta a equação 20, significa que  $kd \gg 1$ . Olhando para o comportamento da função, chega-se à conclusão, que para águas profundas tem-se a seguinte simplificação:

$$\tanh kd \approx 1 \quad (23)$$

O raciocínio é o mesmo para águas pouco profundas onde  $d \ll \lambda$  então  $kd \ll 1$ :

$$\tanh kd \approx kd \quad (24)$$

A partir destes resultados é possível obter as aproximações para os parâmetros de onda, apresentando-se assim um quadro resumo.

Tabela 2.1 - Principais aproximações para as diferentes profundidades

	Águas profundas	Águas pouco profundas
Velocidade de fase	$c = g/\omega$	$c = \sqrt{g \cdot d}$
Velocidade de grupo (capítulo 2.2.2)	$c_g = c/2 = g/2\omega$	$c_g = c = \sqrt{g \cdot d}$
Relação de dispersão	$\omega^2 = gk$	$\omega^2 = gk^2d$

### 2.3 Interação entre a agitação marítima, os fundos e as estruturas costeiras

A construção de estruturas costeiras têm como objetivos principais estabilizar a posição da linha de costa, protegendo as zonas do litoral dos efeitos da erosão, e mitigar inundação das frentes marítimas. O dimensionamento destas inclui para além da verificação da estabilidade global, a consideração de níveis aceitáveis de resposta ao espraiamento, ao galgamento, à reflexão e à

rebentação tendo diversos níveis de aceitação que dependem do tipo e funcionalidades da futura estrutura em causa.

Ao observar-se uma agitação marítima próxima de uma estrutura costeira, depara-se com a existência de um comportamento distinto, das ondas, em relação a situações como em águas profundas e próximas às praias. Estes comportamentos devem-se às ações de diversos fenómenos físicos que ocorrem próximos de cada tipo de local podendo alterar profundamente as características das ondas geradas ao largo dos mesmos. A batimetria (topografia dos fundos) é igualmente importante e poderá desempenhar um papel essencial na direção e/ou intensidade com que a agitação atinge cada local.

### 2.3.1 Conjunto de ondas simples

Na verdade, as ondas nos oceanos não apresentam um perfil tão simples como o da Figura 2.2. Devido às suas formas irregulares, apresentam superfícies em constante mudança, já que as ondas no oceano estão continuamente a ser ultrapassadas e atravessadas por outras ondas. Como resultado disto, as ondas no mar são normalmente de crista curta. Isto é verdadeiro, caso o crescimento das ondas seja feito sob a influência do vento ocorrido no mar (Laing et al., 1998). Na Figura 2.8 está presente um exemplo de um registo de onda gerado no mar.

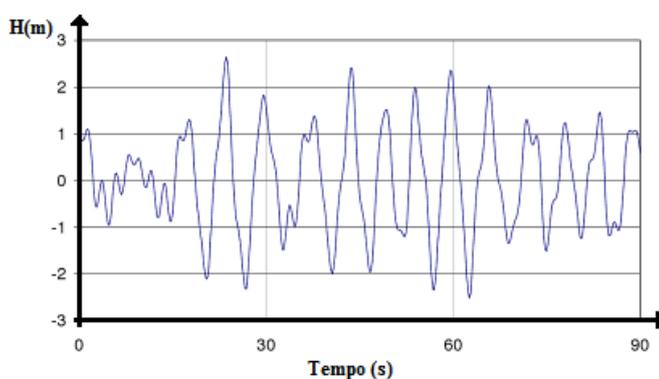


Figura 2.8 – Registo de onda gerado em um oceano (Adaptado Kamphuis, 2000)

As ondas base da Teoria Linear, descritas anteriormente, podem ser apresentadas de maneira a estarem incluídas em vários padrões de ondas observados nos oceanos. Dito de outra forma estes padrões de ondas podem ser representados de maneira a incluir várias ondas simples, que diferem entre si no comprimento de onda, na altura e direção (Kamphuis, 2000). Na Figura 2.9 temos um exemplo de duas ondas com crista longa, paralelas entre si, mas que diferem na frequência.

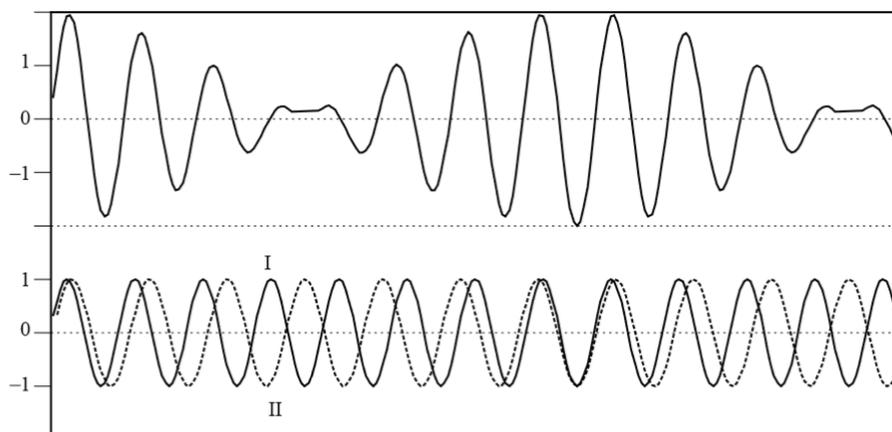


Figura 2.9 - Exemplo de uma onda igual à sobreposição de duas ondas (I e II) simples (Adaptado de Laing et al., 1998)

Como podemos observar na figura anterior, embora o perfil superior seja relativamente regular, já não é um perfil de onda sinusoidal simples, já que a altura da onda não permanece constante em todas as cristas e para além disso, o comprimento de onda entre elas também é diferente. No entanto, este é representado pela soma de dois perfis de duas ondas (I e II) simples com ligeiras diferenças na frequência (Laing et al., 1998).

Partindo deste conceito simples, de sobreposição de ondas sinusoidais simples, podemos perceber como um padrão irregular de ondas, concebidas pelo vento, pode ser visto como a sobreposição de um conjunto infinito de ondas sinusoidais com diferentes características, como está ilustrado na Figura 2.10.

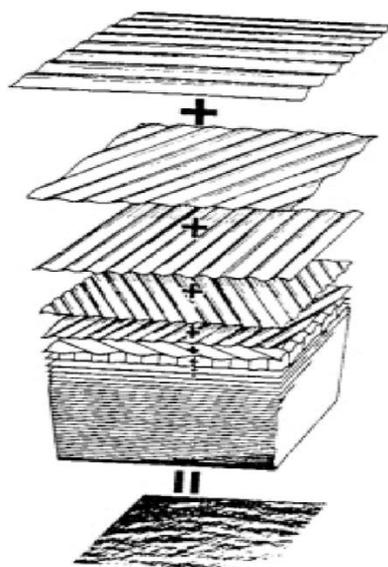


Figura 2.10 - Superfície do Oceano, obtida pela soma de várias ondas sinusoidais (Adaptado de Pierson et al., 1955).

### 2.3.2 Grupo de Onda e sua velocidade

Como referido anteriormente as ondas do mar são combinações de ondas simples e que em um mar irregular o número de diferentes comprimentos de onda pode ser extremamente elevado. Mesmo em ondas regulares, existem diferentes comprimentos de onda, mas estes tendem a ser agrupados (Laing et al., 1998).

Na Figura 2.9, observa-se como duas ondas simples, com comprimentos de onda próximos se combinam, formando um grupo de ondas. Este fenómeno é extremamente comum. Qualquer pessoa que já tenha observado atentamente as ondas ao chegarem à costa, deve ter notado que as maiores ondas tendem a vir em grupos. Embora as várias cristas de onda do grupo não serem equidistantes, pode-se falar de uma distância média e, portanto, de um comprimento de onda médio (Kamphuis, 2000).

De facto, a crista de cada onda individual avança a uma velocidade efetiva, correspondente ao seu comprimento de onda, do grupo, funcionando como uma unidade coerente e progredindo com a sua própria velocidade. A esta velocidade chama-se velocidade de grupo. Como já foi descrito na Tabela 2.1 a velocidade de grupo em águas profundas é dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} \quad (30)$$

Uma equação mais geral, válida para zonas com profundidade de água finita, é:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{2} * \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (31)$$

Daí na Tabela 2.1 para águas pouco profundas a velocidade de grupo vem:

$$c_g = c = \sqrt{g \cdot d} \quad (32)$$

Se se considerar o fluxo de energia devido a uma série de ondas, a energia cinética está associada com o movimento das partículas de água em orbitais praticamente fechadas e não é propagada de forma significativa. Já a energia potencial está associada com o deslocamento das partículas de água movendo-se juntamente com a onda, na velocidade fase. Assim, em águas profundas, o efeito adquirido é o de apenas metade da energia se mover à velocidade de fase, que é o mesmo que dizer que a energia total desloca-se a metade da velocidade de fase (Laing et al., 1998).

A integridade da onda é mantida devido a haver um equilíbrio constate entre a energia cinética e potencial. À medida que as ondas se propagam para uma zona não perturbada, a energia potencial localizada na onda da frente é convertida em energia cinética, resultando em uma perda de amplitude. Isto leva a que as ondas tendam em afrouxar. Já na retaguarda do grupo de ondas, a energia cinética deixada para trás é automaticamente transformada em energia potencial, que leva ao aparecimento de novas ondas no local. Consequentemente, um grupo de

ondas pode ser considerado o veículo da energia das ondas e a velocidade de grupo é também a velocidade com que a energia da onda se propaga, que é um resultado importante na modelação das ondas (Laing et al., 1998).

### 2.3.3 Fenómenos de interação

#### 2.3.3.1 Empolamento

O fenómeno do empolamento consiste na alteração da altura da onda que decorre somente da redução da profundidade, pouco antes da rebentação, a onda atinge a sua altura máxima. Na Figura 2.11 temos presente o fenómeno de empolamento da onda com a redução da profundidade.

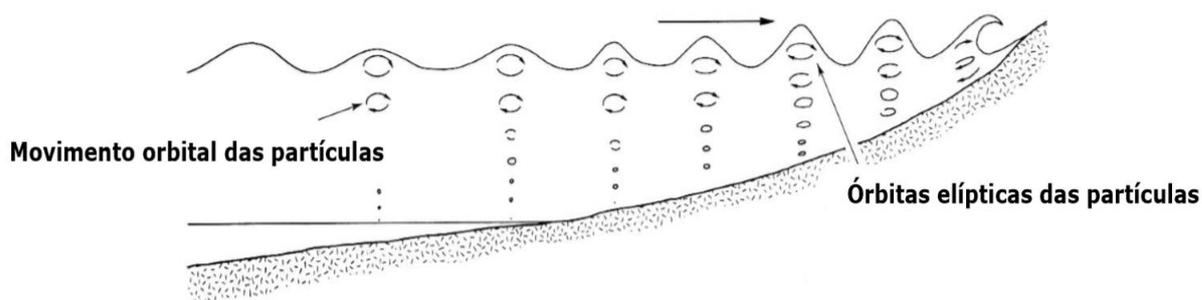


Figura 2.11 - Fenómeno de empolamento da agitação (Adaptado Bay, 2005)

Como já foi mencionado anteriormente a energia entre duas cristas consecutivas mantém-se constante durante a sua propagação. Assim quando a profundidade diminui, a altura da onda vai ter de aumentar para que a quantidade de energia que está a ser transportada seja a mesma, numa área de superfície livre mais pequena.

Para definir-se o fenómeno do empolamento é usual utilizar o coeficiente de empolamento,  $K_s$ , e como a energia está diretamente relacionada com o quadrado da altura da onda, equação 17, e a energia desloca-se à velocidade de grupo, o fluxo de energia é  $c_g H^2$  que será constante. Por isso, o coeficiente de empolamento depende da relação entre a velocidade de grupo em águas profundas e a velocidade de grupo em águas de profundidade  $d$  (Laing et al., 1998), então tem-se:

$$K_s = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{c_0}{c_g}} \quad (33)$$

onde  $c_0$  é a velocidade de fase em águas profundas,  $c_{g0}$  é a velocidade de grupo em águas profundas e  $H_0$  é a altura das ondas em águas profundas. Na verdade o coeficiente de empolamento traduz unicamente o efeito da diminuição da profundidade, Figura 2.12.

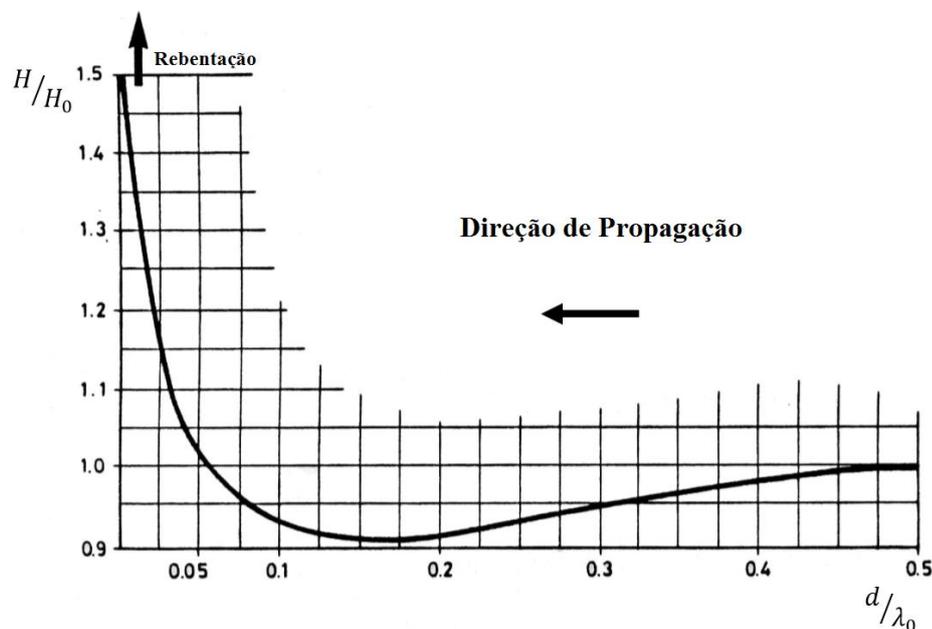


Figura 2.12 - Variação do coeficiente de empolamento com a profundidade relativa (Kamphuis, 2000).

No caso da aproximação a uma estrutura costeira, devido ao fenómeno do empolamento, as alturas da onda sobre a estrutura podem ser maiores do que as alturas de onda ao largo, o que deverá ser ponderado em relação à estabilidade de uma estrutura. Alguns autores concluem que a variação do coeficiente de empolamento é mais suave para estruturas com taludes lisos do que para rugosos, atribuindo essa diferença à maior turbulência do processo de dissipação da energia no caso das estruturas com taludes rugosos (Taveira-Pinto, 2001).

É também importante evidenciar que a Teoria Linear das Ondas não tem em conta a rugosidade dos taludes, ou seja, os valores apresentados podem diferir dos valores que se encontrariam num modelo (Taveira-Pinto, 2001).

### 2.3.3.2 Refração

A refração das ondas, tal como o empolamento, advém do facto da velocidade de propagação das ondas depender apenas da profundidade. À medida que os vários pontos das cristas das ondas se aproximam da costa, passando por diversas profundidades, propagam-se mais depressa aquelas que se encontram em águas mais profundas e mais devagar as que se encontram em águas intermédias e pouco profundas. Isto faz com que a crista da onda rode e procure deslocar-se paralelamente às curvas batimétricas (Sancho, 2002), Figura 2.13.

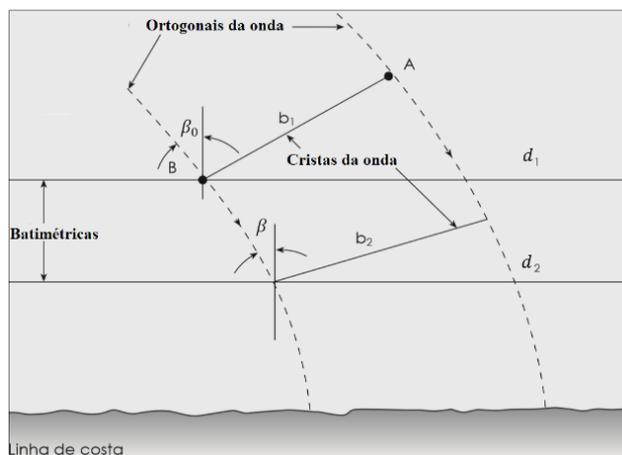


Figura 2.13 - Vista planimétrica ilustrando a correlação entre ângulo ( $\beta$ ) de aproximação da onda, profundidade ( $d$ ) e comprimento da frente de onda ( $b$ ). As ortogonais (linhas tracejadas) são normais às frentes de onda e são as trajetórias seguidas pelos pontos nas frentes de onda (Alfredini e Arasaki, 2009).

Como se observa na figura anterior, a modificação de rumo da onda pode ser indicado pela curvatura das ortogonais, que são linhas imaginárias perpendiculares às cristas da onda e que estendem-se ao longo do avanço da onda. A refração também influencia a altura da onda uma vez que numa só frente de crista de onda podem haver várias alturas, ou seja, esta variação da altura é devida a haver efeitos de concentração e desconcentração de energia, independentemente do empolamento, que possam ocorrer durante a refração (Sancho, 2002).

Existem várias técnicas, gráficas e numéricas, para a análise da refração mas, essencialmente, todos os métodos são baseados na lei de Snell que estabelece uma relação entre a celeridade da onda ( $C$ ) e a direção de propagação da onda (Sancho, 2002):

$$\frac{c_0}{c} = \frac{\sin \beta_0}{\sin \beta} \Rightarrow \frac{\sin \beta_0}{c_0} = \frac{\sin \beta}{c} = \text{const.} \quad (34)$$

Pode-se assumir que a energia se mantém igual entre duas ortogonais e que a onda se propaga perpendicularmente às cristas de onda. Assim quando a onda sofre refração, a distância entre as ortogonais altera-se mas a energia entre elas mantém-se a mesma. Observando a Figura 2.14, na região da praia a distância entre ortogonais é maior, logo as ondas vão ser inferiores às ondas da região do cabo onde as distâncias entre ortogonais são mais pequenas e há uma maior concentração de energia (Alfredini e Arasaki, 2009).

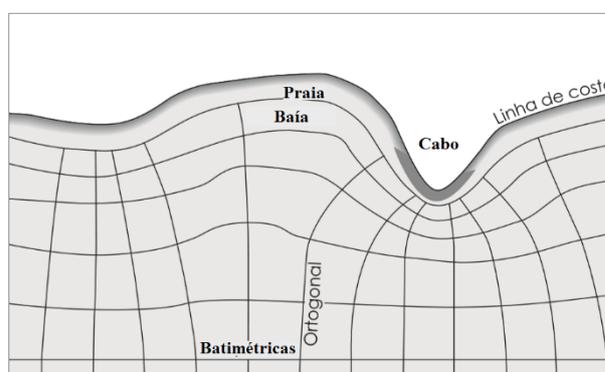


Figura 2.14 - Dispersão e concentração de energia em baías e cabos respetivamente. (Adaptado marítimas)

Na realidade, o facto das cristas das ondas tenderem a ser paralelas às batimétricas em águas pouco profundas, não pode ser desprezado, pois este pode afetar a eficácia de determinada estrutura na criação de zonas abrigadas, ou na proteção de zonas sensíveis. Por outro lado, a batimetria local ou a sua alteração ao longo do tempo poderá originar zonas de concentração de energia no manto resistente, afetando a estabilidade das estruturas costeiras.

### 2.3.3.3 Difração

O fenómeno de difração acontece quando as ondas encontram um obstáculo ou um orifício por exemplo: um quebra-mar que se traduz em uma deflexão das ondas em torno do obstáculo (resulta da existência de reflexão e transferência de energia lateral); um orifício, que se traduz na propagação longe dos extremos do orifício e perto destes curvam, desvio que é proporcional à abertura. Se esta abertura é muito inferior ao comprimento de onda, as ondas difratadas são aproximadamente circulares. Na Figura 2.15 apresenta-se um exemplo natural da difração das ondas à entrada na Baía de São Martinho do Porto, Portugal.



Figura 2.15 - Imagens aéreas da Baía de São Martinho do Porto, Portugal via Google Earth

Quando um grupo de ondas se propaga em direção a uma estrutura costeira, com profundidade constante, podem identificar-se três zonas distintas (Sancho, 2002), Figura 2.16:

- I. Zona em que o grupo de ondas não sofre qualquer perturbação pela existência da estrutura costeira;
- II. Zona de abrigo do quebra-mar, onde as cristas das ondas adquirem uma configuração quase circular, devido à transferência “lateral” de energia através das cristas das ondas;
- III. Zona onde haverá perturbações provocadas pela reflexão total ou parcial do grupo de ondas que atinge a estrutura costeira.

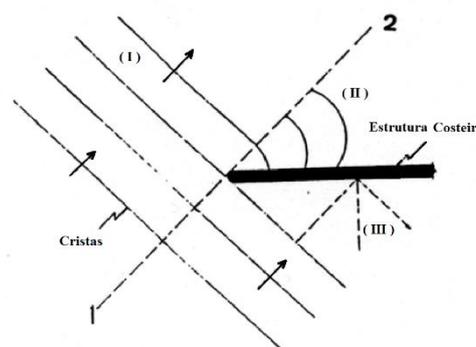


Figura 2.16 - Fenómeno de difração das Ondas (Adaptado de Sancho, 2002)

Em relação às estruturas costeiras, a importância da difração tem maior ênfase quando se fala em obras com características portuárias ou afins, podendo criar alguma instabilidade à acostagem ou permanência dos navios no cais. Esta instabilidade também pode ser devido aos fenômenos de difração e refração poderem atuar em simultâneo (Sancho, 2002)

### 2.3.3.4 Reflexão

As estruturas costeiras são um obstáculo à propagação das ondas, e quando estas atingem a estrutura refletem em parte ou na totalidade. A reflexão das ondas segue as mesmas leis que em outros meios contínuos, e pode numa abordagem teórica linear, ser demonstrada pela soma de duas ou mais ondas de direção contrária e com o mesmo período.

Após algum tempo e em condições controladas, a onda incidente e a refletida formam em conjunto uma onda estacionária o que faz aumentar a altura da onda. A altura máxima da onda (“Ventre”) está presente na estrutura e em cada comprimento de meia onda,  $\lambda/2$ , a partir desta, Figura 2.17. Já quando as ondas incidem numa estrutura obliquamente, a onda refletida terá igual ângulo, como está evidente na Figura 2.18.

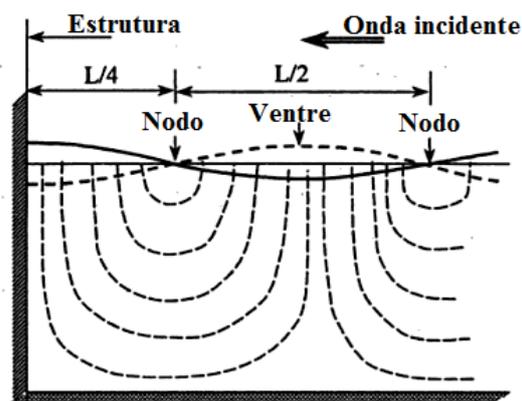


Figura 2.17 - Linhas de corrente na reflexão completa de acordo com a teoria linear. (Kamphuis, 2000).

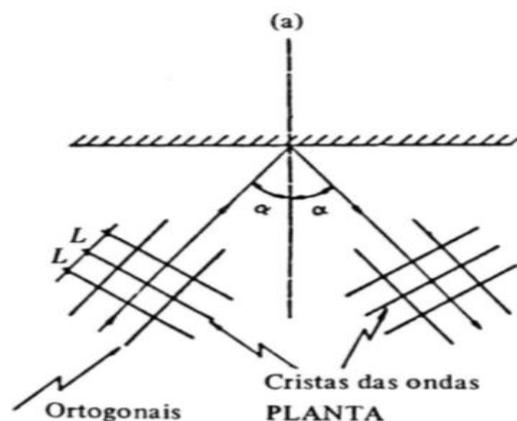


Figura 2.18 - Reflexão das ondas (Adaptado de Sancho, 2002).

O fenómeno da reflexão é quantificado pelo coeficiente de reflexão,  $C_r$ , igual ao quociente entre a altura de onda refletida e a altura de onda incidente, ou seja,

$$C_r = \frac{H_{reflectida}}{H_{incidente}} \quad (25)$$

Este coeficiente depende das características da estrutura refletora, nomeadamente a inclinação do talude, a rugosidade, e a porosidade. Depende também de algumas características das ondas, como a declividade da onda,  $\delta$ , e a altura relativa,  $H/d$  (Kamphuis, 2000).

O parâmetro que melhor caracteriza o efeito conjunto da inclinação do fundo e da declividade da onda,  $\delta$ , é a relação entre estes dois parâmetros definida como o número de Iribarren,  $\xi$ .

Ficando assim importante referenciar que a reflexão ocorre para valores de  $\xi$  superiores a um determinado valor crítico situado em geral entre 2.0 e 2.5. Assim:

- Se  $\xi < \xi_{cri}$ , a onda **rebenta** sobre o talude, a **dissipação de energia é intensa e a reflexão é pequena**;
- Se  $\xi > \xi_{cri}$ , não ocorre rebentação e a dissipação de energia depende apenas da rugosidade e/ou porosidade do obstáculo, sendo **grande parte da energia refletida**.

Portanto, para um valor da inclinação do talude fixo, ao número de Iribarren crítico corresponde uma **declividade crítica**,  $\delta_{cri}$ , que distingue duas situações possíveis:

- Se  $\delta < \delta_{cri}$ , a onda não rebenta sobre o talude;
- Se  $\delta > \delta_{cri}$ , a onda rebenta sobre o talude.

### 2.3.3.5 Espraiamento e Refluxo

O fenómeno do espraiamento em estruturas costeiras, ou taludes naturais, é definido como a subida da água sobre esta até que toda a sua energia cinética se transforme em energia potencial (Bay, 2005), ou seja, é a **cota máxima atingida por uma onda marítima na estrutura**. Esta é definida através da altura, na vertical,  $R$ , que a água atinge sobre a estrutura relativamente ao nível médio da água, Figura 2.19.

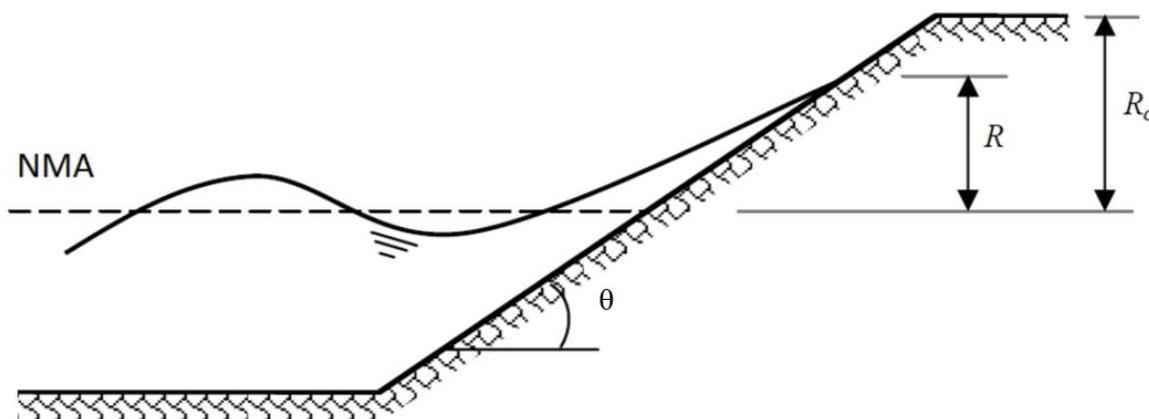


Figura 2.19 - Exemplo de espraiamento (Adaptado de Bay, 2005).

É de notar que quando o espraiamento,  $R$ , é superior à altura do bordo livre da estrutura,  $R_c$ , dá-se o galgamento, sendo que a estimativa do espraiamento tem um papel muito importante para a previsão do galgamento.

Atualmente pode definir-se o valor de espraiamento,  $R_s$ , correspondente à média do terço dos maiores espraiamentos num registo e  $R_{n\%}$ , que representa o valor do espraiamento excedido por  $n\%$  de todos os espraiamentos num registo. No passado recente o espraiamento máximo era

definido, no caso da agitação irregular, como aquele que apenas é excedido por 2% das ondas e que podia ser calculado com maior rigor pela formula de Battjes (1971),

$$R_{2\%} = CH_s \xi_p = CH_s \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_s/\lambda_0}} \quad (26)$$

em que  $C$  representa um parâmetro determinado experimentalmente e que segundo Grüne (1982) varia entre 1.33 e 2.86,  $H_s$  a altura de onda significativa,  $\tan \theta$  a inclinação do talude da praia ou estrutura e  $\lambda_0$  o comprimento de onda em águas profundas. Segundo Van der Meer (1992) referido por Sancho (2002), o espraçamento máximo pode ser obtido utilizando o ábaco da Figura 2.20 que o relaciona com o coeficiente de Irribaren ou *surf similarity parameter*.

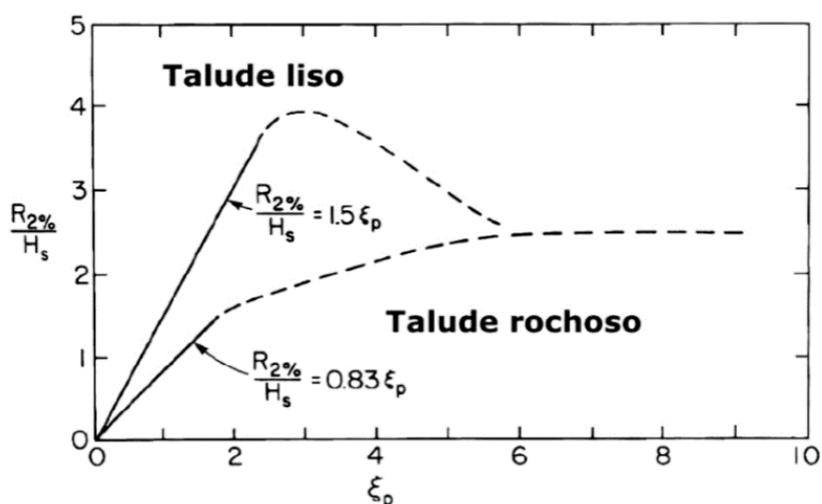


Figura 2.20 - Espraçamento sobre estruturas sendo  $H$  a altura de onda na base da estrutura (Van der Meer e Stam referido por Sancho, 2002).

Ao contrário do espraçamento, o refluxo é a cota mínima que a onda atinge na estrutura marítima, devido à da oscilação da onda na estrutura, ou seja, é uma consequência do espraçamento devido à força gravítica, na Figura 2.21.

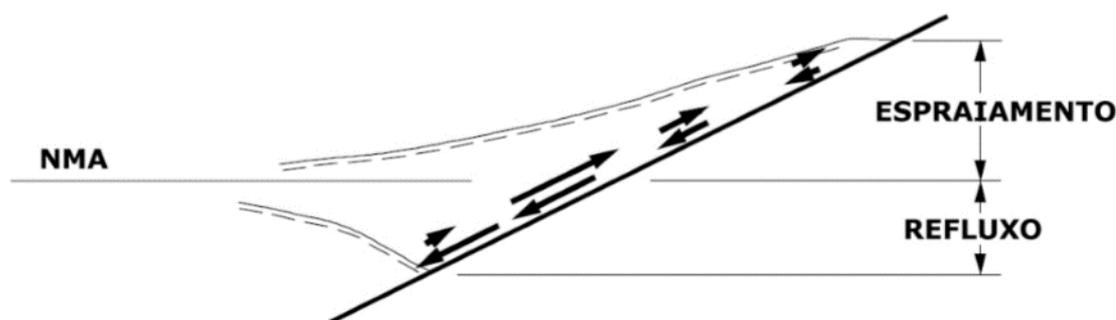


Figura 2.21 - Espraçamento e refluxo (Adaptado de CEM, 2008).

## 2.4 Rebentação de Ondas

A rebentação das ondas ocorre devido à instabilidade a que uma onda está sujeita ao progredir para águas de pouca profundidade. Este fenómeno da rebentação está associado à dissipação de energia que uma onda sofre ao encontrar águas de pouca profundidade, o seu comprimento de onda vai diminuindo tal como a velocidade da onda o que irá provocar um aumento da altura da onda, como já referido anteriormente.

As zonas de rebentação, normalmente denominadas por “surf zone”, são áreas onde existe maior transporte de sedimentos, devido à grande intensidade da agitação e às profundidades baixas. Este transporte de sedimentos devido às fortes correntes provocadas pela rebentação também se dão ao longo da costa.

### 2.4.1 Princípios gerais

No subcapítulo 2.2.3 evidenciou-se que a velocidade das partículas de água é ligeiramente superior na parte de cima da órbita, criando assim um movimento de retorno pela cava ligeiramente menor que o avanço de uma crista e, conseqüentemente, um posicionamento ligeiramente mais adiante do ponto inicial.

Este efeito é mais evidente em ondas com grande declividade, tanto que o valor máximo da velocidade da partícula pode alcançar  $7.H/T$  e não  $\pi.H/T$ , como referido para águas profundas. Caso o comprimento de onda igual o valor de  $7.H$ , ou seja, se a declividade da onda for  $\delta = H/\lambda = 1/7$ , a velocidade da água na crista seria então igual à velocidade de propagação da onda, cujo valor é dado pela equação 13 (Laing et al.,1998). Se o valor da velocidade de propagação for excedido a crista da onda avança para fora da onda causando a rebentação.

De acordo com a teoria de Stokes as ondas não conseguem manter uma altura maior do que um sétimo do comprimento de onda sem que haja arrebentação desta, onde as vertentes de sotavento e barlavento de uma onda encontram-se na crista, formando um ângulo de  $120^{\circ}$ , como ilustra a Figura 2.22 (Laing et al.,1998). Raramente as ondas apresentam uma declividade superior a um décimo, no entanto, para valores dessa magnitude, o perfil da onda já não apresenta uma simples linha ondulante e possui uma forma cicloidal, onde as cristas se localizam mais acima do nível médio e as cavas abaixo deste, Figura 2.23.

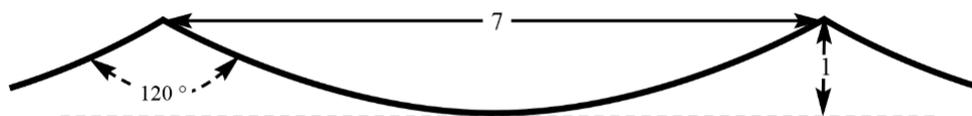


Figura 2.22 - Último formato possível da onda antes da rebentação, segundo a Teoria de Stokes (Adaptado de Laing et al., 1998)

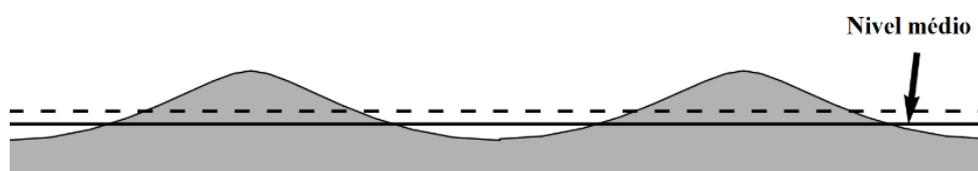


Figura 2.23 - Perfil de onda cicloidial, onde as cristas estão localizadas mais acima do nível médio que as cavas abaixo deste (Adaptado de Laing et al., 1998)

De acordo com o que foi já mencionado anteriormente quando a profundidade for menor que metade do comprimento de onda, a celeridade e o comprimento de onda vão reduzir-se mas o período de onda mantém-se constante. Ao monitorizar-se uma onda na transição de águas profundas para águas onde a distância ao fundo já começa a ter influência,  $d > \lambda/2 \rightarrow d \leq \lambda/2$ , depara-se com uma diminuição inicial da altura da onda, devido à diminuição da celeridade e do comprimento de onda, mas, esta diminuição, não acontece com a energia da onda. A energia da onda nesta transição, muito temporária, dispersa-se por outras ondas, assim que esta diminui a altura da onda começa a aumentar gradualmente relativamente a diminuição do fundo até ao ponto de rebentação. Normalmente a recuperação da altura original da onda vinda de águas profundas dá-se quando o rácio da profundidade com o comprimento de onda,  $d/\lambda$ , é cerca de 0.06 (Beer, 1996) e, posteriormente o aumento é gradual, dependendo das características que a onda se propaga.

O ponto de rebentação de uma onda já foi sugerido por vários autores. McCowan (1894) sugeriu numa onda solitária o seu ponto de rebentação define-se:

$$H_b = kd_b \quad (27)$$

em  $H_b$  que é a altura da onda na rebentação,  $d_b$  a profundidade nesse mesmo ponto e  $k$  um parâmetro já determinado igual a 0.78.

#### 2.4.2 Tipos de Rebentação

Quando as ondas chegam à zona de rebentação, podem quebrar de diferentes maneiras, dependendo do tipo de fundo que vão encontrar e da intensidade e direção do vento que na altura está a soprar na costa.

É habitual considerarem-se quatro tipos de rebentação:

- Rebentação tipo deslizante ou progressiva (spilling breaker);
- Rebentação mergulhante (plunging breaker);
- Rebentação por colapso (collapsing breaker);
- Rebentação oscilante (surging breaker).

A rebentação progressiva ocorre em fundos praticamente horizontais, geralmente com declive mínimo de 2%. Esta rebentação é caracterizada pela sua instabilidade na parte da frente da crista da onda onde ocorre um progressivo desenvolvimento de uma emulsão de água e ar (espuma) que, parte da crista e vai deslizando pela vertente da onda abaixo, mantendo a crista com uma configuração aproximadamente simétrica, Figura 2.24. Este tipo de rebentação ocorre relativamente longe da praia (Talley et al., 2011).

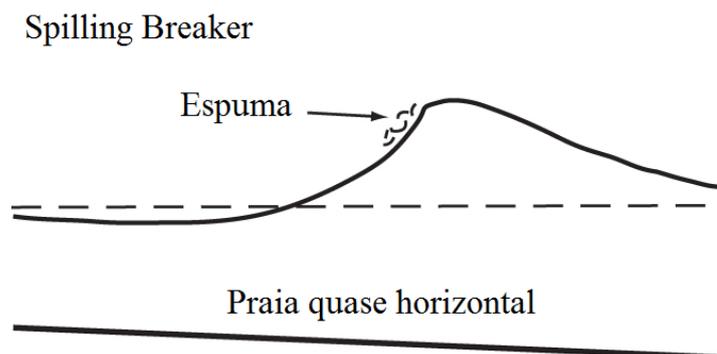


Figura 2.24 - Exemplo de rebentação progressiva (Adaptado de Talley et al., 2011).

A rebentação mergulhante ocorre com uma deformação bastante saliente da crista de onda, instantes após a zona frontal da crista tornar-se praticamente vertical, forma tubular. Esta quebra de uma forma muito poderosa e violenta e tem um forte poder erosivo na zona de impacto. O processo de rebentamento cria vórtices responsáveis por tal poder erosivo. A Figura 2.25 mostra um exemplo de rebentação mergulhante.

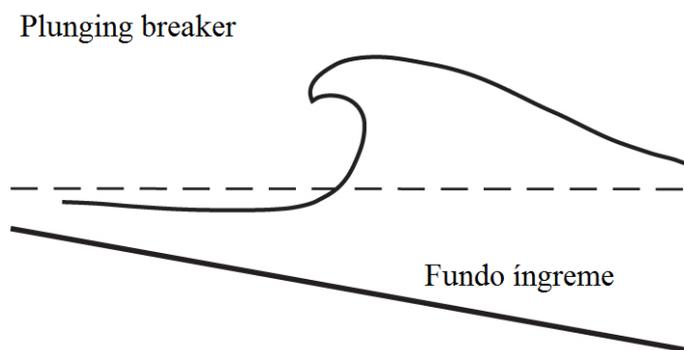


Figura 2.25 - Exemplo de rebentação mergulhante (Adaptado de Talley et al., 2011).

A rebentação por colapso tem muitas semelhanças com a rebentação mergulhante mas não apresenta uma rebentação em forma tubular e sim uma forma relativamente íngreme, por outras palavras, a onda colapsa para a frente. Este tipo de rebentação é especialmente encontrado em situações onde o fundo é íngreme e rochoso. A Figura 2.26 mostra um exemplo de rebentação por colapso.

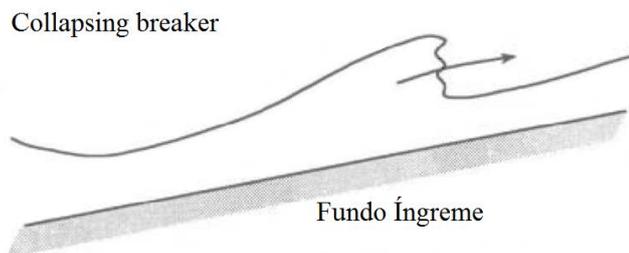


Figura 2.26 - Exemplo de rebentação por colapso (Adaptado de Kamphuis, 2000)

A rebentação oscilante tal como a de colapso é típica em locais com perfil de fundo íngreme onde inicialmente se assemelha à rebentação mergulhante, mas devido a haver um adiantamento da zona inferior da onda, devido à inclinação, causa a diminuição e o desaparecimento da crista, ou seja não existe rebentação. O fenómeno de reflexão adquire bastante importância para este tipo de rebentação que no movimento “vai e vem” da onda surge uma mistura de ar e água (espuma). Na Figura 2.27 apresenta-se um modelo desta rebentação.

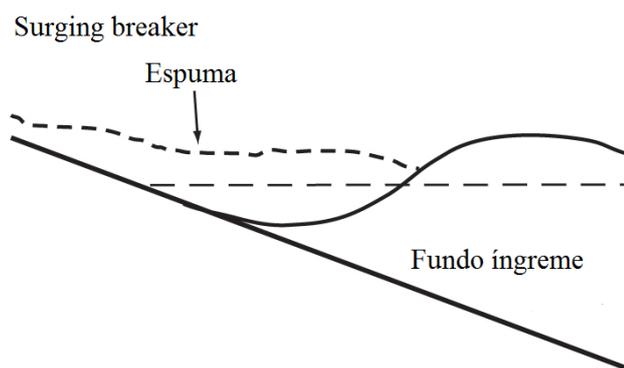


Figura 2.27 - Exemplo de rebentação oscilante (Adaptado de Talley et al., 2011).

### 2.4.3 Critérios de Rebentação vs número de Iribarren

Os diversos tipos de rebentação das ondas mencionados anteriormente podem ser classificados pelo parâmetro  $\xi$ , “surf similarity parameter”, Battjes (1974), ou pelo nº de Iribarren. Pode-se estabelecer as seguintes gamas de ocorrência dos diversos tipos de rebentação, Tabela 2.2, através da Equações 38 e 39:

$$\xi_0 = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_0}{\lambda_0}}} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} * \frac{T \tan \theta}{\sqrt{H_0}} \quad (28)$$

$$\xi_b = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_b}{\lambda_0}}} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} * \frac{T \tan \theta}{\sqrt{H_b}} \quad (29)$$

em que  $H_0$  é a altura da onda em águas profundas,  $H_b$  a altura da onda na rebentação e  $\tan \theta$  o declive do fundo/talude.

Tabela 2.2 - Intervalos do número de iribarren, conforme o tipo de rebentação

Tipos de Rebentação	Local	
	Águas profundas	Rebentação
Progressiva ( <i>spilling breaker</i> )	$\xi_0 < 0.5$	$\xi_b < 0.4$
Mergulhante ( <i>plunging breaker</i> )	$0.5 < \xi_0 < 3.3$	$0.4 < \xi_b < 2.0$
Colapso ( <i>collapsing breaker</i> )	$\xi_0 > 3.3$	$\xi_b > 2.0$
Oscilante ( <i>surging breaker</i> )	$\xi_0 > 3.3$	$\xi_b > 2.0$

Os dados da Tabela 2.2 são sujeitos a inúmeras críticas mas a sua adoção tem sido preferível, pelo menos de um ponto de vista prático. Van Dorn (1976) considera que o limite de separação entre a rebentação progressiva e mergulhante é  $\xi_b = 0.6$ , chegando-se a este valor com base em resultados experimentais com o auxílio de um estroboscópio (Galvin, 1968).

Pode-se concluir ainda a existência de uma grande incerteza envolvida na previsão das características da rebentação podendo resultados experimentais não darem os valores apresentados na tabela.

## 2.5 Parâmetros estatísticos das ondas

Ao observarmos o comportamento das ondas marítimas conclui-se que raramente se podem representar por ondas sinusoidais simples. A sua irregularidade tanto espacial como temporal mostra que este é formado por várias ondas de diferentes amplitudes, comprimentos e períodos. Posto isto, é necessário, para o estudo do mesmo, recorrer a certos parâmetros estáticos.

Um registo representativo de uma onda marítima é mostrado na Figura 2.28, em que o eixo vertical é em metros (m) e o eixo horizontal é em segundos (s).

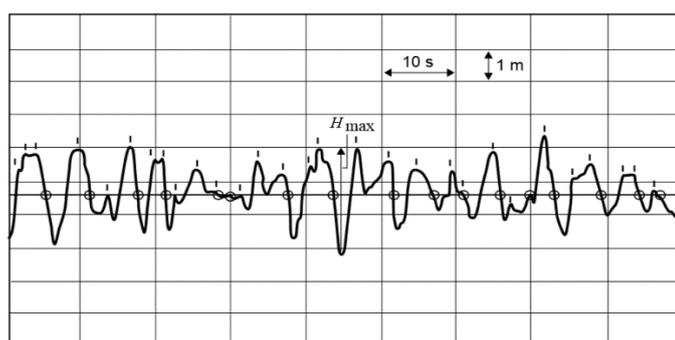


Figura 2.28 - Registo de uma onda marítima (Adaptado Leing et al., 1998)

As cristas das ondas estão indicadas com traços e os cruzamentos dos zeros descendentes, passagem pelo nível médio do mar, estão marcados com círculos. Sendo assim, o período de onda  $T$  no registo irá ser a “distância” temporal medida entre dois cruzamentos de zeros

descendentes, enquanto que a altura da onda  $H$  é a distância vertical entre uma cava e a próxima crista, dentro dos mesmos cruzamentos.

Um registo temporal da elevação da superfície livre nunca é idêntico, devido ao comportamento irregular das ondas. Caso o comportamento do mar fosse estacionário, diferentes registos iriam ser similares, nas propriedades estatísticas da distribuição de períodos e alturas de onda (Laing et al., 1998).

Na análise de um registo são frequentemente usados os seguintes parâmetros estatísticos (Laing et al., 1998):

- $\bar{H}$  - Altura de onda média;
- $H_{máx}$  - Altura de onda máxima, medida num registo;
- $\bar{T}_z$  - Período médio de zero descendente, obtido a partir da divisão do comprimento do registo, em segundos, pelo número de cruzamentos de zeros descendentes;
- $\overline{H_{1/n}}$  - Altura média de  $1/n$  das maiores alturas, i.e., se todas as alturas de onda medidas num registo forem dispostas em ordem descendente, da maior à menor, o  $n$ -avo contendo as ondas mais altas deve ser retirado e  $\overline{H_{1/n}}$  é dado pelo valor médio dessa parcela;
- $\overline{T_{1/n}}$  - Período médio do  $n$ -avo de ondas mais altas;
- Por norma geral, é normalmente utilizado o valor de  $n$  igual a três, obtendo os seguintes dados de referência:
- $\bar{H}_s$  - Altura de onda significativa, altura de onda correspondente à média de alturas de  $1/3$  das maiores ondas, cujo valor é aproximadamente igual à altura de onda observada visualmente;
- $\bar{T}_s$  - Período de onda significativo, média dos períodos de  $1/3$  das maiores ondas, aproximadamente igual ao período de onda associado com o valor do espectro máximo.

O tempo de registo é uma característica bastante importante na análise do comportamento da elevação do mar, sendo que, quanto maior for o registo melhor são os dados para a **análise**. Numa situação em que o registo de ondas é efetuado no mar, é necessário ter o cuidado de observar se as **condições estão estatisticamente estacionárias** durante o período da amostragem. De facto, isto nunca irá ser inteiramente atingido, já que os campos de onda habitualmente estão em estado de evolução. Então para compensar este problema devem ser feitos registos de pelo menos **200 ondas do tipo cruzamento zero descendente ou ascendente**. Daí, o tempo ideal para o qual as ondas são registadas é de **15 a 30 min**, onde as condições enunciadas são ultrapassadas de forma razoável (Laing et al., 1998).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Ensaios em Modelo Físico

##### 3.1.1 Introdução

Os trabalhos experimentais têm como objetivo a análise de dados de elevação da superfície livre e de velocidade para várias condições de agitação incidente regular sobre um fundo variável rugoso. Os dados foram obtidos em modelo físico realizados no longo do canal de ondas irregulares, COI3, no pavilhão de Hidráulica Marítima do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Os trabalhos experimentais foram efetuados considerando o canal de largura e fundo variável sem e com a implementação de uma estrutura de inclinação de declive 10.5:7. Nas duas configurações em várias posições ao longo do canal foram obtidos os seguintes dados:

- Tipo I – Série temporal de valores de elevação da superfície livre para cada condição de agitação e ao longo da posição em x do canal;
- Tipo II – Análise temporal da série de valores de velocidade das partículas para cada condição de agitação e ao longo da posição em x e z do canal.

O foco desta dissertação é a análise do comportamento das ondas perto de uma estrutura costeira. Na Figura 3.1 está representado o canal de ondas sem estrutura e com estrutura usado para ensaios.

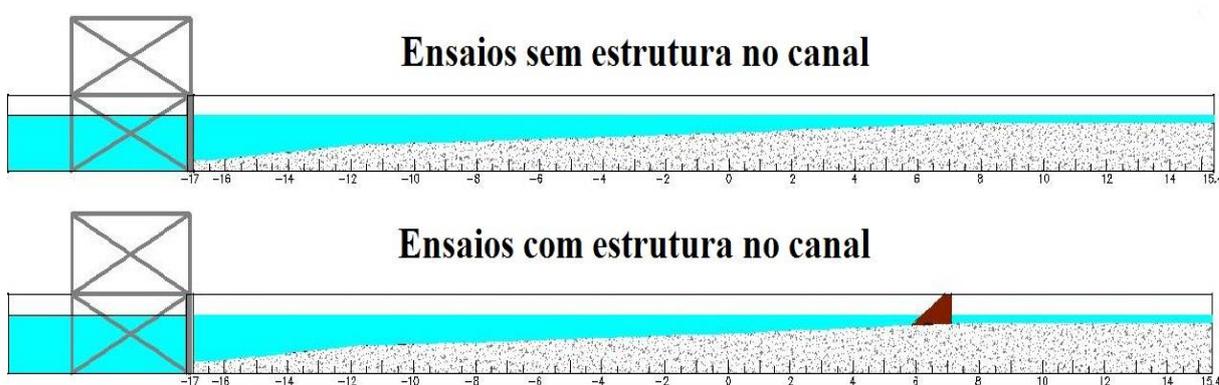


Figura 3.1 - Canal sem a implementação da estrutura e com estrutura.

### 3.1.2 Canal de Ondas

O canal de ondas irregulares, COI3, tem 38.3 m de comprimento mas apenas 32,4 m de comprimento útil, já que a zona do bater de onda ocupa 5,9 metros. Na Figura 3.2 apresenta-se duas vistas do canal.



Figura 3.2 - Vistas do canal de ensaios, COI3.

A largura do canal varia desde 1 metro,  $x = -1250$  cm, até aproximadamente 0.6 metros,  $x = -175$  cm como pode-se observar na planta do mesmo, Figura 3.3.

### Planta

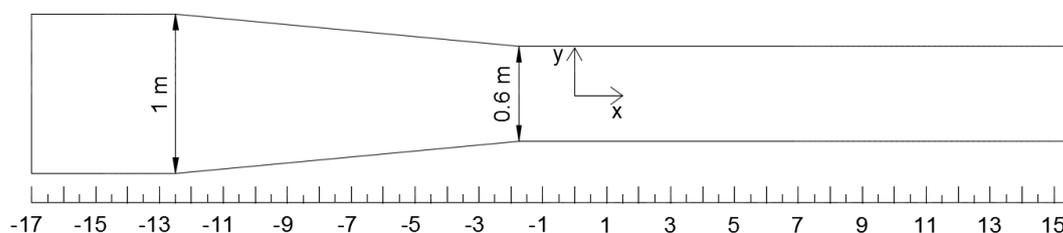


Figura 3.3 - Planta do canal de ondas COI3.

A profundidade vai desde sensivelmente 1.18 m até 0.28 m, valores que correspondem à altura da coluna de água de 27,8 cm medida na posição  $x=470$  cm. O fundo do canal é em betão, apresentando alguma rugosidade na zona de  $x=125$  até 650 cm. Na Figura 3.4 está exposto o perfil do canal.

O canal de ondas está construído à escala reduzida de 1/13, escala esta que depois é convenientemente adequada aos resultados finais dos ensaios de modo a obter-se valores a uma escala 1/1.

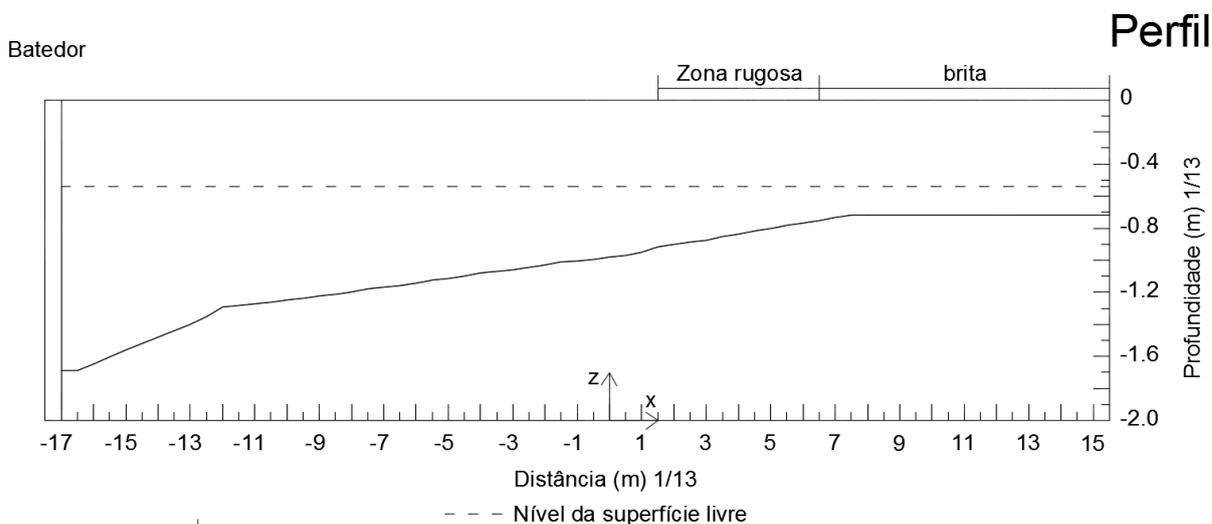


Figura 3.4 – Perfil do canal de ondas COI3.

### 3.1.3 Estrutura

Como foi referido anteriormente foi colocada uma estrutura no canal, para posteriores ensaios do nível da elevação da superfície livre e da velocidade das partículas sob a influência ou não da estrutura. Esta foi colocada, como pode-se observar na Figura 3.1, na posição  $x = 710$  cm

A estrutura foi construída em madeira com 1.25 m de comprimento, 0.6 m de largura e 0.7 m de altura e posteriormente colocados blocos de esferovite de modo a esta apresentar alguma rugosidade semelhante a dos mantos resistentes de um talude, como indica a Figura 3.5.



Figura 3.5 - Estrutura e suas dimensões (à esquerda); Estrutura colocada no COI3 (à direita).

Para a estrutura não sofrer um pouco movimentação devido a força das ondas que a atingiam colocaram-se tijolos e pedras acima deste, como pode-se observar na Figura 3.5 à direita, o que resolveu o problema.

### 3.1.4 Equipamentos de medição

Os equipamentos de medição utilizados para os ensaios consistiram em 10 sondas resistivas para medição da elevação da superfície livre e um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) para medição de velocidades das partículas. De seguida, descrevem-se cada um desses equipamentos.

#### 3.1.4.1 Sondas de altura de onda, baseadas em condutividade

A medição da superfície da água é realizada através de uma sonda resistiva e o correspondente condicionador de sinais. Para os ensaios foi usado o tipo de sonda *Wave-Height Sensor (WHS) mark III*, da *Delft Hydraulics*, com eléctrodos de 50 cm. As características geométricas desta sonda são ilustradas na Figura 3.6.

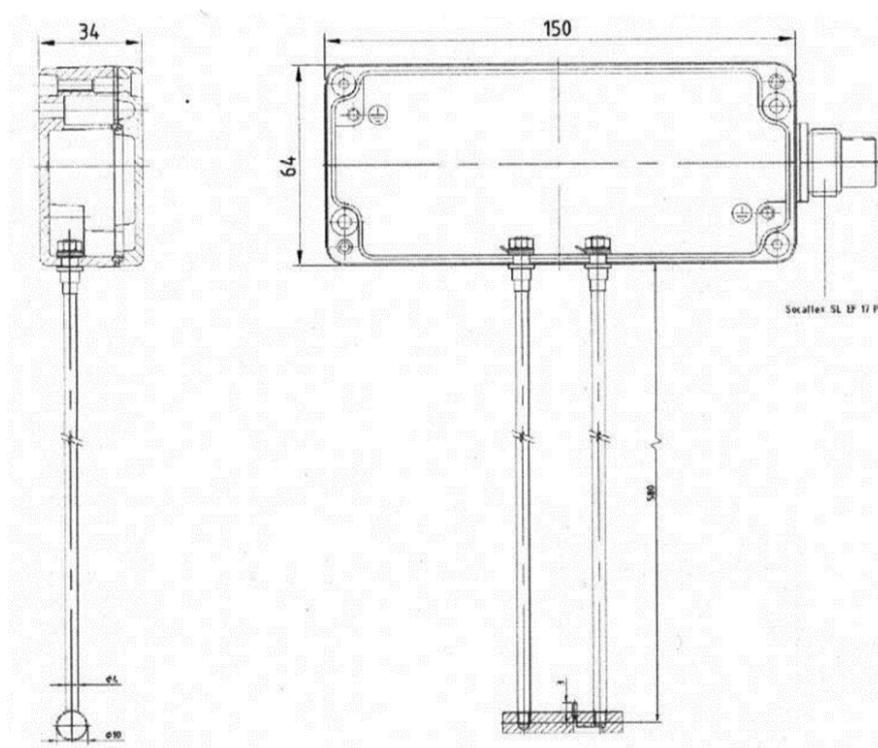


Figura 3.6 - Características geométricas da sonda Wave-Height Sensor (WHS) mark III.

Esta sonda é constituída por duas varetas paralelas de aço inoxidável, montadas por baixo de uma pequena caixa que contém os circuitos eletrónicos para o sensor de excitação, deteção e amplificação de sinal. As varetas atuam como eléctrodos através dos quais se mede a condução elétrica. É incluído um eléctrodo de referência, de platina, para medir a condutividade do fluido, sendo este para compensar a medição da altura da onda. O eléctrodo de referência é ótimo em água doce, sendo que em água salgada existe uma diminuição da sua precisão. O sinal analógico de saída, em volts, é proporcionalmente linear com o nível de água entre as varetas do sensor,  $H$ .

Importa referir que é necessário realizar uma calibração prévia das sondas, antes da realização dos ensaios com o nível de água estabilizado.

Para a medição dos valores da elevação da superfície livre, colocou-se, de acordo com o representado na Figura 3.7:

- Uma sonda junto ao batedor  $x = -1200$  cm (escala da Figura 3.4), para caracterização das condições de agitação incidente. Esta sonda foi mantida nesta posição para todas as condições de agitação incidente, Figura 3.7a. A frequência de aquisição é de 25Hz. A função desta sonda é verificar que o batedor de ondas está a gerar a altura de onda correta;
- Oito sondas espaçadas de 20 cm fixas do ponto  $x = -840$  cm até  $x = -700$  cm, Figura 3.7b;
- Uma sonda junto ao medidor de velocidades. Com posições da sonda em  $X = -100, 250, 300, 400, 500$  e  $580$ , Figura 3.7c.

A frequência de aquisição de todas as sondas é de 25 Hz.

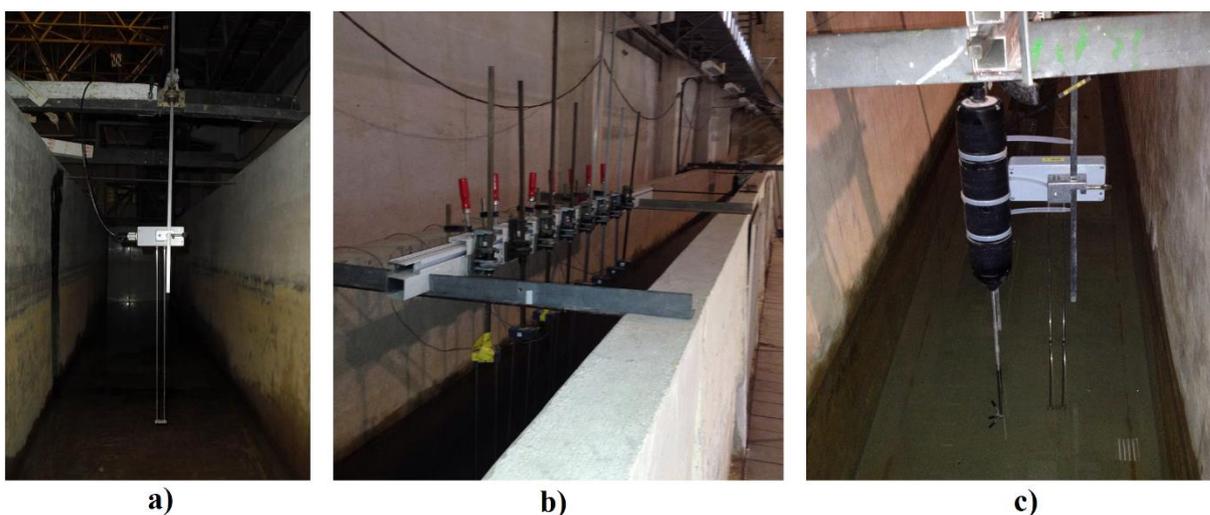


Figura 3.7 - a) Sonda junto ao batedor; b) 8 sondas; c) Sonda junto ao ADV.

As especificações técnicas da sonda *Wave-Height Sensor (WHS) mark III* são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas da sonda de nível *Wave-Height Sensor (WHS) mark III*.

Eléttodos do sensor	Varetas de 50 cm, aço inoxidável, tipo 316 Diâmetro – 4mm; espaçamento – 2.0 cm Comprimento – 580 mm
Dimensões	Incluindo eletrônica – 649 x 34 x 150 mm
Eléttodo de referência	Platina, 5 x 2 mm de diâmetro
Não-linearidade	0.5% da gama de medição, linha de tendência linear ótima
Meio líquido	Todos os líquidos compatíveis com os materiais supracitados
Efeito-condutividade	Condutividade mínima requerida – 0.08mS Sensibilidade <1% para variações entre 0.1 e 0.2 mS
Saída	-10 até +10 VDC para gama completa, i.e. 0.4 V/ cm
Cabo de alimentação	Fornecido um cabo padrão, 7 núcleos, blindado, com conectores para o sensor e o Sensor Control Box, comprimento total – 10 m Comprimento máximo – 100 m

### 3.1.4.2 ADV - Vectrino

A medição de velocidades é feita com um medidor acústico (ADV - *Acoustic Doppler Velocimeter*), marca NORTEK, modelo *Vectrino*, com sonda “down-looking”. A sua tecnologia é baseada no efeito doppler onde um curto impulso acústico de frequência conhecida é transmitido ao longo do eixo vertical sendo o eco proveniente da água recebido nos quatro pequenos transdutores (recetores acústicos). É importante referir que o som não é refletido na água em si, mas sim, a partir de partículas em suspensão na água e que cada sonda tem um sensor de temperatura. As suas características geométricas são apresentadas na Figura 3.8.

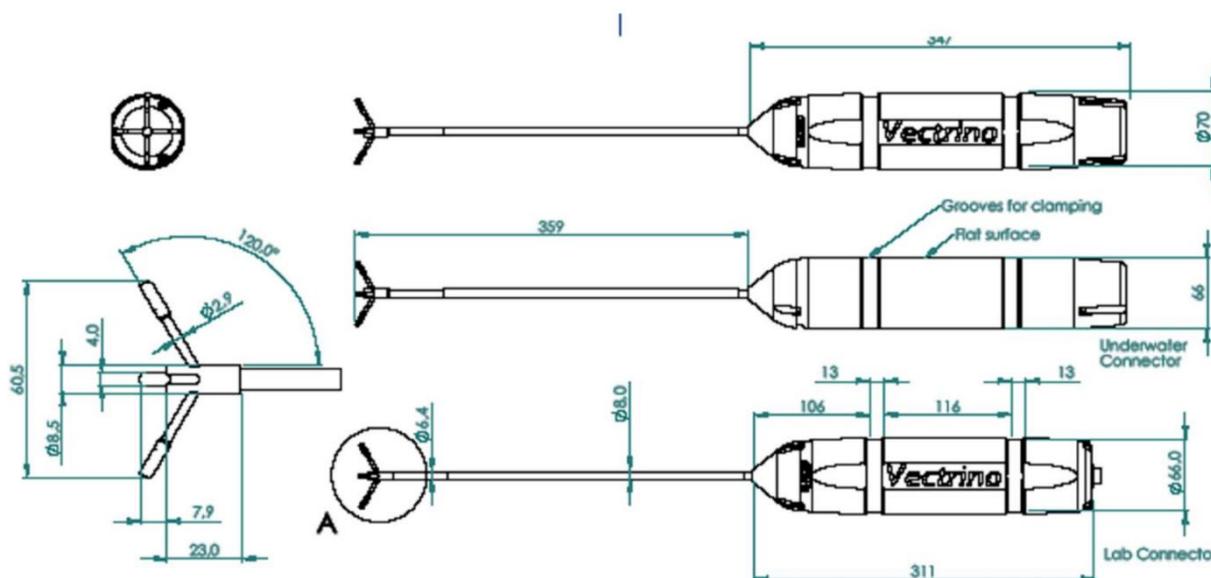


Figura 3.8 - Características geométricas do ADV *Vectrino*.

Este velocímetro fornece três componentes ortogonais da velocidade instantânea das partículas em suspensão na água, Figura 3.9.

As posições do *Vectrino* ao longo do canal foram idênticas às posições da sonda resistiva que foi colocada ao seu lado. Na Figura 3.7c) apresenta-se a montagem experimental utilizada nos ensaios.



Figura 3.9 – ADV e as três componentes ortogonais.

O posicionamento do ADV foi a meio da largura do canal, alinhado com o eixo longitudinal do canal - ângulo  $0^\circ$  (representação esquemática na Figura 3.10). Este posicionamento foi mantido sempre igual nas várias posições de ensaios ao longo da direção “x”. A frequência de aquisição é de 25 Hz.

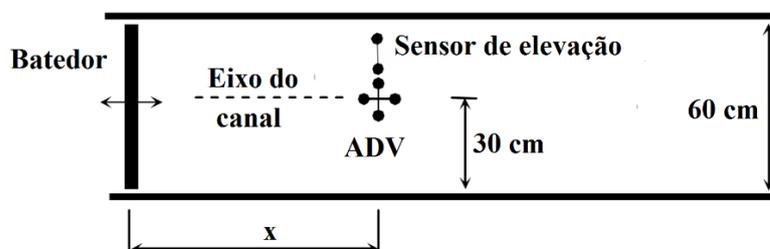


Figura 3.10 - Posicionamento do ADV em planta

As especificações técnicas do ADV *Vectrino* são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Especificações técnicas do ADV *Vectrino*.

Medições de velocidade da água	
Gama	$\pm 0.01, 0.1, 0.3, 1, 2, 4$ m/s
Precisão	$\pm 0.5\%$ do valor medido $\pm 1$ mm/s
Taxa de amostragem	(Saída) 1–25 Hz 1–200 Hz (firmware do Vectrino)
Volume de amostragem	
Distância da sonda	0.05 m
Diâmetro	6 mm
Altura	3–15 mm (personalizável)
Intensidade do eco	
Frequência acústica	10 MHz
Resolução	Escala linear
Gama dinâmica	25 dB
Temperatura do termistor embutido na sonda	Gama – 4°C até 40°C; Precisão/Resolução - 1°C/0.1°C; Tempo de resposta - 5 min
Alimentação e saída de dados	
Entrada DC	12 – 48 VDC
Pico de corrente	2.5 A a 12 VDC (personalizável)
Consumo máximo	200 Hz 1.5 W
Saídas analógicas	3 canais padrão, um para cada componente da velocidade. A gama de saída é 0–5 V.
Ambiente	
Temperatura de operação	–5°C até 45°C
Temperatura de armazenamento	–15°C até 60°C

### 3.1.5 Sistema de geração de ondas

O sistema de geração de ondas é constituído pelo batedor de ondas pelo computador de geração do sinal e pela instalação elétrica do batedor indicados na Figura 3.11.

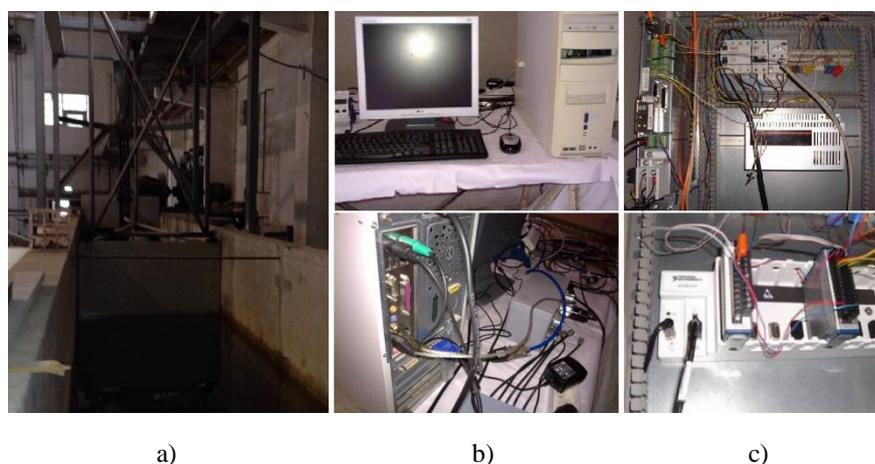


Figura 3.11 - Sistema de geração das ondas: a) Batedor de ondas; b) Computador de geração do sinal (CPU); c) Painel de atuação do gerador.

O sistema de geração de onda é controlado a partir de um computador portátil (CPU1), conectado via USB a um conversor digital-analógico, marca *National Instruments*<sup>TM</sup>, que transforma o sinal digital em analógico e o envia para a instalação elétrica do batedor de ondas. Para a geração das ondas, foram usados arquivos em formato ASCII correspondentes a uma duração de 370s (duração total do ensaio). Estes arquivos possuem duas colunas sendo a primeira, o tempo, com intervalo de  $\Delta t = 0.01s$  e, a segunda, a amplitude das ondas incidentes em voltagem.

A geração destes arquivos foi efetuada com emprego de um programa escrito em ambiente *LabVIEW* que reproduz um sinal sinusoidal ou retilíneo, incorporando a função de transferência do sistema gerador, com as seguintes características:

- Ondas regulares com características de amplitude e período definido;
- Rampa de amplitudes de onda crescente até à estabilização dos 0 s aos 60 s
- Valor da amplitude de onda constante dos 60 s aos 300 s;
- Rampa de amplitudes de onda decrescente dos 300 s aos 360 s;
- Valor de amplitude constante e igual a zero dos 360 s aos 370 s.

A Figura 3.12 apresenta um exemplo de um desses sinais de geração de ondas.

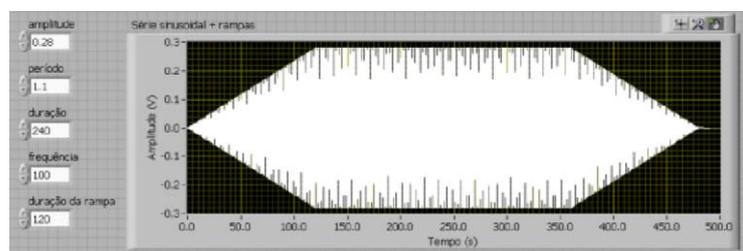


Figura 3.12 - Exemplo de um sinal de geração de ondas em formato ASCII. (Adaptado de Neves et al., 2011a)

### 3.1.6 Sistema de aquisição de dados

No computador, Figura 3.11b, efetuou-se a aquisição do sinal das sondas resistivas e do ADV. Utilizou-se o *software Vectrino* para o controlo de qualidade de aquisição do sistema de medição das velocidades, onde verificava-se os parâmetros da correlação, distancia ao fundo, impulsos acústicos e a qualidade da aquisição. Para visualização e aquisição das medições da elevação da superfície livre a partir da sonda resistiva e da velocidade das partículas no volume de controlo definido pelo ADV, segundo os três eixos espaciais, foram utilizadas as saídas analógicas de dados dos equipamentos, através do *software LabVIEW Signal Express* (*National Instruments*<sup>TM</sup>).

O sinal analógico das sondas é adquirido pelo condicionador de sinal é transformado em digital no *SPIDER* e é enviado para o computador (Neves et al., 2011). Na Figura 3.13 apresentam-se alguns desses equipamentos.

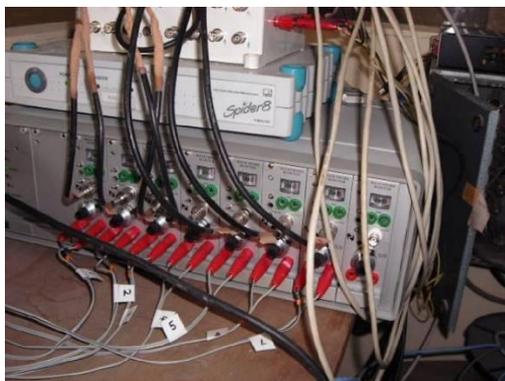


Figura 3.13 - Painel *National Instruments™*, *SPIDER* e Condicionador de sinal

### 3.1.7 Plano de ensaios

Para cada condição de agitação incidente, procedeu-se à medição das velocidades da elevação da superfície livre com e sem estrutura no canal com duração total de 370 s.

#### 3.1.7.1 Condições de agitação incidente

As condições de agitação simuladas no canal foram efetuadas por ficheiros já existentes em formato *ASCII*, tendo sido escolhidas ondas que tivessem rebentação ao longo do canal, estas foram:

- Onda com período de 7 segundos e altura de onda 1.25 metros, T7H1.25;
- Onda com período de 7 segundos e altura de onda 1.5 metros, T7H1.5;
- Onda com período de 11 segundos e altura de onda 2 metros, T11H2.

As características das ondas correspondem à escala real, sendo necessário calculá-las para o modelo, que correspondem às seguintes características:

- T7H1.25 – Período de 1.94 segundos e altura de onda 9.62 cm;
- T7H1.5 – Período de 1.94 segundos e altura de onda 11.54 cm;
- T11H2 – Período de 3.05 segundos e altura de onda 15,38 cm.

Sendo assim, para os ensaios da elevação da superfície livre e da velocidade das partículas, foram considerados três condições de agitação, indicadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Combinações de períodos e alturas de onda utilizadas nos ensaios.

H (cm)	T (s)	
	7	11
125	✘	-
150	✘	-
200	-	✘

**3.1.7.2 Ensaios sem influência da estrutura**

No canal sem a estrutura colocada e para cada condição de agitação incidente, procedeu-se à medição e aquisição da elevação da superfície livre e da velocidade das partículas ao longo do eixo longitudinal do canal. Na Figura 3.14 estão indicadas as posições dos equipamentos numa perspetiva em perfil, do canal de ondas.

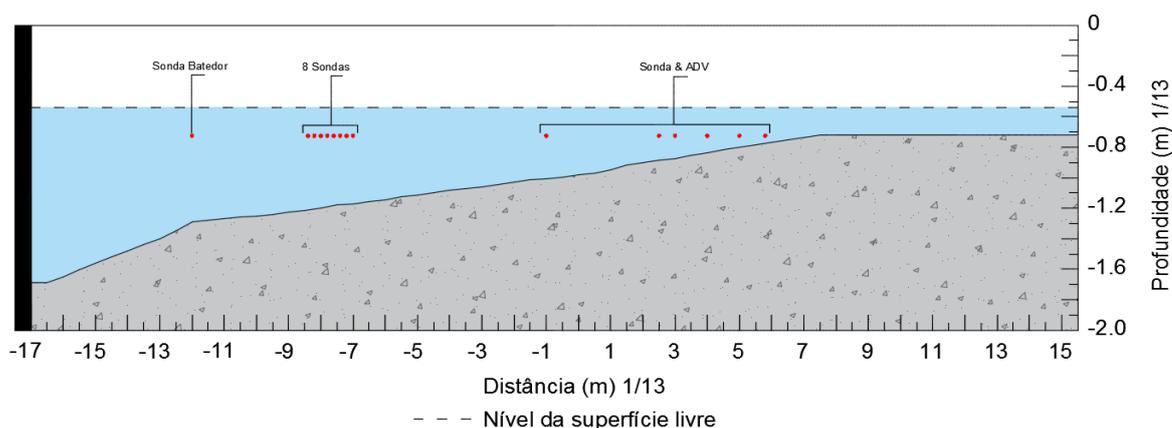


Figura 3.14 – Posições dos equipamentos no canal de ondas sem implementação da estrutura.

Junto ao batedor e no local indicado pelas 8 sondas apenas se realizaram medições de altura de elevação. Já no local indicado pela sonda & ADV, foram realizadas medições de altura da elevação da superfície livre e velocidade das partículas, nas posições indicadas, nos quais o ADV foi colocado a uma profundidade, a partir do nível da superfície livre, constante de 13,5 cm para as várias posições ao longo do canal. Na tabela estão descritas as posições dos ensaios.

Tabela 3.4 - Posições dos ensaios no canal sem influência da estrutura.

Posição x no COI3 (cm)	Batedor	8 Sondas								Sonda & ADV					
	-1200	-840	-820	-800	-780	-760	-740	-720	-700	-100	250	300	400	500	600
Ensaio															
Elevação da superfície livre, H	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
Velocidade das partículas, V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✘	✘	✘	✘	✘	✘

### 3.1.7.3 Ensaios com influência da estrutura

Na realização dos ensaios com estrutura além dos ensaios tipo I e II foram realizados os ensaios tipo III em uma análise das velocidades em profundidade próximas a estrutura. De notar que não foi realizado o ensaio na posição  $x = 600$  cm devido a posição da estrutura no canal, de  $x = 585$  a  $710$  cm, substituindo-se pela posição  $x = 580$  cm. Na Figura 3.15 estão indicadas as posições dos ensaios em perfil do canal de ondas.

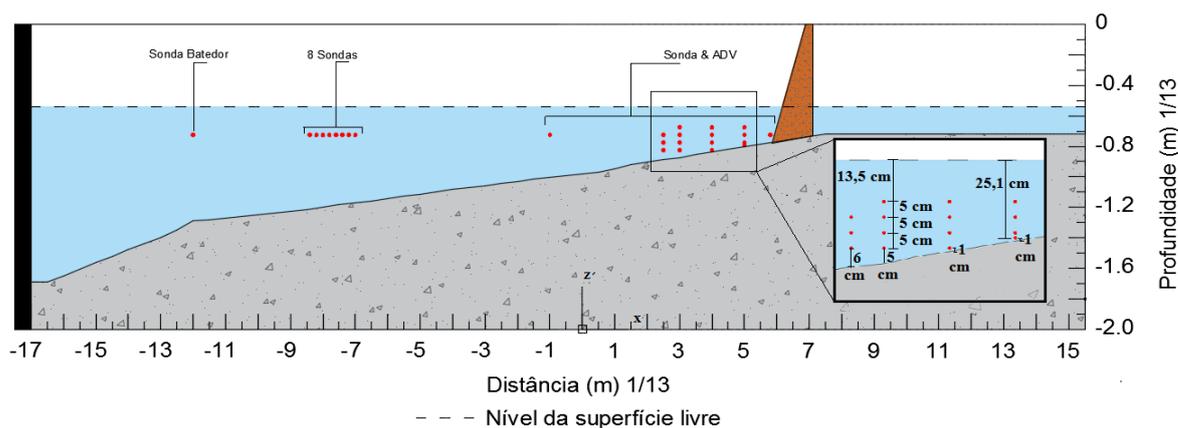


Figura 3.15 - Posições dos equipamentos no canal de ondas com implementação da estrutura.

Da mesma maneira que os ensaios sem influência estrutura, mas agora com influência da estrutura. Junto ao batedor e no local indicado pelas 8 sondas apenas se realizaram medições da altura de elevação enquanto que no local indicado pela sonda & ADV, foram realizados ensaios de velocidade, nos quais, e inicialmente, o ADV foi colocado nas mesmas posições dos ensaios sem influência da estrutura. Além destas medições e para as posições  $x = 250$ ,  $300$ ,  $400$  e  $500$  cm realizaram-se medições de velocidade para várias profundidades relativamente ao nível da superfície livre, no eixo  $z$ , de 5 em 5 cm desde 13,5 cm até 28,6 cm:

- Posição 1 – 13,465 cm de profundidade;
- Posição 2 – 18,465 cm de profundidade;
- Posição 3 – 23,465 cm de profundidade;
- Posição 4 – 28,465 cm de profundidade;
- Posição 4a – 25,13 cm de profundidade.

Na ampliação da Figura 3.15, pode-se observar que na posição  $x = 250$  cm, tem-se em falta uma posição 1 devido aos dados de aquisição do sinal se terem perdido, no entanto, optou-se por colocar as restantes três profundidades para essa posição. Na posição  $x = 500$  cm devido ao fundo do canal não permitir a posição 4, analisou-se então a posição 4a. Na Tabela 3.5 estão descritas as posições e profundidades dos ensaios realizados com estrutura.

Tabela 3.5 - Posições dos ensaios no canal com influência da estrutura

Ensaio	Posição x no CO13 (cm)	Batedor	8 Sondas								Sonda & ADV					
		-1200	-840	-820	-800	-780	-760	-740	-720	-700	-100	250	300	400	500	580
Elevação da superfície livre, H		✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘						
Velocidade das partículas, V	Profundidade relativamente ao nível da superfície livre (cm)									13,465	-	-	✘	✘	✘	-
										18,465	✘	✘	✘	✘	✘	✘
										23,465	-	✘	✘	✘	✘	-
										25,13	-	-	-	-	✘	-
										28,465	-	✘	✘	✘	-	-

### 3.1.8 Nota dos ensaios

Com a realização dos ensaios, e respetivo estudo dos mesmos, permitiu chegar a algumas conclusões tendo estas um carácter meramente exemplificativo para futuros ensaios no canal de ondas.

Na realização dos ensaios, verificou-se que, deve ser feito um intervalo de descanso, entre 15 a 20 minutos, devido ao motor do gerador de ondas sobreaquecer podendo este danificar-se. O normal, e por segurança, era realizar dois conjuntos de três ensaios para as três ondas distintas onde cada ensaio demorava cerca de 10 minutos, ou seja, de mais ou menos de 1 em 1 hora realizar o descanso do motor do bater de ondas. Por outro lado após interrupções de trabalho superiores a 2 horas (normalmente após a hora de almoço ou no início dos ensaios, na manhã do dia seguinte), tinha-se de rodar o motor durante cerca de 10 minutos antes do início dos ensaios. Na Figura 3.16 apresenta-se uma verificação do aquecimento do motor do gerador.



Figura 3.16 - Verificação da temperatura do motor do gerador de ondas.

As sondas são bastante sensíveis a variações de temperatura devido, por exemplo, à variação da condutividade da água com a temperatura, pelo que foram calibradas pelo menos uma vez por dia.

No início e no fim da realização de cada dia de ensaios procedia-se a calibração das sondas resistivas devido a estas serem bastante sensíveis a variações de temperatura devido, por exemplo, à variação da condutividade da água com a temperatura. Esta calibração consistia na aquisição de dados, na água em repouso, e de seguida mergulhar cerca de 5 cm, com auxílio de uma régua vertical graduada em milímetros existente em cada sonda, e voltar a adquirir os dados, através do “*LabVIEW SignalExpress*”. Após a aquisição dos dois dados procedia-se à calibração através de um *software* de calibração **já previamente programado pela instituição do LNEC**, onde insere-se os dados adquiridos pelas sondas resistivas e o programa dava-nos a calibração dessas mesmas sondas, que posteriormente eram usados no tratamento do sinal.

A necessidade de aguardar tempo suficiente para que o nível da água estabilizasse no fim dos ensaios deu azo a algumas discrepâncias após o respetivo tratamento. Os motivos para rejeitar estes dados podiam ir desde o mau funcionamento dos filtros eletrónicos, erros na determinação das constantes da sonda, ocorrência de fenómenos de reflexão nítidos, início dos ensaios sem restabelecimento do repouso da água, má calibração ou perda de linearidade das sondas.

Em certos ensaios as sondas resistivas sofriam um movimento pendular devido a força de impacto da rebentação nas duas varetas que atuam como elétrodos podendo dar azo a pequenos erros nos dados finais. Este fenómeno ocorreu mais nos ensaios com a estrutura colocada no canal onde a força de impacto das ondas era maior e, ao mesmo tempo, a reflexão da onda também efetuava forças em movimento contrários da direção da onda vinda do baterdor.

### 3.1.9 Tratamento dos dados adquiridos

O tratamento dos dados adquiridos pelas sondas resistivas e ADV foram executados através de um código realizado no *software Matlab*<sup>®</sup>. Antes da utilização deste foram reunidos os dados relativos a calibração do dia de cada conjunto de ensaios, os dados para cada condição de agitação incidente, onde se obtiveram os valores de tensão (em volts) em vários pontos do canal, e os dados da posição de repouso do nível da água. Após a reunião destes foi então utilizado o código realizado em *Matlab*<sup>®</sup> onde se obtiveram os seguintes dados:

Sinal das altura da onda e das velocidades num intervalo de 175 s, onde a escolha deste intervalo foi devido à onda já estar maioritariamente estabilizada e constante;

- Valores mínimos da altura de cada onda, entre zeros ascendentes, e respetivas velocidades mínimas;
- Valores máximos da altura de cada onda, entre zeros ascendentes, e respetivas velocidades máximas;
- Número de ondas do sinal no intervalo de 175 s;
- Média da altura e da velocidade de cada onda, correspondente ao valor médio, entre zeros ascendentes, da altura ou velocidade de cada onda no intervalo de 175 s;
- Soma de todos os valores da altura de cada onda no intervalo de 175 s.

O código elaborado em *Matlab*<sup>®</sup> resumidamente estava concebido para realizar os seguintes passos:

1. Acertar o sinal obtido para o nível de repouso, isto é, o sinal da altura das ondas vindo do programa *LabVIEW Signal Express* não vinha na posição zero. O nível de repouso das alturas da onda e das velocidades tinha de ser acertado. Sendo que as velocidades foram acertadas posteriormente em *Excel*.
2. Calibrar o sinal da onda com os dados obtidos no programa de calibração, sendo que a parte das velocidades não necessita de ser calibrada, vindo esta já em m/s;
3. Visualização do sinal da onda após a calibração e opção de escolha do intervalo de tempo a analisar, 175 s;
4. Detecção dos zeros ascendentes do intervalo escolhido, considerando que uma onda esta no intervalo de dois zeros ascendentes;
5. Entre o intervalo dos zeros ascendentes encontra os máximos e mínimos, média da altura de todos os valores e a soma de todos os valores da altura das ondas e das velocidades.

Na Figura 3.17 está ilustrado um exemplo de matrizes que foram base de cálculo para o código em *Matlab*<sup>®</sup> onde tem-se: os dados, “dad”, que são respetivos ao sinal puro vindo das sondas e ADV; os coeficientes de calibração retirados do programa de calibração, “cal”; e o valor do nível de repouso da água relativamente a cada sinal, “repouso”.

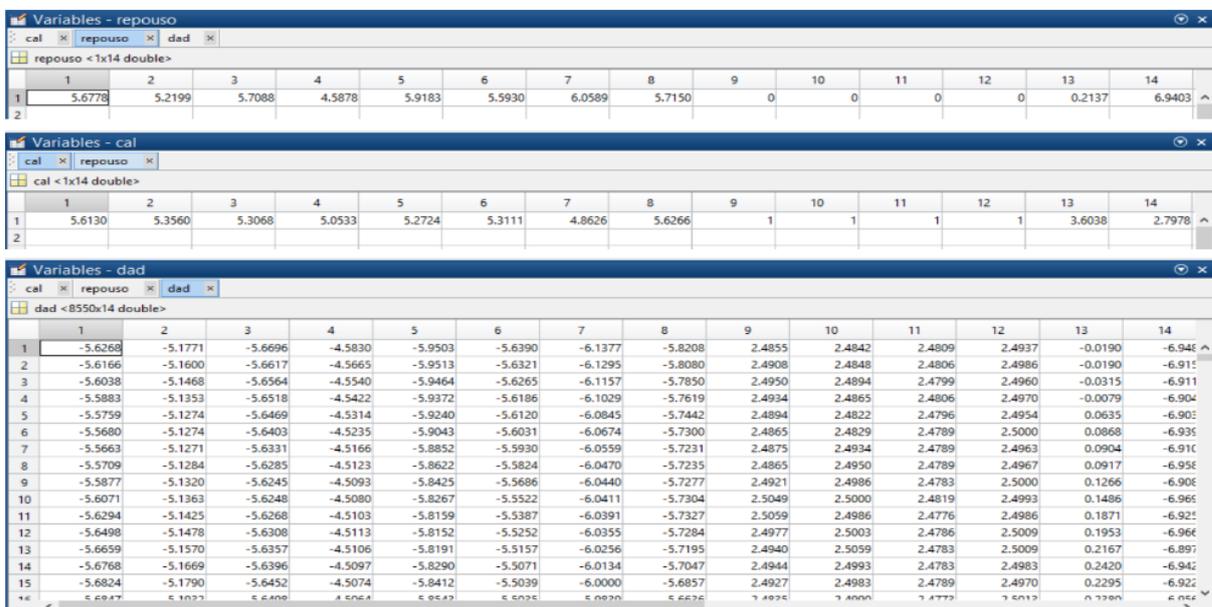


Figura 3.17 - Exemplo das Matrizes do programa *Matlab*<sup>®</sup> de repouso, calibração e dados puros de um ensaio de uma onda T7H1.25 sem estrutura.

Onde os números da figura anterior correspondem:

- 1 até 8 – valor da altura de onda do conjunto de 8 sondas resistivas;
- 10 até 12 – valor das velocidades dos quatro pequenos transdutores do ADV, onde 9 corresponde a velocidade longitudinal,  $x$ , 10 à velocidade transversal,  $y$ , 11 a velocidade vertical,  $z$ , e 12 uma componente da velocidade vertical que não vai ser aprofundada nesta dissertação;
- 13 – Valor da altura de onda da sonda junto ao batedor;
- 14 – Valor da altura da onda da sonda junto ao ADV.

Após a obtenção dos dados fornecidos pelo código em *Matlab*<sup>®</sup> foi realizado um tratamento, para cada ensaio, em *Excel* onde determinaram-se as seguintes características:

- $\bar{H}$  – Altura de onda média de um registo;
- $H_{máx}$  – Altura de onda máxima, valor de altura de onda máximo de um registo;
- $H_{10}$  – Altura média de 10% das maiores ondas de um registo;
- $H_s$  – Altura média de 1/3 das maiores ondas de um registo;
- $V_x$  – Velocidade longitudinal  $x$
- $V_y$  – Velocidade transversal  $y$
- $V_z$  – Velocidade vertical  $z$

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Sinal da Onda

Neste subcapítulo irão ser apresentados os resultados do sinal das alturas de elevação da onda, previamente tratados, fornecidos pelas sondas resistivas. Neles irá poder observar-se a alteração do comportamento da elevação da altura da onda ao longo do canal e também a comparação do comportamento com e sem influência da estrutura.

Para esta análise foi escolhido o ensaio, com e sem estrutura colocada no canal, com a condição de agitação incidente T7H1.5 sendo o sinal captado nas posições  $x = -1200$ ,  $-700$  e  $250$  cm. A escolha da condição de agitação poderia ter sido outra mas o comportamento do sinal iria ter as mesmas diferenciações ao longo das posições escolhidas. Já as posições foram escolhidas de modo a haver uma diferenciação do perfil de fundo do canal e no caso do canal com a estrutura colocada, mais especificamente para a posição  $x = 250$  cm, uma análise do comportamento do sinal perto da estrutura.

#### 4.1.1 Sem influência da Estrutura

Ao longo do canal de ondas, na direção longitudinal, a profundidade vai diminuindo como observa-se no perfil do canal da Figura 3.4. Os ensaios escolhidos para observar o sinal do perfil de alturas da onda tiveram em atenção essas variações da profundidade, como foi mencionado anteriormente. Então, na Figura 4.1, pode observar-se partes dos perfis da altura da onda nas posições longitudinais  $x = -1200$ ,  $-700$  e  $250$  cm, ao longo do canal.

Na posição  $x = -1200$  cm, localizada junto ao batedor, seria de esperar que as características do perfil de alturas da onda fossem bastante semelhantes à onda gerada pelo batedor, T7H1.5. Como se pode observar na Figura 4.1a, essa semelhança acontece, onde o período da onda é cerca de  $1,95$  s, que a escala real é  $1,95 * \sqrt{13} = 7s$ , e a altura da onda é  $11,5$  cm, que a escala real são cerca de  $149,5$  cm, ou seja  $2$  metros.

À medida que a onda avança no canal de ondas e chega a posição  $x = -700$  cm, começa a sentir a influência do fundo sofrendo um certo empolamento na onda e aumento do valor das alturas da onda, como se pode observar no gráfico da Figura 4.1b. Este empolamento ainda se verifica mais na posição  $x = 250$  onde as alturas da onda, como se pode observar na Figura 4.1c, já são proximamente de  $13$  cm,  $169$  cm a escala real.

---

As posições  $x = -1200$  e  $-700$  cm, o perfil apresenta características de uma onda sinusoidal simples o que já não acontece na posição  $x = 250$  cm. Em relação às cristas das ondas analisa-se que o seu encurtamento ao longo do canal, ligeiro entre  $x = -1200$  e  $-700$  cm, mas mais acentuado em  $x = 250$  cm, onde apresenta características próximas de uma onda de rebentação.

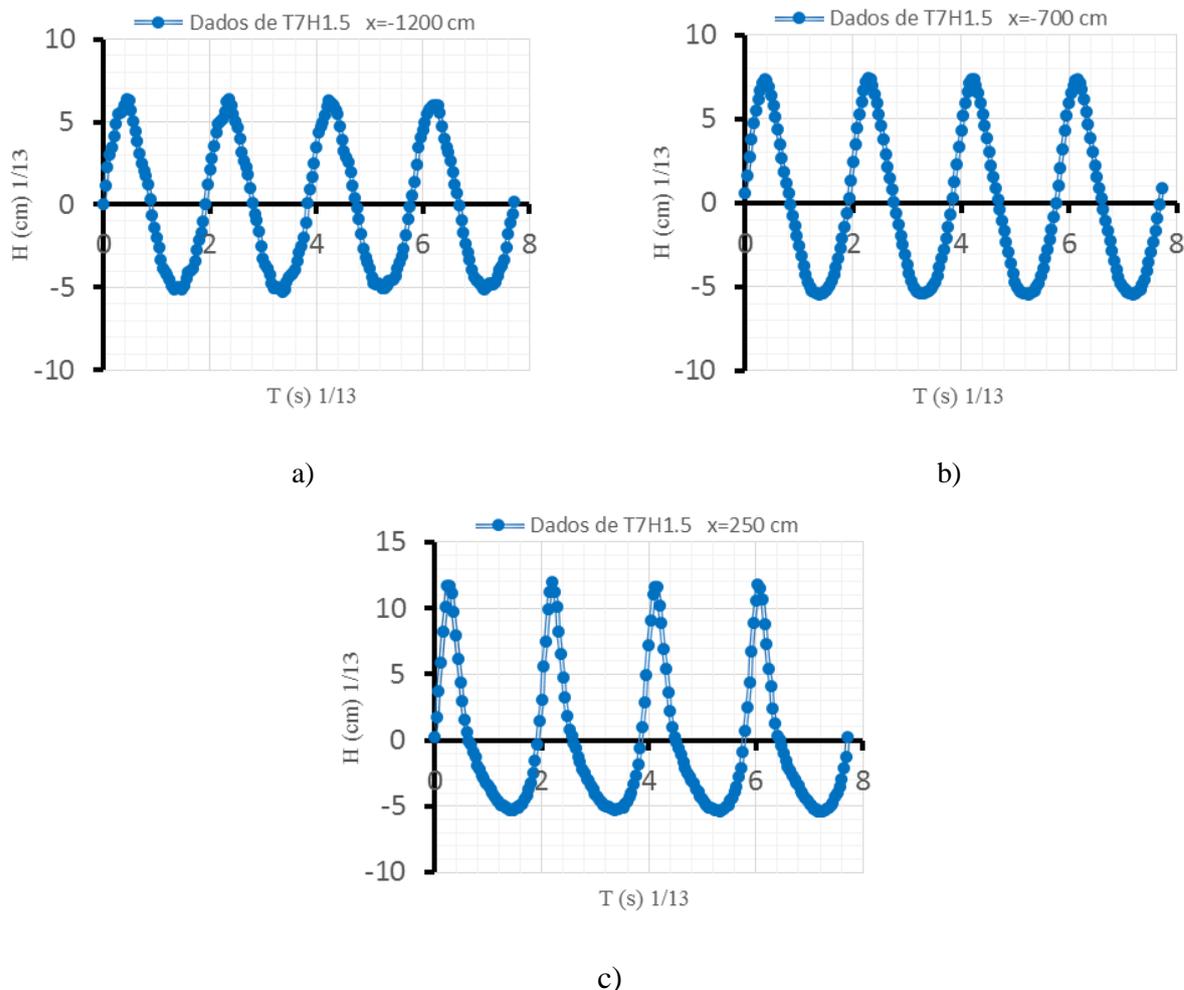


Figura 4.1 - Excertos dos sinais da altura da onda nas posições  $x = -1200$  cm, a),  $x = -700$  cm, b) e  $x = 250$  cm, c), sem estrutura no canal.

#### 4.1.2 Com influência da Estrutura

Da mesma forma dos ensaios sem influência da estrutura, a variação do perfil de fundo do canal irá alterar as características do sinal do perfil de alturas da onda gerada, para o canal de ondas com a influência da estrutura. Sendo que nestes haverá registo de um novo fenómeno a ter em consideração, a reflexão. Esta reflexão irá provocar alterações no canal devido a junção das ondas incidentes com as ondas refletidas na estrutura.

A Figura 4.2, na posição  $x = -1200$  cm, a reflexão causada pela estrutura vai alterar o sinal da altura da onda notando-se mais na posição  $x = 250$  cm, onde se observa o início de uma junção de duas frequências de sinal de ondas durante um período de 1,95 s.

Pode observar-se que a junção da onda incidente com a onda refletida, após algum tempo do ensaio se iniciar, em condições controladas e no canal limitado a uma distância, a onda que vai aumentar. Este aumento observa-se pela altura da onda nas três posições ser muito semelhante apenas se destacando mais na posição  $x = 250$  cm devido a junção das duas ondas, em conjunto com o empolamento, ser inicial.

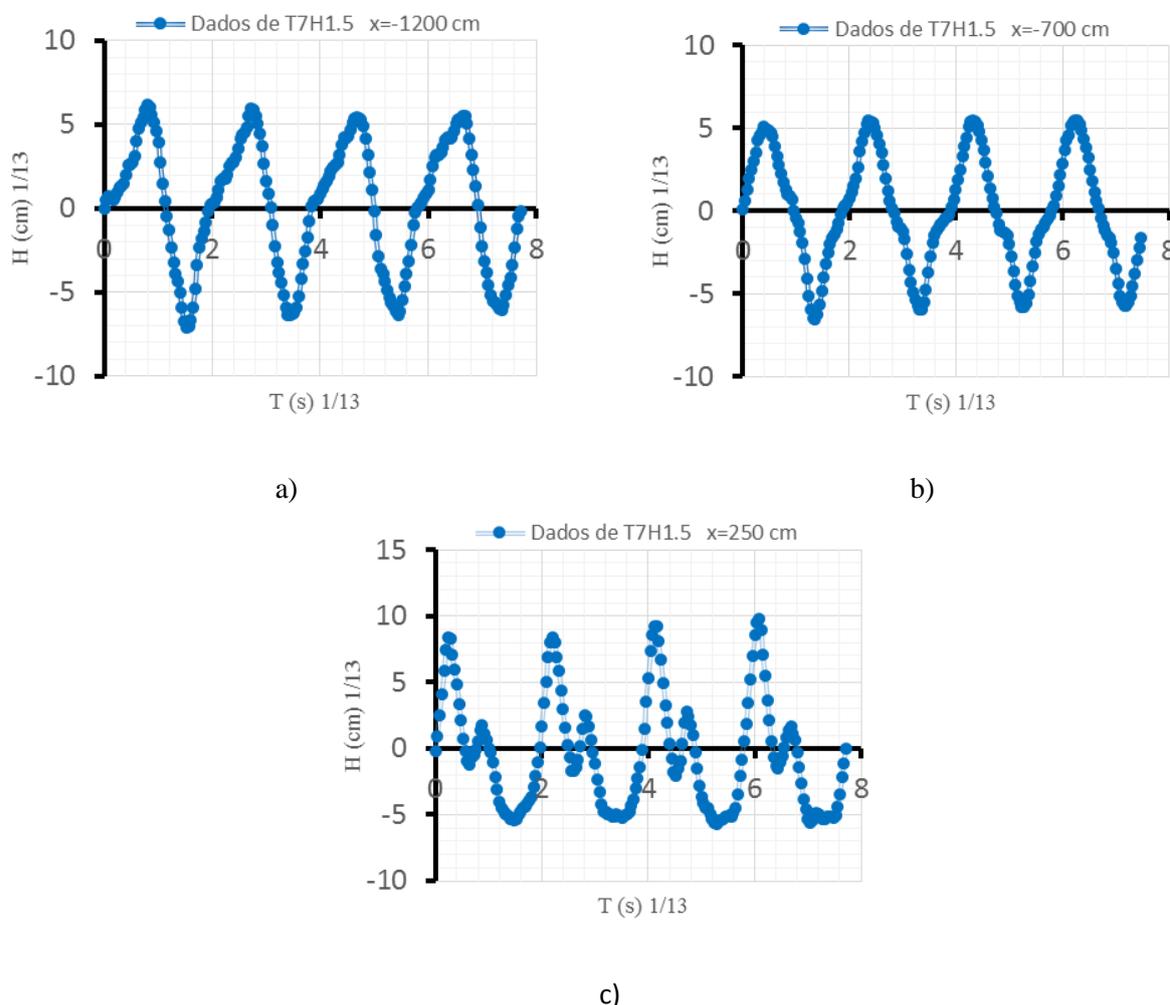


Figura 4.2 - Excertos dos sinais da altura da onda nas posições  $x = -1200$  cm, a),  $x = -700$  cm, b) e  $x = 250$  cm, c), com estrutura no canal.

Para os casos sem estrutura e com estrutura as diferenças são bastante evidentes. O impacto da reflexão no segundo caso é bastante notório e apesar de também existir no primeiro caso, devido ao canal ser limitado, ela não é sentida no perfil de sinal de alturas de onda. Ao fazer-se uma

análise do período das ondas, para os dois casos pode-se visualizar que ele é praticamente constante, podendo mesmo dizer-se que o período com e sem a influência da estrutura é igual.

#### 4.1.3 Com e sem influência da Estrutura vs velocidade

Para a posição  $x = 250$  cm, o ensaio foi realizado com a sonda resistiva e o ADV lado a lado, como já foi referido anteriormente. Com isto já se pode fazer uma análise da velocidade em relação ao comportamento da altura da onda através dos gráficos das Figura 4.3 e Figura 4.4, onde observa-se o comportamento da variação da altura da superfície livre e o comportamento do campo de velocidades. Sendo a Figura 4.3, referente à situação sem influência da estrutura e a Figura 4.4 à estrutura colocada no canal.

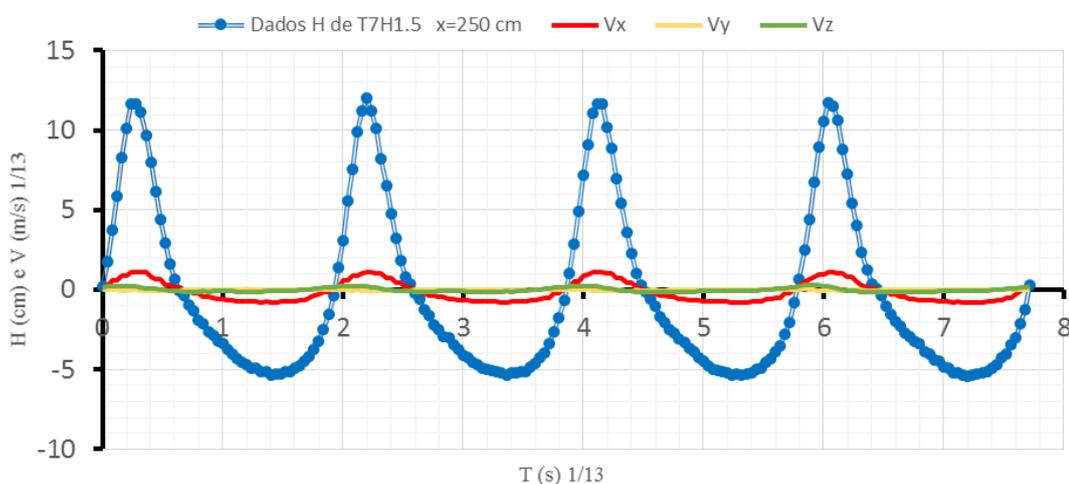


Figura 4.3 – Perfil de altura da onda vs velocidade, sem estrutura no COI3 na posição  $x = 250$  cm.

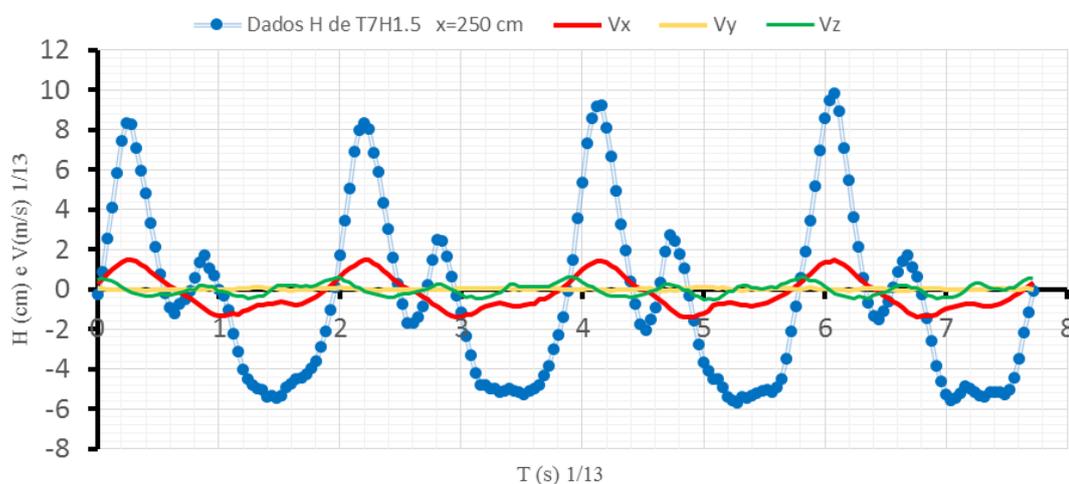


Figura 4.4 - Perfil de altura da onda vs velocidade, com estrutura no COI3 na posição  $x = 250$  cm.

Nestes estão representados os sinais da altura da onda, a azul, quem vêm em cm e à escala do canal, e o campo velocidades no local, fornecidas pelo ADV no mesmo instante da captação das alturas das ondas pela sonda resistiva, sendo que estas vêm em m/s à escala do canal.

Para o caso sem a influência da estrutura colocada no canal, a velocidade longitudinal,  $V_x$ , é máxima na passagem da crista da onda, pelo local do ensaio, e mínima na cava e a velocidade vertical,  $V_z$ , é superior na passagem do início da onda e inferior no fim da mesma. Já na situação com influência da estrutura a velocidade longitudinal é máxima na passagem da crista incidente e mínima na passagem da crista da onda que advêm da reflexão na estrutura, ou seja vai em direção ao bater. Ao observar a Figura 4.4 podemos visualizar que a velocidade longitudinal é máxima na passagem da crista da onda incidente e mínima na crista na passagem da onda refletida. Após a mínima temos um ligeiro aumento e novamente um mínimo na passagem da cava da onda incidente. O que leva a concluir que o comportamento das velocidades é idêntico para os casos com e sem estrutura no canal, apenas o facto de existir reflexão leva à formação de novas ondas com alturas diferentes e mudanças de velocidade nos locais.

## 4.2 Rebentação

Os ensaios realizados não se localizaram exatamente nos pontos de rebentação, motivo o qual se optou por visualizar e apontar os locais onde a rebentação ocorria. Isto porque, e segundo Goda (1985), pode-se facilmente observar, num canal hidráulico usado para ensaios, o comportamento de ondas regulares que apesar delas sofrerem um empolamento e rebentarem a uma certa profundidade a localização dessa rebentação é praticamente fixa, isto no caso de um canal sem estrutura. No ensaio com estrutura no canal observou-se que a rebentação tinha uma pequena variância de aproximadamente 10 cm. Na Tabela 4.1 estão descritos os pontos de rebentação, ao longo do eixo longitudinal, nos dois tipos de canal:

Tabela 4.1 - Pontos de Rebentação no COI3, com e sem influência da estrutura.

Ondas geradas	Posição x de rebentação no canal no Canal (cm)	
	Sem Estrutura	Com Estrutura
T7H1.25	620	Não rebenta
T7H1.5	470	470-480
T11H2	320	320-330

Ao visualizar a Tabela 4.1 a onda T7H1.25 não chega a rebentar acontecendo os fenómenos de espraiamento e refluxo sobre o talude da estrutura, como mostra a sequência de doze fotografias da Figura 4.5.

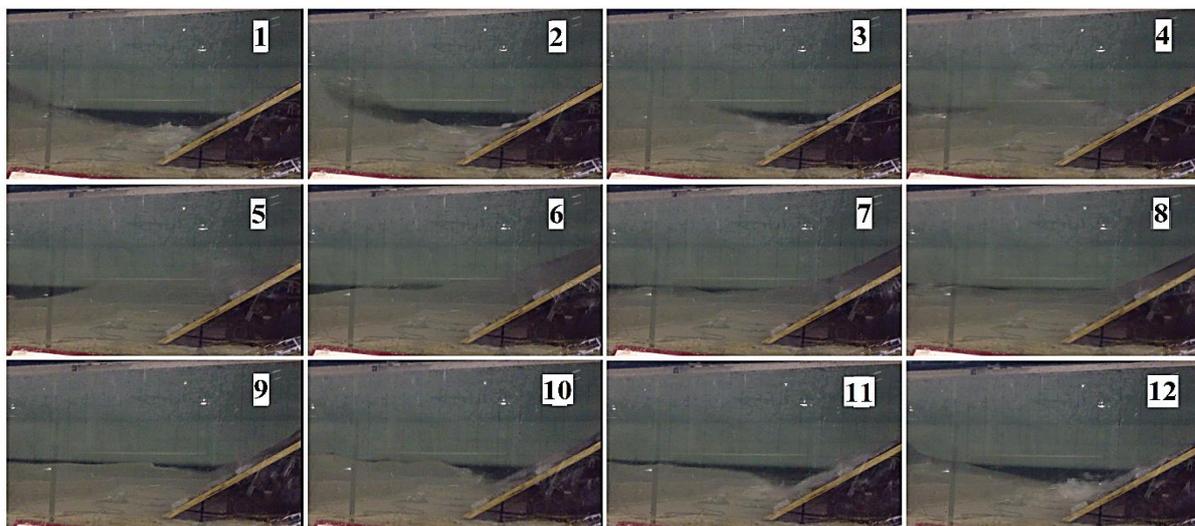


Figura 4.5 - Sequência de 12 fotografias aos fenómenos de espriamento e refluxo da onda T7H1.25 sobre o talude da estrutura no canal.

O facto do local da rebentação, dos ensaios com influência da estrutura, das ondas de geração T7H1.5 e T11H2, não serem exatos deve-se muito a reflexão da onda sobre o talude da estrutura. Como já foi dito, a onda refletida e a onda incidente em conjunto tentam criar uma onda estacionária que causa um aumento da altura da onda. No entanto, as condições na posição da rebentação ainda não estão controladas existindo um fenómeno, do tipo, “choque” de ondas mesmo no ponto de rebentação. Estas ondas em ensaio experimental apresentaram características de uma onda com rebentação mergulhante, que poderá também ser consequência da inclinação do talude ser bastante íngreme. Na Figura 4.6 está ilustrado uma sequência de doze fotografias da rebentação mergulhante da onda de geração T11H2.

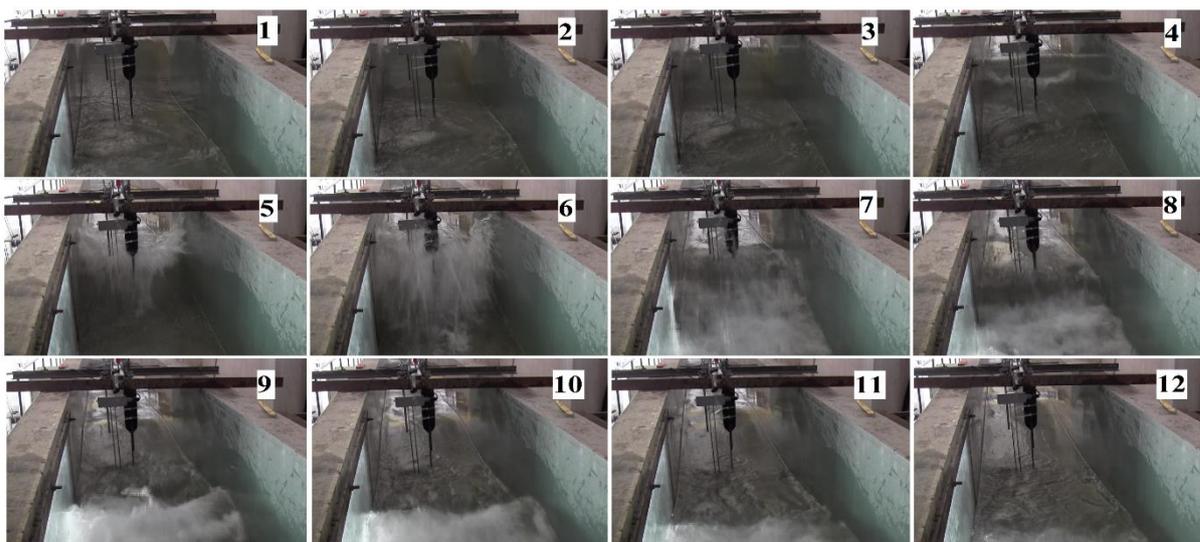


Figura 4.6 - Sequência de 12 fotografias da rebentação mergulhante da onda de geração T11H2, com a estrutura colocada no canal.

Em relação aos ensaios sem a estrutura no canal, as ondas geradas T7H1.25 e T7H1.5 geradas pelo batedor têm uma rebentação progressiva, enquanto que, a onda T11H2 já apresenta características de onda mergulhante, criando após a rebentação pequeno vórtices. Isto deve-se ao facto da inclinação de fundo não ser muito íngreme mas também devido ao tamanho da onda gerada.

### 4.3 Análise temporal da série de valores de elevação da superfície livre

Neste subcapítulo apresentam-se os valores dos resultados obtidos nos ensaios, com e sem influência da estrutura, da altura da superfície livre no canal. Posteriormente, faz-se uma análise valores da altura, que, apesar de terem sido determinados os valores da altura da onda média,  $\bar{H}$ , a altura significativa,  $H_s$ , a altura média de 10% das maiores ondas,  $H_{10}$  e a altura máxima,  $H_{máx}$ , optou-se apenas por analisar os resultados da altura significativa,  $H_s$ , pois os restantes apresentam características semelhantes em que altera-se apenas o valor da altura de onda. Os resultados dos valores da altura da onda média,  $\bar{H}$ , a altura média de 10% das maiores ondas,  $H_{10}$  e a altura máxima,  $H_{máx}$ , para o caso com influência da estrutura são apresentados graficamente no Anexo A.

#### 4.3.1 Sem influência da Estrutura

Os resultados da altura significativa,  $H_s$ , ao longo do canal, referentes aos ensaios sem a influência da estrutura e para os três tipos de onda incidente, apresentam-se graficamente nas Figura 4.7 Figura 4.8 Figura 4.9.

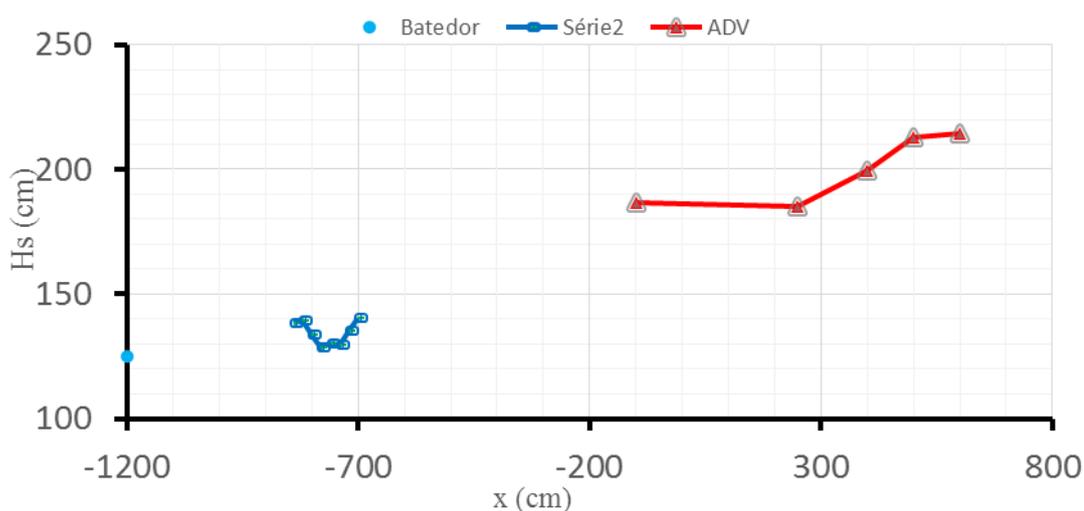


Figura 4.7 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3.

No gráfico de resultados da Figura 4.7, visualiza-se que a altura significativa, na sonda indicada como “batedor”, tem praticamente o mesmo valor que a onda gerada pelo batedor de ondas, 125 cm, como seria de prever, devido a esta estar localizada muito próxima do batedor de ondas.

À medida que a onda vai progredindo no canal, vai sendo afetada pelos perfis de fundo e largura do canal que vão diminuindo, Figura 3.4. Devido ao perfil de fundo esta vai sofrendo empolamento à medida que avança, verificando-se um aumento da altura da onda que se torna mais significativo a partir da posição  $x = -100$  cm. O facto da rebentação desta onda ocorrer em  $x = 620$  cm, não se consegue observar o decaimento da altura significativa no gráfico devido aos ensaios se terem realizado até  $x = 600$  cm, mas visualiza-se ver que em  $x = 600$  cm a altura da onda já é bastante diferente da gerada pelo batedor tendo alturas próximas da altura da rebentação, devido à proximidade do local.

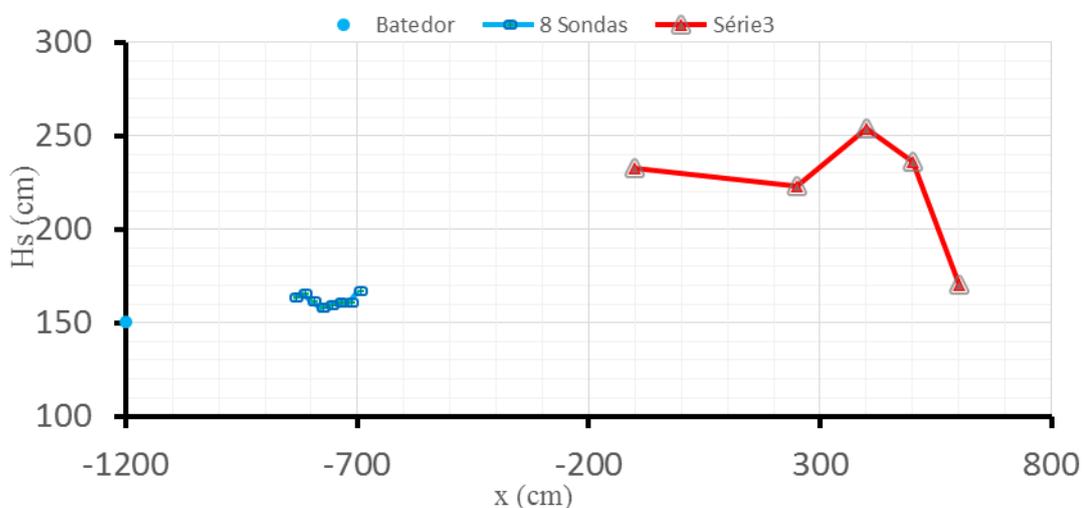


Figura 4.8 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3.

Para a onda de geração T7H1.5, obteve-se os resultados do gráfico da Figura 4.8. Neste, tal como T7H1.25, verifica-se que a altura da onda junto do batedor é equivalente à onda gerada e o mesmo irá acontecer para a onda de geração T11H2.

Na posição  $x = 250$  cm, pode-se visualizar que a onda sofre um aumento significativo, conseqüente da diminuição da profundidade e da largura do canal longitudinalmente. Esse aumento acaba em  $x = 400$  cm, sofrendo um decréscimo drástico até  $x = 600$  cm devendo-se à ocorrência da rebentação na posição  $x = 470$  cm, que, e segundo Fredsøe e Deigaard (1992), depois de haver rebentação progressiva ou mergulhante, ocorre uma transição. No caso da rebentação progressiva, que ocorre nas ondas de geração com período T7, a superfície de espuma cresce e a altura de onda reduz-se rapidamente. Em ambos os casos, a onda sofre uma transformação e na parte interior da zona de rebentação, pode ser descrita como uma série periódica de pequenas vagas (Svendsen et al., 1978).

Para a onda de geração T11H2, Figura 4.9, foi captado o sinal da altura de onda muito próximo da zona de rebentação,  $x = 320$  cm e, posteriormente, um decréscimo muito acentuado até  $x = 600$  cm como seria de esperar, ponto já significativamente distante da zona de rebentação.

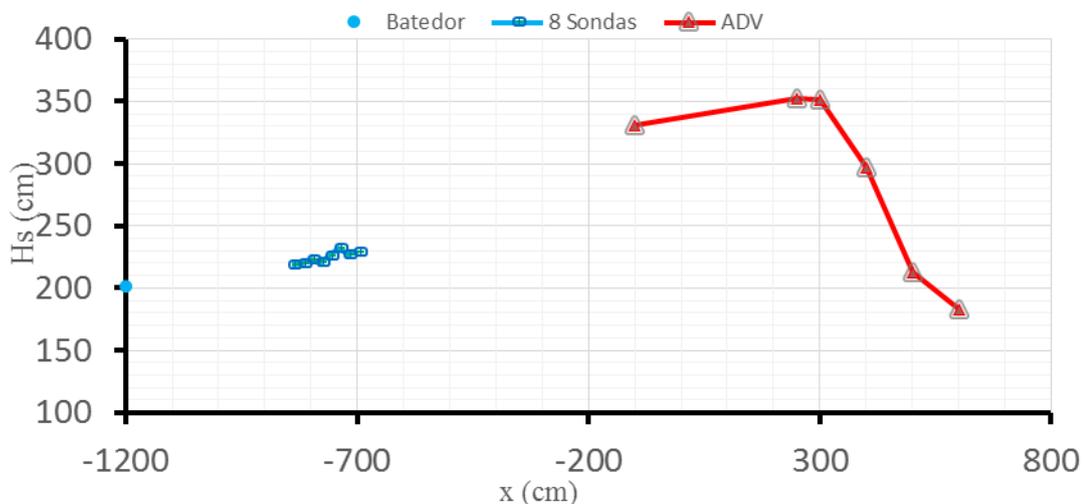


Figura 4.9 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T11H2 no COI3.

Segundo os autores Andersen e Fredsøe (1983), que chegaram à fórmula empírica, Eq. 50, que estabelece a variação deste rácio entre a altura de onda local e a profundidade:

$$\frac{H}{d} = 0.5 + 0.3 \exp\left(-0.11 * \frac{\Delta x}{d_b}\right) \quad (30)$$

Onde  $\Delta x$  é a distância, medida a partir do ponto de rebentação, na direção de propagação da onda. Quanto maior for a distância à rebentação da onda menor vai ser o rácio, atingindo um mínimo de 0.5 na “inner zone”, zona inferior ilustrado na Figura 4.10 (Andersen e Fredsøe, 1983).

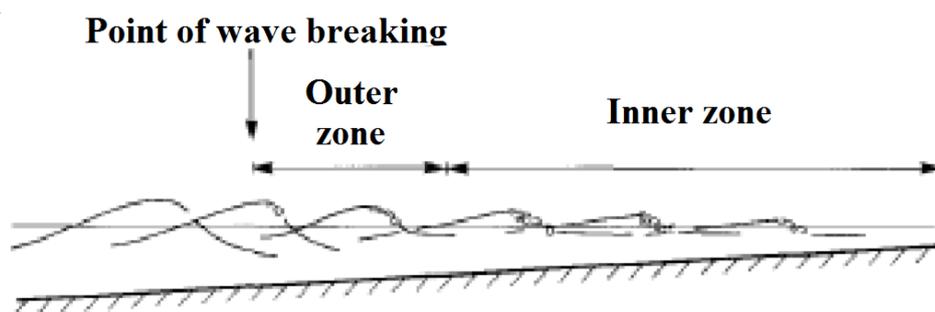


Figura 4.10 - Partes exterior e interior da zona de rebentação (Adaptado de Fredsøe e Deigaard, 1992).

### 4.3.2 Com influência da Estrutura

Relativamente aos ensaios com a estrutura no canal, é importante relembrar que a inclinação da estrutura se inicia em  $x = 585$  cm, não tendo um ensaio em  $x = 600$  cm mas sim em  $x = 580$  cm.

Os gráficos seguintes representam a variação, ao longo do canal, da altura significativa para as três ondas geradas, Figura 4.11, Figura 4.13e Figura 4.14.

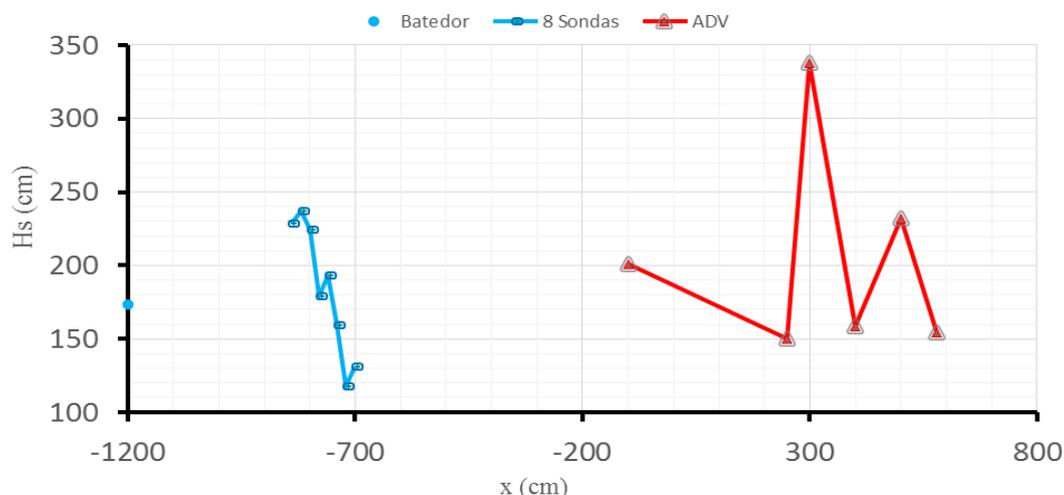


Figura 4.11 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura.

Como se observa na Figura 4.11, o gráfico das alturas significativas difere bastante em relação aos gráficos sem a influência da estrutura no canal anteriormente analisados. Começado por se referenciar a altura da onda junto do baterdor, que já não apresenta características semelhantes à onda gerada pelo baterdor de ondas. Como já foi referido anteriormente esta diferença deve-se ao facto de ao longo do canal se sentir a reflexão que a onda incidente tem na estrutura, que juntamente com a onda refletida e em condições mais controladas, formam características idênticas a uma onda estacionária.

Na zona onde se localizam as 8 sondas, tal como acontece para todas as ondas geradas com influência da estrutura, existe uma grande instabilidade na altura de onda onde existe um conjunto de várias ondas sobrepostas e de tamanhos diferentes num curto espaço de tempo, Figura 4.12 referente à onda de geração T7H1.5. Esta instabilidade é resultante da reflexão que a estrutura provoca no canal.



Figura 4.12 - Zona de instabilidade na localização das 8 sondas com uma onda de geração T7H1.5.

No capítulo 2, referiu-se que a junção da onda incidente e a refletida formam alteram a altura da onda, e que a altura máxima da onda, o ventre, está presente em cada comprimento de meia onda a partir da estrutura,  $\lambda/2$ . Uma das várias localizações ao longo do canal deste ventre acontece onde as 8 sondas estão colocadas. Daí a diferença de alturas significativas obtidas nos resultados experimentais relativos a estas, Figura 4.11, que demonstram a altura da máxima da onda (ventre em  $x = -820$  cm), naquela zona do canal.

Relativamente próximo da estrutura, a partir  $x = 250$  cm, existe uma grande variação das alturas. Isto deve-se mais uma vez ao fenómeno da reflexão da onda associado ao fenómeno de empolamento. Os resultados obtidos experimentalmente no canal com influência da estrutura, relativamente ao sem a influência da mesma, são bastante mais elevadas como seria de prever. Em  $x = 300$  cm pode ver-se que a altura da onda é maior que as restantes, devendo-se à rebentação, que não ocorre para a onda T7H1.25, mas sim à junção da onda incidente com a refletida na estrutura, que foi possível observar visualmente durante o ensaio que a junção da onda incidente com a refletida criavam “pontos” onde a altura era superior aos restantes locais intermédios a estes “pontos”, pontos estes que seriam os ventres da onda estacionaria, que também iria ocorrer perto de  $x = 500$  cm.

Apesar de não rebentar a onda apresenta características próximas da rebentação nas proximidades da estrutura, mas ao chegar a esta ela produz os fenómenos de espraiamento e refluxo, dissipando a sua energia pelo talude da estrutura, Figura 4.5.

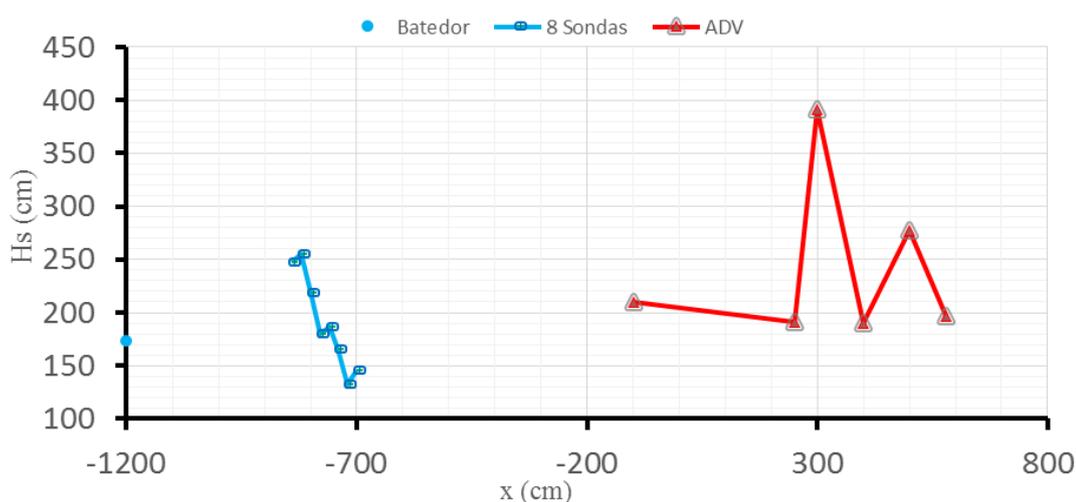


Figura 4.13 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura.

Em relação à onda T7H1.5, foi referido anteriormente, e exemplificado na Figura 4.12, no local das 8 sondas e batedor existe uma grande instabilidade da água que resulta em diferentes alturas da onda, como se pode observar pelos resultados obtidos nas 8 sondas que estão espaçadas por

20 cm no canal e fixadas da posição  $x = -840$  até  $-700$  cm, sendo novamente um dos ventres deste ensaio localizado na posição  $x = -820$  cm.

A partir da posição  $x = -100$  cm os resultados da altura da onda são maiores, relativamente aos denominados por batedor e 8 sondas. Nestes, mais uma vez a onda ganha uma altura maior na posição  $x = 300$  cm, devido a localização próxima de um ventre. Ao contrário da onda T7H1.25 que apresentava características próximas da rebentação, a onda T7H1.5 chega mesmo a rebentar em  $x = 470-480$  cm, mas, como a aquisição dos dados não foi realizada na posição de rebentação e sim na  $x = 400$  cm, a altura da onda é significativamente menor devido às proximidades de um nodo, resultante da iteração da onda incidente com a refletida. Posteriormente a esta rebentação, e como acontece muito próximo da estrutura, mais uma vez os fenómenos de espraiamento e refluxo ocorreram, sendo novamente a altura da onda menor.

Para a onda de geração T11H2 no gráfico ilustrado mais abaixo, Figura 4.14, observa-se que o conjunto de 8 sondas, em relação aos outros conjuntos das outras ondas de geração, apresentam resultados diferentes. Isto deve-se à mudança de período da onda, ou seja, as localizações dos ventres no canal já não irão ser as mesmas. Então este conjunto de 8 sondas, em relação a direção à estrutura, apanha a “parte de trás do ventre”, por isso apresenta características de ir aumentando de  $x = -840$  até  $-700$  cm.

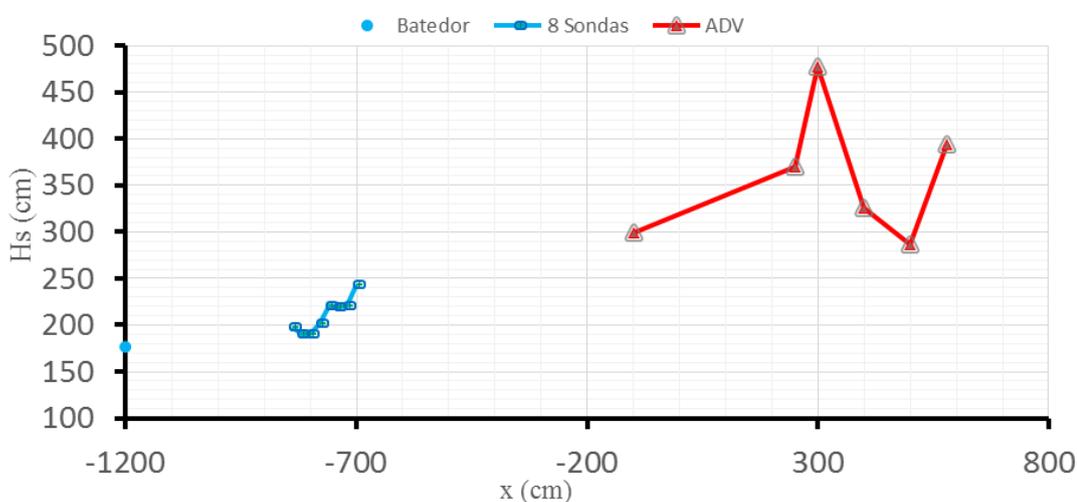


Figura 4.14 - Altura significativa,  $H_s$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.

A partir da fotografia, Figura 4.15, retirada a partir da posição  $x = 300$  cm em direção ao batedor do ensaio T11H2, se pode observar os ventres e os nodos existentes, que se propagam ao longo do canal. Nela pode-se visualizar uma linha de trajeto, nas paredes húmidas do canal, que a variação da altura da onda faz ao longo do canal.

As características da variação da altura de onda a partir de  $x = -100$  cm, são semelhantes aos resultados das outras ondas geradas, excepto na posição  $x = 580$  cm onde a altura da onda

aumenta. Este aumento deve-se à onda T11H2 ser de maior transporte de energia, que ao embater na estrutura provoca um maior volume de espraiamento e refluxo.

A rebentação ocorre entre  $x = 320-330$  cm e foi possível visualizar, nos ensaios, que esta se dava quando ocorria o “choque” com a onda refletida pela estrutura, causando uma rebentação mergulhante de grande aparato, como é possível de observar pela Figura 4.6. Posteriormente a esta a altura diminuía e voltava a aumentar perto da estrutura, nas proximidades de um novo ventre.

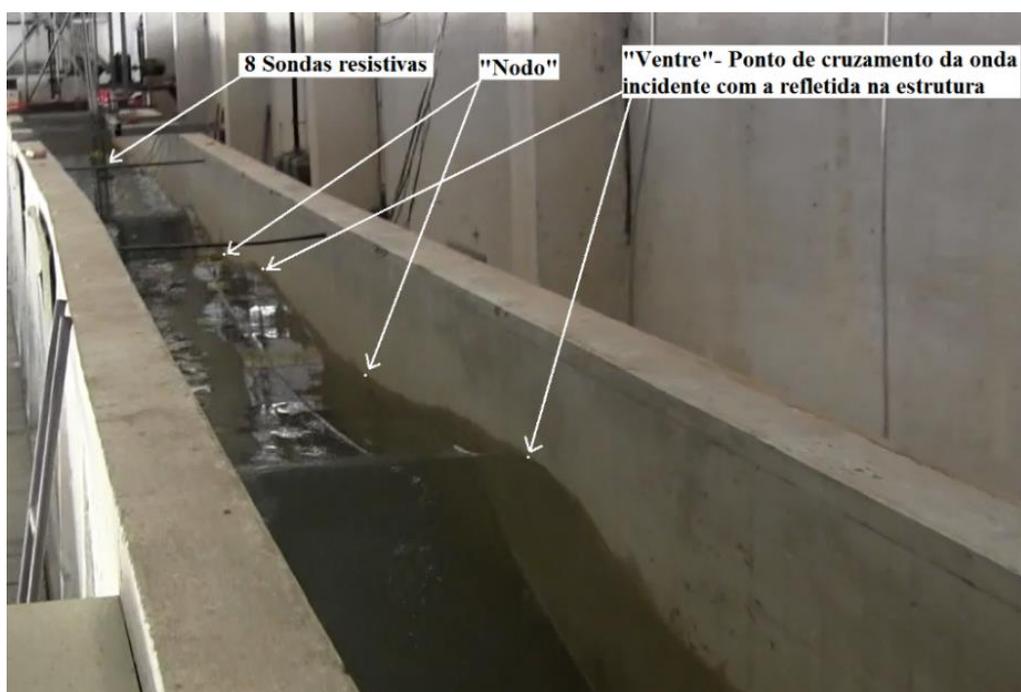


Figura 4.15 – Fotografia do COI3 com estrutura para onda de geração T11H2.

#### 4.4 Análise temporal da série de valores de velocidade das partículas da onda

Os resultados experimentais do campo de velocidades ao longo do canal apresentam-se em duas fases. Na primeira irá ser realizada uma análise das velocidades ao longo do eixo longitudinal do canal, com e sem influência da estrutura colocada. Na segunda parte irá ser feita uma análise do perfil de velocidades entre a posição  $x = 250$  até  $x = 500$  cm, dos ensaios realizados com influência da estrutura.

##### 4.4.1 Velocidades das partículas ao longo do eixo longitudinal do canal

###### 4.4.1.1 Sem influência da Estrutura

Na Figura 4.16 apresentam-se os resultados das velocidades longitudinal,  $V_x$ , transversal,  $V_y$  e vertical,  $V_z$  da onda de geração T7H1.25 do canal sem a estrutura colocada.

Numa análise aos gráficos das velocidades para a onda de geração T7H1.25 observa-se que as velocidades, à medida que a onda vai progredindo no canal, tendem a ser maiores. Na Figura 4.16<sup>a</sup>, as velocidades longitudinais máximas tornam-se cada vez maiores, à medida que a onda avança no canal, o mesmo acontece com as velocidades mínimas. Isto está relacionado com a diminuição da profundidade e, conseqüentemente com o aumento da altura da onda.

Transversalmente, Figura 4.16b, devido ao canal ser de duas dimensões a velocidade é próxima de zero, isto porque, a onda avança segundo o eixo longitudinal limitada pelas paredes do canal, mas perto da rebentação existe um pequeno aumento devido a existir maior turbulência na zona.

Quanto à velocidade vertical verifica-se na Figura 4.16c que também existe uma variação ao longo do canal de acordo com a diminuição da profundidade e o aumento da altura da onda, podendo verificar-se o início do empolamento. Antes da rebentação em  $x = 620$  cm, verifica-se que as velocidades  $V_{z,máx}$  e  $V_{z,min}$  diminuem, como se pode ver a partir da posição  $x = 600$  cm. Atribui-se a esta diminuição às características da rebentação já que com a rebentação existe dissipação de energia, que está associada à diminuição das velocidades.

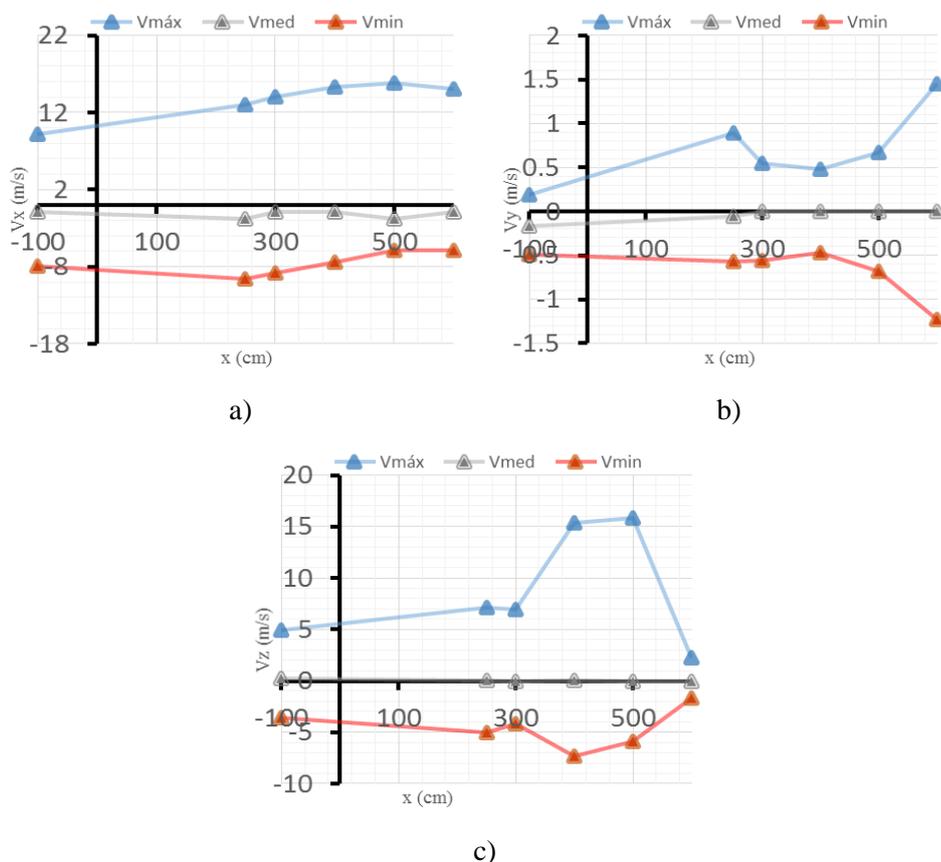


Figura 4.16 – Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.25 ao longo do eixo x do COI3.

Para a onda de geração T7H1.5, Figura 4.17, verifica-se um comportamento semelhante durante o empolamento. Mais uma vez é verificada a diminuição da profundidade que vai proporcionar um aumento das velocidades. Na Figura 4.17a vê-se que este aumento das velocidades máximas e mínimas longitudinalmente ocorre até a posição  $x = 500$  cm. Verificou-se que depois da posição  $x = 500$  cm as velocidades máximas e mínimas diminuem, podendo este acontecimento estar diretamente relacionado com a rebentação ocorrente em  $x = 470$  cm.

Transversalmente, verifica-se um aumento das velocidades após a rebentação, Figura 4.17b. Este comportamento é semelhante à onda de geração T7H1.25 devido à existência de maior turbulência na zona.

Olhando para o gráfico da Figura 4.17c, antes de ocorrer a rebentação a amplitude da velocidade vertical tende a diminuir (o valor máximo a diminuir e o valor mínimo a aumentar). Sabendo que após a rebentação existe uma dissipação de energia e a velocidade diminui, pode justificar-se o ligeiro aumento que ocorre em  $x = 500$  cm pela formação de uma segunda onda com menos energia que, como foi possível ver em ensaio, vai desaparecendo à medida que se afasta da zona da rebentação.

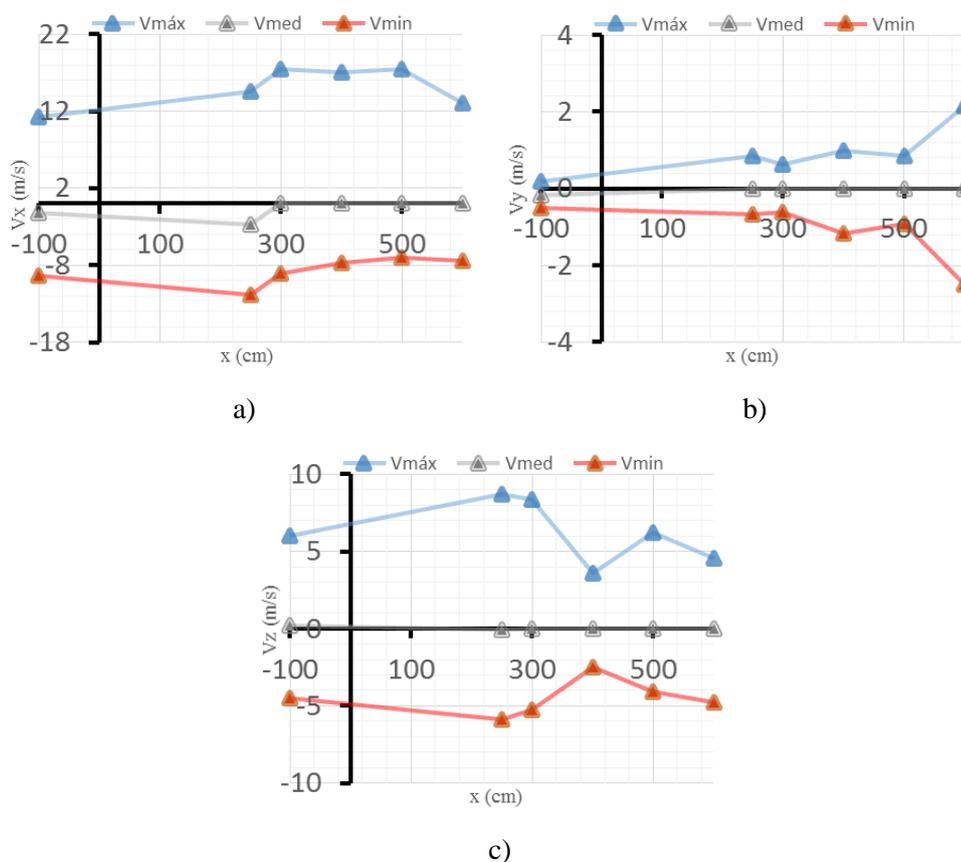


Figura 4.17 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.5 ao longo do eixo x do COI3.

Quanto a onda de geração T11H2, Figura 4.18, visualiza-se em todos os gráficos que existem dois comportamentos distintos separados pelo ponto onde existe rebentação,  $x = 320$  cm. Quanto à velocidade longitudinal antes da rebentação existe um aumento das velocidades,  $V_{x,máx}$  e  $V_{x,min}$ , e após esta existe uma diminuição acentuada, sendo que,  $V_{x,min}$  praticamente se mantém constante. Em relação à velocidade transversal, Figura 4.18b, a partir da rebentação verifica-se um aumento da amplitude dos valores de velocidade (diminuição de  $V_{y,min}$  e aumento de  $V_{y,máx}$ ) como verificado nos casos anteriores.

Em relação à velocidade vertical, após a rebentação, as velocidades apresentam características semelhantes à onda T7H1.5, variando apenas os valores das alturas.

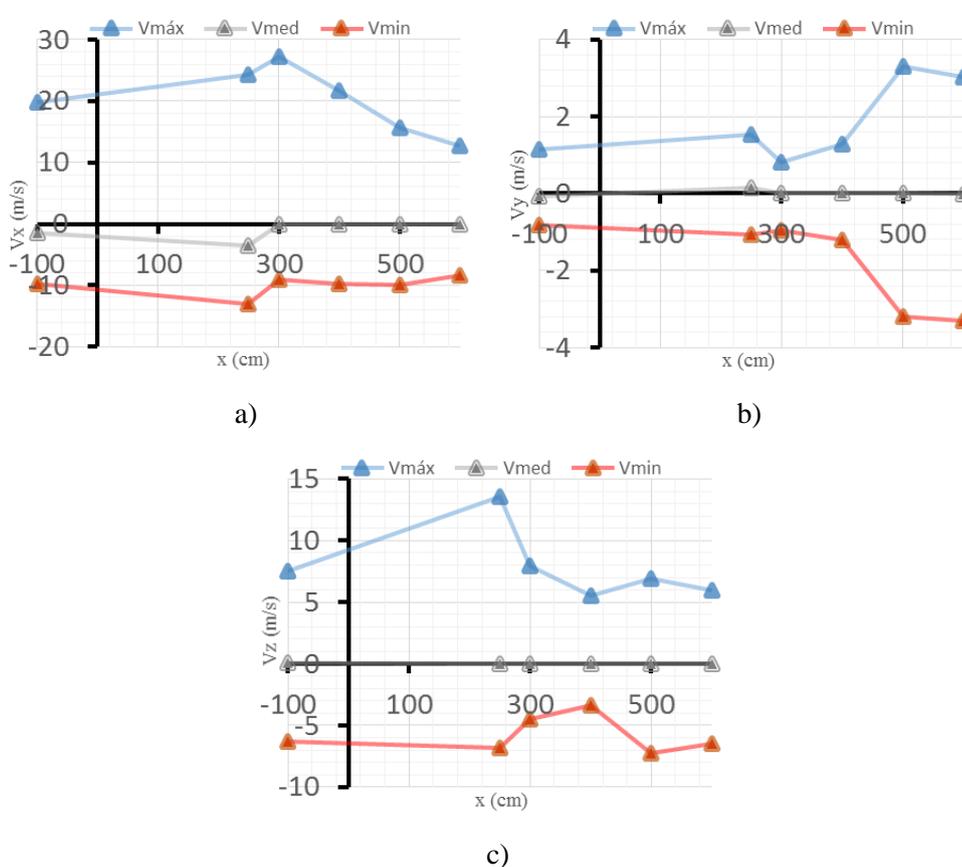


Figura 4.18 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T11H2 ao longo do eixo x do COI3.

#### 4.4.1.2 Com influência Estrutura

Os resultados dos ensaios com a influência da estrutura, serão apresentados nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Neste vai ser possível visualizar a grande alteração das características das velocidades devido, maioritariamente, à reflexão na estrutura.

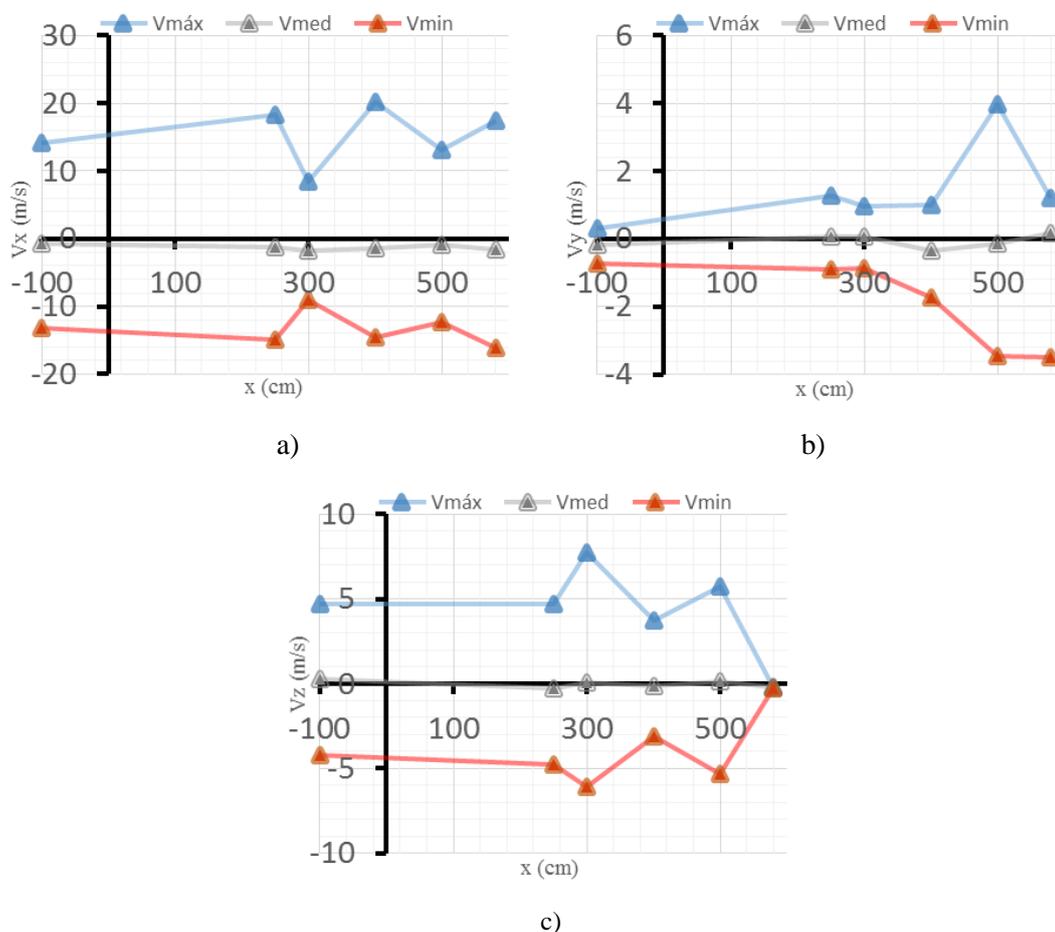


Figura 4.19 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.25 ao longo do eixo x do COI3.

Na Figura 4.19 apresentam-se os resultados das velocidades longitudinal,  $V_x$ , transversal,  $V_y$  e vertical,  $V_z$  da onda de geração T7H1.25 do canal com influência da estrutura. No decorrer dos ensaios foi possível visualizar que as posições  $x = 300$  cm e  $x = 500$  cm decorreram nas proximidades de ventres formados pelo fenómeno da reflexão, zonas onde a onda incidente e a refletida se cruzam e formam maiores oscilações da altura da onda. Nos resultados obtidos observa-se para posição  $x = 300$  cm, a amplitude das velocidades longitudinais, Figura 4.19a, irá diminuir e volta a aumentar em  $x = 400$  cm, na proximidade de um nodo, e volta a aumentar no encontro de outro ventre. Na zona de espraiamento e refluxo,  $x = 580$  cm, a velocidade volta a ganhar amplitude devido ao movimento “vai-e-vem” na estrutura.

Nesta zona de espraiamento e refluxo existe alguma emulsão de ar e tendo em conta que o ADV adquire os dados das velocidades através das partículas suspensas, os resultados poderiam não ser os melhores, mas verificou-se que as correlações se mantinham nos 68% na aquisição dos dados o que torna os valores das velocidades bastante aceitáveis.

A zona próxima da estrutura, devido à reflexão das ondas, aparenta uma estabilidade na altura da superfície livre. No entanto, verifica-se uma velocidade transversal bastante maior relativamente ao caso sem estrutura, Figura 4.19b, que pode indicar que a interação da onda incidente com a refletida produz efeitos tridimensionais significativos, é o que acontece a partir de  $x = 400$  cm e pode justificar as oscilações na velocidade longitudinal.

Quanto à velocidade vertical Figura 4.19c, repara-se que à semelhança da velocidade longitudinal esta altera-se nos locais próximos aos ventres, mas em sentido inverso (a amplitude das velocidades verticais é maior nesses pontos). Nesses pontos existe um maior movimento ascendente e descendente das partículas, que o ADV mede, devido à junção e separação das duas ondas provocando maiores  $V_{z,máx}$  e menores  $V_{z,min}$ . Na posição próxima a estrutura,  $x = 580$  cm, esta é praticamente nula, isto deve-se ao “vai-e-vem” dos fenómenos de espraiamento e refluxo, onde o movimento da onda é maioritariamente horizontal.

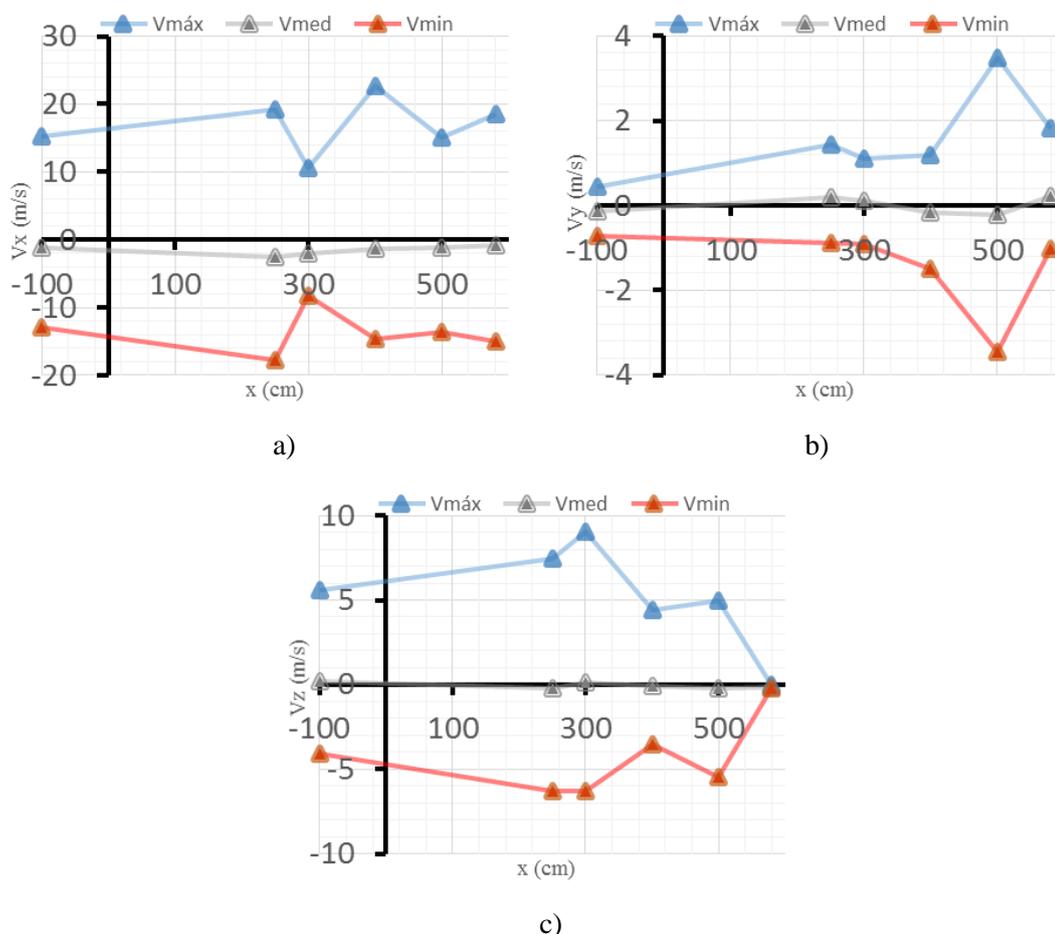


Figura 4.20 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T7H1.5 ao longo do eixo x do COI3.

Relativamente à onda de geração T7H1.5, as velocidades tem um comportamento idêntico à onda T7H1.25, como se observa nos gráficos de resultados da Figura 4.20. Mais umas vez os

pontos de cruzamento da onda incidente com a onda refletida na estrutura, ventres, são importantes. Apesar de a onda ser outra, esses pontos são os mesmos já que o período da onda é igual entre ambas. Então na posição  $x = 300$  e  $500$  cm as velocidades longitudinais,  $V_{x,máx}$  e  $V_{x,min}$ , são menores e as velocidades verticais,  $V_{z,máx}$  e  $V_{z,min}$ , são maiores nesses pontos. Como ocorre rebentação em  $x = 470-480$  cm, e existe instabilidade do nível da superfície livre devido à reflexão a partir de  $x = 400$  cm, ocorre um aumento das velocidades transversais nessas zonas.

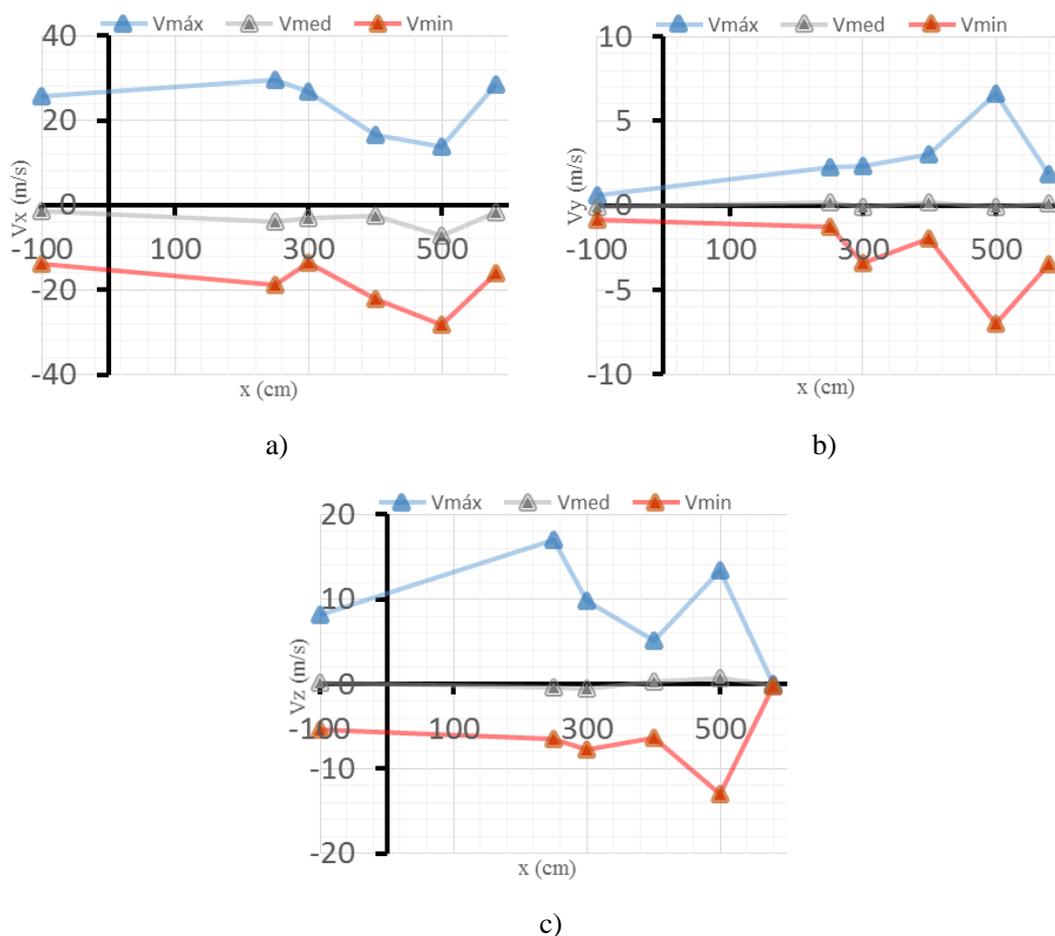


Figura 4.21 - Velocidades longitudinal, a), transversal, b) e vertical c), para a onda de geração T11H2 ao longo do eixo x do COI3.

Na Figura 4.21 estão representados os gráficos dos resultados das velocidades referente à onda de geração T11H2. A rebentação da onda ocorre para a posição  $x = 320-330$  cm, e como se pode notar no gráfico das velocidades longitudinais, Figura 4.21a, este difere do das ondas anteriores. Neste caso os valores mínimos e máximos não variam no sentido inverso, que se deve ao facto da rebentação se dar mais cedo, ocorrendo fenómenos complexos que resultam da interação da onda incidente que sofreu já rebentação com reflexão. É interessante notar que os valores mínimos e máximos seguem um comportamento similar à parte final dos restantes casos com estrutura e apresenta um comportamento contrário aos primeiros casos sem estrutura.

Quanto às velocidades verticais máximas e mínimas, Figura 4.21c, o comportamento é semelhante aos casos anteriores. Visto que a onda rebenta, a onda não sofre empolamento, logo os movimentos ascendentes e descendentes das partículas vão ser inferiores e irá ocorrer a diminuição da amplitude da velocidade para a posição  $x = 400$  cm, ao contrário da posição  $x = 500$  cm que está próxima de um ventre, altura máxima e mínima da junção das ondas incidentes com as refletidas. Apesar de a onda rebentar, devido à formação de uma segunda onda, a altura irá aumentar neste local,  $x = 500$  cm, devido à junção da nova onda formada pela rebentação e a onda refletida na estrutura.

As velocidades transversais mais uma vez nas zonas próximas à estrutura, onde a instabilidade da reflexão é maior e provoca efeitos tridimensionais significativos, apresentam velocidades de maior amplitude.

#### 4.4.2 Velocidades ao longo do eixo longitudinal e em profundidade do canal

Para a análise dos resultados ao longo da altura foram elaborados os gráficos ao longo das posições  $x = 250, 300, 400$  e  $500$  cm, em relação às velocidades longitudinais, transversais e verticais para cada condição de agitação incidente na estrutura. As profundidades são relativamente ao nível da superfície livre tendo as seguintes posições, respetivas a cada profundidade:

- Posição 1 – 13,465 cm de profundidade;
- Posição 2 – 18,465 cm de profundidade;
- Posição 3 – 23,465 cm de profundidade;
- Posição 4 – 28,465 cm de profundidade;
- Posição 4a – 25,13 cm de profundidade.

Sendo que a “posição 1” não foi realizada para  $x = 250$  cm e a “posição 4<sup>a</sup>” para  $x = 500$  cm. No entanto, a posição 4a realizou-se para  $x = 500$  cm. Esta como se verá em todos os gráficos, ilustrados neste subcapítulo, apenas se representou por um ponto, mas poderá observar-se que esta é a posição mais funda no ensaio realizado em  $x = 500$  cm comparativamente às outras “posições” ilustradas, Figura 3.15.

Relativamente à onda de geração T7H1.25, para a velocidade longitudinal, Figura 4.22, observa-se que o comportamento das velocidades em profundidade é semelhante ao longo do canal, destacando que na proximidade de um ventre, na posição  $x = 300$  cm, as velocidades  $V_{x,máx}$  e  $V_{x,min}$  vão aumentando com a profundidade, mantendo praticamente a amplitude entre elas. Já na proximidade do nodo, posição  $x = 400$  cm, que apresenta uma altura menos oscilante (devido à onda apenas apresentar características semelhantes a uma onda estacionária), a velocidade perto do fundo apresenta uma maior amplitude. Os valores médios apresentam uma relação com a profundidade, equanto que, para os valores mínimos e máximos, pode observar-se que as

velocidades não dependem da profundidade. A onda T7H1.25 não rebenta, mas, a proximidade à estrutura das posições  $x = 400$  e  $500$  cm, devido ao fenómeno da reflexão associado ao empolamento, causam uma grande instabilidade.

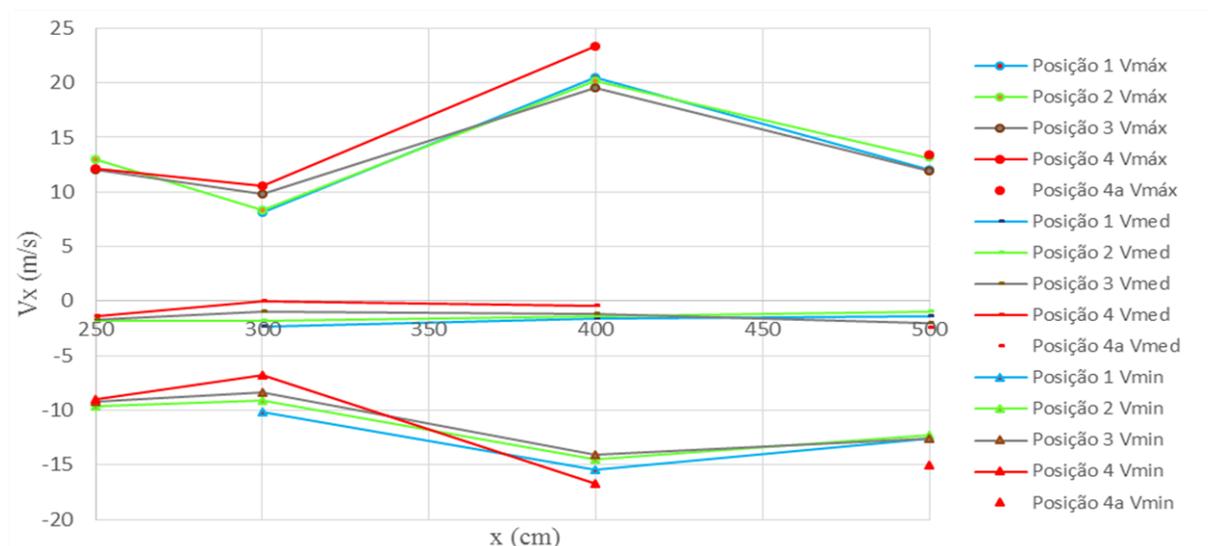


Figura 4.22 - Onda T7H1.25 Velocidade Longitudinal,  $V_x$ , em profundidade.

Em relaoo a velocidade transversal, Figura 4.23, pode observa-se que os efeitos tridimensionais, possivelmente causados pela interaoo da onda incidente com a refletida proximos oo estrutura visualizados pelas oscilaoo dos valores minimos e maximos da velocidade transversal ao longo do eixo do canal, se notam em profundidade mais cedo ( $x = 300$  cm) enquanto que os restantes soo se notam a partir de  $x = 400$  cm.

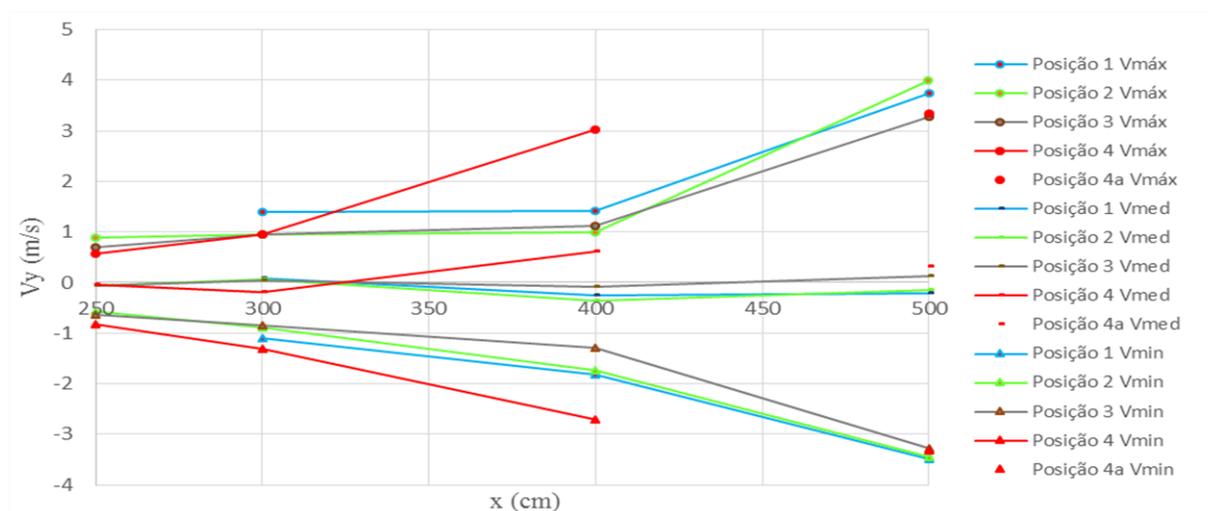


Figura 4.23 - Onda T7H1.25 Velocidade transversal,  $V_y$ , em profundidade.

Para a velocidade vertical, Figura 4.24, visualiza-se que os valores próximos do fundo, “posição 4 e 4a”, apresentam um comportamento semelhante à velocidade longitudinal, da posição  $x = 300$  cm até  $x = 400$  cm a amplitude de velocidades aumenta e volta a diminuir em  $x = 580$  cm. Para as restantes posições verticais, observa-se o oposto ( $V_{z,máx}$  vai diminuindo e  $V_{z,min}$  vai aumentando), e não do mesmo modo, ie, para  $x = 400$  cm os valores de velocidade não apresentam uma relação direta com a profundidade. Pressupõe-se que na junção de uma onda incidente com a onda refletida as variações de velocidade vão ser maiores nas zonas mais próximas da superfície livre, acalmando em profundidade. Já na zona próxima do nodo,  $x = 400$  cm, se observa uma diminuição da amplitude das velocidades até à “posição 4”, que está a cerca de um centímetro do fundo do canal, que aumenta significativamente a sua amplitude de velocidade verticais. Posteriormente como observa-se em  $x = 500$  cm, na “posição 4a” que também está a um centímetro do fundo do canal e novamente próxima de um ventre, a amplitude de velocidade volta a diminuir levando a pressupor que em profundidades próximas do fundo as velocidades verticais comportam-se de modo semelhante as velocidades longitudinais, diminuindo nos ventres e aumentando nos nodos.

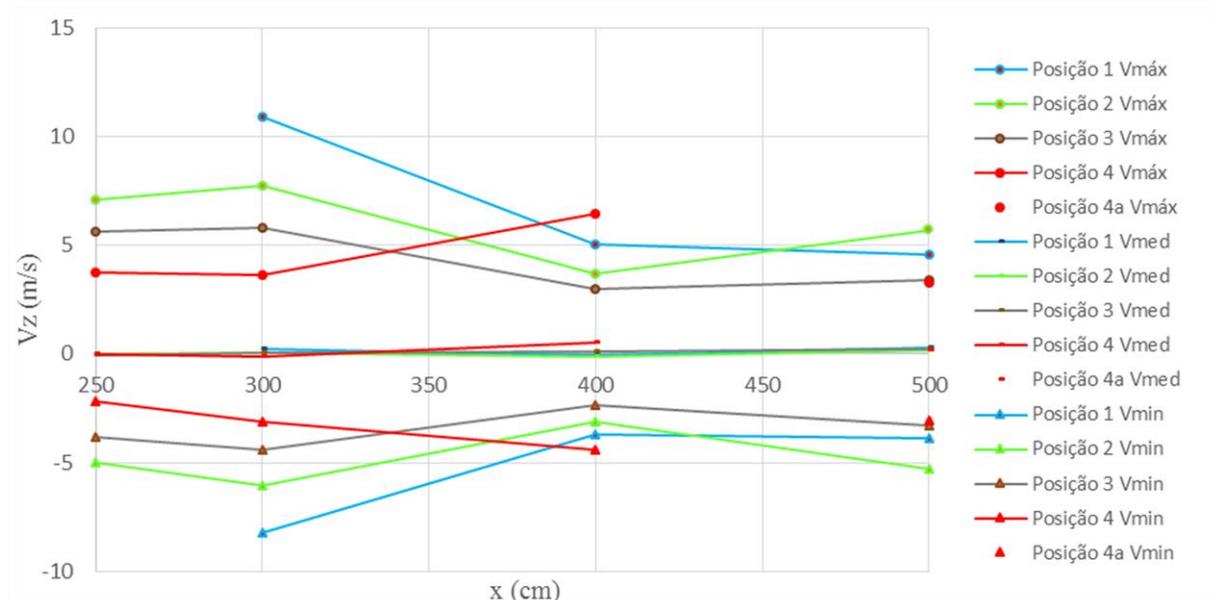


Figura 4.24 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical, Vz, em profundidade.

Os resultados das velocidades relativas à onda de geração T7H1.5 estão ilustrados nos gráficos das Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e apresentam um comportamento semelhante, comparativamente com os resultados das velocidades da onda de geração T7H1.25.

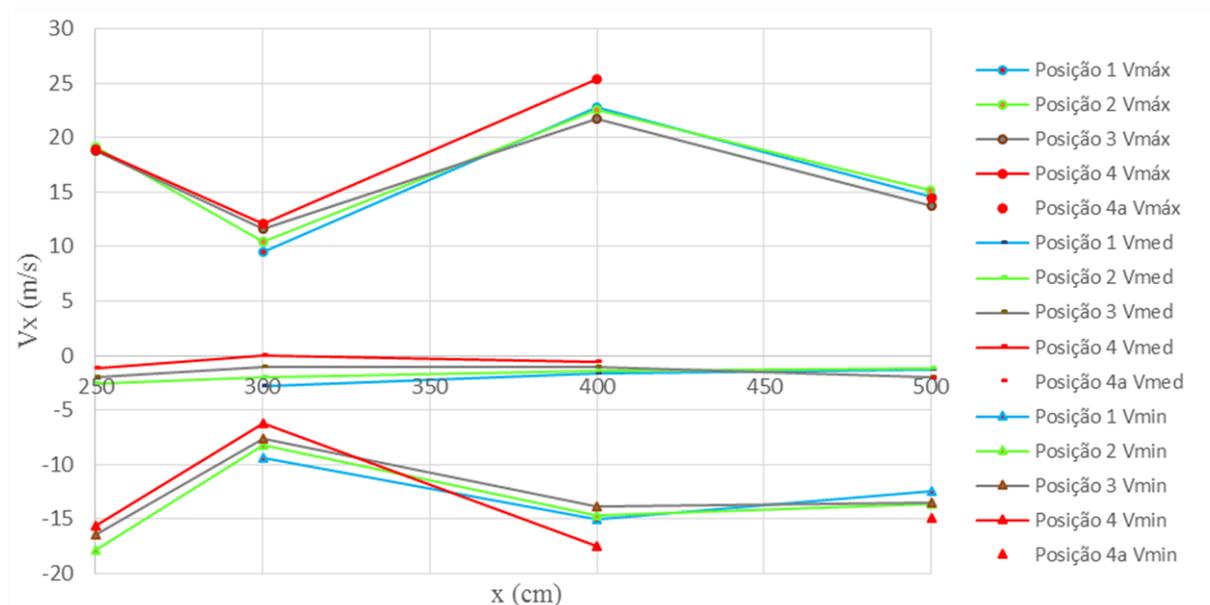


Figura 4.25 - Onda T7H1.5 Velocidade longitudinal,  $V_x$ , em profundidade.

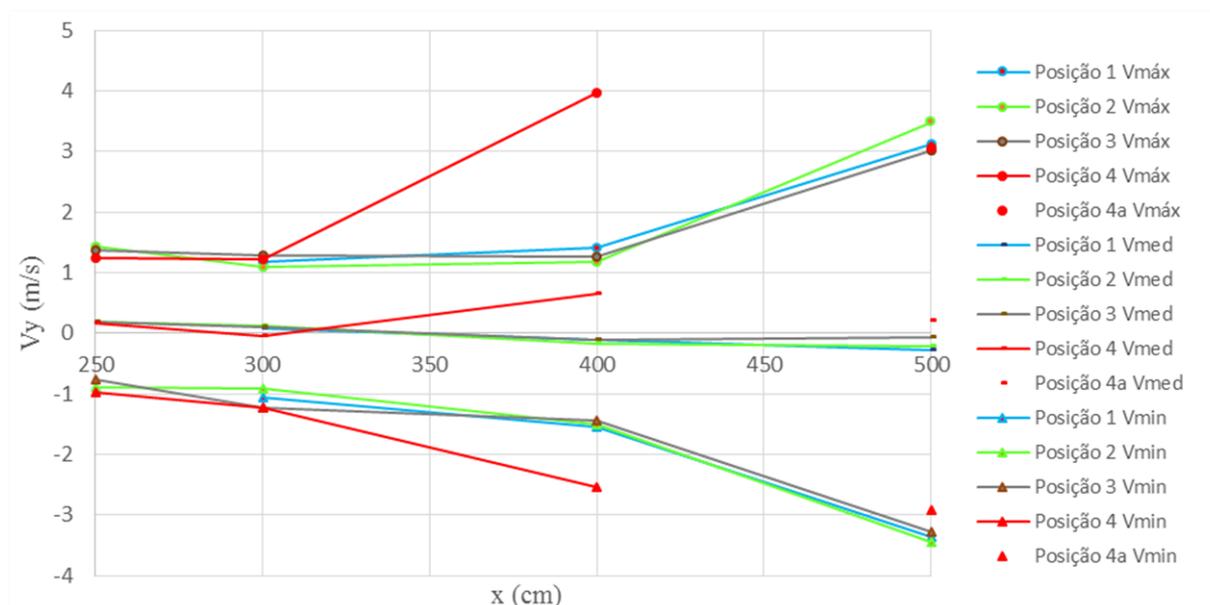


Figura 4.26 - Onda T7H1.5 Velocidade transversal,  $V_y$ , em profundidade.

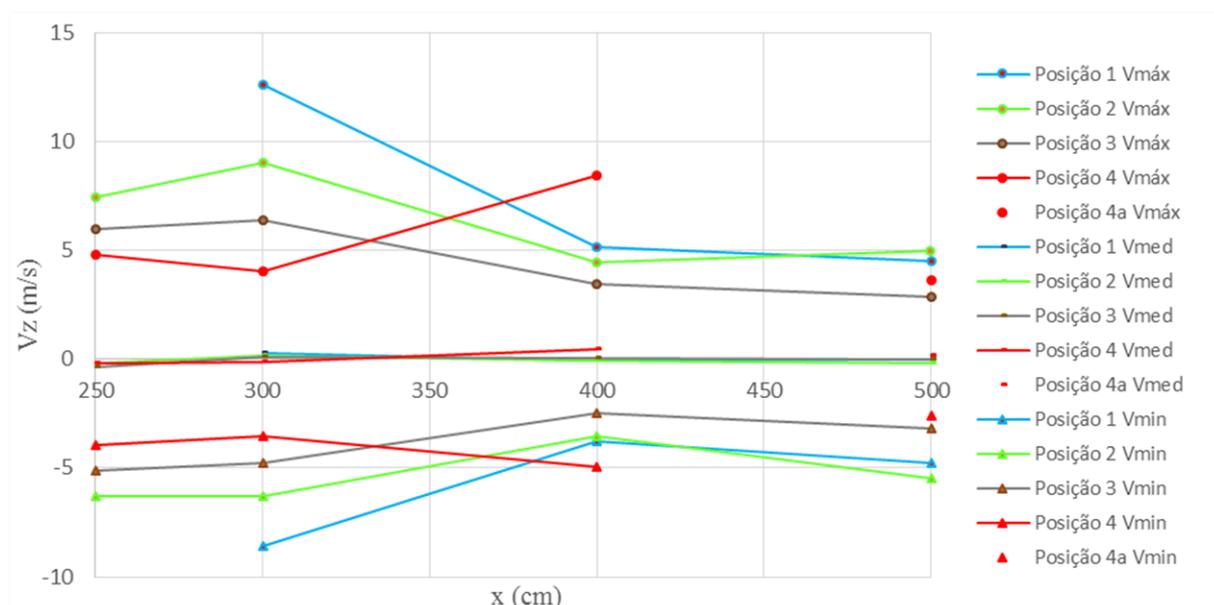


Figura 4.27 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical, Vz, em profundidade.

Para onda de geração T11H2 os resultados das velocidades estão nas Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30.

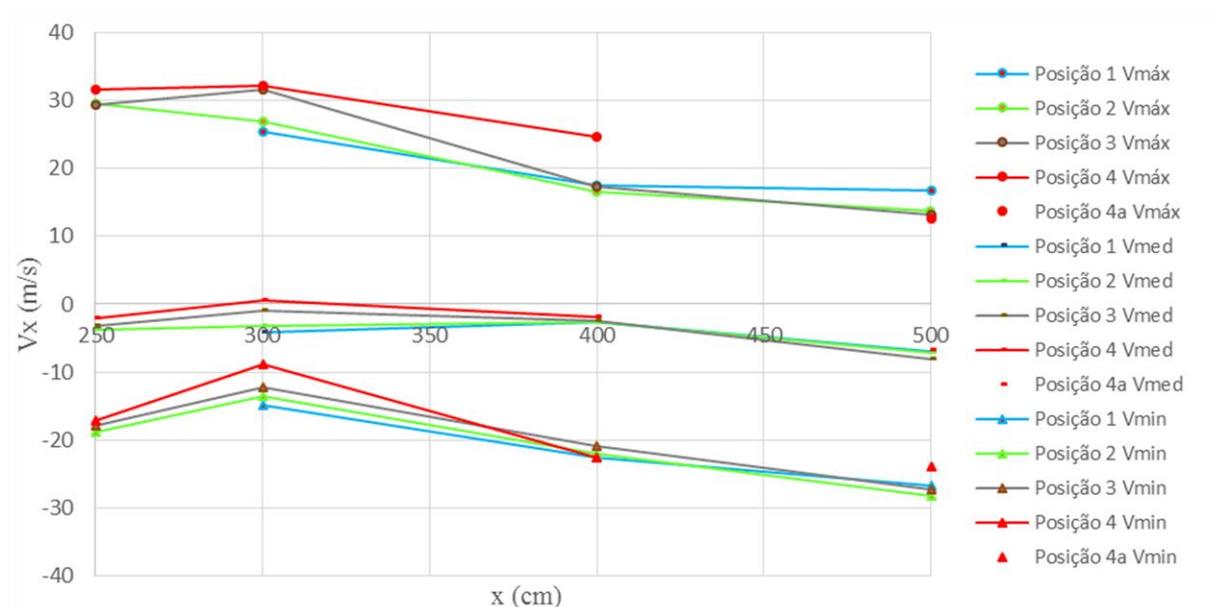


Figura 4.28 - Onda T11H2 Velocidade longitudinal, Vx, em profundidade.

Relativamente à velocidade longitudinal, verifica-se que os valores médios e mínimos apresentam resultados semelhantes aos casos anteriores. Verifica-se o aumento das velocidades  $V_{x,máx}$  e  $V_{x,min}$  em profundidade na zona  $x = 300$  cm, próxima de um ventre. Sendo essa

coerência novamente não verificada a partir de  $x = 400$  cm. Os valores máximos apresentam um comportamento diferente já que em  $x = 300$  cm os valores máximos são bastante mais altos em qualquer das posições ao longo da vertical.

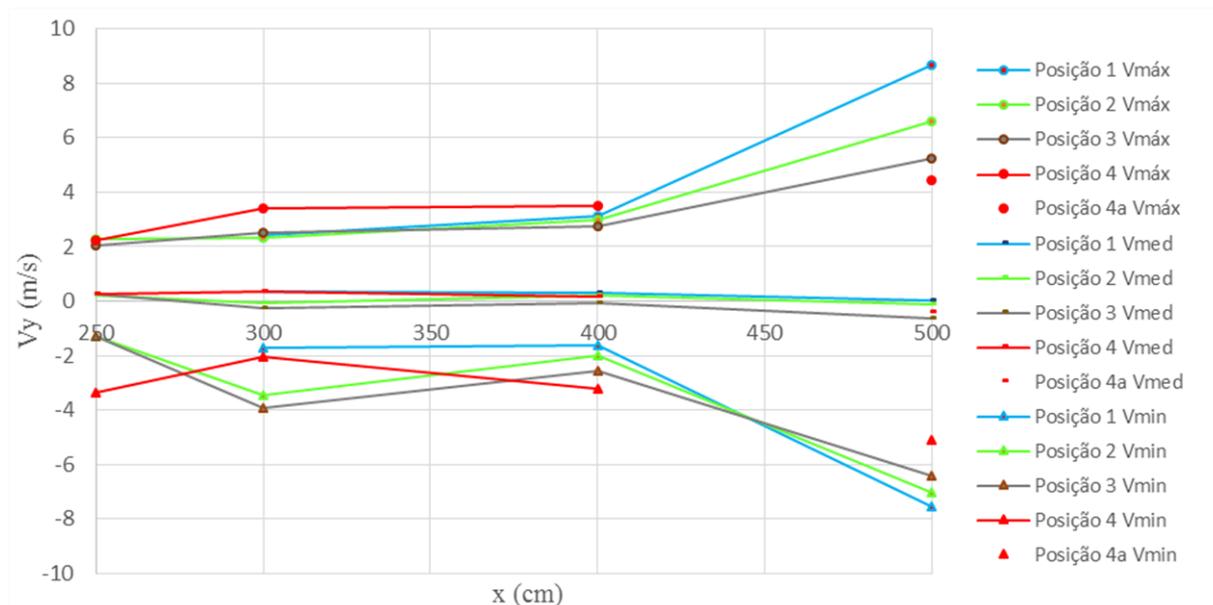


Figura 4.29 - Onda T11H2 Velocidade transversal,  $V_y$ , em profundidade.

Em relação às velocidades transversais, Figura 4.29, relativamente à posição  $x = 300$  cm observa-se um comportamento diferente que atribui-se ao choque de ondas verificado durante os ensaios e documentado nos filmes (Figura 4.6). Assim para a “posição 4” deixa de existir o aumento significativo das velocidades transversais a partir de  $x = 300$  cm. Isto poderá ser consequência desta onda ter maiores quantidades de energia e apresenta uma rebentação do tipo mergulhante, dissipando mais a energia e tornando a onda refletida menos insignificante face à incidente.

Por fim, para as velocidades verticais, Figura 4.30, mais uma vez irá ocorrer na “posição 4”, na posição  $x = 300$  cm que está próxima de um ventre, uma diminuição da amplitude de variação das velocidades, embora neste caso com um comportamento diferente relativamente aos valores máximo e mínimo de velocidade. Em relação à proximidade do nodo, na posição  $x = 400$  cm, apesar de não tão claro como as ondas de período 7s, verifica-se uma ampliação da variação das velocidades para esta velocidade ( $V_{z,máx}$  nota-se um maior aumento enquanto  $V_{z,min}$  praticamente se mantém igual). Para as restantes profundidades, o valor da amplitude mínima verifica-se para  $x = 400$  cm apresentando uma relação direta com a profundidade. Para  $x = 500$  cm a relação dos valores máximos e mínimos da velocidade apresentam uma variação com a profundidade também para a posição mais próxima do fundo. Note-se que  $x = 400$  e  $x = 500$  cm ocorrem depois da rebentação já que a onda rebenta em  $x = 320-330$  cm.

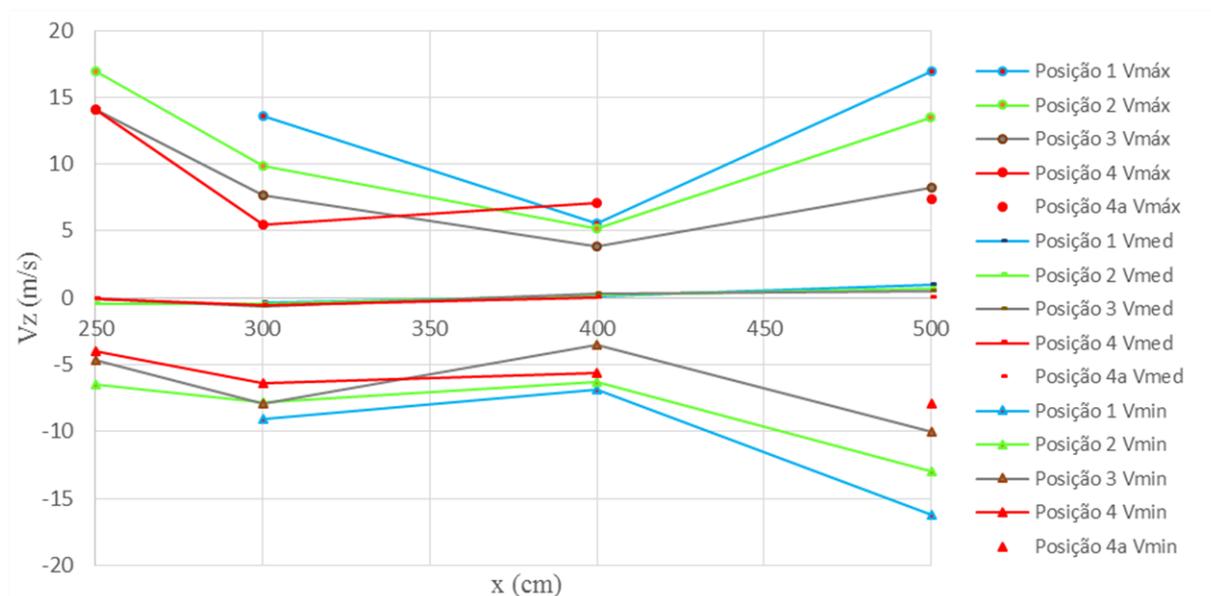


Figura 4.30 - Onda T11H2 Velocidade vertical,  $V_z$ , em profundidade.

Na observação destas análises em profundidade, em relação a todas as ondas geradas, visualiza-se uma clara diminuição da amplitude das velocidades verticais à medida que a profundidade é maior na posição  $x = 300$  cm e também se pode verificar, para esta posição, um aumento da amplitude de velocidades longitudinais em profundidade, em exceção da T11H2 onde a amplitude é constante. Quanto às amplitudes das velocidades verticais na “posição 4” observa-se uma tendência a estas diminuírem em zonas próximas dos ventres e a aumentar nas próximas dos nodos ao contrário das outras posições mais adjacentes à superfície livre que tendem a aumentar a amplitude nos ventres e a diminuir nos nodos. Em relação aos efeitos tridimensionais causados pela junção das ondas incidentes com as refletidas consegue ver-se que quando a profundidade é maior mais longe, relativamente à estrutura, se fazem sentir esses efeitos, aumentando a amplitude das velocidades verticais mais “cedo”.

Em anexo, Anexo B, serão expostos os gráficos das velocidades ao longo das profundidades, “posições”, para todas as condições de ondas geradas.

## 5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

### 5.1 Conclusões

Na presente dissertação procurou-se efetuar um estudo do comportamento do campo de velocidades e alturas de onda nas proximidades de uma estrutura costeira, tendo em conta que a caracterização da agitação marítima é fundamental para o dimensionamento das estruturas costeiras.

De modo a servirem de apoio a validações de futuros modelos numéricos, foram realizados ensaios em modelo físico no canal de ondas, COI3, do LNEC, onde se colocou uma estrutura.

Para os ensaios estabeleceram-se três condições de agitação incidente regular, T7H1.25, T7H1.5 e T11H2, e foram analisadas as variações da elevação da superfície livre e do campo de velocidades das ondas para várias posições ao longo e em profundidade do canal próximas a estrutura colocada. Posteriormente, foram realizados alguns ensaios sem estrutura para as mesmas posições para se poder observar as diferenças dos comportamentos das ondas neste sem influência da reflexão imposta pela estrutura.

Os resultados observados foram os seguintes:

- A influência na estrutura provoca o fenómeno da reflexão, e este, é sentido em todo o canal, podendo concluir-se que a onda refletida na estrutura dependendo das características da onda, consegue ter uma grande capacidade de propagação em direção contrária à estrutura;
- O período de onda mantêm-se constante com ou sem influência da reflexão na estrutura;
- Os pontos de rebentação tornam-se variáveis com a influência da estrutura no canal;
- Após a rebentação a altura da onda decresce mas para os casos em que influência da estrutura está presente e a rebentação ocorra distante da estrutura, ocorrem pontos de junção, da segunda onda formada pela rebentação, com a onda refletida na estrutura e a altura é maior;
- As maiores alturas da onda verificaram-se para os casos com a influência da estrutura onde a altura da além de sofrer o empolamento, devidas às características do fundo, também sofre um aumento da altura da onda devido ao fenómeno da reflexão;

A junção da onda incidente com a refletida, provoca inúmeras oscilações, verificando-se uma grande alteração do comportamento das velocidades nesses pontos, podendo assim pressupor que:

- As características do campo de velocidade ao longo do canal alteram-se quando o período de onda é diferente mantendo um comportamento semelhante caso seja igual;
- Os efeitos tridimensionais, possivelmente causados pela interação da onda incidente com a refletida, provocam maior amplitude das velocidades transversais, esta amplitude faz-se sentir mais longe da estrutura consoante a profundidade é maior;
- Pode observar-se que as amplitudes das velocidades verticais nas proximidades do fundo do canal, tendem a diminuir próximas dos ventres e a aumentar próximas dos nodos ao contrário de situações mais próximas da superfície onde as velocidades verticais tendem a aumentar de amplitude nos ventres e diminuir nos nodos.

## 5.2 Futuros Trabalhos

Salientando-se que este trabalho faz parte de um estudo que está longe de estar concluído, sendo ainda necessário a curto prazo, realizar uma série de tarefas que permitam complementar o estudo. Propondo-se os seguintes ensaios de complementação para este estudo:

- Realizar um conjunto de perfis de velocidade complementares de modo a validar ou não pressuposições mencionadas neste trabalho. A realização destes perfis deve ser efetuada ao longo do canal e em profundidade, em distâncias muito próximas. Sugere-se que colocação do ADV deva ser de 10 em 10 cm ao longo do eixo longitudinal do canal. Em cada posição ensaiada, devem-se efetuar perfis com espaçamento de 1 cm em profundidade. Note-se que estas posições devem ser numa zona próxima à estrutura;
- Para as posições ao longo do eixo longitudinal do modelo físico colocar uma sonda resistiva lado a lado com o ADV de modo a retirar medições da elevação da superfície livre nesses, conseguindo uma análise minuciosa da localização de pontos onde a elevação da onda é superior;
- Realizar ensaios para outras condições de agitação de diferentes, de modo a entender até que ponto a junção da onda incidente com a refletida altera as características do campo de velocidades e elevação da superfície livre;
- Estudo para as mesmas condições de ensaio, com uma colocação adequada de sondas de modo a poder usar a metodologia de Mansard and Funke (Santos, 2008) para poder separar o sinal da onda incidente e refletida e fazer uma análise individual das duas ondas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfredini, Paolo e Arasaki, Emilia (2009). "Obras e Gestão de Portos e Costas". Blucher, São Paulo.

Bay, Ibrahim, (2005). "Measurement and Analysis of Wave Overtopping". Tese de Doutorado, Universidade de Liverpool, Inglaterra.

Beer, Tom (1996). "ENVIRONMENTAL OCEANOGRAPHY". CRC Press, Florida.

Coastal Engineering Manual (2008). Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers.

Fredsøe, J., Deigaard, R., (1992). "Mechanics of Coastal Sediment Transport". World Scientific, Singapore.

Galvin, C., (1968). "Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches". Journal of Geophysical Research, Volume 73.

Groen, P. en Dorrestein, R. (1976). "Zeegolven". Staatsdrukkerij em uitgeverijbedrijf, 'sGravenhage.

Kamphuis, J. William (2000). "Introduction to Coastal Engineering and Management". World Scientific, Singapore.

Laing, A., Gemmill, W., Magnusson, A.K., Burroughs, L., Reistad, M., Khandekar, M., Holthuijsen, L., Ewing, J.A., Carter, D.J.T., (1998). "Guide to Wave Analysis and Forecasting". World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Neves, D.R.C.B., Endres, L.A.M., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T., (2011a). "Rebentação das Ondas. Análise e Tratamento de Dados Obtidos em Ensaios em Modelo Físico". Relatório BRISA. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Newman, John Nicholas (1977). "Marine Hydrodynamics". Cambridge : The MIT Press, United States of America.

Pierson, W.J., Neumann, G., James, R.W., (1955). "Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics". U.S. Navy Hydrographic Office Publications, Washington D.C., United States of America.

Sancho, F. (2002). "Hidráulica Fluvial e Marítima". Lições da disciplina de Processos Fluviais e Costeiros 2002-2004, Mestrado em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Universidade de Coimbra.

Santos, F., (2008). "PERFORMANCE OF A MULTIPROPOSE HYDRAULIC CHANNEL". Tese de Mestrado em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Dep. Eng. Civil, Universidade de Coimbra. (Aprovado com 16/20)

Svendsen, I.A., Madsen, P., Hansen, J.B., (1978). "Wave Characteristics In the Surf Zone". Proceedings 16th Coastal Engineering Conference, Chapter 29, Hamburg, Germany.

Talley, Lynne D., George L. Pickard, William J. Emery, James H. Swift, (2011). "Descriptive Physical Oceanography: An Introduction". Academic Press, United States of America.

Taveira Pinto, F. (2001). Trabalhos Fluviais e Marítimos. Dimensionamento Hidráulico e Estrutural de Quebramares de Taludes. Porto, FEUP.

Young, Ian.R., (1999). "Wind Generated Ocean Waves". University of Adelaide, Austrália, Cap. 2.

## ANEXO

### Anexo A – Resultados da análise temporal da série de valores de elevação da superfície livre com influência da estrutura

Resultados da onda T7H1.25:

- Altura de onda média,  $\bar{H}$ :

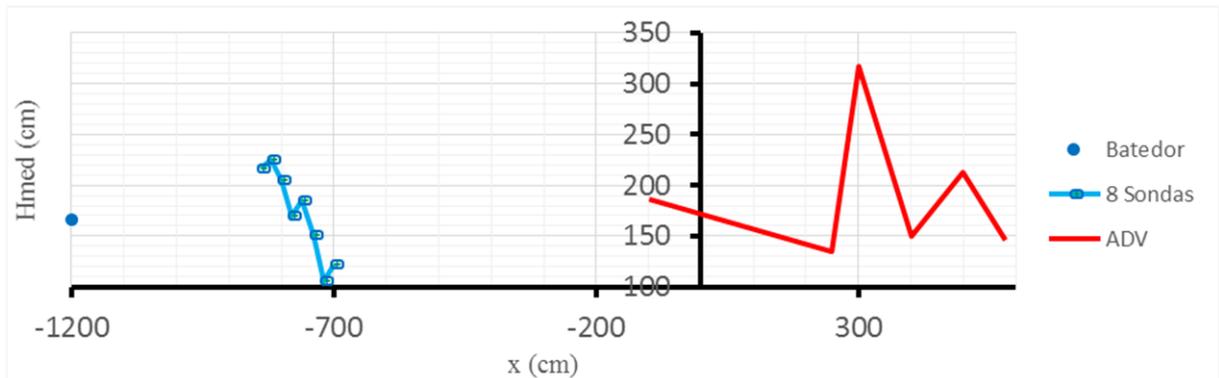


Figura A.1 - Altura média,  $\bar{H}$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura.

- Altura média de 10% das maiores ondas:

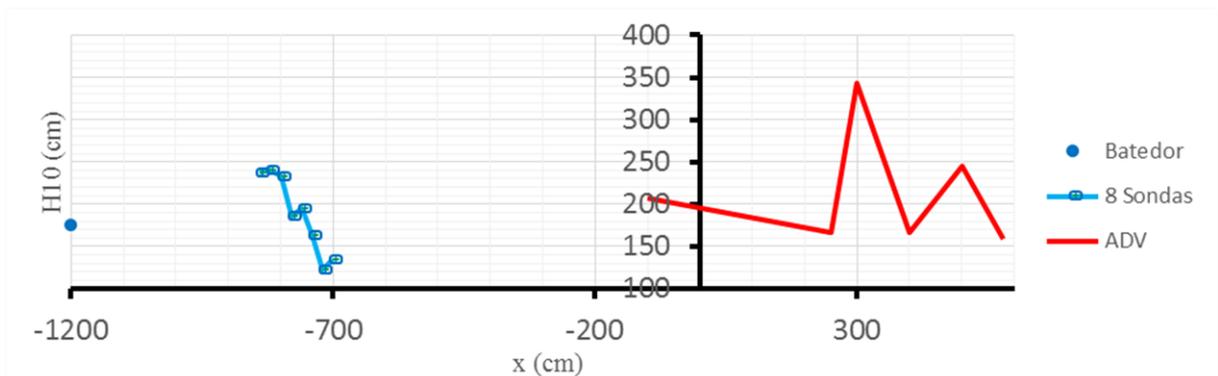


Figura A.1 - Altura média de 10% das maiores ondas,  $H_{10}$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura.

- Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ :

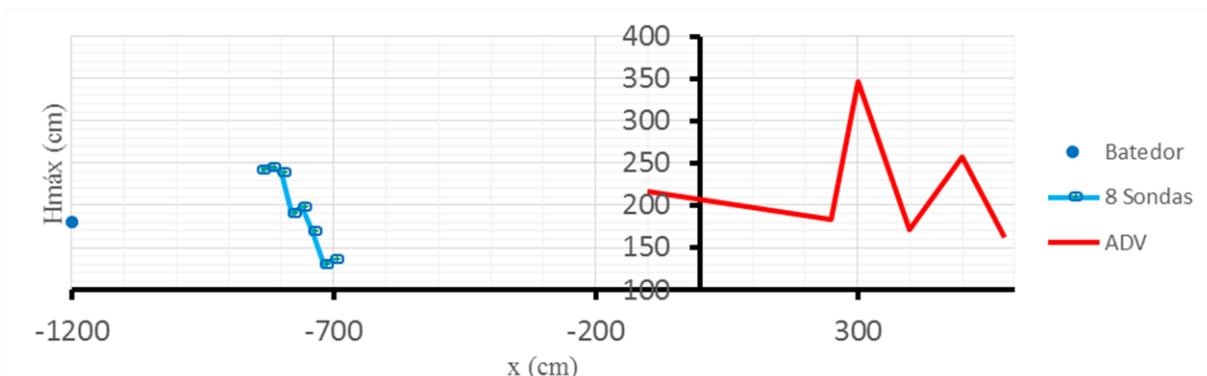


Figura A.2 - Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ , da onda de geração T7H1.25 no COI3 com estrutura.

Resultados da onda T7H1.5:

- Altura de onda média,  $\bar{H}$ :

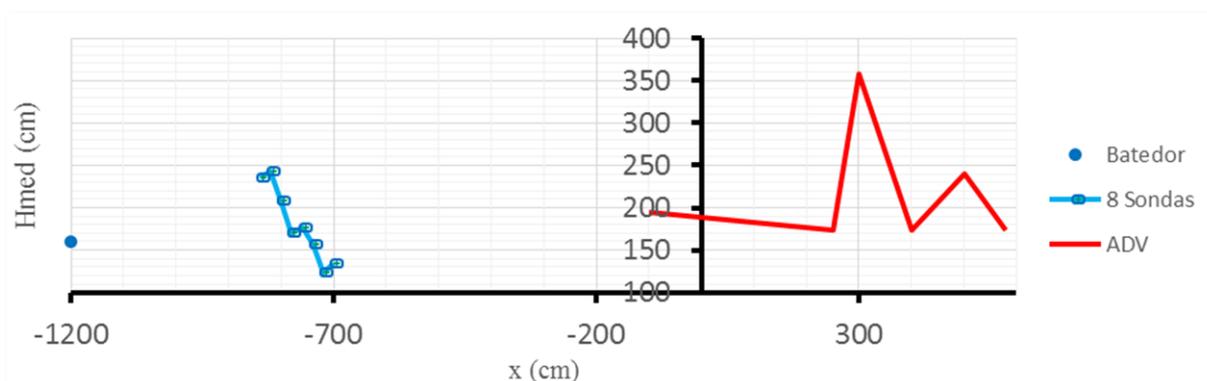


Figura A.3 – Altura de onda média,  $\bar{H}$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura.

- Altura média de 10% das maiores ondas:

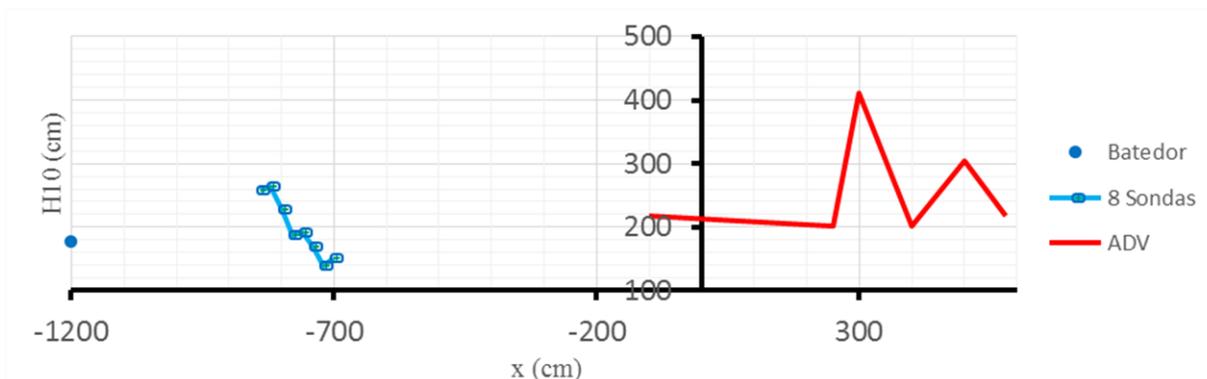


Figura A.4 - Altura média de 10% das maiores ondas,  $H_{10}$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura.

- Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ :

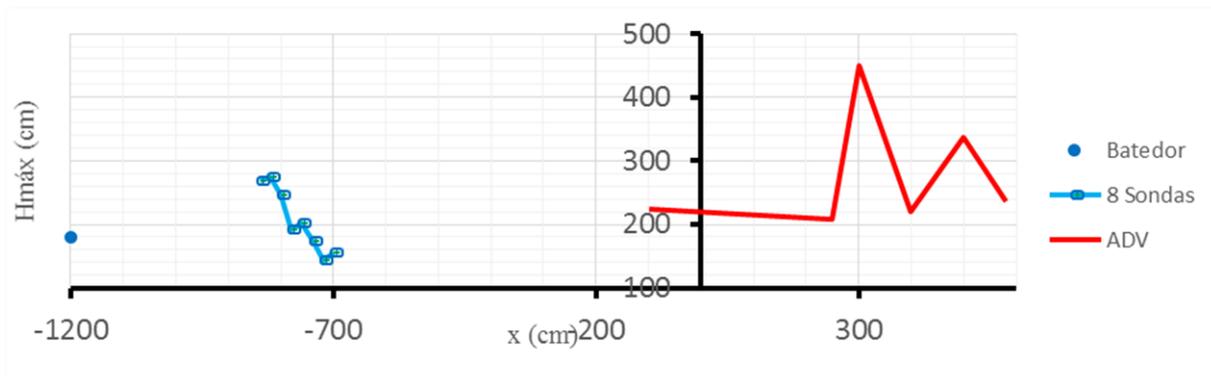


Figura A.5 - Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ , da onda de geração T7H1.5 no COI3 com estrutura.

Resultados da onda T11H2:

- Altura de onda média,  $\bar{H}$ :

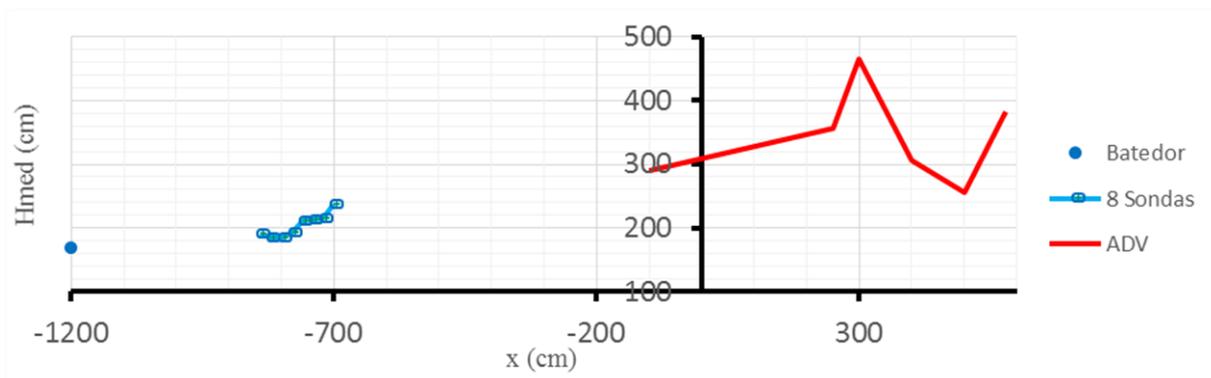


Figura A.6 - Altura de onda média,  $\bar{H}$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.

- Altura média de 10% das maiores ondas:

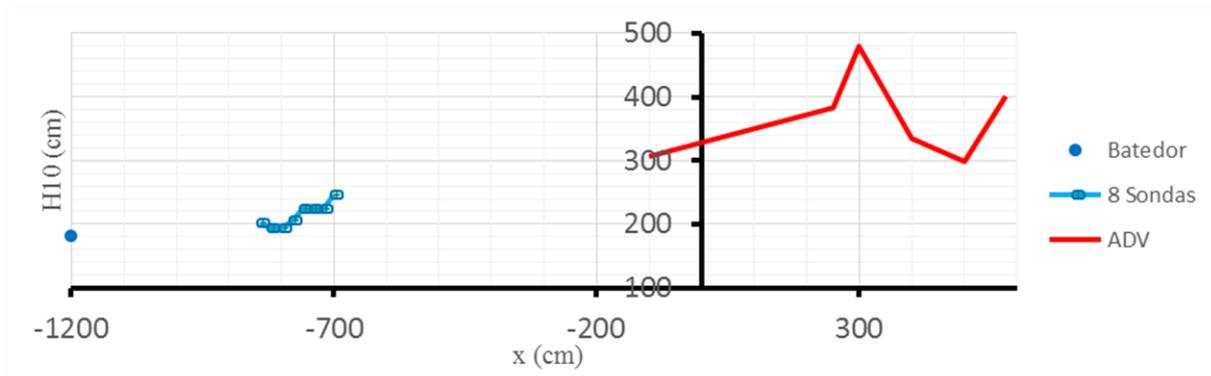


Figura A.7 - Altura média de 10% das maiores ondas,  $H_{10}$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.

- Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ :

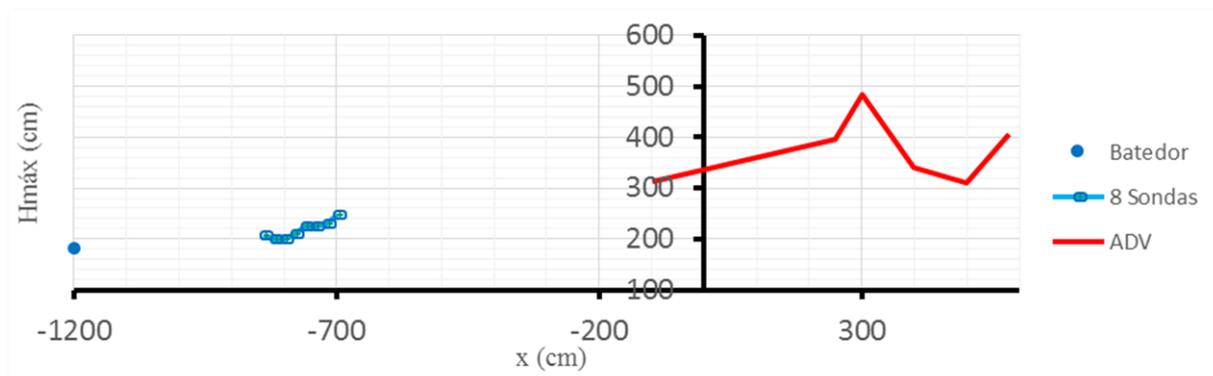


Figura A.8 - Altura máxima do registo,  $H_{m\acute{a}x}$ , da onda de geração T11H2 no COI3 com estrutura.

## ANEXO B – Resultados das velocidades das partículas ao longo do eixo longitudinal em profundidade.

Resultados da onda T7H1.25:

- $V_x$ , Velocidade Longitudinal:

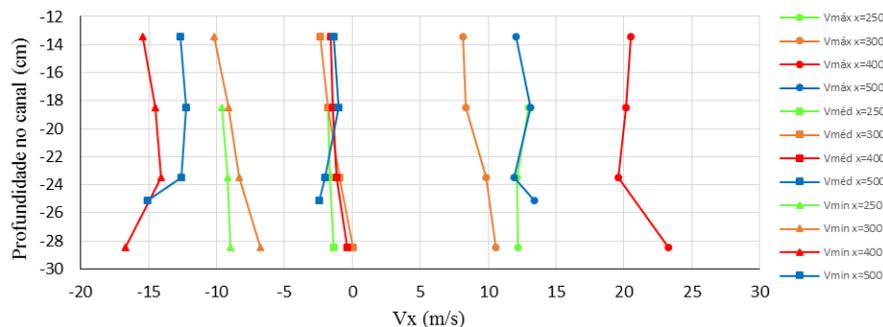


Figura B.9 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical,  $V_x$ , em profundidade.

- $V_y$ , Velocidade Transversal:

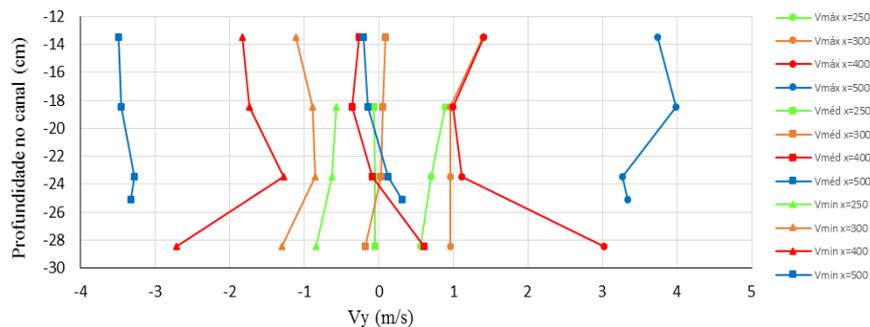


Figura B.10 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical,  $V_y$ , em profundidade.

- Velocidade Vertical,  $V_z$ :

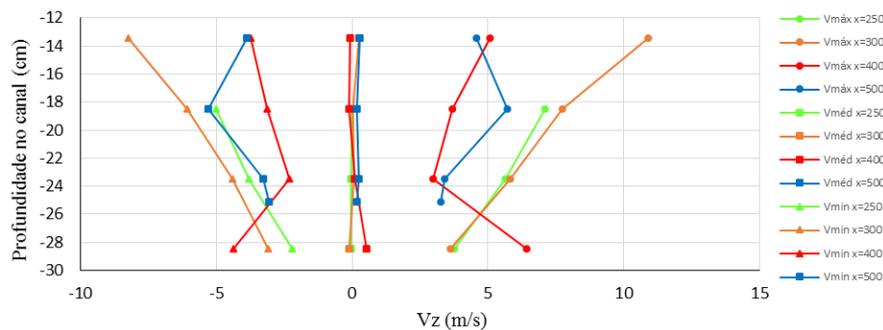


Figura B.11 - Onda T7H1.25 Velocidade vertical,  $V_z$ , em profundidade.

Resultados da onda T7H1.5:

- $V_x$ , Velocidade Longitudinal:

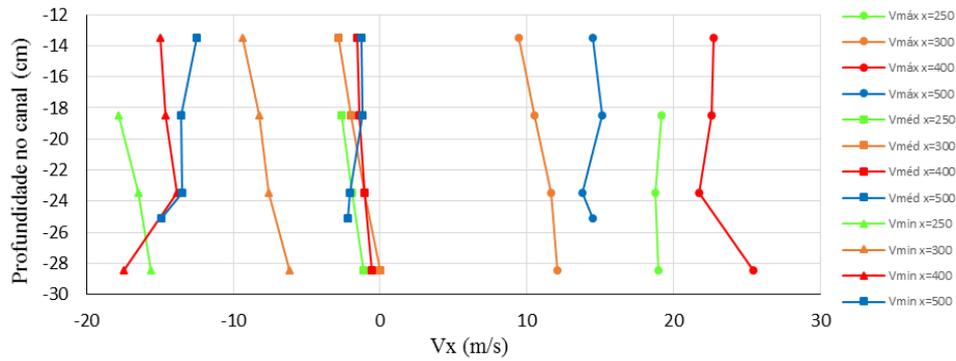


Figura B.12 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical,  $V_x$ , em profundidade.

- $V_y$ , Velocidade Transversal:

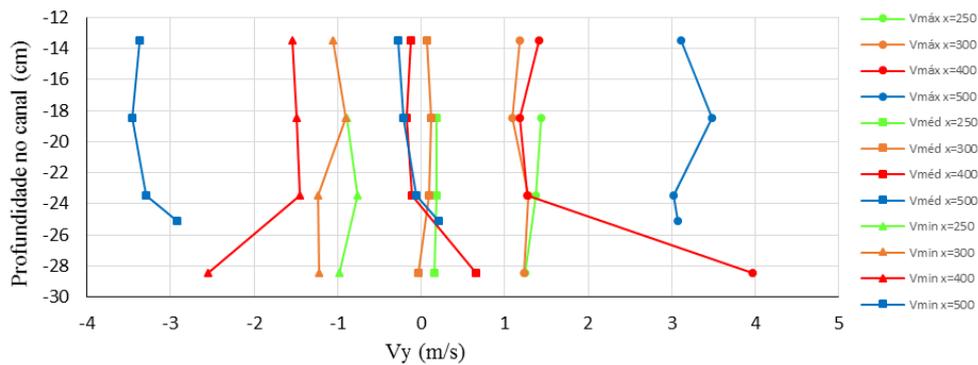


Figura B.13 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical,  $V_y$ , em profundidade.

- Velocidade Vertical,  $V_z$ :

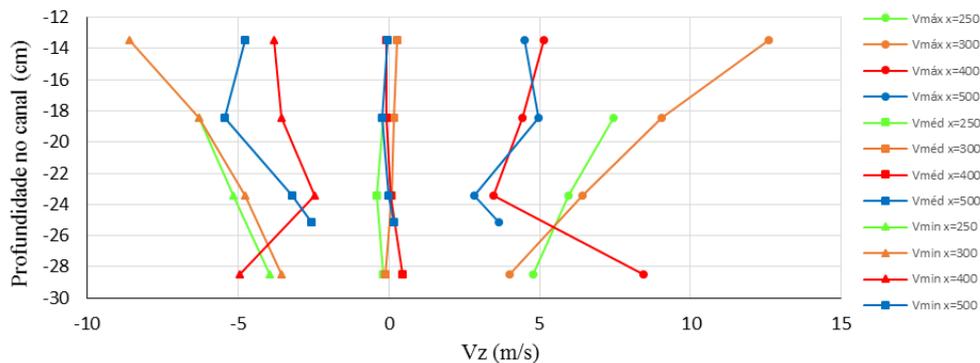


Figura B.14 - Onda T7H1.5 Velocidade vertical,  $V_z$ , em profundidade.

Resultados da onda T11H2:

- Velocidade Longitudinal:

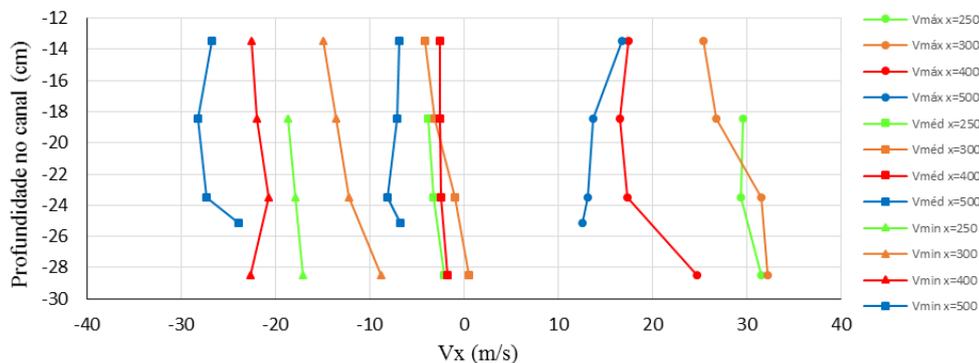


Figura B.15 - Onda T11H2 Velocidade vertical,  $V_x$ , em profundidade.

- $V_x$ , Velocidade Transversal:

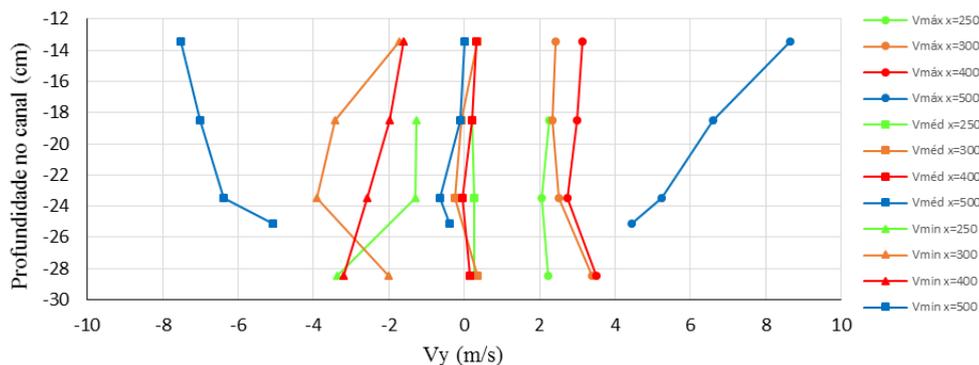


Figura B.16 - Onda T11H2 Velocidade vertical,  $V_y$ , em profundidade.

- Velocidade Vertical,  $V_z$ :

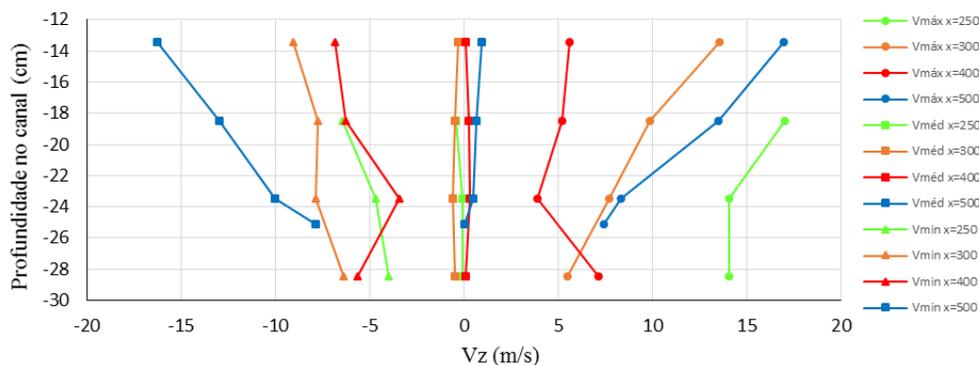


Figura B.17 - Onda T11H2 Velocidade vertical,  $V_z$ , em profundidade.