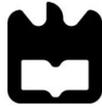




**Gil André Casal  
Ferreira de Sousa**

**Avaliação da concentração de sedimentos na zona  
de rebentação**



**Gil André Casal  
Ferreira de Sousa**

**Avaliação da concentração de sedimentos na zona  
de rebentação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a todos os alunos de mestrado.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim**  
professor associado, Universidade de Aveiro

**Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho**  
investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Este trabalho teve o apoio e a colaboração de várias pessoas e instituições.

Gostaria de expressar um grande apreço pelo apoio incansável do professor Carlos Coelho, que em muito contribuiu na realização desta dissertação.

Ao professor Augusto Silva pela contribuição na criação de um *script* em Matlab, que permitiu definir os parâmetros da onda estudados.

Também à instituição LIM – Laboratório de Engenharia Marítima da Universidade Politécnica da Catalunha que me recebeu da melhor forma, ao director Agustín Sánchez-Arcilla a toda a equipa do laboratório e em especial pela paciência ao Investigador Ivan Cáceres.

A todos os amigos e colegas pelo acompanhamento, ajuda e preocupação.

Por fim à família e namorada que me acompanharam de forma incondicional.

**palavras-chave**

Concentração de sedimentos em suspensão, altura de onda, perfil transversal, zona de rebentação, canal de ondas.

**resumo**

Vários estudos têm sido efectuados no âmbito da análise do transporte sedimentar perpendicular à costa, incluindo estimativas para a sua quantificação. Contudo, a previsão das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) existentes em cada zona do perfil transversal necessária para o cálculo deste transporte, nem sempre reúne consenso. Um dos principais objectivos deste estudo é clarificar a relação entre as alturas de onda e a CSS.

Este estudo baseia-se em resultados do trabalho realizado no Laboratório de Engenharia Marítima da Universidade Politécnica da Catalunha, LIM. Na experiência em causa foi recriado o perfil de uma praia num canal de ondas de grandes dimensões, com 100 m de comprimento, 5 m de altura e três metros de largura.

O estudo efectuado divide-se em duas fases. A primeira é composta pela análise individual de algumas variáveis inerentes à experiência. Numa fase posterior analisa-se a relação entre essas variáveis. Primeiro estuda-se o comportamento das ondas na sua propagação no canal, na tentativa de enquadrar o mesmo com os fenómenos de alteração de ondas conhecidos. Em termos de CSS, faz-se o estudo comparativo de quantidade e localização. Numa fase posterior analisa-se a relação entre CSS, altura de onda e zona de rebentação.

Como principal conclusão salienta-se o facto de existir uma relação complexa entre a altura de onda e a CSS. Assim, esta relação só poderá ser analisada se forem tidos em conta factores como a distância à zona de rebentação, a interferência de ondas sucessivas na CSS, entre outras.

**keywords**

Suspended sediment concentrations, wave height, cross shore profile, breaking zone, wave flume.

**abstract**

Several studies have been developed about cross shore sediment transport. However, predicting suspended sediment concentrations (SSC) among the surf and swash zone, can be very difficult to reach.

The experiment studied was developed in Laboratory of Marine Engineering of Polytechnic University of Catalonia. A beach profile was recreated in a big dimension wave flume, with 100 m length, 5 m depth and 3 m width.

The present study was made in two different phases: first the analysis of the behavior of variables individually and then the relationship between them. The behavior of waves in the flume has been study in order to find some relation with known propagation phenomena.

A comparative study of quantity and location of SSC has been done. Later, the relation between SSC, wave's height and breaking zone is analyzed.

The relationship between wave's height and SSC is complex because it also depends on location of breaking wave's, consecutive waves interference in SSC, among others that should be taken into account.

# Índice

1.	Introdução .....	1
2.	Enquadramento teórico .....	4
2.1	Zona costeira .....	4
2.1.1	Nível energético da praia .....	5
2.1.2	Fenómenos de alteração e deformação da agitação marítima.....	6
2.1.3	Zona de rebentação .....	7
2.1.4	Espraçamento e refluxo .....	10
2.1.5	Mudança morfológica da praia .....	12
2.2	OBS.....	14
2.2.1	Efeitos das características dos sedimentos no OBS-3.....	15
2.2.2	Outros factores de interferência no OBS-3 .....	18
2.3	Calibração do OBS .....	19
3.	Alturas de ondas.....	21
3.1	Método de análise .....	21
3.2	Discussão de resultados .....	23
4.	Concentração de sedimentos em suspensão.....	29
4.1	Método de obtenção e análise de dados.....	29
4.2	Discussão de resultados .....	30
5.	Zona de rebentação .....	34
6.	Relações entre variáveis.....	37
6.1	A CSS em função da altura de onda .....	37
6.2	A CSS em função da altura de onda e do tempo .....	40
6.3	A CSS em função da altura de onda e da zona de rebentação .....	43
7.	Considerações Finais .....	48
7.1	Conclusões .....	48
7.2	Desenvolvimentos futuros .....	50

## Lista de figuras

Figura 1: Canal de ondas CIEM, em Barcelona.....	1
Figura 2: Representação esquemática do perfil da praia e do posicionamento do equipamento de medição.....	3
Figura 3: Componente transversal e longitudinal do vector de transporte de sedimentos.....	4
Figura 4: Exemplos de praias com diferentes níveis energéticos.....	6
Figura 5: Zonas típicas do perfil de uma praia (adaptada de Neves, 2004). ....	8
Figura 6: Tipos de rebentação das ondas (adaptada de Coastal and Hydraulics Laboratory, 2003).....	10
Figura 7: Exemplificação do movimento na zona de espraiamento (adaptada Masselink e Puleo, 2006).....	11
Figura 8: OBS.....	14
Figura 9: Resposta do OBS-3 a diferentes CSS, em medições de sedimentos finos (adaptada de Downing, 2006).....	15
Figura 10: Relação entre o sinal de saída e o aumento de CSS, para sedimentos de vidro tosco de várias dimensões (adaptada de Bunt, 1999). ....	16
Figura 11: Diferentes intensidades difusoras entre partículas com forma diferente (adaptada de Gibbs, 1978). ....	17
Figura 12: Reflectividade de alguns minerais em função dos seus diferentes valores de Munzell (adaptada de Sutherland <i>et al.</i> , 2000). ....	18
Figura 13: Modo empírico de comparação das propriedades ópticas, para uso do OBS (adaptada de Butt <i>et al.</i> , 2002). ....	20
Figura 14: Alturas de onda registadas ao longo do canal de ondas.....	22
Figura 15: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do troço 1. ....	23
Figura 16: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do troço 3. ....	24
Figura 17: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do troço 4a. ...	25
Figura 18: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada wg do troço 4b. ....	25

Figura 19: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada troço. ....	26
Figura 20: Altura (m) das ondas ao longo do canal.....	27
Figura 21: Curva de calibração do OBS.....	29
Figura 22: Concentrações médias por minuto em cada OBS.....	30
Figura 23: Concentrações médias por minuto, para diferentes distâncias à linha de costa. .....	32
Figura 24: Cota medida pelo <i>profiler</i> para o fundo do canal de ondas.....	35
Figura 25: Zona aproximada de rebentação das ondas registadas no WG11.....	36
Figura 26: Comparação de alturas de onda com CSS.....	37
Figura 27: Relação entre altura de onda e CSS, média por minuto.....	38
Figura 28: Altura de onda das ondas individuais e respectivas CSS.....	39
Figura 29: CSS para cada onda individual nos OBS 2, OBS4 e OBS5.....	39
Figura 30: CSS e alturas de onda.....	41
Figura 31: CSS na zona de rebentação.....	43
Figura 32: Aproximação linear de declives em relação a alturas de onda.....	45
Figura 33: Aproximação do declive e altura de onda a uma função exponencial.....	46

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Valores de alturas de onda médias por trecho (m).....	26
Tabela 2: Ondas consideradas na análise isolada.....	27
Tabela 3: Caracterização dos registos dos OBS no canal.....	31
Tabela 4: Caracterização de distâncias de rebentação em função da altura de onda.....	36
Tabela 5: Valores utilizados para a obtenção da equação 6.....	46
Tabela 6: Variação da CSS (g/l) de acordo com a equação 6.....	47

## Lista de símbolos

$a$  - Amplitude da onda ( $a = 0.5 H_0$ )

$d_{50}$  - Diâmetro médio dos sedimentos (mm)

$g$  - Aceleração da gravidade ( $9.807 \text{ m/s}^2$ )

$H_0$  - Altura de onda ao largo (m)

$h_b$  - Profundidade de rebentação (m)

$H_b$  - Altura de onda na zona de rebentação (m)

$L_0$  - Comprimento de onda (m)

$m$  - Declive

$R$  - Raio da partícula esférica (m)

$T$  - Período da onda (s)

$w_s$  - Velocidade de queda da partícula (m/s)

$\alpha$  - Ângulo de inclinação da praia

$\mathcal{E}$  - Parametro de escala de rebentação

$\mu$  - Viscosidade dinâmica do fluido (Pa s)

$\rho_f$  - Massa volúmica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_p$  - Mass volúmica das partículas ( $\text{kg/m}^3$ )

$\sigma$  - Frequência angular ( $\sigma = 2 \pi / T$ )

$\xi_b$  - Número de Irribarren

## 1. Introdução

Este estudo pretende dar um contributo ao trabalho desenvolvido no Laboratório de Engenharia Marítima da Universidade Politécnica da Catalunha, LIM. O laboratório possui um canal de ondas de grandes dimensões, CIEM *flume* (Figura 1), onde foi recriado o perfil de uma praia. Este trabalho decorre no âmbito de uma experiência inserida no projecto SANDS, que é uma actividade de pesquisa conjunta, dentro da EC Framework 6, *Integrated Infranstructor Initiative*, HYDRALAB-III (2008). As três principais instituições envolvidas no projecto são o *GroBe Wellenkanal* (GWK), em Hannover, o CIEM *flume*, em Barcelona e o DELFT *Hydraulics*, em Delft.

A praia recriada no canal foi submetida a vários testes de séries de ondas irregulares. No canal foram instalados vários tipos de equipamento, como: *Resistance Wave Gauges* (WG), *Acoustic Wave Gauges* (AWG), *Acoustic Doppler Velocimeters* (ADV), *Optical Backscatter Sensor* (OBS) e um *Profiler*.



Figura 1: Canal de ondas CIEM, em Barcelona

Os equipamentos referidos têm como função avaliar o comportamento de vários factores e grandezas ao longo da simulação. Neste caso, os ADV foram usados para medir velocidades da corrente em várias direcções. No entanto, a caracterização das velocidades não será parte integrante deste estudo. Através dos sensores WG e AWG caracterizou-se a

variação do nível da superfície livre da água. Por sua vez, os OBS permitem analisar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS). O *profiler* é um dispositivo que caracteriza o perfil da praia e que permite registar a variação da cota de fundos do perfil transversal.

O canal de ondas que serviu de base à experiência tem 100 metros de comprimento, 5 metros de altura e 3 metros de largura. As unidades de grande escala permitem minimizar problemas usuais relativos aos efeitos de escala e assim conseguem traduzir melhor os regimes de transporte sedimentar em suspensão. Contudo, também são os que requerem equipamento mais avançado e que experienciam mais limitações sobre a colocação dos equipamentos.

Nas análises que se efectuaram associa-se o comprimento do canal com o eixo x, medido desde a zona do batedor e a altura da coluna de água com o eixo y, medida desde o fundo do perfil.

A geometria inicial do perfil da praia apresentava quatro áreas diferentes, divididas do troço 1 ao troço 4, como pode ser observado na Figura 2. De acordo com o representado na Figura 2, após uma zona plana inicial, o perfil apresenta uma primeira zona inclinada, seguida de uma zona plana e por fim uma outra zona inclinada, onde acontece a rebentação e o espraçamento. A inclinação teórica do perfil a executar nas duas zonas inclinadas foi de 1/15, contudo, nas análises efectuadas no capítulo 5 adopta-se o valor proveniente de medições efectuadas pelo *profiler*, usado para obter as cotas reais do perfil executado.

O teste realizado tem uma duração aproximada de 30 minutos. Os dados analisados dirão respeito a uma série de ondas irregular (aproximadamente 500), a série de ondas foi induzida tendo em conta uma altura de onda significativa ( $H_s$ ) de 0,53 m, quando o canal se encontra em repouso a altura de água é de 2,47 m. A areia usada nesta experiência tem uma dimensão mediana ( $d_{50}$ ) de 246  $\mu\text{m}$ . Esta areia tem pequena quantidade de elementos finos e grossos, a maioria dos seus grãos têm dimensões próximas do seu  $d_{50}$ .

Entre os objectivos deste trabalho estão incluídos os seguintes tópicos:

- Estudo do funcionamento do OBS desde a sua calibração até ao seu comportamento na zona de espraçamento e rebentação;
- Análise e comparação da CSS nos vários pontos de recolha de dados;
- Análise do comportamento das ondas ao longo do canal, incluindo a sua zona de rebentação;
- Estudo de variáveis que influenciam a CSS para as condições de teste;

- Desenvolvimento de um método de previsão de CSS.

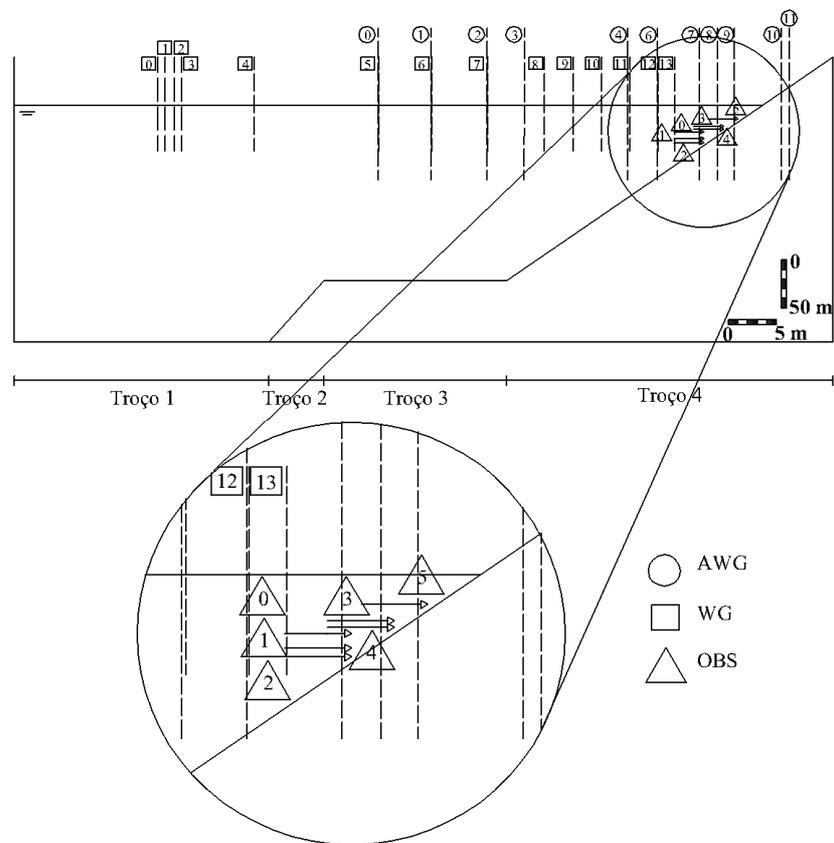


Figura 2: Representação esquemática do perfil da praia e do posicionamento do equipamento de medição.

## 2. Enquadramento teórico

### 2.1 Zona costeira

O transporte de sedimentos na zona costeira pode ser definido através de um vector que representa as componentes de transporte ao longo da costa e perpendicular a esta (Figura 3). Dependendo da zona costeira em estudo, o transporte sedimentar pode ser dominado por cada uma destas duas componentes sendo o seu estudo em geral, realizado de forma separada (Dean *et al.*, 2006).

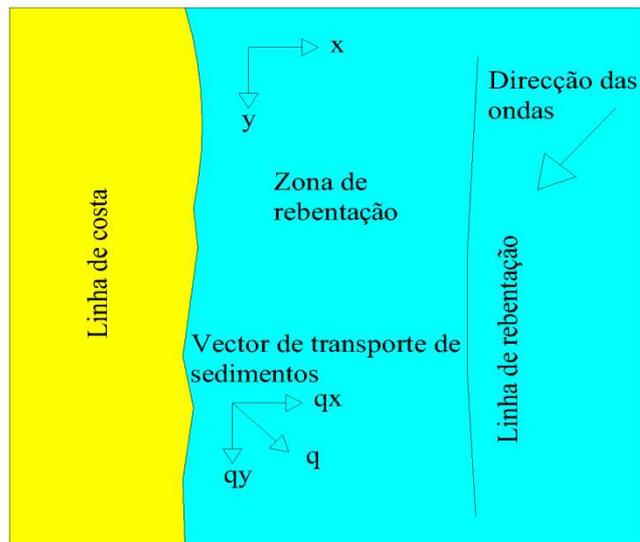


Figura 3: Componente transversal e longitudinal do vector de transporte de sedimentos

O estudo do transporte sedimentar ao longo da costa começou há aproximadamente cinco décadas e está entre os processos mais importantes de transformação da morfologia das praias. O factor que mais determina o transporte de sedimentos ao longo da costa é a rebentação oblíqua das ondas e as correntes que estas geram, que se podem propagar por vezes em todo o comprimento da praia. Este transporte pode ser interrompido pela construção de esporões, quebramares, ou outras estruturas costeiras. Os sedimentos em transporte também podem ser capturados pela existência de desfiladeiros marítimos. No caso dos esporões, o que acontece é a deposição de sedimentos a montante (barlamar) e a erosão a jusante (sotamar) (Rosati *et al.*, 2002). Perante isto, é facilmente perceptível a

importância do estudo do transporte sedimentar ao longo da costa, para poder existir um planeamento marítimo mais consciente e eficaz.

O estudo do transporte sedimentar perpendicular à costa é relativamente recente (aproximadamente uma década). O transporte sedimentar perpendicular à costa é relevante para um grande número de problemas costeiros, nomeadamente a resposta das dunas às tempestades, o desenvolvimento das praias após a colocação artificial de areias, o conhecimento da evolução de perfis transversais aquando da colocação de areias perto da costa, a resposta da linha de costa à subida do nível da superfície do mar, as mudanças sazonais da posição da linha de costa, que podem chegar a ser de 30 ou 40 m e a limpeza imediata de areias junto às estruturas paralelas à margem, entre outras (Dean *et al.*, 2006).

O presente estudo tenta representar um contributo na compreensão do transporte sedimentar, abordando a componente do transporte transversal à praia na zona de rebentação e espraçamento da onda.

### 2.1.1 Nível energético da praia

No que refere ao nível energético, as praias poderão ser classificadas como reflectivas, dissipativas e intermédias. Normalmente as praias reflectivas (Figura 4a) têm areia grossa, declives altos e a rebentação das ondas ocorre junto à praia ou nem chega a ocorrer. As praias dissipativas (Figura 4b) serão praias rasas de areia fina, de baixa declividade e a sua zona de rebentação é bastante extensa. As praias intermédias serão uma mistura das duas anteriores (Loureiro, 2006). O nível energético da praia depende da altura das ondas incidentes e pode ser estimado através de diversos parâmetros. Como exemplo, na equação 1 apresenta-se o parâmetro  $\varepsilon$ , de escala de rebentação (*surf scaling*), através da qual se pode fazer uma estimativa sobre o tipo de comportamento da praia (Guza e Inman, 1975).

$$\varepsilon = \frac{a \cdot \sigma^2}{g \cdot \tan \alpha^2} \quad (1)$$

Segundo Wright e Short (1984), através de  $\varepsilon$  pode-se diferenciar as praias em reflectivas ( $\varepsilon < 2.5$ ) e dissipativas ( $\varepsilon > 20$ ).



a) Praia reflectiva em Belinho, Portugal (adaptada de Loureiro, 2006).



b) Praia dissipativa, em Grobust Sands, Orkney Islands.

Figura 4: Exemplos de praias com diferentes níveis energéticos

### 2.1.2 Fenómenos de alteração e deformação da agitação marítima

A propagação das ondas em águas pouco profundas pode ser fortemente influenciada pela batimetria e pelas correntes. Assim a inclinação do fundo, a sua homogeneidade (fundo ondulado, fundo com bancos de areia, entre outros) podem causar grandes mudanças na altura de onda e na sua direcção de propagação.

Os fenómenos de alteração da agitação em direcção à costa podem ser resumidos como: o empolamento, a refacção, a difracção, a reflexão, a rebentação e o espraiamento/refluxo. Será dada uma breve descrição de todos estes fenómenos, mas pela sua importância para este estudo, os últimos dois serão abordados mais a frente, com um maior detalhe.

#### **Empolamento**

Na sua aproximação à costa, a onda sofre uma interacção com o fundo. No caso do empolamento, a interacção é caracterizada pela diminuição da velocidade de propagação da onda. Devido à redução da velocidade, verifica-se uma diminuição do comprimento de onda e um aumento da sua altura. O efeito deste fenómeno acentua-se gradualmente com a diminuição da profundidade, até que a altura de onda é tal, que se dá a instabilidade da forma da onda e a sua rebentação.

## **Refracção**

O fenómeno designado por refracção é caracterizado pela transformação de algumas características da onda, como a altura e a direcção de propagação e ocorre quando a linha de crista das ondas forma um determinado ângulo com as curvas de nível do fundo do mar (batimétricas). O principal efeito desta transformação será o alinhamento da direcção de propagação das ondas com a perpendicular às linhas batimétricas. Nos estudos efectuados no canal não se espera verificar este fenómeno devido a direcção de propagação das ondas ser perpendicular às linhas batimétricas do perfil da praia.

## **Difracção**

A difracção de uma onda acontece quando a sua propagação é interrompida por um obstáculo e caracteriza-se pela transferência lateral de energia ao longo da crista. Tal como com a refracção, nas experiências realizadas não se espera observar este fenómeno.

## **Reflexão**

A reflexão de ondas em meio fluido tem comportamento semelhante à reflexão existente noutros meios e por isso, as leis gerais de comportamento da reflexão existentes, também serão aplicáveis para o caso da reflexão de ondas. Então, quando esta existe, o ângulo de reflexão deverá ser igual ao ângulo de incidência das ondas (Gomes, 1995).

Para este caso de estudo poderá não ser verificado este fenómeno. Contudo, a onda pode reflectir no extremo do canal onde está o perfil da praia e também poderá acontecer algum desvio da direcção da onda, que pelo contacto com as paredes do canal ocasionará reflexão. Então, este fenómeno não deverá ser desprezado à priori, já que uma onda total ou parcialmente reflectida pode interferir com as ondas incidentes.

### **2.1.3 Zona de rebentação**

A zona de rebentação (*surf zone*) está inserida na zona de contacto entre o mar e a costa. A esta zona, em conjunto com a zona de espraiamento (*swash zone*), dá-se o nome de praia

baixa (*foreshore*). A zona anterior a esta é designada por largo (*offshore*) e à zona posterior à praia baixa dá-se o nome de praia alta (*backshore*) (Figura 5).

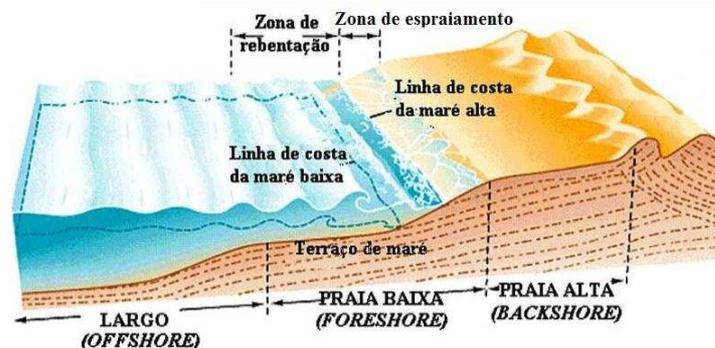


Figura 5: Zonas típicas do perfil de uma praia (adaptada de Neves, 2004).

A rebentação das ondas junto à costa ocorre devido à redução da profundidade. Segundo a teoria linear das ondas, a sua propagação em direcção à costa é caracterizada por uma diminuição de  $H$  até um mínimo ( $\approx 0.9H_0$ ), para depois dar origem ao crescimento contínuo de  $H$ , por efeito do empolamento.

Existem vários critérios que tentam caracterizar o início da rebentação. Entre eles os mais correntes estabelecem que o início da rebentação ocorrerá quando (Gomes, 1995):

- a zona frontal da crista assume uma posição vertical;
- as velocidades das partículas na crista igualam a celeridade da onda;
- a pressão livre calculada pela equação de Bernoulli é incompatível com a pressão atmosférica;
- a aceleração das partículas na zona da crista tende a separar as mesmas da massa fluida;
- a configuração da superfície livre aproxima-se de uma cicloide.

Segundo Arcilla e Lemos (1990) existem dois grupos principais de critérios de previsão da zona de rotura:

- critérios que expressam as condições de rotura em função dos parâmetros locais das ondas e das características batimétricas do local;
- critérios que especificam a altura de onda de rotura em função das características batimétricas e dos parâmetros da onda ao largo.

Existem vários tipos de rebentação de ondas. Na rebentação progressiva (*spilling*), a onda rebenta de forma contínua e a crista “rola” sobre a cava precedente (Figura 6a). Este tipo de rebentação ocorre normalmente em praias de declive ligeiro ou dissipativas.

A rebentação mergulhante (*plunging breaker*) ocorre de forma súbita, quando a crista se dobra em voluta e cai para a frente (Figura 6b). Os fenómenos de turbulência que provoca são muitos intensos, assim como as suas solicitações dinâmicas (Gomes, 1995).

A rebentação oscilatória (*collapsing or surging breaker*) ocorre muito próximo da costa, em praias de declive muito acentuado. Neste tipo de rebentação existe um adiantamento da zona inferior que leva ao colapso da crista (*collapsing breaker*, Figura 6d). Existem situações onde o colapso referido não é notório existindo apenas espraiamento (*surging breaker*, Figura 6c). Quase toda a energia deste tipo de ondas é reflectida.

O tipo de rebentação também pode ser previsto pela utilização de algumas fórmulas, que permitem caracterizar alguns parâmetros. Como exemplo, refere-se o número de Iribarren,  $\xi_b$  (Liu, 2001):

$$\xi_b = \frac{1}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}} \cot \alpha} \quad (2)$$

De acordo com a fórmula que relaciona a altura de onda ( $H_b$ ), com o comprimento de onda ( $L_0$ ) e o ângulo de inclinação da praia ( $\alpha$ ), pode-se definir a rebentação como:

$\xi_b < 0.4$  - rebentação progressiva;

$0.4 < \xi_b < 2.0$  - rebentação mergulhante;

$\xi_b > 2.0$  - rebentação oscilatória.

Pode-se relacionar o tipo de rebentação com o tipo energético de praia, mas não será uma relação sempre verdadeira, porque alguns dos parâmetros existentes nas fórmulas anteriores podem sobrepor-se de maneira incomum aos outros (em tempestades por exemplo). De qualquer modo, as praias reflectivas costumam estar associadas a rebentações oscilatórias, as praias dissipativas tendem a ter rebentação do tipo progressivo

e por fim as praias intermédias estarão mais associadas à rebentação mergulhante (Osborne e Simpson, 2005).



a) Rebentação progressiva



b) Rebentação mergulhante



c) Rebentação oscilatória (*surging breaker*)



d) Rebentação oscilatória (*collapsing breaker*)

Figura 6: Tipos de rebentação das ondas (adaptada de Coastal Engineering Manual, (2003).

#### 2.1.4 Espraimento e refluxo

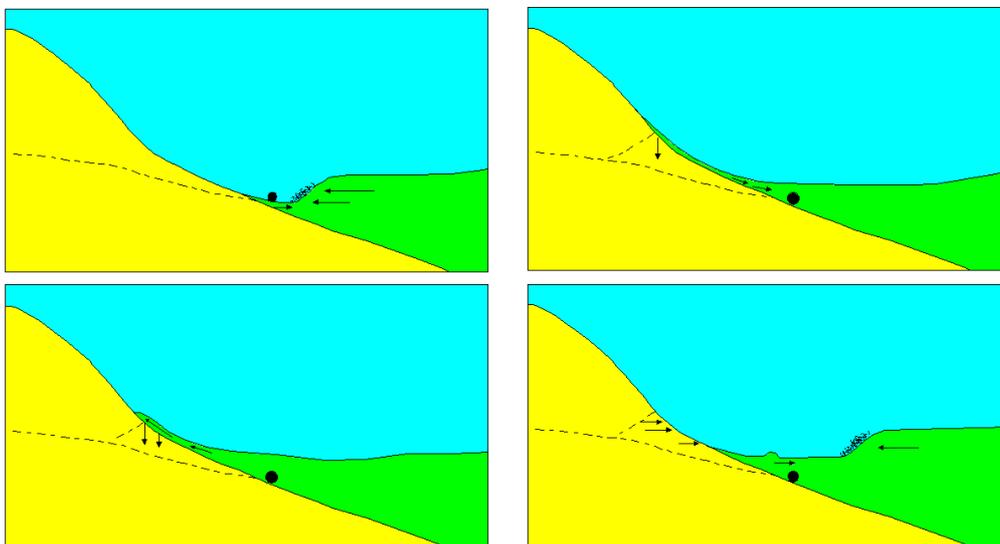
A zona de espraimento é a zona de praia que está intermitentemente coberta por água. Ao movimento efectuado pela água nesta zona dá-se o nome de espraimento (movimento no sentido *backshore*) e refluxo (movimento no sentido *offshore*). Esta zona é caracterizada por correntes inconstantes, grandes níveis de turbulência (principalmente no movimento ascendente), grandes quantidades de transporte sedimentar e por mudanças morfológicas rápidas (Puleo *et al.*, 2000). Estas condições são um desafio para qualquer tipo de medição (velocidades de corrente, CSS, entre outros), mesmo para os equipamentos de medição mais avançados.

Obter nestas condições uma taxa de CSS instantâneo, poderá ser um maior desafio ainda, devido às grandes quantidades de sedimentos que poderão estar envolvidas e também às várias formas de transporte sedimentar que estão associadas a esta zona, como o transporte

por arrastamento e o transporte em suspensão. Por outro lado, a zona de espraiamento é muito mais acessível que outras zonas inseridas no perfil de uma praia (exemplo da zona de rebentação). Os instrumentos podem ser colocados com mais facilidade na zona de espraiamento e também poderão ser feitas medições morfológicas mais facilmente.

O estudo do transporte sedimentar na zona de espraiamento é muito importante, porque é nesta zona que predomina a troca de sedimentos entre a zona marítima e a terrestre. Este processo de erosão e sedimentação provocado pelo transporte sedimentar ao longo da costa é proporcionado por vários agentes além da água.

O movimento de espraiamento (Figura 7a) é tipicamente originado pelo colapso da vaga nos sedimentos, e pode colidir com o movimento de refluxo (Figura 7b). A colisão entre uma vaga e o movimento de refluxo pode provocar uma onda quase estacionária (quando duas ondas idênticas se encontram, movendo-se em sentidos opostos) ou salto hidráulico (zona de transição entre dois fluxos com velocidade e altura diferentes), este fenómeno é um caso de reflexão na zona de espraiamento. As colisões entre espraiamento e refluxo também podem provocar vórtices de refluxo que são mecanismos de suspensão eficientes e podem ser responsáveis pela formação de “degraus” na praia.



a) Espraiamento

b) Refluxo

Figura 7: Exemplificação do movimento na zona de espraiamento (adaptada Masselink e Puleo, 2006).

Na mesma zona, a cotas diferentes podem existir correntes em sentidos opostos que geram transporte sedimentar em direcções opostas dependendo da altura da análise (Masselink e Puleo, 2006). Este facto pode ser importante para perceber os resultados obtidos a partir dos sensores OBS.

Para finalizar a breve exposição do movimento na zona de espraiamento refere-se que a duração do espraiamento é menor que a do refluxo.

### **2.1.5 Mudança morfológica da praia**

#### **Na zona de espraiamento**

Na fase inicial do espraiamento, a velocidade da corrente e a concentração de sedimentos em suspensão têm valores máximos. Nesta fase os sedimentos estarão a uma certa altura do fundo, o que sugere uma predominância de transporte sedimentar em suspensão. Conforme o movimento da água se processa sobre a areia, existe uma grande diminuição da sua energia cinética, o que faz com que as partículas em suspensão tendam a assentar. O refluxo é caracterizado por um aumento progressivo da velocidade da água, sendo que o mesmo acontecerá com a concentração de sedimentos em suspensão. A corrente durante esta fase é menos turbulenta, e a forma principal de transporte de sedimentos esperada é a *sheet flow*. Este é um caso especial do transporte por arrastamento, onde o esforço tangencial é muito alto e a superfície do fundo não se encontra definida (Masselink e Puleo, 2006).

Se a inclinação da praia for menor que o gradiente de equilíbrio, o movimento de espraiamento transportará mais sedimentos que o refluxo, provocando uma situação de deposição de areias na costa. Quando acontece o contrário, os sedimentos são transportados para o largo fazendo com que a praia se torne mais plana. O gradiente de equilíbrio representa a relação entre a assimetria dos movimentos na zona de espraiamento e a componente da gravidade relativa à inclinação do perfil (Masselink e Puleo, 2006).

As mudanças máximas de altura do fundo deverão acontecer a meio da parte inferior da zona de espraiamento e nesta zona pode ser desenvolvida uma forma côncava em condições de erosão e convexa em condições opostas. É de esperar que as duas situações referidas tenham a forma oposta na parte superior da zona de espraiamento (Masselink e Puleo, 2006).

### **Entre a zona de espraiamento e a zona de rebentação**

A morfologia da zona de espraiamento está interligada com a morfologia da zona de rebentação. Por exemplo, aquando da existência de erosão na zona de espraiamento os sedimentos são transportados para o largo, podendo então ser formada uma barra próxima desta. Esta situação fará com que a maior dissipação da energia da onda (correspondente à fase inicial do espraiamento), passe da parte inferior da zona de espraiamento para a zona de rebentação. Como consequência, a energia do movimento na zona de espraiamento já será menor. O transporte de sedimentos para a costa, por sua vez, provoca o aumento da profundidade na zona de rebentação. Perante isto a rebentação pode deslocar-se para a costa expondo assim a praia a uma acção de espraiamento mais energética.

## 2.2 OBS

O OBS é um aparelho utilizado para medir a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e também a turbidez, em meio líquido (Figura 8). Neste documento apenas se foca a primeira vertente, correspondente à medição de CSS.



Figura 8: OBS.

De modo simples, o funcionamento do OBS pode ser explicado da seguinte maneira: uma amostra de água é iluminada por uma fonte de luz, então fotodetectores convertem a luz retro-difundida pela amostra num sinal eléctrico. No caso do OBS-3, que é o modelo de OBS usado neste estudo, a luz emitida são raios Infra-Vermelhos (IV). O sinal do OBS representa mudanças relativas na luz retro-difundida pelas amostras e o seu significado só será perceptível aquando da realização da calibração do aparelho. A calibração permite relacionar o sinal recebido pelo aparelho, expresso em Volts, com a CSS, expressa em mg/l ou g/l.

Segundo Downing (2006), existem vários factores que podem alterar a sensibilidade do sensor, tais como as características difusoras do material, a eficiência reflectiva, a matéria dissolvida e outras condicionantes do meio (vegetação, obstrução do sensor, entre outras).

O aumento de CSS é naturalmente acompanhado por um acréscimo proporcional do sinal registado pelo sensor, contudo certas propriedades dos sedimentos podem condicionar esta

evolução. No caso de medição de concentrações de partículas finas como a argila, após um certo limite de CSS o principal factor que afecta os dados recolhidos é a atenuação, conforme exemplificado pelo gráfico da Figura 9. O coeficiente de atenuação expressa o efeito combinado entre a difusão e a absorção, e representa a proporção de energia perdida por um raio de luz, por uma unidade de distância (Downing, 2006). A luz retro-difundida pelos sedimentos é captada pelo sensor com ângulos entre 140° e 160°, sendo este o seu plano de acção. O ângulo mencionado diz respeito à relação entre o raio de luz incidente e o raio reflectido.

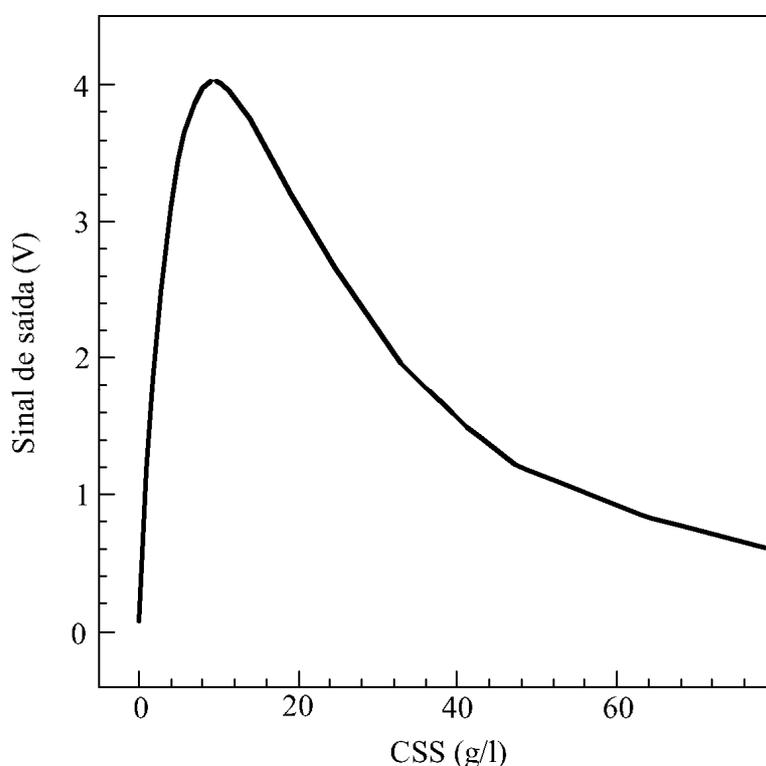


Figura 9: Resposta do OBS-3 a diferentes CSS, em medições de sedimentos finos (adaptada de Downing, 2006).

### 2.2.1 Efeitos das características dos sedimentos no OBS-3

Entre as características dos sedimentos que afectam os resultados do OBS estão o tamanho, a forma, a reflectividade e a floculação (argilas). A hierarquia entre estas foi descrita por ordem decrescente de importância por Downing (2006) da seguinte forma: CSS= O (1000),

tamanho = O (100), forma = O (10), reflectividade = O (10) e floculação = O (2).

Imaginando O como um valor qualquer e multiplicando este pelo valor entre parêntesis pode-se ter a noção do grau de importância que cada factor tem. Por dizer apenas respeito a partículas finas, como as argilas, a floculação não será abordada na descrição feita a seguir, de cada uma das características mencionadas.

### Tamanho das partículas

Bunt *et al.* (1999) descrevem uma experiência realizada anteriormente por Conner e De Visser (1992), na qual foi utilizado vidro fosco de tamanhos diferentes e os resultados demonstram que para a mesma CSS, mas com partículas de tamanhos diferentes, o sinal de saída (*output*) obtido pode variar bastante, conforme se pode analisar na Figura 10. Ou seja, o sensor parece ser mais sensível a partículas mais pequenas.

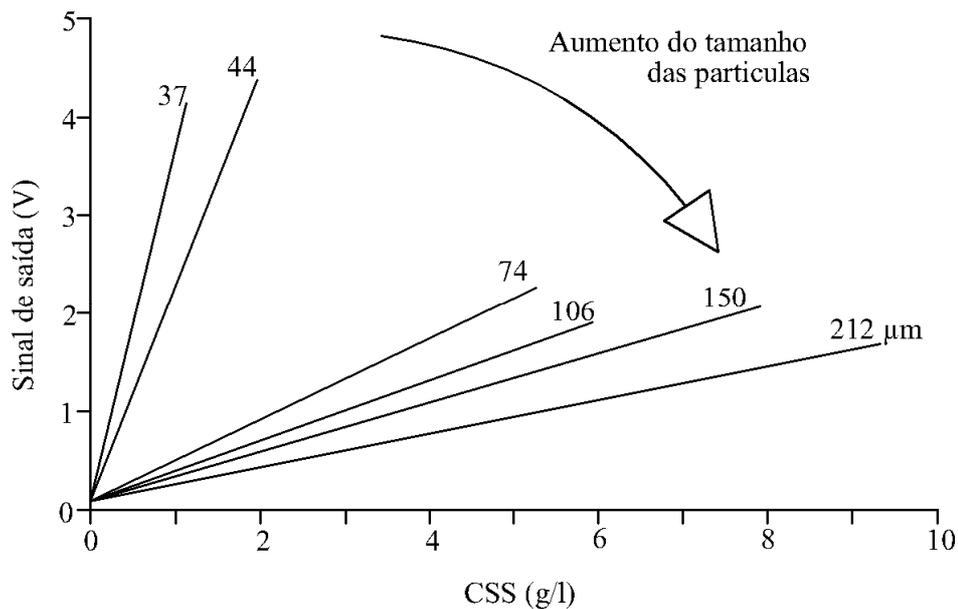


Figura 10: Relação entre o sinal de saída e o aumento de CSS, para sedimentos de vidro fosco de várias dimensões (adaptada de Bunt *et al.*, 1999).

## Forma das partículas

A forma das partículas é descrita por alguns autores como Downing (2006), Bunt *et al.*, (1999) e Gibbs (1978), como uma das características dos sedimentos que podem afectar o sinal *output* do OBS. É referido que os sedimentos com forma mais alongada, tem uma maior propensão para retro-difundir raios de luz, do que outros, com forma mais esférica. Gibbs (1978) demonstrou isto mesmo ao comparar o comportamento difusor de partículas com formas distintas, tendo estas aproximadamente o mesmo tamanho (Figura 11).

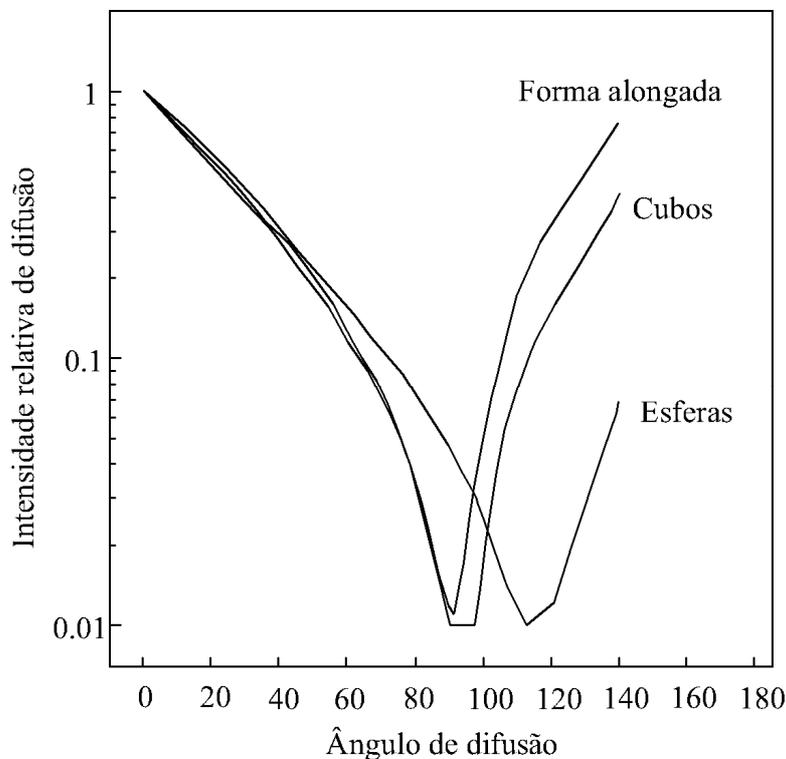


Figura 11: Diferentes intensidades difusoras entre partículas com forma diferente (adaptada de Gibbs, 1978).

## Reflectividade

Sutherland *et al.* (2000) referem que as partículas mais escuras reflectem muito menos os raios IV que outras mais claras, conforme apresentado na Figura 12. Como exemplo poderá dizer-se que partículas de magnetite em suspensão reflectem apenas 10% do que é

reflectido por partículas de calcite com a mesma forma, tamanho e concentração. A notação de Munsell, representada na Figura 12, descreve propriedades dos sedimentos através de três parâmetros: cor, chroma (cor relacionada com a saturação) e grau de intensidade luminosa, sendo este último o factor decisivo para a reflectividade segundo Sutherland *et al.* (2000).

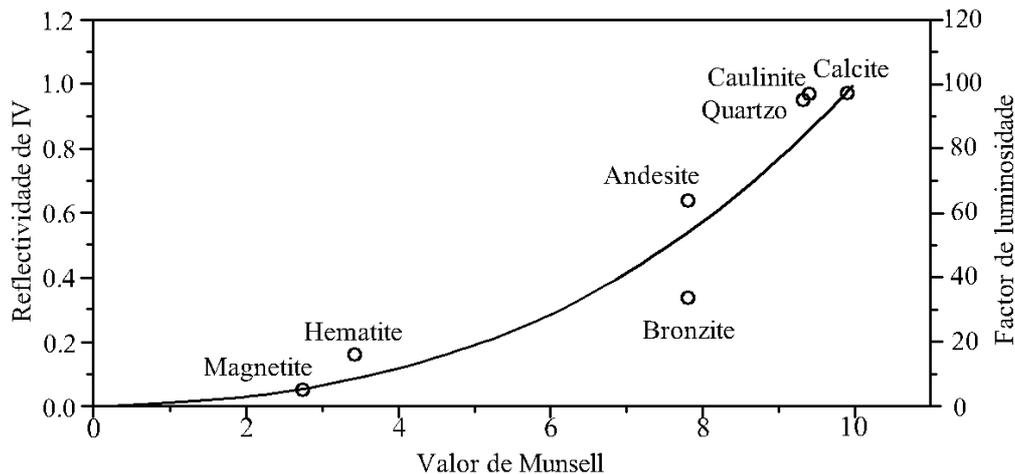


Figura 12: Reflectividade de alguns minerais em função dos seus diferentes valores de Munsell (adaptada de Sutherland *et al.*, 2000).

## 2.2.2 Outros factores de interferência no OBS-3

### Bolhas de ar

Os aparelhos OBS são muitas vezes utilizados para medir a CSS em zonas onde existe formação constante de bolhas de ar, como é o caso da zona de rebentação e espraiamento das ondas. O efeito destas bolhas é referido por Puleo *et al.* (2006), como bastante significativo nos resultados obtidos a partir do aparelho OBS. Eles estimam que o aumento da voltagem devido a bolhas de ar, na presença de areia ou argilas, possa ser de 25%.

### Partículas biológicas ou outras

Todo o tipo de partículas ou seres que possam existir no meio são susceptíveis de degradar a qualidade dos dados recolhidos. Dependendo das qualidades reflectoras destas, os dados

recolhidos de CSS podem ser ampliados ou reduzidos. Muitas vezes algumas matérias podem obstruir completamente o sensor (Downing, 2006).

### 2.3 Calibração do OBS

A maior parte dos fenómenos que afectam as medições do sensor OBS são ultrapassados quando se efectua a calibração do aparelho, tentando reproduzir ao máximo as condições reais da sua utilização.

A calibração do OBS é necessária para se poder fazer a ligação entre o sinal eléctrico recolhido e a concentração de sedimentos em suspensão pretendida. Resumem-se dois métodos possíveis para a realização desta calibração. O primeiro será o aconselhado pelo livro de instruções do aparelho OBS-3 (DAIC, 1991) e o segundo foi estudado por Butt *et al.* (2002) e é também o que foi utilizado para calibrar os aparelhos usados neste estudo. Segundo DAIC (1991), a calibração do OBS-3 pode ser resumida da seguinte maneira: o sensor deve ser emerso em água destilada, num recipiente de plástico e na presença de luz fluorescente, este recipiente não deve conter bolhas de ar; em seguida, devem ser acrescentados os sedimentos escalonadamente e com incrementos iguais (as medições devem ser feitas com os sedimentos totalmente em suspensão); deve-se acrescentar sedimentos até ao volume esperado aquando da utilização do OBS. As voltagens recolhidas juntamente com as concentrações podem ser transformadas numa curva polinomial, que será a curva de calibração.

Na tentativa de ultrapassar algumas dificuldades do método referido anteriormente, como a dificuldade de manter a areia em suspensão em quantidades superiores a 30 g/l (Butt *et al.* 2002), a água foi substituída por um líquido com maior viscosidade, o glicerol. Esta troca de líquidos faz com que velocidade de queda das partículas de areia diminua, podendo obter assim uma mistura mais estável e durante mais tempo.

A velocidade de queda das partículas esféricas num meio líquido pode ser descrita pela lei de Stokes, representada pela seguinte expressão:

$$w_s = \frac{2(\rho_p - \rho_f)}{9\mu} g R^2 \quad (3)$$

Como se pode ver pela fórmula anterior, a velocidade de queda das partículas ( $w_s$ ) é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do líquido. Com este método Butt *et al.* (2002) referem que podem ser alcançadas CSS superiores a 200 g/l, que será um valor mais próximo do esperado, por exemplo na zona de espraimento. Os autores do método referem ainda que as diferenças óbvias das características ópticas dos dois líquidos podem ser conhecidas empiricamente, comparando a resposta do OBS nos dois meios.

A relação dos sinais *output* do OBS nestes dois meios deverá ser obtida através da resposta do aparelho quando um objecto reflector é posto na sua zona de acção, estando submerso em cada um dos líquidos (Figura 13). Desta fase serão obtidas duas curvas que representam a resposta do sensor a diferentes distâncias do objecto reflector. Estas curvas são aproximadas a duas funções exponenciais, através da relação de voltagem entre as duas e pode-se transformar então os valores medidos em glicerol para o seu correspondente em água. A cada curva de calibração obtida terá que ser aplicada a expressão que relaciona os dois líquidos.

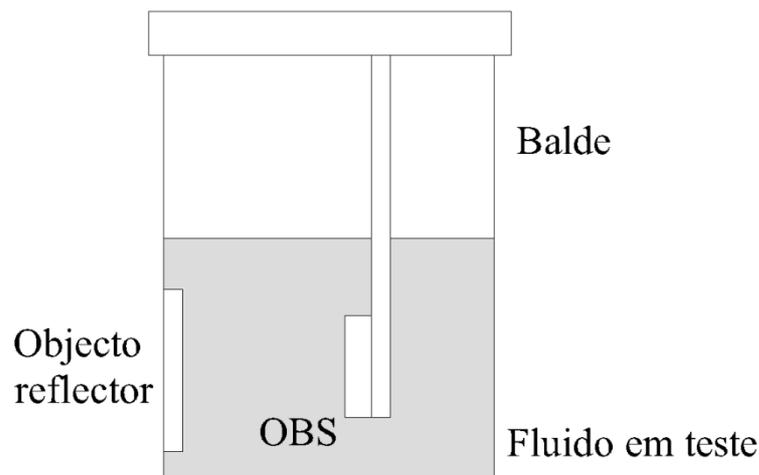


Figura 13: Modo empírico de comparação das propriedades ópticas, para uso do OBS (adaptada de Butt *et al.*, 2002).

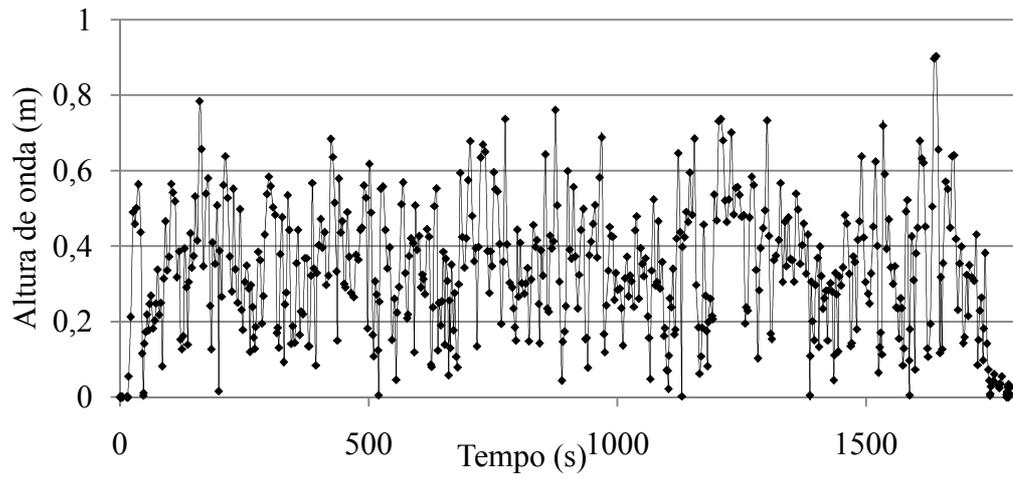
### **3. Alturas de ondas**

#### **3.1 Método de análise**

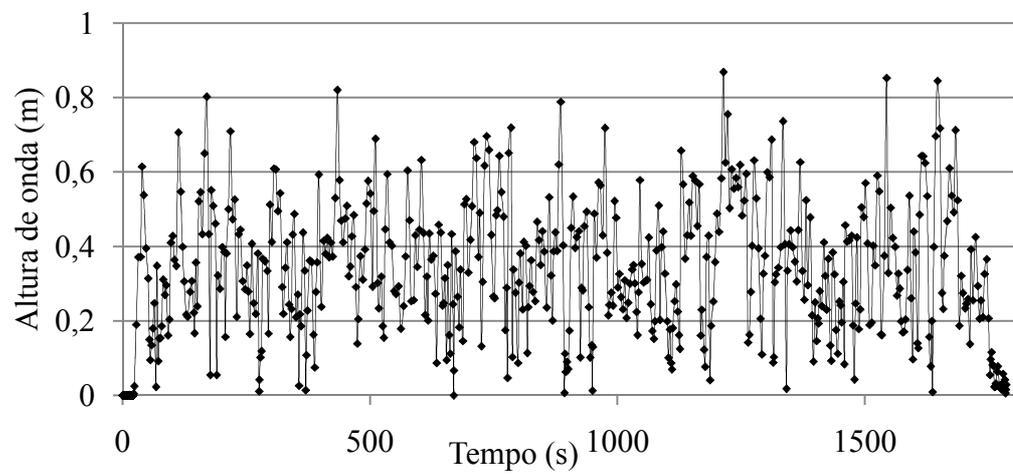
As alturas de onda usadas neste estudo foram obtidas em função dos aparelhos de medição da superfície livre da água, distribuídos ao longo do canal, sendo estes aparelhos de dois tipos (acústicos e resistivos). Ambos mediram a altura da superfície livre da água do canal com uma frequência de 40 Hz. Então, a partir de um *script* Matlab encontraram-se alturas de onda em cada aparelho, medindo a distância entre picos máximos e mínimos consecutivos. A cada altura de onda encontrada fez-se corresponder o instante de tempo igual ao tempo médio entre o pico máximo e mínimo.

Após uma comparação preliminar dos valores medidos por os dois tipos de aparelhos, decidiu-se usar apenas o valores provenientes dos sensores resistivos (WG), já que existe uma diferença assinalável entre os dois e as localizações dos sensores resistivos serem mais convenientes para o estudo. Considera-se que as localizações dos WG são mais apropriadas porque reflectem a propagação de onda desde o início do canal até pouco depois da zona de rebentação. Os AWG não têm uma abrangência espacial tão significativa e a maior parte destes estão localizados depois da zona de rebentação onde se deixa de ter a percepção das alturas de onda. É de referir a ligação entre os troços do canal já definidos e a posição dos WG. O troço 1, na primeira zona plana, abrange os WG de 0 a 4, o troço 3 na segunda zona plana contem os WG de 5 a 7 e por fim o troço 4, correspondente à última zona inclinada, contem os WG de 8 a 11. Por apresentarem alturas de onda bastante distintas os WG do troço 4 condicionaram a sua divisão em troço 4a e troço 4b (ver Figura 2). Os gráficos de alturas de onda apresentados na Figura 14 apresentam os valores em três WG distintos, localizados próximo do 1º declive (no final do troço 1), no final da zona plana do troço 3 e a meio do troço 4.

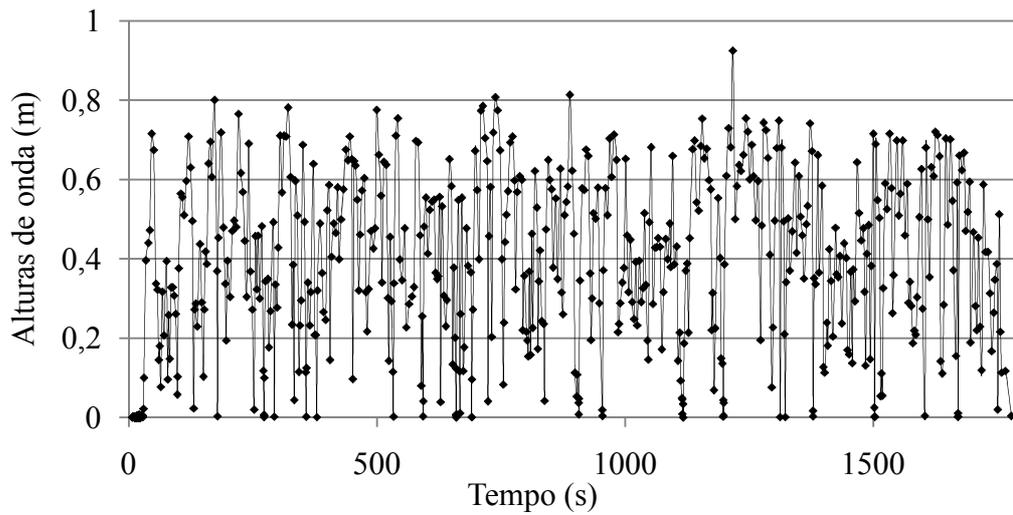
Como é notório pela Figura 14, a comparação gráfica da evolução das alturas de onda ao longo do tempo e nas diversas posições do canal é muito difícil. Devido à quantidade de ondas medida por cada aparelho ser elevada (cerca de quinhentas), decidiu-se contabilizar as ondas medidas por cada aparelho em cada minuto e fazer a média de alturas das mesmas. Desta forma espera-se poder comparar valores de alturas entre aparelhos mais facilmente.



a) WG4, no trecho 1.



b) WG7, no trecho 3.



c) WG11, no trecho 4.

Figura 14: Alturas de onda registadas ao longo do canal de ondas.

### 3.2 Discussão de resultados

Efectuando uma análise troço a troço, pode-se afirmar que as alturas de onda medidas no troço 1 apresentam alguma homogeneidade, como se pode analisar na Figura 15. Esta figura representa a média das alturas de onda registadas em cada minuto, em cada um dos cinco WG localizados no troço 1 do canal.

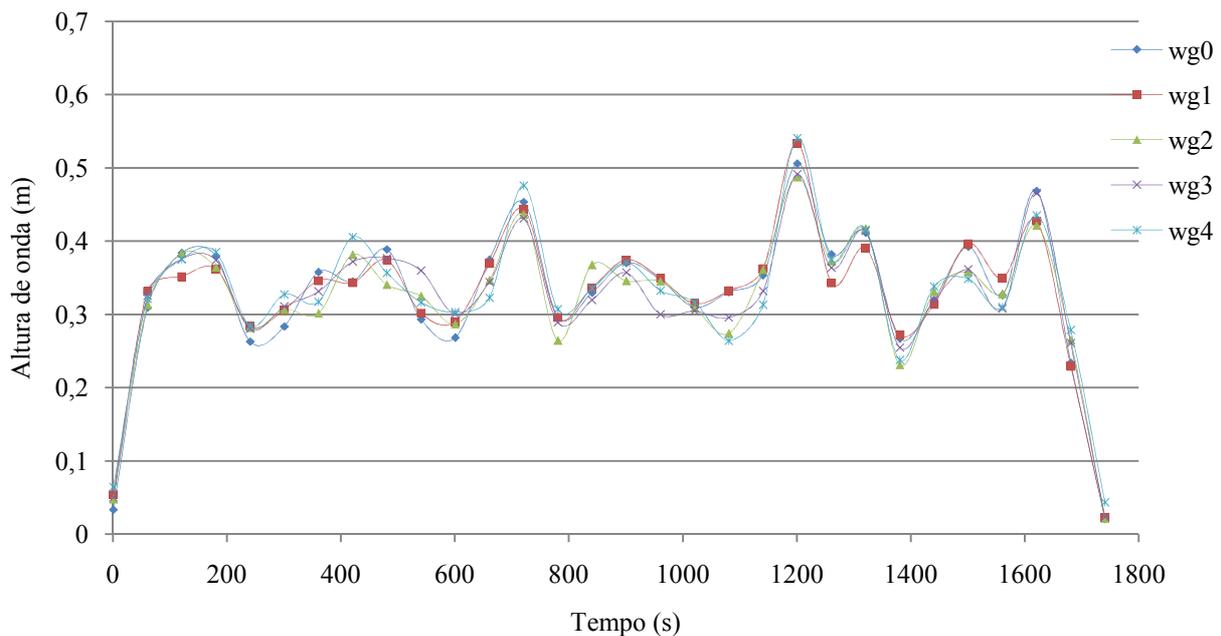


Figura 15: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do troço 1.

No troço 3 (Figura 16) a relação de alturas de onda entre os sensores aparenta ser menos homogénea do que no troço 1. De acordo com a Figura 2, existe uma proximidade do WG7 ao troço 4ª, talvez por isso os valores de WG5 e WG6 parecem ser mais próximos que os do WG7. A turbulência existente no troço 4 é superior à do troço 3, já que nesta se dá a rebentação, o espriamento e o refluxo, ou seja, este facto poderá ser suficiente para justificar a diferença entre os resultados no WG7, que se encontra muito próximo desta zona, e os resultados do WG 5 e WG6.

Como já foi referido, o último troço foi dividido em dois. A razão desta divisão deve-se à diferença de alturas de onda que se verifica entre estas duas partes, que poderá ter proveniência da passagem da zona de rebentação das ondas.

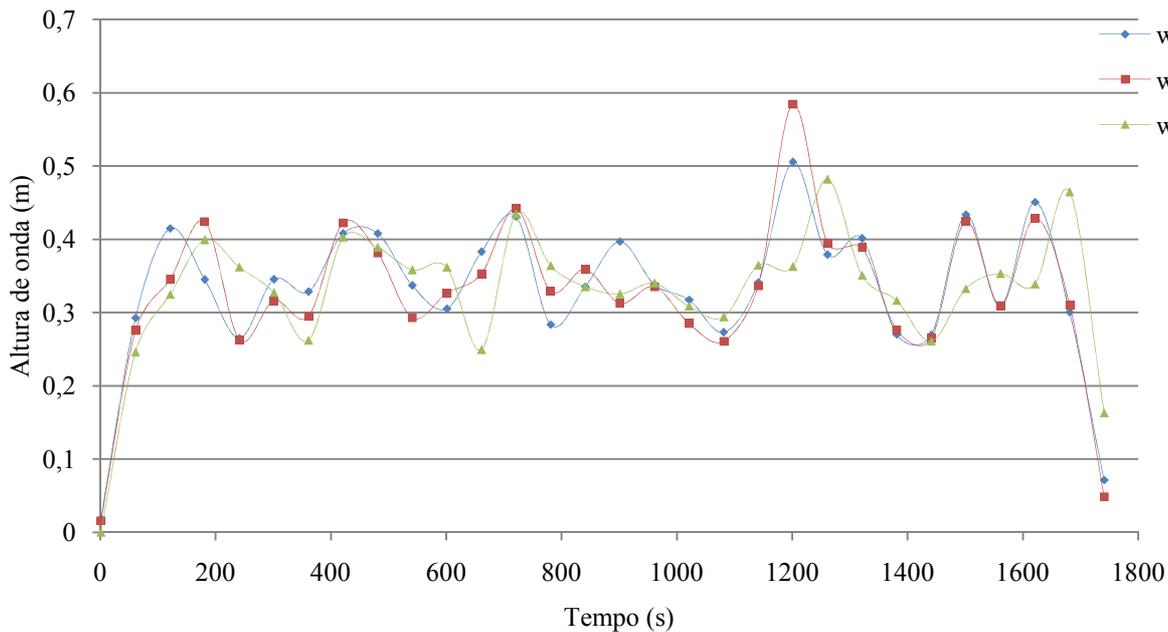


Figura 16: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do trecho 3.

Na Figura 17 podem ser observados os valores médios de alturas de onda no trecho 4a. A tendência que se observa neste gráfico é similar para a maioria dos aparelhos e constata-se que as alturas de onda medidas no aparelho localizado onde existe uma profundidade menor de água (WG11) são superiores, provavelmente devido a efeitos de empolamento. O efeito de empolamento já foi amplamente referido por exemplo por Coelho (2005), que denota que, a causa principal deste efeito é a diminuição da profundidade da água.

Como é visível na Figura 18, os valores das alturas de onda no trecho 4b parecem ter uma dispersão maior que a observada nos restantes treços, o que estará associado à instabilidade da zona de rebentação, espriamento e refluxo e a fenómenos de reflexão e rebentação. No trecho 4b as alturas de onda diminuem relativamente aos anteriores e não existe uma correlação clara entre os instantes em que se registam picos de altura de onda entre este e os treços anteriores.

Através da observação dos conjuntos de onda relativos a cada trecho, denota-se que a dispersão de resultados entre estes aumenta à medida que há uma aproximação à linha de costa. Como tinha sido referido anteriormente, esta dispersão crescente será provocada pela aproximação à zona de rebentação, de espriamento e de refluxo e às turbulências inerentes a estas zonas.

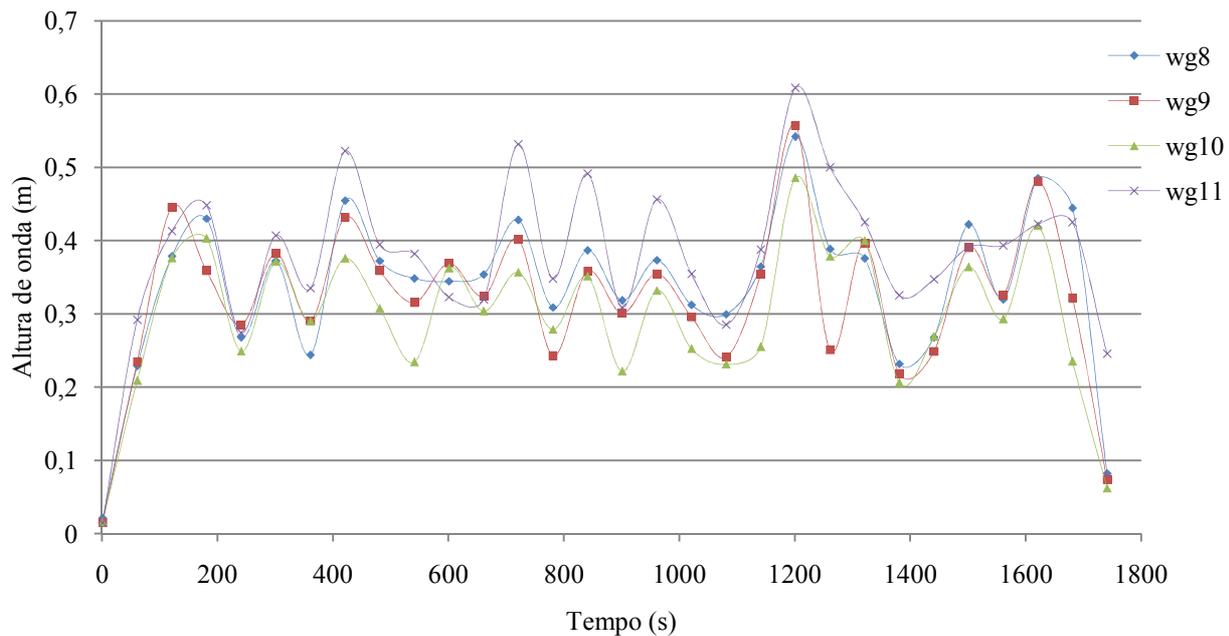


Figura 17: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada WG do troço 4a.

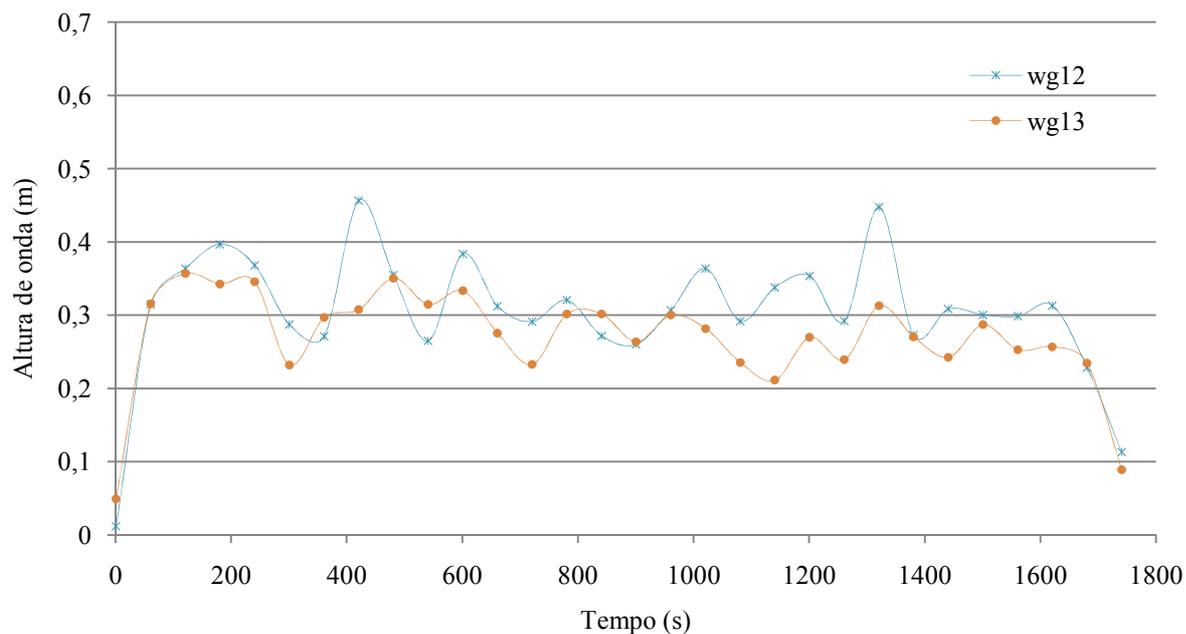


Figura 18: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada wg do troço 4b.

Apresenta-se agora a comparação de alturas de onda entre troços, através da média dos valores médios por minuto dos registos dos WG em cada troço (Figura 19). Parece existir em alguns pontos um desenvolvimento nas alturas de onda médias por minuto crescente até ao troço 4a provavelmente associado a efeitos de empolamento das ondas com a diminuição da altura de água relativamente ao fundo. A quebra deste aumento, sentida

quando se observam os valores do troço 4b, estará certamente associada à zona de rebentação da maioria das ondas, já que a rebentação ocorrerá entre o troço 4a e 4b. Para comprovar isto mesmo, a Tabela 1 mostra as alturas médias em cada troço, estimadas a partir dos valores médios por minuto.

Tabela 1: Valores de alturas de onda médias por troço (m).

	Troço 1	Troço 3	Troço 4-a	Troço 4-b
Média total	0,325	0,329	0,334	0,289

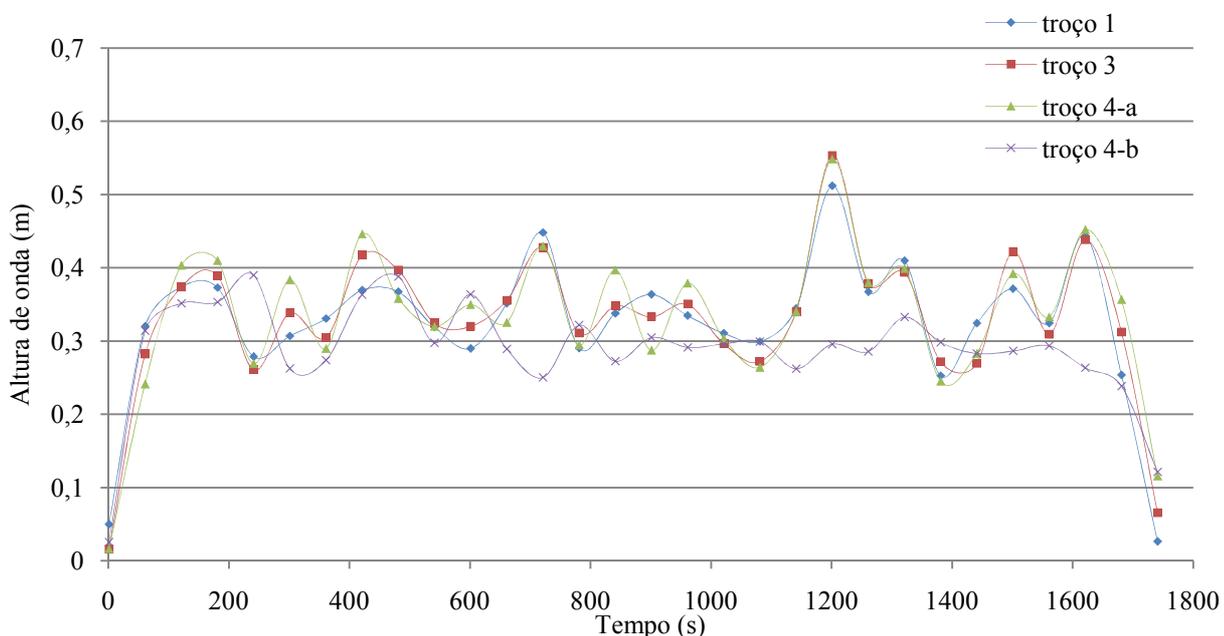


Figura 19: Alturas de onda médias por minuto registadas em cada troço.

Para os desenvolvimentos seguintes deste estudo foi conveniente escolher uma altura de onda representativa, para poder prever zonas de rebentação e também para comparação das alturas de onda com as concentrações medidas nos OBS. Assim, depois desta análise prévia considerou-se apropriado que a altura de referência das ondas fossem as alturas das ondas medidas no troço 4a, no WG 11. A razão para esta escolha tem a ver com as comparações que se pretendem fazer onde, é conveniente a minimização do tempo de passagem de onda entre sensores e uma boa representação da altura de onda antes da rebentação.

No entanto, foi também estudada uma abordagem diferente das anteriores, na qual se tentou acompanhar o comportamento isolado de 8 ondas distintas, avaliando a variação da altura da onda à medida que se ia passando em cada WG. A Tabela 2 mostra as alturas de onda consideradas e está ordenada por ordem crescente tendo, em conta a altura da onda registada no WG0.

Tabela 2: Ondas consideradas na análise isolada.

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Altura no WG0 (m)	0,194	0,223	0,317	0,449	0,483	0,625	0,780	0,828
Instante do registo no WG0 (s)	185,275	822,900	71,475	353,850	322,300	1533,475	159,475	1203,975

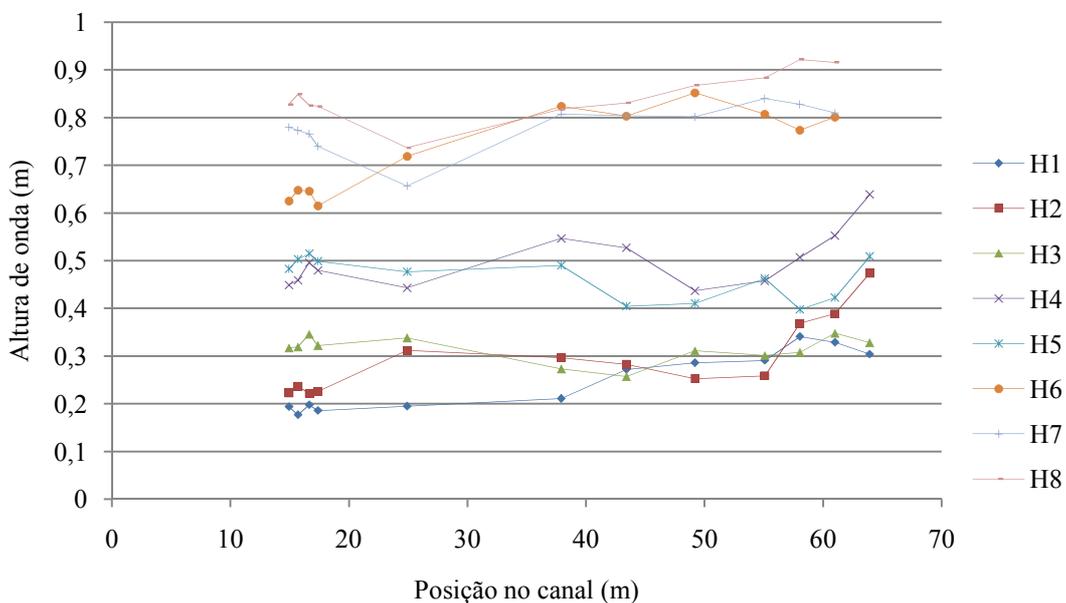


Figura 20: Alturas (m) das ondas ao longo do canal.

Seria de esperar que devido ao empolamento, a altura de onda aumentá-se à medida que diminuí-se a altura de água. Todas as ondas apresentam uma tendência de crescimento bem visível ao longo do canal, comportamento já assinalado antes, no caso das ondas médias

por minuto. Este fenómeno é bem perceptível por exemplo na onda H1, que parece seguir a geometria do fundo do canal. Contudo, na onda H5, este comportamento não é tão notório. No gráfico da Figura 20 estão representadas as várias alturas de onda medidas pelos WG ao longo do canal. Neste gráfico pode ser observado que só existem registos de alturas de onda no máximo até ao WG11 e duas destas (as maiores) até ao WG10. Este facto deve-se a dificuldade em acompanhar devidamente as ondas sem cometer erros, como já foi analisado antes existem diferenças acentuadas de alturas de onda entre o troço 4a e 4b.

## 4. Concentração de sedimentos em suspensão

### 4.1 Método de obtenção e análise de dados

A calibração terá que ser feita individualmente para cada aparelho, pois os sensores destes poderão ter resultados diferentes, para as mesmas condições. Como exemplo apresenta-se uma das curvas final de calibração do OBS (Figura 21), obtida após a transformação dos valores em glicerol no seu correspondente em água.

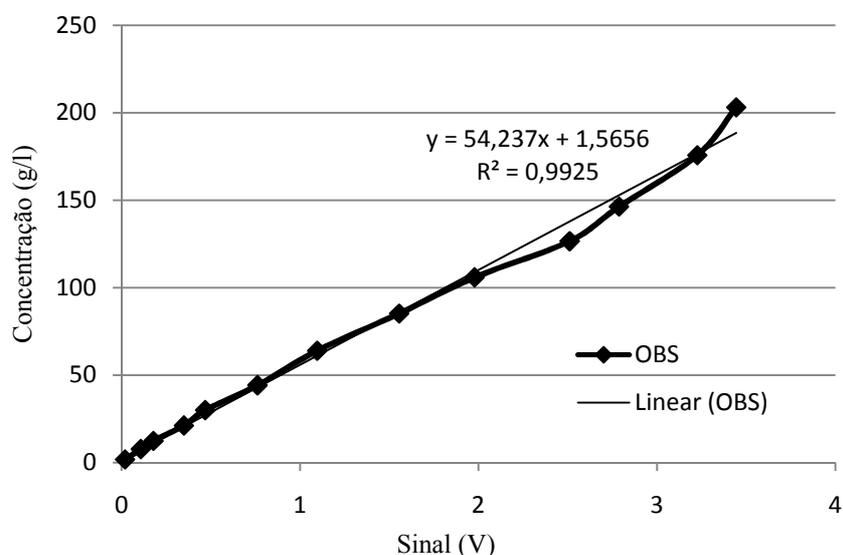


Figura 21: Curva de calibração do OBS.

Os aparelhos OBS registraram dados a uma frequência de 40 Hz, o que totaliza cerca de 72000 registos em 1800 segundos (tempo de série de registo estudado), dificultando qualquer análise instantânea.

Assim, os dados recolhidos pelos seis OBS existentes no canal de ondas, com a frequência de 40 Hz foram analisados recorrendo à sua média por segundo, por minuto, em cada seis minutos e também à sua média total. Na análise e comparação das concentrações medidas foi utilizada preferencialmente a média por minuto.

## 4.2 Discussão de resultados

A rebentação das ondas na zona de rebentação do perfil da praia provoca turbulência e uma complexa movimentação dos fluidos, que exerce tensões tangenciais sobre o fundo do mar. Estas tensões por sua vez provocam a suspensão e transporte de sedimentos (Suzuki *et al.*, 2007).

O gráfico da Figura 22 apresenta as concentrações médias por minuto em todos os OBS. Neste gráfico é visível que o OBS 5 se destaca de todos os outros por ter registos de maiores concentrações e também pelo desfasamento dos seus picos em relação aos restantes. Note-se que a posição deste OBS é a mais próxima da linha de costa (Tabela 3), onde é mais provável já ter ocorrido a rebentação das ondas.

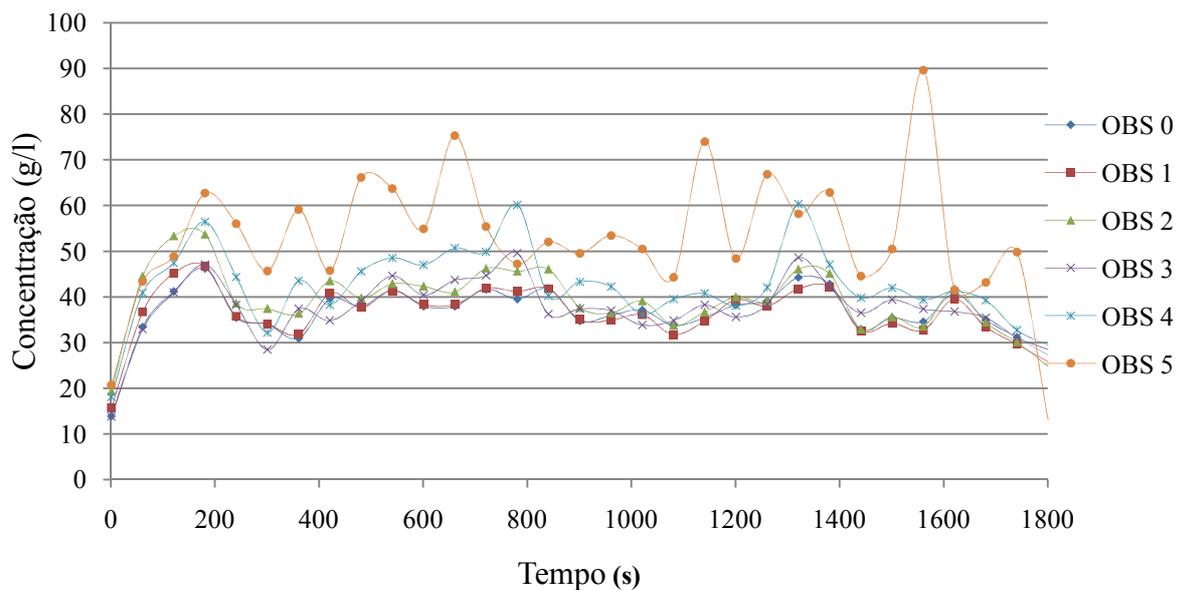


Figura 22: Concentrações médias por minuto em cada OBS.

Em termos de valores médios e máximos totais em todos os OBS, observam-se tendências que serão provavelmente também explicadas pela localização dos OBS no canal, tanto em termos de distâncias ao fundo, como à linha de costa. A partir destes dados gerais pode-se afirmar que existe um aumento de concentração de sedimentos com a aproximação do OBS ao fundo e quando há uma aproximação à linha de costa (para OBS à mesma altura).

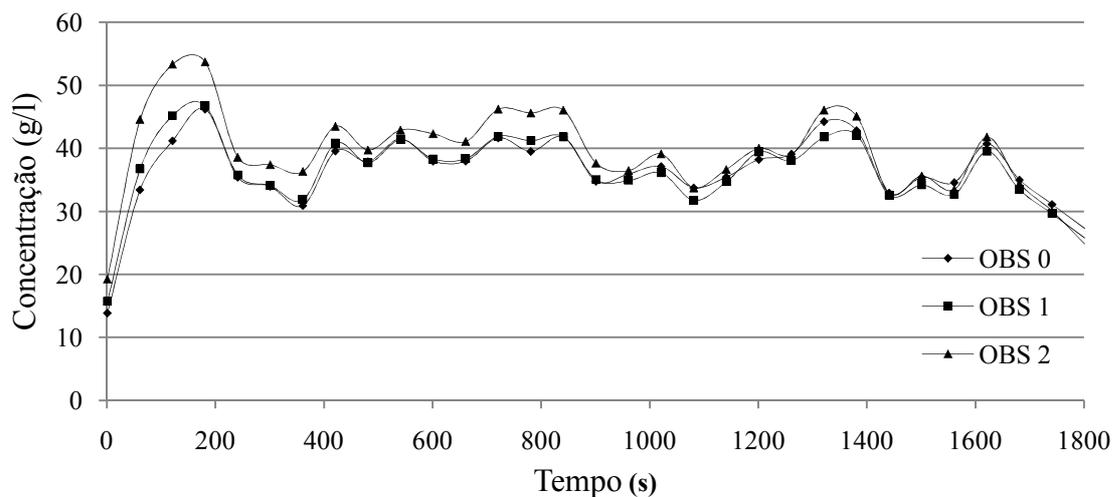
Tabela 3: Caracterização dos registos dos OBS no canal.

Sensor	Posição no canal (desenvolvimento, m)	Distância ao fundo (m)	Concentração média (g/l)	Concentração máxima instantânea (g/l)
OBS 0	71,61	0,14	36,80	119,54
OBS 1	71,61	0,07	36,79	127,96
OBS 2	71,61	0,03	39,76	157,47
OBS 3	73,26	0,06	37,82	174,09
OBS 4	73,26	0,03	42,91	215,83
OBS 5	75,17	0,03	54,16	267,26

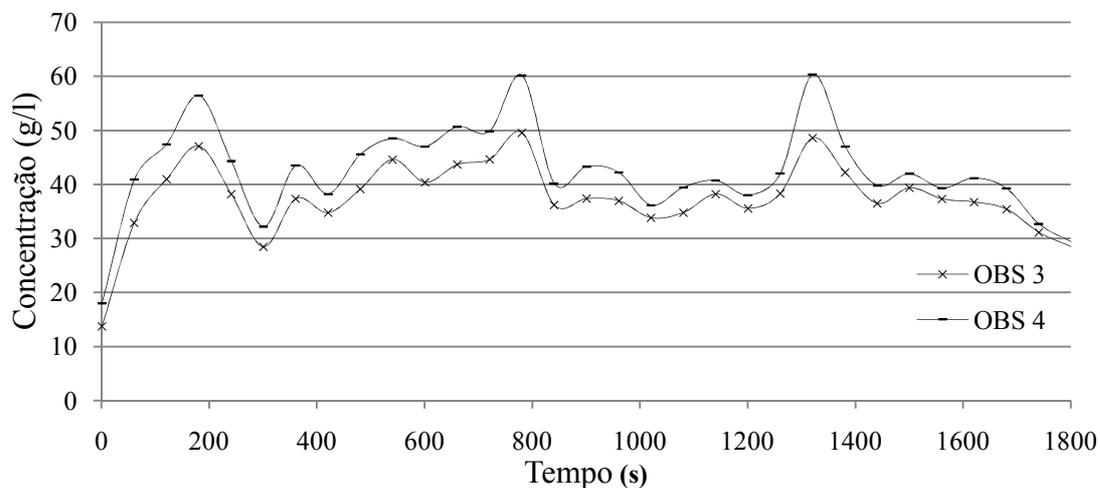
Para seguir a tendência apresentada anteriormente dividiu-se a análise de concentrações em três posições distintas correspondentes à mesma distância da linha de costa ( $x=71,61$  m,  $x=73,26$  m e  $x=75,17$  m). Na posição 1 estão os OBS 0, OBS 1 e OBS 2 (Figura 23a), na posição 2 os OBS 3 e OBS 4 (Figura 23b) e na posição 3 o OBS 5 (Figura 23c).

É visível nas Figuras 23a e 23b que as concentrações médias nos OBS localizados na mesma posição (eixo x) seguem sempre a mesma tendência ao longo do tempo, sugerindo uma boa qualidade dos dados recolhidos por estes sensores. Verifica-se também um aumento da CSS com a diminuição da distância ao fundo.

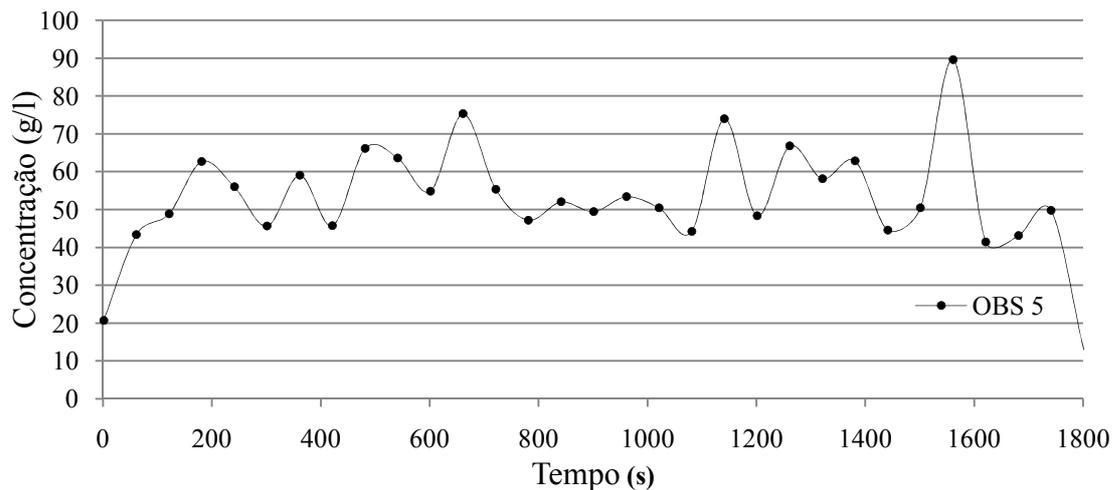
Esta tendência já foi confirmada por vários autores. Wang *et al.*, (2002) afirmam que a CSS decresce rapidamente com o aumento da distância ao fundo. Beach e Sternberg (1996) verificaram que a CSS diminui com o afastamento ao fundo, mas com a aproximação à costa esse efeito não será tão notório. No presente estudo, a diminuição de CSS com o afastamento ao fundo existe mas não é muito expressiva, talvez devido à proximidade à costa ou sugerindo que grande parte das ondas rebente nesta zona, provocando assim uma maior homogeneidade nos valores de CSS, como também referido por Wang *et al.*, (2002). A diferença existente entre a tendência referida para as posições 1 e 2 e a tendência seguida na posição 3, com valores de concentrações bastante mais elevados e também com picos desfasados dos anteriores, atribui-se numa primeira análise à maior proximidade desta posição com a zona de espraiamento e refluxo.



a) Posição 1 ( $x = 71,61$  m).



b) Posição 2 ( $x = 73,26$  m).



c) Posição 3 ( $x = 75,17$  m).

Figura 23: Concentrações médias por minuto, para diferentes distâncias à linha de costa.

De acordo com Masselink e Puleo, (2006), a concentração de sedimentos em suspensão é bem maior na zona de espraiamento que na zona de rebentação de ondas. Estes autores referem que na zona de espraiamento existem CSS superiores a 100 g/l junto ao fundo, e no presente trabalho verificam-se concentrações máximas superiores a 200g/l.

## 5. Zona de rebentação

Como referido por Wang *et al.* (2002) e como verificado no ponto anterior, a zona de rebentação de uma onda é um factor que pode influenciar as concentrações medidas nos aparelhos OBS, dependendo da distância a que esta se dá dos mesmos.

Existem vários critérios usados para prever a que profundidade é que se dá a rebentação de uma onda. Entre estes, alguns usam parâmetros de onda da praia baixa e outros os parâmetros da onda medidos ao largo. Neste estudo interessa apenas seguir o primeiro tipo de metodologia, já que as alturas de onda disponíveis são obtidas num local que representa a praia baixa. Analisou-se um estudo efectuado por Sierra e Presti (1998), que resume 23 critérios existentes de previsão das condições de rotura de ondas regulares. Sierra e Presti (1998) efectuaram uma compilação de dados laboratoriais existentes na bibliografia para analisar o comportamento de cada um dos vários critérios. Posteriormente foram analisadas as percentagens de erro de cada critério na previsão da zona de rebentação, tendo em conta diferentes inclinações de fundo. Embora o estudo de Sierra e Presti (1998) seja referente a ondas regulares, usa-se como referência para o cálculo da zona de rebentação um dos critérios que melhores resultados apresenta (menor erro), para a inclinação existente no canal de ondas. Na estimativa da profundidade de rebentação optou-se pelo critério de Galvin (1969), que para o declive existente no canal (troço 4) apresenta a taxa de erro menor (14,1%). Este critério é caracterizado em função da altura de onda na praia baixa e do declive existente nessa zona, e é descrito da seguinte forma:

$$\frac{H_b}{h_b} = \beta_b \quad (4)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \beta_b &= 1,28 && \text{para } m \geq 0,07 \\ \beta_b &= (1,40 - 6,85 m)^{-1} && \text{para } m < 0,07 \end{aligned}$$

Sendo necessário definir o declive da zona de rebentação, recorreu-se aos dados recolhidos pelo *profiler* (Figura 24). O declive foi então definido entre dois pontos, correspondentes ao início e fim do troço 4.

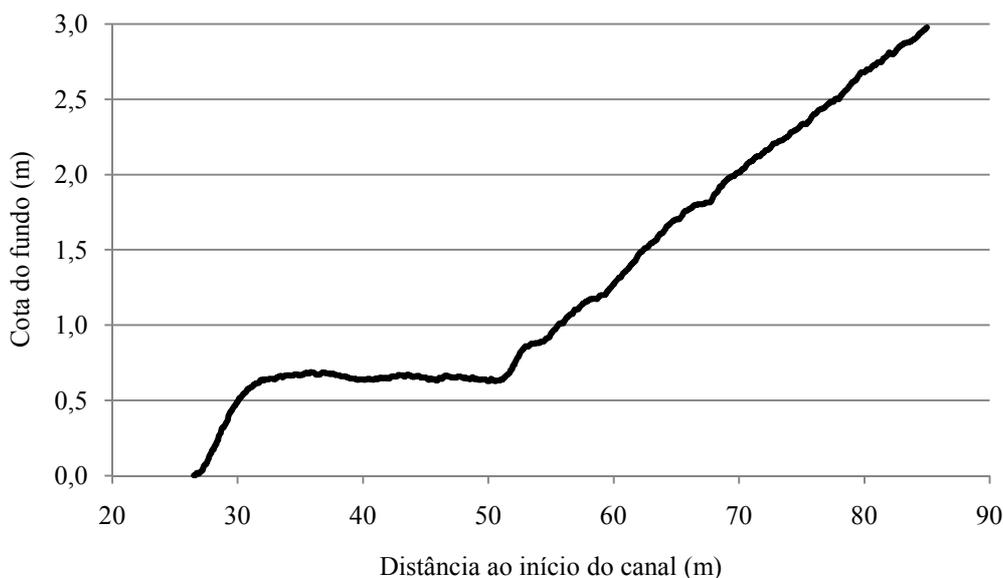


Figura 24: Cota medida pelo *profiler*, para o fundo do canal de ondas.

O valor obtido para o declive foi de 0,0691. Como é assumido por simplificação que a forma do perfil não foi alterada ao longo do teste de ondas, a única variável para o cálculo da zona de rebentação é a altura de onda. A Tabela 4 apresenta distâncias ao fundo e consequentes zonas de rebentação para várias alturas de onda. Na Figura 25 apresentam-se os resultados da aplicação da equação 4, onde se usaram as alturas de onda registadas pelo WG11. Este gráfico representa a localização e a quantidade de ondas que se prevê terem rebentado canal, nele figuram 536 ondas, estas estão divididas em sete grupos que identificam a localização da zona de rebentação. Isto quer dizer que uma das ondas mais pequenas com altura de 1 cm rebenta à profundidade de 10 cm, o que corresponde a uma distância ao início do canal de 79 m e que a onda mais alta com 92.4 cm rebenta à profundidade de 86 cm a que corresponde a posição a 65,67 m do início do canal.

Através da visualização do gráfico é perceptível que a maior parte das ondas rebentam próximo ou mesmo na zona de medição de concentrações onde estão instalados os OBS (71,61 m; 73,26 m e 75,17 m).

O estudo percentual da zona de rebentação para o conjunto das 536 ondas indica que 36% rebentam antes da posição 1, 18% entre a posição 1 e 2 e 20% entre a posição 2 e 3. A média da zona de rebentação é aproximadamente 73 m, ou seja entre a posição 1 e 2.

Tabela 4: Caracterização de distâncias de rebentação em função da altura de onda.

Altura de onda (m)	Distância ao fundo do canal (m)	Posição da rebentação no canal (m)
0,10	0,09	76,91
0,20	0,19	75,55
0,30	0,28	74,18
0,40	0,37	72,82
0,50	0,46	71,46
0,60	0,56	70,09
0,70	0,65	68,73
0,80	0,74	67,36
0,90	0,83	66,00
1,00	0,93	64,64

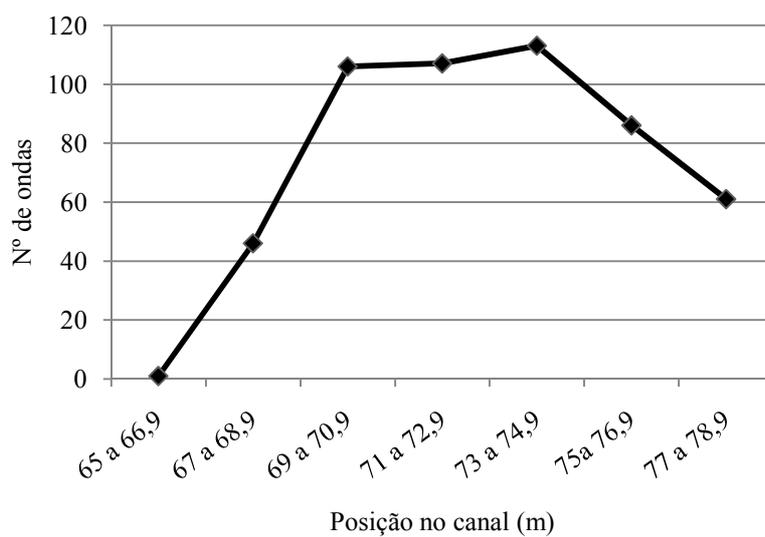


Figura 25: Zona aproximada de rebentação das ondas registadas no WG11.

## 6. Relações entre variáveis

### 6.1 A CSS em função da altura de onda

Um dos objectivos deste trabalho é a tentativa de relacionar a altura de onda e a concentração de sedimentos em suspensão verificada. Por isso, após a análise apresentada para cada um destes factores individualmente, passa-se agora ao estudo do seu comportamento em conjunto.

Para esta análise estimou-se a velocidade média de propagação de um conjunto de ondas, avaliando o tempo que estas demoraram a passar de WG para WG. Assim, tem-se a possibilidade de relacionar as alturas de onda medidas num determinado WG, com as CSS medidas num dado sensor, no instante aproximado em que a onda cruza com o OBS.

Na Figura 26 relacionam-se as alturas de onda medidas no WG11 com as CSS registadas nos OBS de fundo (OBS2, OBS4 e OBS5). Estas concentrações correspondem à média das concentrações medidas no segundo estimado para a passagem da onda correspondente.

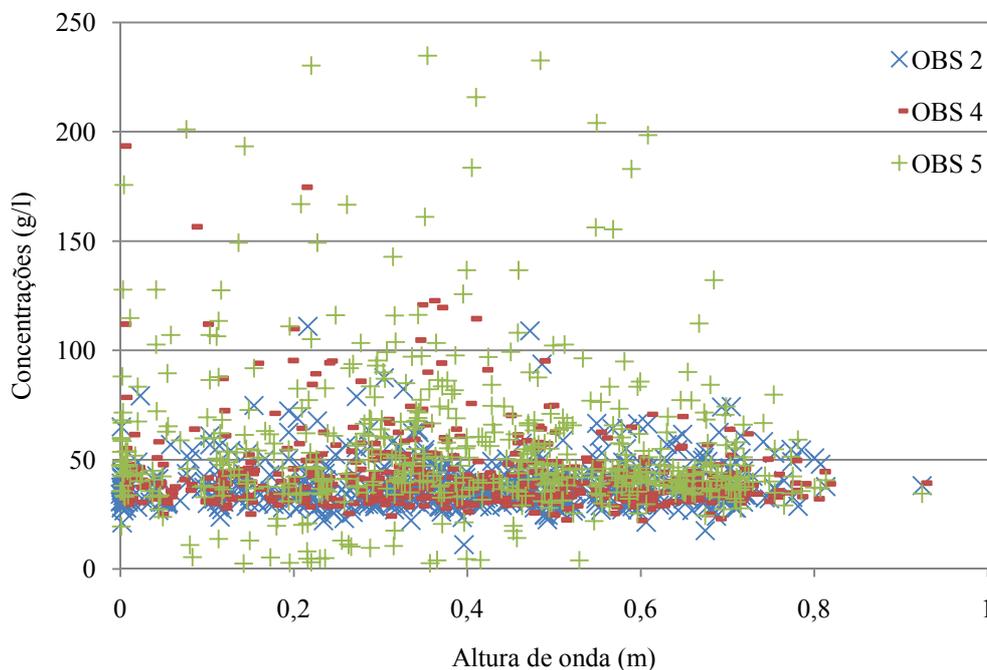


Figura 26: Comparação de alturas de onda com CSS.

A Figura 26 remete para uma situação em que não se verifica um aumento evidente da CSS à medida que a altura de onda aumenta. Perante este facto torna-se notório que a relação entre a altura de onda e a CSS é dependente de outros factores. Uma das possíveis

explicações será que a concentração medida em cada instante sofre a influência de um certo conjunto de ondas anteriores a esta. Para tentar verificar esta conclusão, apresenta-se na Figura 27 a média da altura dos conjuntos de ondas de um minuto e respectivas CSS. Neste caso, a cada minuto apresenta-se a média das alturas de onda e as respectivas concentrações médias, sem avaliar o tempo de propagação da onda porque não será relevante quando comparado com o minuto de medições.

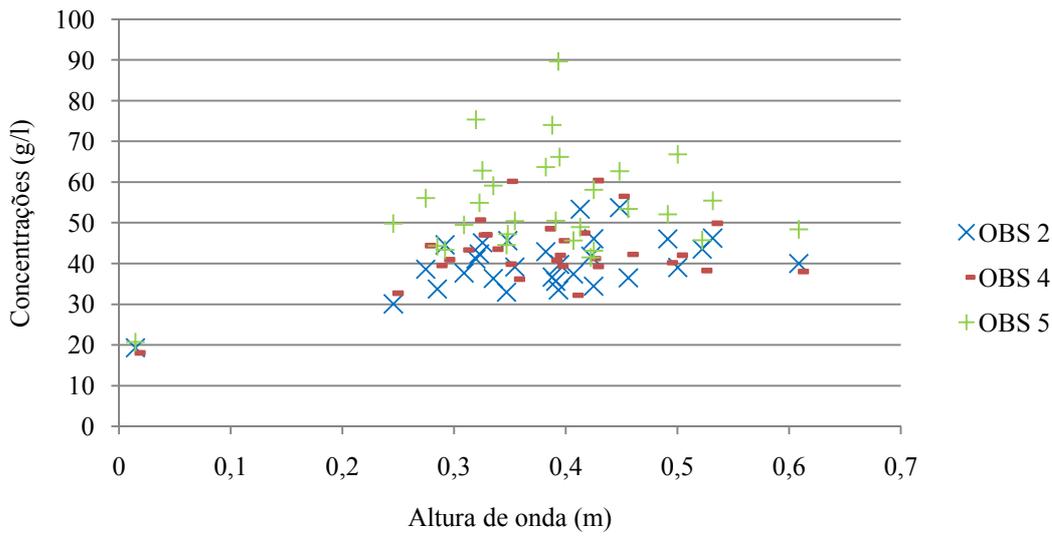


Figura 27: Relação entre altura de onda e CSS, média por minuto.

Como é perceptível na figura anterior não existe nenhuma tendência de evolução demarcada que permita dizer que grupos de onda de 1 minuto podem ajudar a estabelecer uma relação fiável entre altura de onda e CSS.

Na Figura 28 analisa-se ainda a relação entre a altura de onda e a CSS para o conjunto das 8 ondas individuais consideradas anteriormente. Neste caso optou-se por relacionar as alturas de onda com as CSS médias de todos os aparelhos OBS.

Esta análise mostra mais uma vez que a relação entre as alturas de onda e a CSS dependerá doutras variáveis. Após analisar todos os gráficos deste subcapítulo, verifica-se que a grande maioria dos valores de CSS se situa entre 30 e 50 g/l, independentemente da altura de onda associada, revelando alguma homogeneidade ou constância.

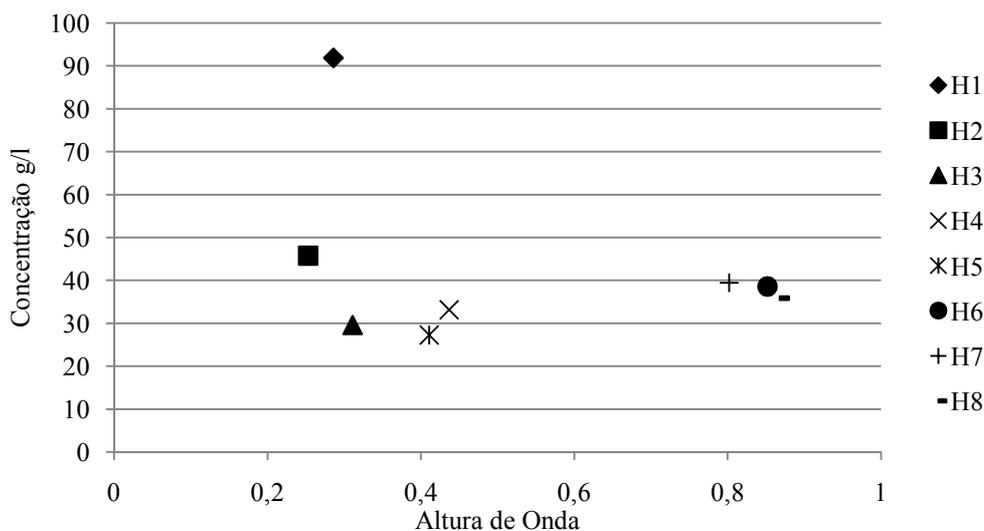


Figura 28: Altura de onda das ondas individuais e respectivas CSS.

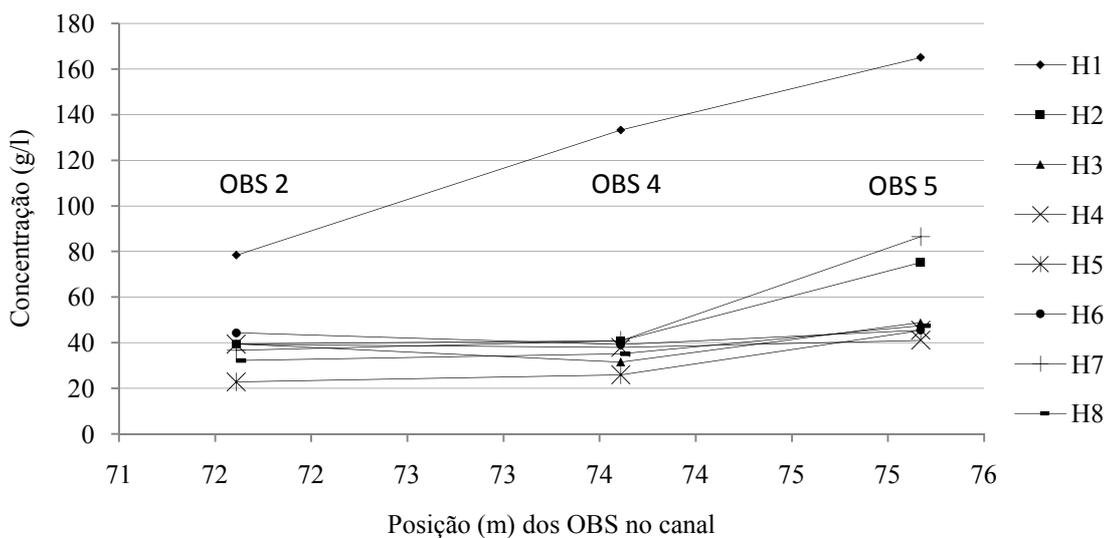


Figura 29: CSS para cada onda individual nos OBS 2, OBS 4 e OBS 5.

Wang *et al.*, (2002) referiu que, comparando uma frequência de ondas elevada com situações de frequências menores, a CSS só varia junto ao fundo. Então, no próximo passo desta análise trabalhou-se apenas com os dados de CSS relativos ao fundo canal. Apresenta-se no gráfico da Figura 29 as CSS para nos OBS 2, OBS 4 e OBS 5, para cada uma das ondas individuais. Repare-se que não será a frequência das ondas a variar mas sim

a altura de onda, contudo em qualquer uma das situações pode ser esperada um maior turbulência no meio.

Apesar de não existir uma correlação evidente entre alturas de onda e CSS, existe uma tendência bem definida na evolução das CSS de todas as ondas à exceção da onda H1. As CSS nestas ondas mantêm-se constantes nas duas primeiras posições para depois ter um crescimento considerável na última. Esta análise demonstra também que a correlação entre altura de onda e CSS terá de ter em conta outros factores, nomeadamente o tempo, a avaliar no ponto seguinte.

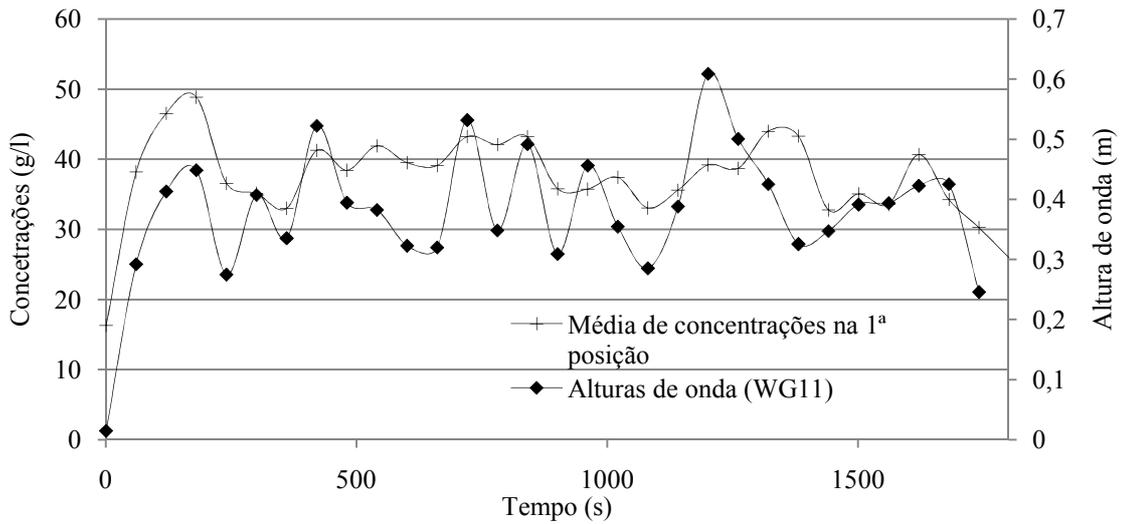
## **6.2 A CSS em função da altura de onda e do tempo**

Para tentar analisar a hipótese da CSS sentida num dado instante poder advir da rebentação de mais do que uma onda, avaliou-se a relação entre a CSS e a altura de onda, no instante de tempo em que esta ocorreu.

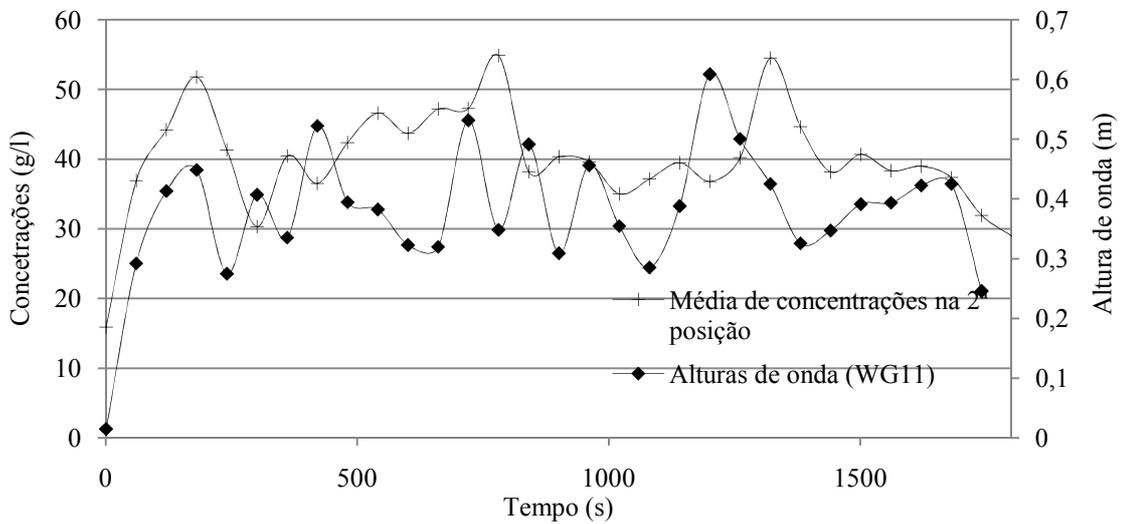
Optou-se primeiramente por fazer comparações em termos de valores médios por minuto, tentando assim facilitar a percepção dos dados. Comparam-se as alturas de onda médias por minuto, medidas no WG11, com a média das médias de concentrações de sedimentos registadas em cada posição de medição (no caso das posições 1 e 2, onde existe mais de um sensor OBS).

A Figura 30 representa os dados de CSS e de alturas de ondas registados em cada minuto de medições. Esta figura apresenta três gráficos distintos relativos às três posições de medição de CSS, para as quais foi feita a média entre os resultados de cada sensor. A opção do uso da média entre dados de sensores existentes na mesma posição, foi tomada para tentar obter resultados mais representativos de cada zona e não da distância ao fundo. No caso da última posição só existe um sensor, portanto os valores desta dizem respeito à localização do OBS 5.

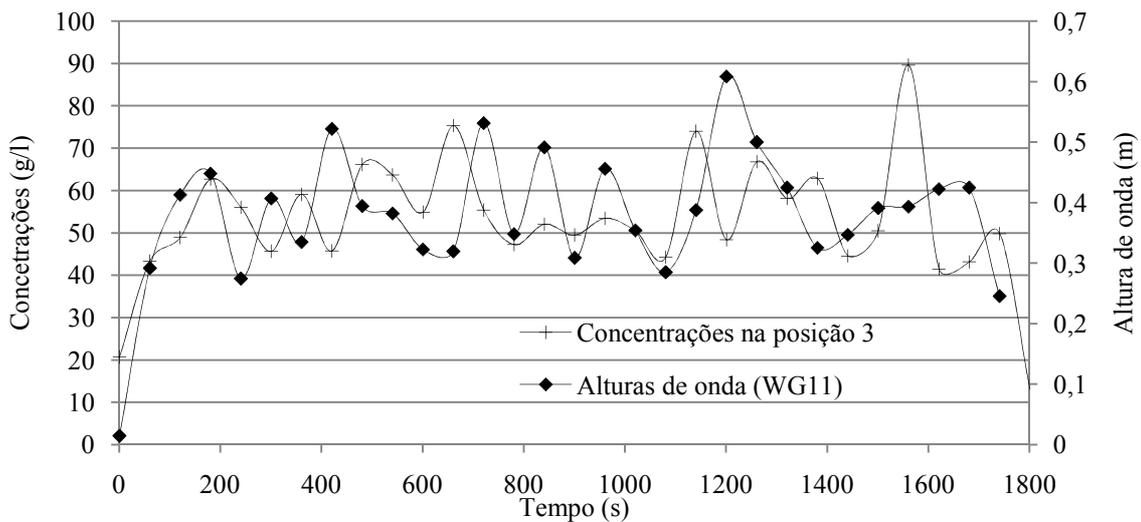
Na Figura 30a apresenta-se o gráfico representativo da relação entre a CSS existente na primeira posição e as alturas de onda. Denota-se existir alguma relação entre as duas variáveis, já que ao longo das curvas existem tendências de subidas e de descidas temporalmente coincidentes.



a) Média dos OBS na posição 1.



b) Média dos OBS na posição 2.



c) OBS da posição 3.

Figura 30: CSS e alturas de onda.

Em termos relativos, observa-se que os valores de concentrações registados não têm oscilações muito abruptas, ao contrário das ondas geradas no canal, denunciando um comportamento das CSS mais regular no tempo. A Figura 30b apresenta a mesma comparação para a posição 2. Ao analisar este gráfico, e por analogia com o anterior, pode-se encontrar a mesma tendência de comportamento entre as alturas de onda e as CSS. Contudo, neste caso a semelhança do comportamento não é tão definida como no anterior e há um ligeiro atraso temporal dos picos de concentrações. Que se poderá dever à distância entre o ponto de medição das alturas de onda apresentadas (WG11) e a posição 2 de medição de CSS.

Na Figura 30c apresentam-se os valores de concentração de sedimentos em suspensão para a posição 3 e as respectivas alturas de onda medidas no WG11. Neste gráfico é menos notória uma coincidência de comportamento entre as alturas de onda e a CSS. Até aos 600s esta parece existir com um atraso temporal, como verificado também para a posição 2, mas após este período existem fases de coincidência de picos, mas sem o mesmo atraso temporal.

Esta abordagem de comparação entre alturas de onda e CSS sugere que existe realmente uma ligação entre os dois factores, no sentido em que maiores alturas de onda originam uma maior CSS. O facto desta relação não ser visível na abordagem apresentada no ponto 6.1 indica a importância para este caso específico da questão temporal e conseqüentemente a afectação da CSS por mais do que uma onda.

Também se podem retirar desta abordagem algumas indicações que poderão dar pistas do melhor caminho a seguir na continuação deste estudo:

- A existência de uma degradação na relação entre CSS e alturas de onda à medida que há uma aproximação à linha de costa.
- As CSS parecem ter variações maiores à medida que há aproximação à linha de costa, denotadas por picos de concentrações mais evidentes.

Segundo Kana (1979) os principais factores que controlam a CSS são: a elevação acima do leito, o tipo de rebentação, distância relativa à zona de rebentação, a inclinação da praia e a altura de onda. A distância relativa a zona de rebentação é o único factor que varia neste caso de estudo e que ainda não foi relacionado com os restantes, pelo que será abordado no ponto seguinte.

### 6.3 A CSS em função da altura de onda e da zona de rebentação

Também foi estudada a relação entre a zona de rebentação, as concentrações de sedimentos em suspensão e as alturas de onda. Numa primeira fase de estudo, as duas primeiras variáveis foram analisadas em termos de valores médios globais. A zona de rebentação prevista para as ondas induzidas na experiência estende-se desde os 65 m aos 79 m no desenvolvimento do canal, o que engloba a localização dos pontos de recolha de dados de CSS.

Os resultados obtidos na secção 6.1 apontam para uma certa homogeneidade de CSS por zonas de medição, independentemente da altura de onda. Então, parece indicado relacionar as CSS registadas nos sensores, com a altura de onda significativa de 0,53 m.

Na Figura 31 apresenta-se um gráfico que permite visualizar as CSS médias e máximas registadas a uma distância de 0,03 m do fundo do canal. Neste gráfico também está indicada a posição média da rebentação (a 73 metros de distância do início do canal) e duas aproximações que traduzem o desenvolvimento dos valores de CSS.

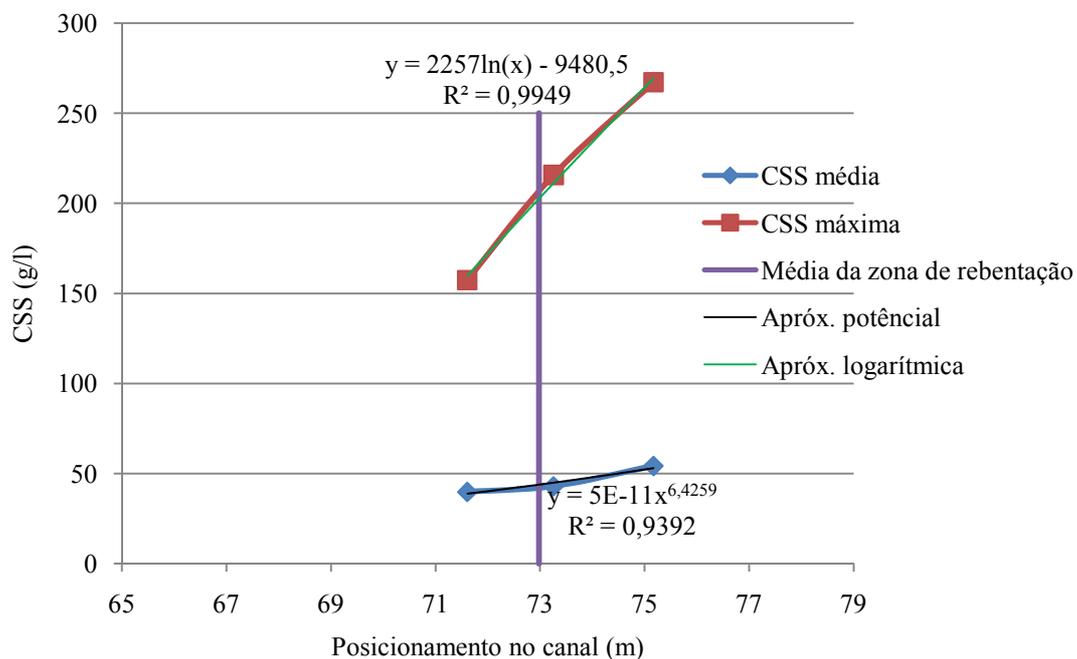


Figura 31: CSS na zona de rebentação.

As aproximações a funções do comportamento das CSS indicadas na Figura 31, por dizerem respeito apenas a três zonas de medições, podem não ser representativas da CSS em toda a zona de rebentação, mas confirmam uma tendência de aumento das CSS à medida que nos aproximamos da linha de costa.

Pensa-se que a distância de rebentação de cada onda a cada OBS poderá influenciar as medições nos sensores OBS. Pode dar-se o seguinte exemplo: uma onda de grandes dimensões pode provocar uma maior CSS, mas também é provável que a sua zona de rebentação seja a uma distância superior da linha de costa e conseqüentemente de alguns dos sensores instalados. Por isso, espera-se que a CSS não seja constante em todo o desenvolvimento da zona de medições.

Propõe-se então uma abordagem um pouco menos directa, que segue os seguintes pontos:

- Para cada onda registada no WG11 (ou outro), calcular o tempo que a mesma demora até chegar a cada posição dos OBS, e estimar a CSS correspondente;
- Para cada onda em estudo, fazer uma aproximação linear entre a CSS e a distância entre a zona de rebentação e cada sensor OBS;
- Retirar os declives das aproximações lineares criadas, relacionando-os com as alturas de onda correspondentes;
- Encontrar uma função que relacione as alturas de onda com os declives do tipo  $\text{declive} = f(\text{alturas})$ , permitindo facilmente chegar a uma outra função do tipo  $\text{CSS} = f(\text{declive})$ .

Testou-se numa primeira fase esta abordagem recorrendo a todas as ondas registadas no WG11 e às concentrações médias por segundo correspondentes, para os sensores de fundo (OBS 2, OBS4 e OBS5). Na Figura 32 apresenta-se um gráfico que representa o declive de cada aproximação linear da relação entre as CSS em função das alturas de onda. Apenas foram consideradas os declives das aproximações lineares à relação entre os 3 pontos de medição da concentração para cada onda, com coeficiente de correlação superior a 0,50. Das 536 ondas analisadas, apenas 377 tiveram essa correlação superior a 0,5. Os resultados obtidos e representados na Figura 32 demonstram que não existe uma boa relação entre a altura de onda e os declives das rectas que caracterizam a relação entre a CSS e a distância de rebentação da onda ao sensor OBS.

Depois de analisar todas as ondas medidas no WG11 e respectivas CSS médias, fez-se também a análise da CSS máxima e mais uma vez não se conseguiram bons resultados.

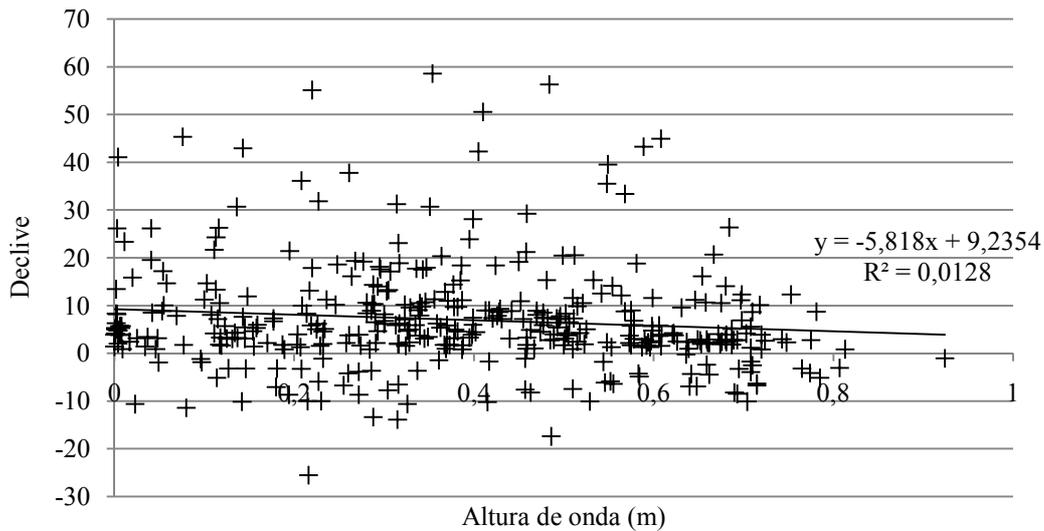


Figura 32: Aproximação linear de declives em relação a alturas de onda.

Optou-se também por tentar a referida abordagem para as ondas individuais. Neste caso analisou-se a velocidade de cada uma das ondas para tentar obter valores de CSS médios mais exactos. Na primeira fase da abordagem verifica-se que apenas 5 das 8 ondas apresentam declives das aproximações lineares com coeficiente de correlação superior a 0,50. Então usaram-se estas ondas (H1, H2, H5, H7 e H8) para tentar encontrar uma função do tipo, declive =  $f$ (alturas) de acordo com o apresentado na Figura 33.

Pelo coeficiente de correlação da função exponencial encontrada pode dizer-se que esta traduz bem a relação entre os parâmetros, altura de onda e declive da recta, de acordo com a equação 5:

$$m = 0,2249 H_b^{-4,066} \quad (5)$$

Desta forma, cada onda terá um declive associado, que representa a variação de CSS com a distância à zona de rebentação.

Passando para o passo seguinte da abordagem, interessa agora encontrar uma função linear do tipo  $CSS = f$ (declive). Para tal, utilizaram-se os valores médios totais de CSS da posição 2, os valores médios de altura de onda e o respectivo  $m$  (Tabela 5).

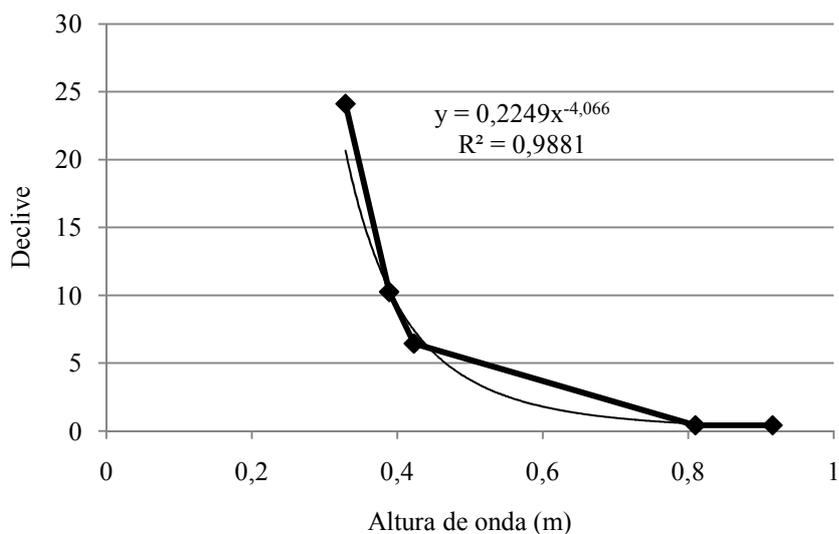


Figura 33: Aproximação do declive e altura de onda a uma função exponencial.

Tabela 5: Valores utilizados para a obtenção da equação 6.

	Valores
CSS média na posição 2 (g/l)	40,366
Altura de onda média total (m) no WG11	0,388
Declive (equação 5)	10,56
Zona de rebentação (m) / distância x à posição 2 (m)	72,98 / 0,28
Componente b	38,41

Através da equação 6 pode-se prever qual a CSS esperada relativamente à sua distância à zona de rebentação.

$$CSS = m \cdot x + 38,41 \Leftrightarrow CSS = 0,2249 H_b^{-4,066} \cdot x + 38,41 \quad (6)$$

A adequação da abordagem a este conjunto de ondas revela-se bastante positiva em comparação com a análise feita à totalidade das ondas. Talvez este facto advinha de uma análise mais pormenorizada feita para as ondas individuais, definindo para cada uma destas uma velocidade própria, o que permite chegar aos valores de CSS correspondentes com uma precisão superior. Contudo após a obtenção da equação 6 e análise de alguns dados daí provenientes (Tabela 6), chega-se à inevitável conclusão de que este método não será adequado para prever a CSS.

Tabela 6: Variação da CSS (g/l) de acordo com a equação 6.

Distância à zona de rebentação (m)	Alturas de onda (m)			
	0,20	0,40	0,60	0,80
1,00	194,73	47,74	40,20	38,97
2,00	351,04	57,08	42,00	39,52
3,00	507,36	66,41	43,79	40,08
4,00	663,67	75,74	45,59	40,64

Pela análise da tabela denota-se que o aumento da altura de onda estará associado a uma diminuição da CSS, o que entra em colisão com os dados apresentados anteriormente. Pensa-se que o peso do declive da recta que exprime a variação de CSS em distância para diferentes alturas de onda tem um peso muito elevado na função. É provável que a escolha de uma função do tipo linear não seja a mais correcta. Por fim pode-se dizer que embora se espera-se uma maior variação de CSS para alturas de onda menores, este pode exprimir a passagem de uma zona que realmente está bastante afectada pela onda e de CSS pequenas para outra zona mais próxima da costa onde a CSS é bastante mais elevada.

## 7. Considerações Finais

Este estudo abordou o tema da avaliação de sedimentos na zona de rebentação, que é normalmente associado a uma vasta gama de incertezas. Esta problemática depende de inúmeros factores e nesta dissertação faz-se uma tentativa de clarificação de algumas das relações entre eles.

### 7.1 Conclusões

O primeiro tema abordado nesta dissertação é a onda e os fenómenos de alteração associados à sua propagação. Através da observação das alturas de onda na sua passagem pelos WG, verifica-se em termos médios e mesmo para as ondas individuais estudadas, que existe uma tendência de aumento de altura de onda com a redução da distância ao fundo até ao WG11. Este comportamento é claramente associado a efeitos de empolamento.

O aumento de altura de onda deixa de ser observado no troço 4b, correspondente ao troço mais próximo da costa. Nesta zona, as alturas de onda diminuem e é difícil observar uma relação de picos de altura de onda com os troços anteriores.

Através da observação dos conjuntos de onda relativos a cada troço, denota-se que a dispersão de resultados entre estes aumenta com a aproximação da linha de costa. Esta dispersão crescente será provocada pela aproximação à zona de rebentação, de espraiamento e de refluxo e todas as interações complexas inerentes a estas zonas.

O estudo das CSS registadas em diferentes localizações no canal foi utilizado para a avaliação da qualidade dos dados, assim como para a observação da influência da localização na maior ou menor CSS. Foi verificado que os OBS à mesma distância da linha de costa seguem uma variação de valores muito semelhante ao longo do tempo, sugerindo uma boa qualidade dos dados recolhidos por estes sensores. Ao longo da coluna vertical de água, observou-se um aumento CSS com a aproximação dos OBS ao fundo. Para as mesmas distâncias ao fundo, verificou-se um aumento de CSS com aproximação à linha de costa.

Contudo, neste estudo, a diminuição de CSS com o afastamento ao fundo existe mas não é muito expressiva, talvez devido à proximidade à zona de rebentação ou sugerindo que grande parte das ondas rebente nesta zona provocando assim uma maior homogeneidade nos valores de CSS em altura, como referido por Wang *et al.*, (2002).

Existe uma variação muito significativa em termos de quantidades e de desfasamento de picos de CSS entre as posições 1 e 2 e a posição 3, atribuída à maior proximidade da posição 3 com a zona de espraiamento e refluxo. A partir desta observação verifica-se que existe uma maior CSS na zona de espraiamento, do que na zona de rebentação.

Estimou-se a posição da zona de rebentação das ondas, seguindo o critério de Galvin (1969). Esta localização associa incertezas que se supõem superiores às existentes na medição das alturas de onda e da CSS, porque incluem os erros associados ao critério em si, mas também às dificuldades de medição de alturas de onda e do declive do fundo.

A zona de rebentação das várias ondas registadas coincide maioritariamente com a zona de medição de concentrações.

Em função da localização dos OBS, estima-se que 36% das ondas rebentam antes da posição 1, 18% entre a posição 1 e 2 e 20% entre a posição 2 e 3. A distância média da zona de rebentação é aproximadamente 73 m do batedor, ou seja entre a posição 1 e 2.

Não foi verificado nenhum tipo de tendência de crescimento ou diminuição de CSS com a variação da altura de onda. Assim, a relação entre as alturas de onda e a CSS depende de outros factores.

Apontou-se então uma possível influência da sequência de conjuntos de ondas nas CSS medidas, comparando as alturas de onda com as CSS, tendo em conta o tempo. Neste caso foi verificada a existência de uma relação entre as duas variáveis. Na comparação das alturas de onda com as CSS verifica-se que existem tendências de subidas e de descidas temporalmente coincidentes. Estas tendências são mais visíveis na posição 1 ( $x = 71,61$ ) e tem uma degradação progressiva nas posições (posição 2 e posição 3 com  $x = 73,26$  e  $x = 5,17$  respectivamente) mais próximas da linha de costa. Em termos relativos, observa-se que os valores de concentrações registados não têm oscilações muito abruptas na posição 1, ao contrário das ondas geradas no canal. Como pontos gerais aponta-se a existência de uma degradação na relação entre CSS e alturas de onda à medida que há uma aproximação da linha de costa e também para uma maior variação de CSS à medida que há aproximação à linha de costa, denotadas por picos de concentrações mais evidentes.

Outra abordagem comparativa foi tentada na perspectiva de clarificar a relação em termos quantitativos da CSS e da altura de onda. Para isso estudou-se a influência da zona de rebentação no processo de suspensão de sedimentos. Os resultados da aplicação da relação simultânea entre alturas de onda e distância da zona de rebentação à zona de medição de concentrações são maus quando esta é aplicada à totalidade das ondas registadas no canal, talvez devido à análise dos factores das mesmas carecer de acertos importantes. No caso da

aplicação da técnica às ondas estudadas individualmente foi possível verificar uma variação superior de CSS com a distância à zona de rebentação. Uma das razões possíveis para esta mudança será a análise mais pormenorizada feita para as ondas individuais, definindo para cada uma destas uma velocidade própria, o que permite chegar aos valores de CSS correspondentes com uma precisão superior. Contudo na continuação da aplicação da abordagem observava-se mais uma vez a sua inadequação para o objectivo pretendido.

## **7.2 Desenvolvimentos futuros**

Em vários pontos abordados nesta dissertação se verificou existir um grau de incerteza associado, normal nos problemas relacionados com o tema.

Seria benéfico para este estudo conhecer com mais exactidão a zona de rebentação de cada uma das ondas. Um dos métodos para a sua obtenção seria através de um sistema de vídeo integrado no trabalho laboratorial, o que permitiria confrontar com os resultados da formulação numérica e aumentar a confiança nos valores utilizados. Poderia também ser feito o estudo dos picos de concentrações e tentar perceber se existe alguma interferência neste acontecimento da sequência de ondas que acontece imediatamente antes.

Para prever a CSS em termos quantitativos seria importante fazer um estudo mais aprofundado das relações entre altura de onda distância de rebentação e CSS. Seria benéfico para o desenvolvimento da abordagem estudada executar testes com séries de ondas de alturas iguais, então obtendo o declive médio da aproximação linear que exprime o desenvolvimento espacial da CSS para cada altura de onda, como também testes de ondas solitárias para uma reflexão sobre a influência da frequência de ondas na CSS. Com os dados deste declive correspondente a diferentes alturas de onda, a função (5) poderia então ser bastante melhorada em termos de fidedignidade. Após esta fase seria importante estudar as novas adaptações da fórmula (6), incluindo a introdução de novas variáveis como o declive da praia e a granulometria dos sedimentos. Por fim, a confrontação de previsões provenientes da abordagem com dados de campo seria o ponto-chave para a sua aceitação.

## 8. Bibliografia

- Arcilla, A. S., Lemos, C. M., 1990. Surf-Zone Hydrodynamics. Ed. CIMNE, 310.
- Beach, R.A., Sternberg, R.W., 1996. Suspended-sediment transport in the surf zone: response to breaking waves. *Continental Shelf Research*, Volume 16, 1989-2003
- Bunt, J. A. C., Larcombe, P., Jago, C. F., 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter. *Continental Shelf Research*, Volume 19, Issue 9, Pág. 1199-1220.
- Butt, T., Miles, J., Ganderton, P., Russell, P., 2002. A simple method for calibrating optical backscatter sensors in high concentrations of non-cohesive sediments. *Marine Geology*, Volume 192, Pág. 419-424.
- Coastal Engineering Manual, (2003). Surf Zone Hydrodynamics. Coastal and Hydraulics Laboratory. Part II, Chapter 4. Engineer Manual 1110-2-1100.
- Coelho, C., 2005. Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro. Pág. 91.
- Conner, C.S., De Visser, A.M., 1992. A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. *Marine Geology* 108, 151-159.
- DAIC, 1991. Suspended Solids & Turbidity Monitor, Instruction Manual. 3ª Revisão. D&A Instrument Company.
- Dean, R., Kriebel, D., Walton T., 2006. Cross-Shore Sediment Transport Processes *Coastal Engineering Manual*, Part 3 - Chapter 3.
- Downing, J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, Volume 26, Issues 17-18, Pages 2299-2318.
- Gibbs, R.J., 1978. Light scattering from particles of different shapes. *Journal of Geophysical Research* 83, 501-502.
- Gomes, F. V., 1995. Fenómenos de alteração e deformação da agitação na propagação em direcção à costa. Laboratório de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Guza, R. T. e Inman, D. L. (1975) Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research* 80, 2997-3012.
- Kana, T. W., 1979. Suspended sediment in breaking waves. Coastal Research Division, Technical Report. No. 18, 153.
- Liu Z., 2001. Sediment transport. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning. Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik.
- Loureiro S. M., 2006. Indicadores geomorfológicos e sedimentológicos na avaliação da tendência evolutiva da zona costeira. Escola de Ciências, Universidade do Minho.
- Masselink, G., Puleo, J. A., 2006. Swash zone morphodynamics *Continental Shelf Research*, Volume 26, Issue 5, Pages 661-680.
- Neves, T. G. G., 2004. Geologia uma abordagem ao geodinamismo externo e interno do nosso planeta. Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve.
- Osborne P. D., Simpson D. P., 2005. Cross-Shore Variation of Grain Size on Beaches. *Encyclopedia of Coastal Science* 353,354.

Puleo, J.A., Beach, R.A., Holman, R.A., Allen, J.S., 2000. Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore-generated turbulence. *Journal of Geophysical Research* 05, 17021–17044.

Puleo, J.A., Johnson, R.V., Butt, T., Kooney, T.N., Holland, K.T., 2006. The effect of air bubbles on optical backscatter sensors. *Marine Geology* 230, 87–97.

Rosati J. D., Todd Walton T., Bodge K., 2002. Longshore Sediment Transport  
Coastal Engineering Manual, Part 3 - Chapter 2.

Sierra e Presti (1998), Estudio Comparativo de Critérios de Rotura del Oleaje Regular. Volume 5, 23 – 34.

Sutherland, T.F., Lane, P.M., Amos, C.L., Downing, J., 2000. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness level. *Marine Geology* 162, 587–597.

Suzuki, T., Okayasu, A., Shibayama, T., 2007. A numerical study of intermittent sediment concentration under breaking waves in the surf zone. *Coastal Engineering*, Volume 54, 433-444.

Wang, P., Ebersole, B.A., Smith, E.R., Johnson, B.D., 2002. Temporal and spatial variations of surf-zone currents and suspended sediment concentration. *Coastal Engineering*, Volume 46, 175–21.

Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology* 56, 93–118.