

## ANÁLISE TEMPORAL, ESPECTRAL E DE ERROS NO PACOTE SOPRO. APLICAÇÕES

Conceição J. E. FORTES

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443446, [jfortes@lneec.pt](mailto:jfortes@lneec.pt)*

Liliana V. PINHEIRO

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443 912, [lpinheiro@lneec.pt](mailto:lpinheiro@lneec.pt)*

João A. SANTOS

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443451, [jasantos@lneec.pt](mailto:jasantos@lneec.pt)*

### RESUMO

Nesta comunicação, descreve-se a análise temporal, espectral e estatística de registos de elevação da superfície livre obtidos quer em ensaios em modelo físico quer utilizando modelos numéricos. Mais ainda, efectua-se uma análise comparativa entre resultados numéricos e experimentais, que inclui uma análise de erros (através do cálculo de viés, erro médio quadrático, índice de concordância, etc.) avaliando assim o desempenho dos modelos numéricos em estudo.

Os casos em estudo correspondem aos ensaios em canal físico da simulação da propagação de ondas sobre uma rampa de declive constante que termina numa estrutura de protecção costeira, para os quais se efectuou um conjunto significativo de medições da elevação da superfície livre em vários pontos ao longo do perfil de estudo. O outro corresponde aos testes numéricos efectuados com os modelos numéricos BOUSSIIW e COULWAVE na simulação da propagação de ondas sobre um baio esférico para os quais existem medições efectuadas em modelo físico. Trata-se pois de um excelente caso para validação dos modelos numéricos.

A aplicação dos modelos numéricos (introdução de dados, execução dos modelos e obtenção de resultados) e principalmente as análises de dados efectuadas quer aos registos obtidos em modelo físico quer aos obtidos com os modelos numéricos foram efectuadas com a aplicação informática SOPRO e, mais concretamente, com a nova funcionalidade desenvolvida neste trabalho, o módulo ANALISES.

**Palavras-chave** – Modelos Numéricos, Modelos Físicos, SOPRO, Análise temporal e espectral, Erros

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das características da agitação marítima é fundamental, entre outros, para o dimensionamento de estruturas de protecção costeira e portuária, para a avaliação de condições de navegação nos portos, para estudos de dinâmica sedimentar, i.e., para a generalidade dos estudos de engenharia portuária e costeira. A realização de campanhas de medições, ensaios em modelo físico e, mais frequentemente, a utilização dos modelos numéricos de geração, propagação e deformação de ondas, contribuem de forma importante para esses estudos.

No entanto, todos estes procedimentos conduzem a grandes quantidades de informação, que têm de ser convenientemente analisadas e sistematizadas de modo a permitir a sua rápida e eficaz interpretação/utilização. Mais ainda, no caso dos modelos numéricos a sua aplicação é complexa e requer tempo para a preparação dos dados de entrada, execução e apresentação e resultados

O pacote SOPRO surgiu da necessidade de uniformizar e automatizar os procedimentos necessários à execução de modelos numéricos (construção de ficheiros de dados, execução, análise e apresentação de resultados) quer estes sejam utilizados de forma independente, quer em conjunto com outros modelos numéricos. Trata-se de uma aplicação informática em Microsoft Access™ composta por uma interface com o utilizador e por um conjunto de módulos. Neste momento, existem dez módulos operacionais, seis deles integram modelos numéricos de propagação da agitação marítima os outros quatro integram um modelo numérico de simulação da navegação em zonas portuárias, uma base de dados de agitação marítima, um módulo para a geração de malhas de elementos finitos e um módulo para estabelecimento de regimes de agitação marítima, respectivamente. A selecção do módulo (ou módulos) mais apropriado(s) depende do objectivo do estudo e dos fenómenos envolvidos.

Há, no entanto, vários aspectos que ainda não estão previstos no SOPRO, tais como:

- ferramentas de análise temporal e espectral de dados de agitação marítima e/ou de resultados de modelos numéricos;
- procedimentos para a validação/calibração dos modelos numéricos, através da comparação entre resultados numéricos com dados medidos em campo ou em laboratório.

Estas funcionalidades são fundamentais para a: a) caracterização da agitação marítima em qualquer zona costeira ou portuária, utilizando quer dados de campo quer resultados numéricos; b) validação de modelos numéricos para os quais é necessário comparar os seus resultados com dados de laboratório ou outros com resultados numéricos de outros modelos; c) utilização dos modelos numéricos em situações reais para as quais é sempre necessário efectuar a calibração de alguns dos seus parâmetros.

Nesta comunicação descreve-se o pacote SOPRO bem como o seu novo módulo, designado por ANALISES, que implementa as funcionalidades anteriores de modo fácil, rápido e eficiente para o utilizador. Para teste do referido módulo, utilizaram-se dois casos de estudo, nomeadamente: análise dos efeitos de escala em ensaios em modelo físico, em que se efectua uma análise temporal e espectral das medições obtidas durante os ensaios; validação dos modelos BOUSSLIW e COULWAVE, em que se efectua uma comparação dos dados de laboratório e numéricos, incluindo uma análise de erros.

## 2 A FERRAMENTA SOPRO

### 2.1 Estrutura

O SOPRO, Gregório (2004), Ribeiro *et al.* (2004), Pinheiro *et al.* (2005, 2006a, 2006b) e Fortes *et al.* (2006, 2007, 2008b), permite efectuar estudos de caracterização e propagação da agitação marítima numa zona costeira ou portuária e de simulação de trajetórias de navios em portos. Este é

um pacote informático que integra um conjunto de modelos numéricos utilizados pelo Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC.

O SOPRO é constituído por uma interface gráfica com o utilizador e um conjunto de módulos correspondentes aos vários modelos numéricos usualmente empregues em estudos de caracterização da agitação marítima e simulação da navegação portuária, ou a procedimentos para a análise e apresentação de resultados.

A interface com o utilizador permite o armazenamento e manipulação de dados, a execução de modelos de propagação da agitação marítima e de simulação da trajectória de navios, assim como a obtenção dos resultados, sua análise e criação das correspondentes visualizações gráficas, Figura 1.

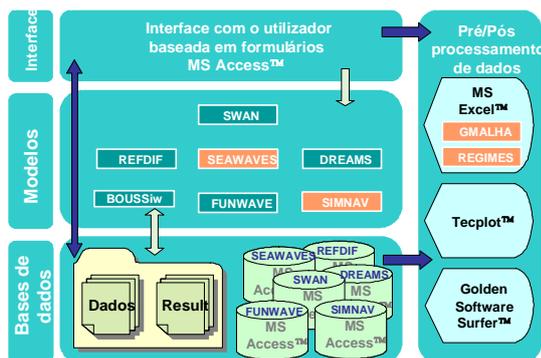


Figura 1 – Estrutura geral do SOPRO.



Figura 2 – Janela inicial do pacote SOPRO.

O conjunto de módulos do SOPRO, Figura 1 e Figura 2, inclui:

- o módulo SEAWAVES, Ribeiro *et al.* (2004), para o tratamento das séries de dados de agitação medidas ao longo da costa portuguesa;
- o módulo SWAN correspondente ao modelo espectral com o mesmo nome, SWAN, Booij *et al.* (1996), que se baseia na equação da conservação da acção da onda e é capaz de modelar a propagação não linear de agitação marítima;
- os módulos REFDIF e DREAMS correspondentes a dois modelos lineares baseados na equação de declive suave, Berkhoff (1972): REFDIF, Dalrymple e Kirby (1991), que utiliza a versão parabólica dessa equação e DREAMS, Fortes (2002), que utiliza a versão elíptica;
- os módulos FUNWAVE e FUNWAVE2D correspondentes às versões 1D e 2D do modelo FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998), que resolve as equações não-lineares de Boussinesq deduzidas por Wei *et al.* (1995);
- o módulo BOUSSiiv, que se baseia no modelo não linear de elementos finitos BOUSSiiv, Pinheiro (2007), que resolve as equações não-lineares de Boussinesq deduzidas por Nwogu (1993);
- o módulo GMALHA é um gerador de malhas de elementos finitos, Pinheiro *et al.* (2006a), capaz de produzir malhas optimizadas especificamente para modelos de propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias, e mais concretamente, para os modelos DREAMS e BOUSSiiv;
- o módulo SIMNAV, correspondente ao modelo de simulação da navegação em zonas portuárias, SIMNAV, Santos e Rita (1991);
- o módulo REGIMES, Pinheiro *et al.* (2006b) que inclui diversas rotinas para estabelecimento dos regimes geral, médios e de eventos notáveis e das amostras necessárias à determinação do regime de extremos.
- o módulo ANALISE, que foi recentemente desenvolvido e que inclui procedimentos para a: a) análise temporal e espectral de séries temporais de dados/resultados de agitação marítima

obtidos em campo, em laboratório ou com modelos numéricos; b) análise estatística (através do cálculo de viés, erro médio quadrático, índice de concordância, etc.); c) calibração dos modelos numéricos, através da comparação entre resultados numéricos e dados obtidos em laboratório ou em campo. Este procedimento também inclui uma análise de erros.

A cada módulo estão associadas as bases de dados em MS Access™ que congregam toda a informação dos projectos e ainda diversas pastas onde são armazenados todos os ficheiros criados.

O pacote SOPRO permite também a transferência automática de dados e resultados entre alguns dos módulos constituintes, nomeadamente entre os modelos SWAN, DREAMS e SIMNAV, Fortes et al. (2008b). Tal procedimento permite simular a propagação de ondas em grandes áreas costeiras, utilizando os modelos mais adequados, desde o largo até ao interior de zonas portuárias, bem como utilizar esses resultados no modelo de simulação de navegação SIMNAV.

O ambiente escolhido para o desenvolvimento do SOPRO foi o Microsoft Access™ que tem a vantagem de ter integrado a linguagem de programação por objectos e dirigida por eventos *Visual Basic for Applications* (VBA). Uma das vantagens desta linguagem é a possibilidade de utilizar e manusear diferentes aplicações Microsoft Windows.

É importante referir que com o SOPRO, é possível realizar estudos sem conhecer em detalhe o funcionamento dos modelos numéricos que lhes estão subjacentes, salvaguardando, como é óbvio, um conhecimento mínimo desejável para o bom uso da ferramenta e posterior análise de resultados.

Nas sub-seções seguintes descreve-se apenas o novo módulo ANALISE que foi recentemente desenvolvido. A descrição dos restantes módulos e potencialidades do SOPRO pode ser consultada em Gregório (2004), Ribeiro *et al.* (2004), Pinheiro *et al.* (2005, 2006a, 2006b) e Fortes *et al.* (2006, 2007, 2008b).

## 2.2 Módulo ANALISE

O objectivo do módulo ANALISE é efectuar a:

- análise temporal e espectral de séries temporais de dados;
- análise estatística de séries discretas de dados;
- análise comparativa entre dois tipos de dados, sejam eles numéricos ou medidos (em campo ou em laboratório).

Após a abertura do módulo ANALISE, surge uma janela com 3 operações disponíveis, Figura 3.

- a) Análise temporal e espectral de séries temporais de dados;
- b) Análise estatística de uma série discreta de dados;
- c) Comparação de dados medidos e numéricos.

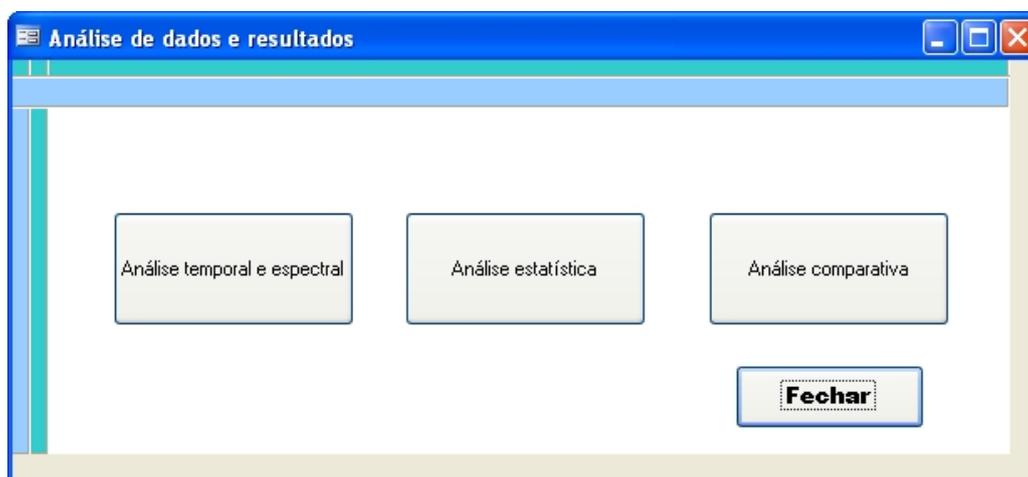


Figura 3 – Módulo Análise. Formulário principal.

### 2.2.1 Formulário “Análise temporal e espectral”

No módulo SOPRO/ANALISE, a análise temporal de uma série temporal de dados (registo) é efectuada recorrendo ao programa em FORTRAN, ANOIAGI (Carvalho, 1973). Obtêm-se, para cada registo, os valores de HM (altura máxima), HS (altura significativa), Hmed (altura média), TS (período significativo) e Tmed (período médio).

Quanto à análise espectral desses registos é efectuada com o programa FORTRAN, SPEC, Gil (2006). É calculada a densidade de energia associada a cada uma das frequências correspondendo ao espectro de energia das ondas. Com base no espectro, obtêm-se os valores da altura significativa, Hm0 (equivalente espectral de HS), TZ (período médio, equivalente a Tmed) e TP (período de pico do espectro, equivalente a TS).

A execução destes programas é efectuada através de um conjunto de formulários pertencente ao módulo SOPRO/ANALISE.

Após accionar o botão “Análise temporal e espectral”, surge o formulário de introdução das principais características dos registos de dados a tratar, Figura 4a, como por exemplo: o número de registos a analisar, a frequência de aquisição, o intervalo de tempo de análise, etc. Após a introdução dos dados, será necessário aceder ao formulário “Run ANOAGI”, que permite a execução do programa ANOAGI, Figura 4b. Para visualização dos resultados, nomeadamente dos valores de HM (altura máxima), HS (altura significativa), Hmed (altura média), TS (período significativo) e Tmed (período médio), é necessário aceder ao formulário “Análise temporal”, Figura 5a. O formulário “Análise espectral” permite a execução do programa SPEC e a determinação dos parâmetros espectrais dos registos, Figura 5b.

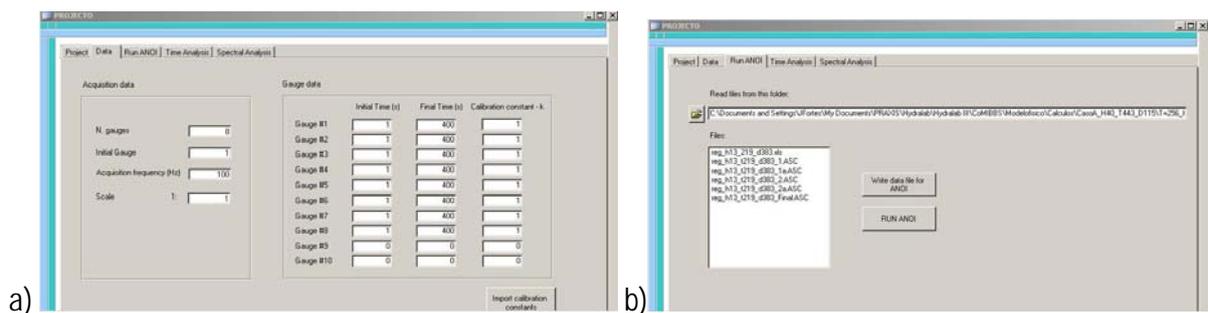


Figura 4 – Módulo Análise - Formulário “Análise temporal e espectral”. a) Introdução de dados; b) Run ANOAGI.

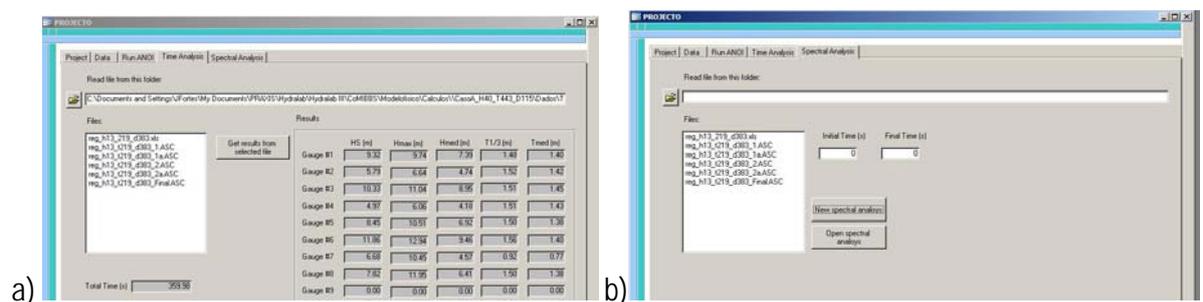
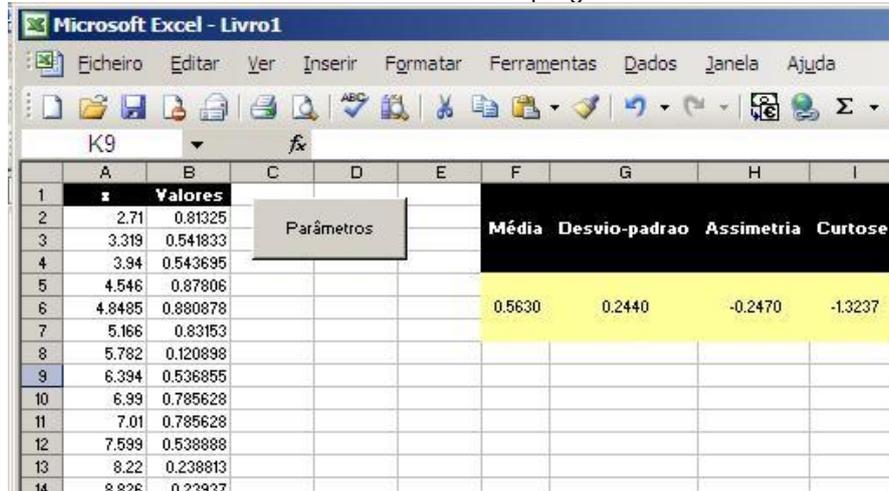


Figura 5 – Módulo ANÁLISE - Formulário “Análise temporal e espectral”: a) Análise temporal; b) Análise espectral.

### 2.2.2 Formulário “Análise Estatística”

No módulo SOPRO/ANALISE, a análise estatística efectuada corresponde aos cálculos dos valores da média, desvio-padrão, assimetria e curtose de uma série discreta de valores.

Após aceder ao formulário “Análise estatística” surge uma folha de Excel em que uma das colunas corresponde aos valores a tratar. Quando se acciona o botão “Parâmetros” automaticamente são calculados os valores atrás referidos com o auxílio do programa ESTATISTICA, Fortes (2009).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		2.71	0.81325						
3		3.319	0.541833						
4		3.94	0.543695						
5		4.546	0.87806						
6		4.8485	0.880878			0.5630	0.2440	-0.2470	-1.3237
7		5.166	0.83153						
8		5.782	0.120898						
9		6.394	0.536855						
10		6.99	0.785628						
11		7.01	0.785628						
12		7.599	0.538888						
13		8.22	0.238813						
14		8.826	0.23937						

Figura 6 – Módulo Análise - Formulário “Análise estatística”.

### 2.2.3 Formulário “Análise Comparativa”

A análise comparativa entre dois tipos de dados é realizada por intermédio de uma análise de erros com a determinação dos valores do viés (*bias*), erro médio quadrático (*RMSE*) e dos índices de concordância (Chwala, 1995).

O erro médio absoluto (*bias*) é dado pela equação:

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (1)$$

onde  $x_i$  são os valores experimentais (referência),  $y_i$  são os valores dos modelos numéricos. O erro médio quadrático (*RMSE*) é dado pela equação

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (2)$$

O índice de concordância, *ic*, representado pela seguinte equação

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (3)$$

em que  $\bar{x}$  é a média do valor experimental e  $n$  é o número de pontos. O índice de concordância varia de zero a um, sendo tanto maior quanto maior for a concordância dos valores numéricos com os experimentais.

Após aceder ao Formulário “Análise comparativa” surge uma folha de Excel, em que na coluna “dados” e “numéricos” se encontram os valores que se pretende comparar.

Quando se acciona o botão “Análise comparativa” são automaticamente calculados os valores atrás referidos com o auxílio do programa COMPARACAO, Fortes (2009).



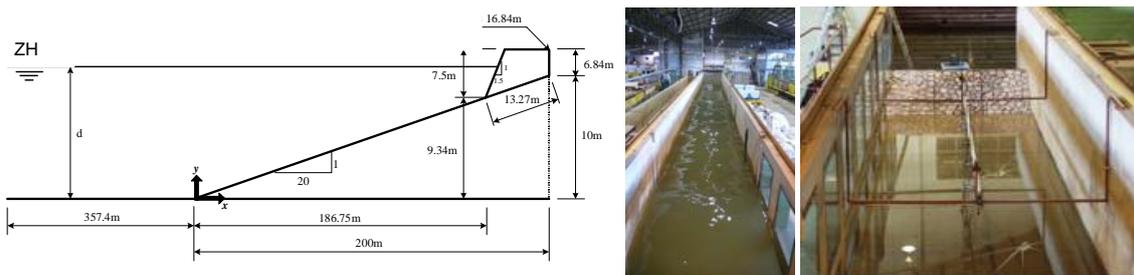


Figura 8 - Protótipo. Canais: COI1 e COI2.

### 3.1.2 Condições de agitação incidente

Em ambos os canais, os testes foram realizados utilizando ondas regulares e irregulares.

As condições de agitação incidente, em valores de protótipo, correspondem a ondas regulares e irregulares com quatro alturas de onda diferentes (1 m, 2 m e 4 ou 6 m) associadas a três períodos de onda 8 s, 12 s e 14 s. Consideraram-se também dois níveis de maré: +0.0 m ZH e +1.5 m ZH

Os testes com ondas regulares tiveram a duração de 5 minutos, enquanto a duração dos testes com ondas irregulares variou com o valor do período da onda, entre 30 e 74 minutos, de forma a se ter uma média de 1000 ondas por ensaio. Efectuaram-se várias repetições de cada teste, i.e., em média 4 repetições para cada condição de agitação incidente. Para a agitação incidente irregular, foi usado um espectro JONSWAP, com um factor de pico de  $\gamma=3.3$ .

No canal COI2, foram efectuados 132 ensaios: 96 com ondas regulares e 36 com ondas irregulares. No canal COI1, foram realizadas 176 ensaios: 128 com ondas regulares e 48 com ondas irregulares.

Finalmente, foi realizado um conjunto de trinta repetições à escala 1:30, para uma condição de agitação regular incidente de  $T=12$  s e  $H=4$  m, e para profundidades,  $d$ , de 10 m e 11.5 m (todos os valores referidos ao protótipo).

### 3.1.3 Equipamento

Ao longo do canal, foi instalado diverso equipamento de medição, que permitiu obter em cada ensaio, séries da elevação da superfície livre, da pressão, do espraimento e dos galgamentos na estrutura. Neste trabalho, apenas se descrevem as medições correspondentes à elevação da superfície livre.

Estas medições foram obtidas com sondas resistivas colocadas ao longo do canal, 6 no canal COI2 e 4 no canal COI1, Figura 9. Duas daquelas sondas ficaram sempre na mesma posição, frente ao gerador de ondas, para garantir a repetibilidade e o controle de qualidade dos ensaios efectuados, enquanto as restantes sondas tomaram diferentes posições ao longo do canal, consoante os testes efectuados.

Para cada condição de agitação incidente e escala, o ensaio foi repetido quatro vezes, no caso de COI1 e seis vezes no caso de COI2, posicionando-se a estrutura móvel com o conjunto das sondas em localizações diferentes, a fim de medir a elevação da superfície livre em 24 diferentes localizações ao longo da rampa.



Figura 9 - Duas sondas junto ao batedor (esq.); Quatro sondas ao longo do canal (centro) – COI2; Seis sondas ao longo do canal – COI1 (dir.).

### 3.1.4 Resultados

Dada a enorme quantidade de dados medidos (resultantes como referido de 224 ensaios com ondas regulares e de 84 com ondas irregulares), a utilização do formulário SOPRO/ ANALISE foi fundamental para a análise desses dados. Com base nas séries temporais da elevação da superfície livre medidas efectuou-se o cálculo da altura de onda significativa ao longo do canal (utilizando o método do zero ascendente) e a respectiva densidade espectral.

A fim de ilustrar os dados medidos e as respectivas análises realizadas, foi seleccionada uma condição de agitação para ondas regulares:  $T=14$  s e  $H=4$  m, para  $d=11.5$  m, o que corresponde a:  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:10,  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:20 e  $T=2.56$  s,  $H=0.13$  m,  $d=0.383$  m à escala 1:30.

A Figura 10 mostra parte das séries temporais obtidas com os ensaios com ondas regulares para a condição de ensaio de  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m, i.e.,  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:10 nos pontos  $x=7.5$  m e  $x=10$  m.

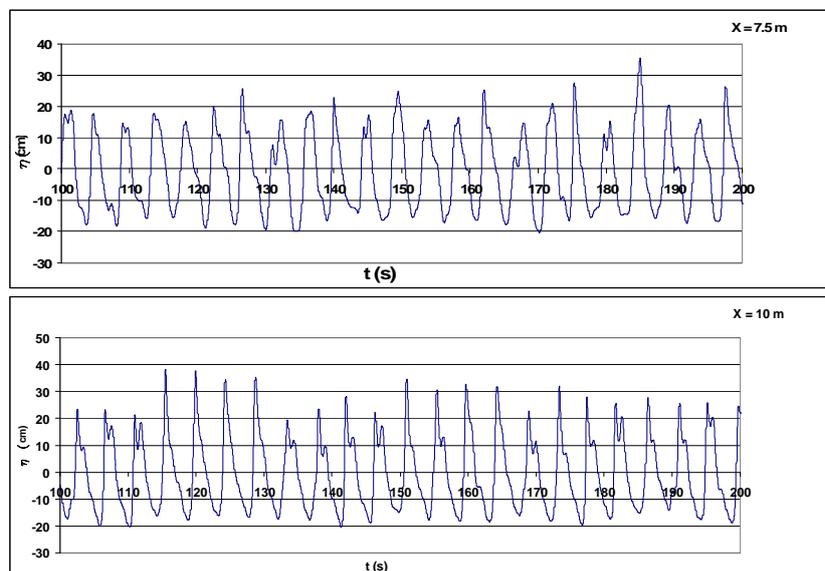


Figura 10 - Séries temporais da elevação da superfície livre para  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m nas sondas colocadas em  $x=7.5$  m e  $x=10$  m, à escala 1:10.

A partir das séries temporais da elevação livre em cada uma das posições das sondas ao longo do canal e utilizando o método do zero ascendente, com o programa SOPRO/ANALISES e os formulários "Análise temporal" e "Análise Espectral", foram calculadas as alturas de onda significativa correspondentes e efectuada a análise espectral.

A Figura 11 representa os valores da altura significativa, ao longo do canal com ondas regulares para a condição de agitação:  $T=14$  s e  $H=4$  m, para  $d=11.5$  m, obtidas nas 3 diferentes escalas (1:10, 1:20 e 1:30), sendo os valores referidos ao protótipo. Apresenta-se também para as séries obtidas na posição  $x=7.5$  m e  $x=10$  m, para a escala 1:10, os espectros obtido.

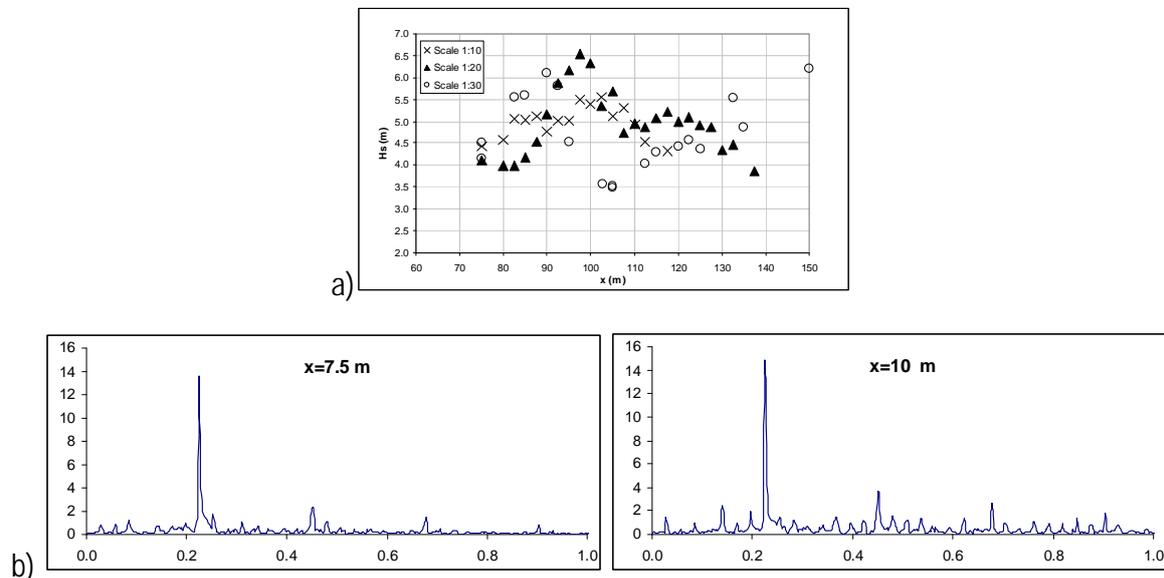


Figura 11 -  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m. Alturas significativas ao longo do canal obtidos para escalas 1:10, 1:20 e 1:30 (valores referidos ao protótipo); b) Análise espectral.

A Figura 11a) mostra que, para as escalas 1:10 e 1:20, a evolução da altura de onda ao longo do canal é semelhante, i.e., há um aumento da altura de onda até à rebentação, ocorrendo depois um decréscimo, tal como esperado. As posições da rebentação são também semelhantes, i.e., 9.5 m e 10.0 m para as escalas 1:10 e 1:20, respectivamente. No entanto, existem algumas diferenças entre a altura das ondas ao longo do canal, obtidas nestes ensaios.

À escala 1:10, chegou-se a valores menores na zona de rebentação (entre  $x=90$  m e  $x=100$  m) (e mesmo após esta) inferiores aos observados à escala 1:20 e 1:30. Para estas diferenças contribui o facto de se terem verificado reflexões significativas à escala 1:10, que não foram tão significativas nos ensaios às outras escalas. Quanto a escala 1:30, o andamento da altura de onda apresenta algumas diferenças relativamente ao verificado nas outras escalas: a rebentação ocorre mais cedo e após a diminuição da altura de onda devido a essa rebentação dá-se o empolamento da onda, enquanto nas outras escalas as alturas de onda tendem a diminuir após a rebentação.

A Figura 10 e a Figura 11a) mostram que a forma da onda toma uma forma fica mais assimétrica à medida que a onda se propaga ao longo do domínio, tornando-se as cristas mais aguçadas e as cavas mais achatadas. Verifica-se também o aparecimento de componentes harmónicas cuja energia associada vai aumentando com a distância ao batedor. No caso de  $x=7.5$  m a maior parte da energia concentra-se no período de pico e apenas uma parcela muito pequena está associada a uma componente harmónica, no caso de  $x=10$  m, a energia está dividida pela frequência principal e pela 2ª componente harmónica. As restantes componentes têm progressivamente menos energia à medida que a frequência aumenta.

É de salientar que a análise de outros resultados destes ensaios, Fortes et al. (2008a) e Lemos et al. (2009), relativos a agitação incidente com menor altura e período (e com menores reflexões na estrutura) os valores de altura de onda obtidos para as três escalas têm um andamento bastante semelhante ao longo do canal sendo da mesma ordem de grandeza. Inclusive a altura na zona de rebentação e a posição de rebentação são semelhantes nas três escalas.

### 3.2 Aplicações dos modelos numéricos COULWAVE e BOUSSIIW

#### 3.2.1 Descrição geral

O segundo caso de teste corresponde à utilização de SOPRO / ANALISE na comparação dos resultados obtidos com dois modelos numéricos não-lineares do tipo Boussinesq, COULWAVE (Lynett e Liu, 2002) BOUSSiiw (Pinheiro, 2007) e com resultados experimentais. Analisa-se o comportamento daqueles modelos na simulação numérica da propagação de ondas sobre um baixo formado por uma calote esférica que foi estudada por Chawla (1995) utilizando modelação física e numérica – neste caso apenas com modelos parabólicos de refração-difracção.

Na Figura 12 define-se a geometria dos casos de teste e a localização das secções onde foram efectuadas medições. As dimensões do tanque são 20x18.2 m e as profundidades máxima e mínima são 0.45 m e 0.08 m, respectivamente. O centro do baixo está localizado nas coordenadas  $x=5.0$  m e  $y=8.98$  m, resultando em uma profundidade mínima no topo de 0.08 m. O baixo consiste numa calote de uma esfera, de raio igual a 9.1 m, seccionado pelo fundo plano de profundidade 0.45 m.

Para validação, utilizou-se o caso 1 proposto por Chawla (1995), que corresponde a uma onda de altura de 0.195 m e período de 0.75 s.

Nesta análise, avalia-se a exactidão dos modelos numéricos comparando os respectivos resultados com os experimentais de Chawla.

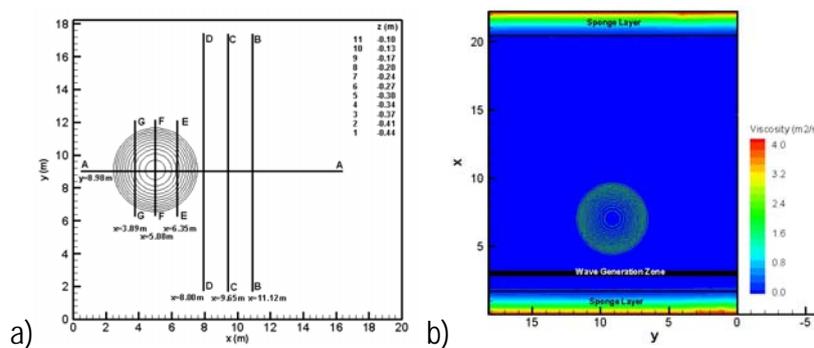


Figura 12 - Configuração geométrica do a) tanque; b) domínio de cálculo.

Salienta-se que o modelo COULWAVE é um modelo totalmente não linear e dispersivo enquanto que BOUSSiiw é fracamente não linear e dispersivo. Os cálculos foram efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM.

Nas próximas secções, apresentam-se as condições de cálculo, os resultados numéricos obtidos com os modelos numéricos BOUSSiiw e COULWAVE e as comparações em resultados numéricos e experimentais.

#### 3.2.2 Condições de cálculo do modelo BOUSSiiw

O domínio de cálculo e a batimetria considerados nos cálculos efectuados com o modelo BOUSSiiw são os indicados na Figura 12 b). O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 72 140 nós e 143 286 elementos. A densidade de nós da malha foi definida de modo a obter uma média de 10 pontos por comprimento de onda, para um período de 0.75 s.

Na Figura 12 b) ilustra-se a localização das zonas absorventes e da zona de geração das ondas. A zona de geração está centrada na coordenada  $x = 3$  m e tem uma largura de 0.89 m, onde se impôs a condição de agitação de ondas regulares monocromáticas. Em todas as fronteiras do domínio consideraram-se condições de reflexão total e colocaram-se duas zonas absorventes (*sponge layers*)

no início e no fim do domínio. As zonas absorventes têm uma largura de 2 vezes o comprimento de onda, isto é, 1.78 m.

O passo de tempo utilizado foi de 0.01 s. Utilizou-se um parâmetro de difusão artificial,  $\gamma$ , igual a  $1.0 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, definido após vários testes preliminares. O intervalo de tempo simulado teve uma duração de 40 s.

### 3.2.3 Condições de cálculo do modelo COULWAVE

O domínio computacional do modelo COULWAVE é bidimensional, com 20x9.1m. Com efeito, dada a simetria do exemplo em questão em relação ao centro do baixio, apenas se considerou metade do domínio de cálculo da Figura 12 b), para diminuir o esforço computacional envolvido.

A batimetria considerada nos cálculos efectuados com o modelo COULWAVE é a indicada na Figura 12 b). A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de  $dx=0.05$  m. O próprio modelo gera uma malha de diferenças finitas com base num número mínimo de pontos dado pelo utilizador, o qual, neste caso, foi de 50 pontos. O número de Courant admitido foi igual a 0.1.

A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição  $x=4$  m. Impuseram-se condições de fronteira de reflexão total a todas as fronteiras do domínio e colocaram-se duas zonas absorventes (*sponge layers*) nos extremos do domínio com um comprimento de onda de largura.

Não se considerou o atrito com o fundo. Para os restantes parâmetros do modelo COULWAVE adoptaram-se os valores sugeridos pelo manual, Lynett e Liu (2002). O intervalo de tempo simulado teve uma duração de 50 s.

### 3.2.4 Apresentação e análise de resultados

Para as condições anteriormente definidas, foram efectuados os cálculos com os modelos COULWAVE e BOUSSiiw. Os resultados (elevação da superfície livre) dos modelos foram obtidos em todo o domínio de cálculo, e em particular, nas posições das secções A-A a G-G.

Para cada modelo, a partir das séries temporais de elevação da superfície livre numéricas e experimentais, foram calculados os valores da altura de onda significativa ( $H_s$ ), utilizando o formulário "Análise temporal". Procedeu-se, depois à determinação dos valores do índice de agitação significativa (relação entre a altura de onda significativa num ponto do domínio e a altura de onda incidente).

Na Figura 13, apresenta-se a comparação dos valores dos índices de agitação dos modelos BOUSSiiw e COULWAVE com os experimentais, ao longo do domínio de cálculo, nas secções A-A a G-G.

Com o formulário "Análise comparativa", obtiveram-se os parâmetros estatísticos *ic*, *bias* e *RMSE* para quantificar as diferenças entre as alturas de onda significativas experimentais e as numéricas para todas as secções, Figura 14.

Da Figura 13 e Figura 14 pode-se concluir que:

- ❖ Em termos gerais, e para todos os testes, os modelos numéricos conseguem reproduzir bastante bem o andamento e a ordem de grandeza dos resultados experimentais. Com efeito, ambos os modelos numéricos conseguem simular o emolamento da onda na zona do baixio e após este, e depois o decréscimo da altura da onda, como se pode constatar na secção A-A. Verifica-se também nas outras secções um acompanhamento bastante razoável dos valores numéricos aos valores experimentais. Embora os modelos numéricos envolvidos tenham formulações diferentes – o COULWAVE é totalmente não-linear enquanto o BOUSSiiw é fracamente não-linear - os resultados obtidos por ambos modelos são muito semelhantes.
- ❖ Os modelos apresentaram comportamentos próximos entre si e com o experimental no que se refere à secção longitudinal A-A e às secções transversais no baixio G-G, F-F e E-E. Mas existem diferenças entre os valores numéricos e os experimentais especialmente na zona após o baixio.

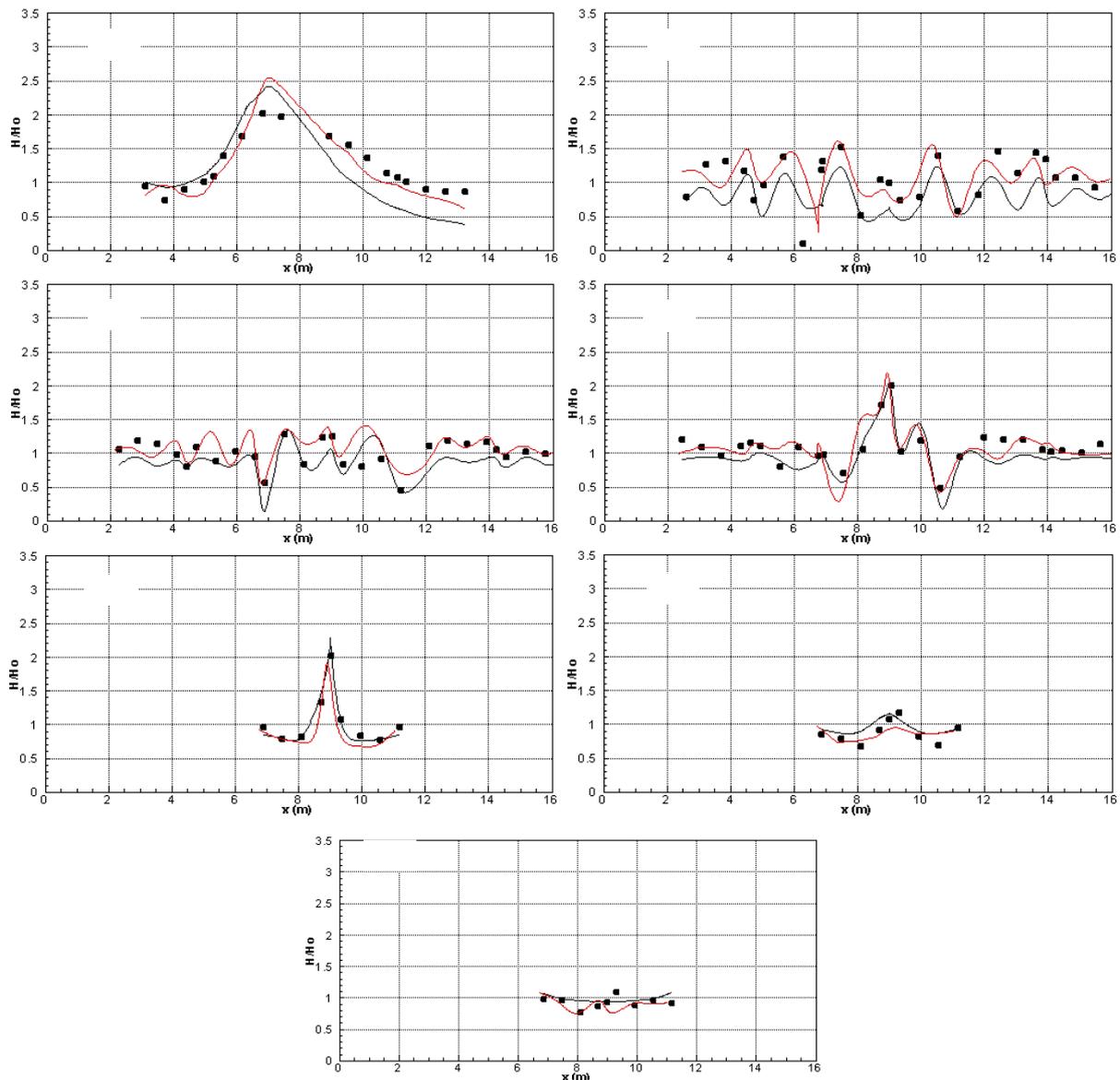


Figura 13 - Teste 1 - Secção A-A a G-G. Índices de agitação. Valores experimentais e numéricos do BOUSSiiv (vermelho), COULWAVE (preto) e experimentais (pontos a preto).

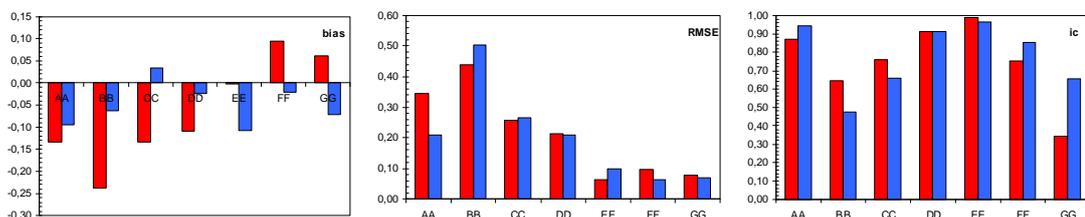


Figura 14 - Teste 1. Secção A-A a G-G. Parâmetros estatísticos dos modelos numéricos BOUSSiiv (azul), COULWAVE (vermelho). (a) *bias*, (b) *RMSE*, (c) *ic*.

- ❖ Na secção A-A verifica-se que os resultados numéricos de COULWAVE e BOUSSiiv tendem a sobre-estimar os valores máximos do índice de agitação sobre o baixo enquanto após este os modelos sub-estimam os índices, tendo o COULWAVE um pior comportamento.
- ❖ Nas secções G a E, há também diferenças, verificando-se que o modelo BOUSSiiv subestima um pouco as alturas de onda. O mesmo se passa para a secção D-D, logo a jusante do baixo. Note-se

que nesta secção os efeitos não-lineares condicionam a propagação da onda, mas ambos os modelos conseguiram representar de forma razoável este comportamento.

- ❖ Já nas secções B-B e C-C, mais afastadas do baixo, a onda apresenta deformações de menor magnitude, mas que são o resultado das alterações significativas que sofreu ao longo da sua propagação. Embora os modelos acompanhem estas variações razoavelmente as diferenças face aos resultados experimentais são mais significativas.

Na maioria das secções, os modelos tendem a subestimar as alturas de onda. O gráfico do parâmetro viés mostra claramente esta tendência. Apenas na secção F-F e G-G é que o modelo COULWAVE sobrestimou os resultados mais significativamente. O erro médio quadrático é baixo nas secções E-E a G-G mas atinge valores bastante elevados na secção B-B. Os resultados, tanto para o COULWAVE como para o BOUSSiiv, têm um índice de concordância acima de 0.7, com excepção da secção B-B, C-C (só BOUSSiiv), G-G.

## 4 CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentaram-se as últimas alterações feitas no pacote de software integrado SOPRO para a análise temporal, espectral e estatística de registos de dados e para a análise comparativa entre dois tipos de dados (medidos e numéricos).

Dois casos de estudo foram usados para ilustrar a importância desta nova funcionalidade do pacote SOPRO: a análise temporal e espectral de dados medidos em laboratório e a validação dos modelos numéricos COULWAVE e BOUSSiiv.

Nos exemplos apresentados, verificou-se que o SOPRO/ANALISES permite realizar a obtenção de resultados e a análise comparativa, de forma interactiva, fácil e amigável. Note-se que esta funcionalidade é aplicável a qualquer tipo de dados, medidos, numéricos, elevação da superfície livre, pressão, etc. Contudo, ainda existem muitos melhoramentos a serem implementados no SOPRO, como, por exemplo; a inclusão de módulos de análise de risco em relação à inundação, à navegabilidade, etc. e a uniformização das estruturas de dados e resultados dos vários modelos. Alguns destes melhoramentos encontram-se, presentemente, em desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/AMB/67450/2006, PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006.

## BIBLIOGRAFIA

- BERKHOFF, J.C.W. (1972) – “Computation of combined refraction-diffraction”. *Proc. 13th International Conference in Coastal Engineering*, Vancouver, Canada, Vol. 2, pp. 471-490.
- BOUIJ, N.R.; HOLTHUIJSEN, L.H.; RIS, R.C. (1996) – “The SWAN wave model for shallow water”, *ICCE '96*, Orlando, pp. 668-676.
- CHAWLA, A, Wave transformation over a submerged shoal. Tese de mestrado. Universidade de Delaware, 1995.
- DALRYMPLE, R.A.; KIRBY, J.T. (1991) – *REF/DIF 1 Version 2.3 Documentation manual. Combined refraction/diffraction model*, CACR Report nº 91-2, University of Delaware, Janeiro.
- FORTES, C.J.E.M. (2002) – *Transformações não lineares de ondas em zonas portuárias. Análise pelo método dos elementos finitos*, Tese de doutoramento, Engenharia Mecânica, IST.

- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.; SANTOS, J.A.; NEVES, M.G.; CAPITÃO, R. (2006) – “SOPRO – Pacote integrado de modelos de avaliação dos efeitos das ondas em portos”. *Tecnologias da Água*, Edição I, Março, pp.51-61.
- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.V.; PALHA, A.C. (2007) – “O pacote SOPRO\_3.1: Evoluções recentes”. *4as. Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Lisboa, Outubro.
- FORTES, C.J.E.M.; LEMOS, R.; NEVES, M.G.; PALHA, A.; PINHEIRO, L.; CAPITÃO, R.; SANTOS, J. A., SOUSA, I. (2008a) - Physical Modelling of Wave Propagation and Breaking in a Flume Using Different Geometric Model Scales. COASTLAB 2008. Bari, Itália.
- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L., SANTOS, J.A. (2008b) – Acoplagem de modelos numéricos no Pacote SOPRO. 9º Congresso da Água, Estoril, Cascais, 2 a 4 de Abril.
- FORTES (2009) – Programas FORTRAN: ESTATISTICA e COMPARACAO. Relatório LNEC 2009.
- GIL, L. (2006) – Programa FORTRAN: SPEC. Relatório. Universidade Nova de Lisboa, 2006, (5 pp).
- GREGÓRIO, T.S.M. (2004) - *DREAMS-SIMNAV. Relatório do Projecto Final de Curso*. Eng. Informática. Universidade Nova de Lisboa, (88 pp).
- KIRBY, J.T.; WEI, G.; CHEN, Q. (1998) – *FUNWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user's manual*, UD, Newark, Rel.CACR-98-06, September.
- LEMOS, R. FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.V. (2009) Desempenho do modelo COULWAVE na simulação do espraiamento. Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009. Barcelona.
- LYNETT P, LIU PL-F (2004) “Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.
- NWOGU, O. (1993) “Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation”. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. **119**, 6, pp. 618 - 638.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.; SANTOS, J.A.; NEVES, M.G.; CAPITÃO, R.; COLI, A.B. (2005) – “SOPRO. Caracterização da agitação marítima. Aplicações”, *4as. Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Angra do Heroísmo, Outubro.
- PINHEIRO, L.V. (2007) – *Um método de elementos finitos para a discretização das equações de Boussinesq estendidas*. Tese de mestrado. Engenharia Mecânica, IST.
- PINHEIRO, L.V.; FERNANDES, J.L.M.; FORTES, C.J.E.M. (2006a) – “Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias”. *I CNMNMFT*, Lisboa, 8 e 9 de Junho.
- PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS, J.A.; NEVES, M.G. (2006b) – “Caracterização de regimes de agitação marítima utilizando a ferramenta SOPRO”, *8º Congresso da Água*, Figueira da Foz.
- RIBEIRO, M.; GONÇALVES, A.; CAPITÃO, R.; FORTES, C.J. (2004) – “Base de dados de agitação marítima da costa portuguesa”. *7º Congresso da Água*, Lisboa, Março.
- SANTOS, J.A.; RITA, M.M. (1991) – “The width of the new artificial channel of the port of Lisbon. An application of the SIMNAV simulation model”. *7th International Symposium on Coastal and Ocean Management, COASTAL ZONE 91*. Long Beach, California.
- WEI, G.; KIRBY, J.T.; GRILLI, S.T.; SUBRAMANYA, R. (1995) – “A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations”, *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engng*. **120**: 251-261.