



**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FORMULAÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DO
COEFICIENTE DE REFLEXÃO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DO
PORTO DE VILA DO PORTO, NA ILHA DE SANTA MARIA, AÇORES**

Sofia Costa Freire^(1,2), Maria da Graça Neves⁽³⁾, António Pires Silva⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. ⁽²⁾ CONSULMAR, Projectistas e Consultores, Lda.

⁽³⁾ Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

RESUMO

Uma das principais aplicações da caracterização da reflexão em hidráulica marítima através de coeficientes está associada aos modelos numéricos de propagação da agitação, que constituem ferramenta fundamental para a modelação e previsão dos fenómenos físicos relevantes na zona costeira. Todavia, a sua utilização ainda apresenta limitações, nomeadamente na definição dos parâmetros necessários para a caracterização das estruturas e respectivas condições de fronteira.

Na modelação da propagação de ondas em águas pouco profundas, surge a necessidade de quantificar com rigor os parâmetros de reflexão nas fronteiras do domínio, uma vez que estes condicionam as soluções estudadas.

Neste trabalho, procede-se à avaliação do desempenho de várias formulações apropriadas para quantificar a reflexão nas fronteiras duma bacia portuária da costa portuguesa – o porto de Vila do Porto em Santa Maria, Açores. Os resultados, em forma de índices de agitação, medidos em modelo físico e estimados em modelo numérico são comparados e analisados, dando-se relevo ao estudo da influência do coeficiente de reflexão escolhido nos valores da agitação obtida no interior do porto.

1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho, procede-se à avaliação do desempenho de várias formulações para avaliar a reflexão nas fronteiras de uma bacia portuária da costa portuguesa – o porto de Vila do Porto em Santa Maria, Açores. Os resultados obtidos com cada uma das formulações serão utilizados para caracterizar, no que se refere à reflexão, a fronteira do modelo numérico.

Os resultados, em forma de índices de agitação, medidos em modelo físico e estimados em modelo numérico (CGWAVE, modelo numérico de propagação da agitação em zonas portuárias de Demirbilek e Panchang (1998) baseado na equação “mild-slope”) são comparados e analisados, dando-se especial relevo ao estudo da influência do coeficiente de reflexão escolhido nos valores da agitação obtida no interior do porto.

A aplicação ao porto de Vila do Porto deve-se às razões seguintes:

- este é um caso que já foi estudado em modelo físico e por isso existem observações que podem ser analisadas e comparadas com os resultados agora obtidos através do modelo matemático. Embora os ensaios efectuados em modelo físico não tenham sido especialmente concebidos para avaliar o comportamento das expressões de cálculo do coeficiente de reflexão, considerou-se que poderiam ser úteis para este objectivo;
- o porto apesar de pequeno, apresenta uma grande variedade de estruturas, o que o torna um caso de maior interesse para este tipo de análise relativa ao estudo da influência do coeficiente de reflexão.

O porto de Vila do Porto situa-se na ilha de Santa Maria no Arquipélago dos Açores e constitui o único porto da ilha. A zona portuária é abrigada por um molhe com cerca de 350 metros de comprimento, com orientação aproximadamente E-W, Figura 1. No interior da zona portuária foi construído recentemente um cais para atracação dos navios que efectuem o transporte de passageiros entre ilhas - o cais ferry, o qual termina numa rampa, Figura 1, (Fortes *et al.*, 2006).

No interior deste porto, pretende-se construir um núcleo de recreio, na zona indicada na Figura 1.



Figura 1 - Porto de Vila do Porto. Cais ferry: Rampa e Extremidade Nascente. Localização do futuro núcleo de recreio (Fortes *et al.*, 2006).

2 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

O LNEC efectuou estudos de agitação em modelo físico, Fortes *et al.* (2005), de modo a avaliar as implicações da construção do núcleo de recreio na agitação marítima no interior do porto de Vila do Porto e nas condições de abrigo no interior desse núcleo de recreio (Fortes *et al.*, 2006).

Efectuaram-se ensaios de agitação para as situações sem e com a obra de protecção do núcleo de recreio e foram testadas seis configurações diferentes para a zona portuária, retendo-se, para o caso em estudo, apenas uma das seis. Os ensaios de agitação foram realizados com ondas irregulares (espectro Jonswap: unidirectional, $\gamma=3.3$) provenientes de três direcções (SW, S e SE), associadas, cada uma delas, a três períodos e a duas alturas de onda.

Os ensaios em modelo físico, Fortes *et al.* (2005), foram realizados num tanque de ondas irregulares do pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC, com uma área aproximada de 650 m². Foi utilizado um gerador de ondas irregulares, cuja pá tem 6 metros de comprimento e 0,80 metro de altura. O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei da semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:55.

A configuração retida corresponde à Configuração 3 (Fortes *et al.*, 2005), que inclui o núcleo de recreio (Solução I), com a rampa e com a extremidade nascente do cais ferry, Figura 2.

Para esta configuração foram testados os valores apresentados no Quadro 1 correspondendo a 18 condições.

Quadro 1 – Valores ensaiados em modelo físico.

Variável	Valores ensaiados
Rumos de incidência	SW, S e SE
Períodos (s)	8, 11, 15
Alturas de onda (m)	2 e 5
Nível de maré (m)	+2,0 ZH

Cada ensaio foi realizado três vezes, de modo a confirmar os resultados obtidos.

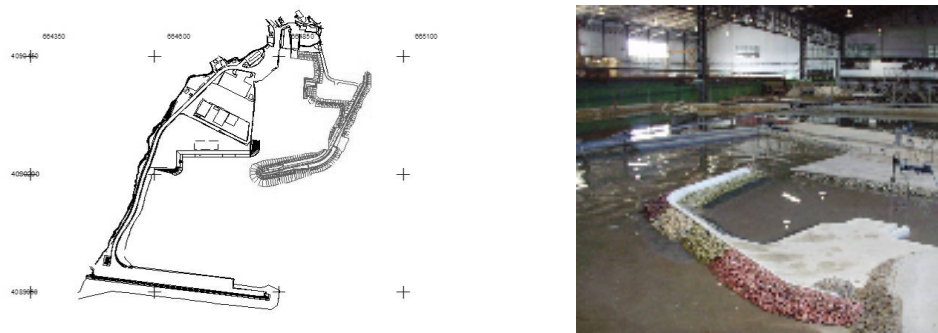


Figura 2 - Aspecto geral do ensaio em modelo físico com o núcleo de recreio (Solução I), com rampa e com a extremidade nascente do cais ferry (Fortes *et al.*, 2006).

Para todos os ensaios, foram seleccionados quinze pontos sobre os quais se viria a proceder ao registo das características da agitação marítima, Figura 3. Para além destes pontos, foi também considerado um ponto em frente ao gerador, onde se efectuou a medição da agitação marítima gerada.



Figura 3 - Pontos de medição no interior do porto de Vila do Porto.

Com base nos registos obtidos nos quinze pontos já referidos, foram calculados índices de agitação, para cada condição de agitação ao largo. Os índices de agitação, H/H_0 , são dados pela relação entre a altura de onda medida em cada ponto, H , e a altura de onda medida no ponto à saída do gerador de ondas, H_0 , em cada ensaio.

Efectuou-se, em cada ponto de medição, a média dos valores dos índices de agitação obtidos no ensaio, na 1^a repetição e na 2^a repetição (Fortes *et al.*, 2006).

3 ENSAIOS EM MODELO NUMÉRICO

3.1 Modelo CGWAVE

O modelo numérico utilizado foi o CGWAVE (Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation), modelo numérico de propagação da agitação em zonas portuárias de Demirbilek e Panchang (1998) baseado na equação não linear do declive suave (“mild-slope”), que permite a simulação da agitação em portos, costas abertas, entradas de estuários e na presença de estruturas fixas e flutuantes.

O modelo reproduz os efeitos combinados da refracção, difracção, dissipação por atrito no fundo, rebentação, dispersão não-linear de amplitude e dissipação na entrada de bacias portuárias. Relativamente às condições de fronteira, existem as fronteiras de reflexão parcial e as fronteiras abertas. É nas fronteiras de reflexão parcial, que se aplicam ao longo da costa e quando existem estruturas permeáveis, que o utilizador terá que fornecer o coeficiente de reflexão, Cr.

O modelo CGWAVE está inserido num programa de pré e pós-processamento chamado Surface Modelling System (Sistema de Modelação da Superfície - SMS) (Jones e Richards, 1992), utilizado na geração da malha de elementos finitos e no processamento dos resultados. Na aplicação do modelo CGWAVE, foram adoptadas as versões SMS9.0 e SMS10.0, respectivamente, para as simulações com agitação regular e irregular.

3.2 Domínio de cálculo

A Figura 4 apresenta a batimetria e o domínio de cálculo do modelo CGWAVE, para a configuração em estudo. Como já referido na descrição do caso de estudo, testou-se apenas uma configuração portuária, com marina, com uma rampa e com a extremidade nascente do cais ferry.

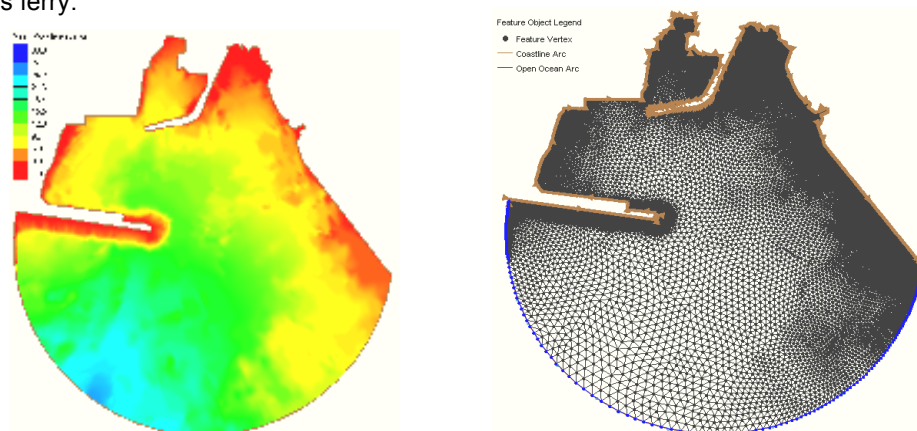


Figura 4 – Porto de Vila do Porto. Batimetria e domínio de cálculo (esquerda), malha de cálculo (direita).

O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos triangulares, com um espaçamento entre nós variável com a profundidade, apresentada na Figura 4.

3.3 Condições de fronteira

Os cálculos de agitação com o modelo numérico foram realizados para algumas das condições de agitação incidente ensaiadas em modelo físico, nomeadamente:

- nível de preia-mar, +2.0 m (Z.H.);
- direcção de onda de S e SE;
- períodos de 11 s e 15 s;
- alturas de onda de 1,0 e 2,0 metros.

Embora os ensaios em modelo físico tenham sido feitos com agitação irregular, optou-se inicialmente por fazer as simulações apenas com agitação regular. Esta opção foi feita em função da duração do tempo de simulação.

Assim as condições de fronteira aberta a simular corresponderam a seis combinações. As quatro primeiras combinações na adopção de agitação regular e as duas últimas quando se adoptou a agitação irregular, com as características que se apresentam no Quadro 2.

Quadro 2 – Simulações efectuadas em modelo numérico.

Tipo do modelo	Tipo de agitação	Rumo	Altura de onda (m)	Período (s)	Nível de maré (m)
linear	regular	S	1,0	11	+2,0 (ZH)
linear	regular	S	1,0	15	+2,0 (ZH)
linear	regular	SE	1,0	11	+2,0 (ZH)
linear	regular	SE	1,0	15	+2,0 (ZH)
não linear	irregular	S	2,0	15	+2,0 (ZH)
não linear	irregular	SE	2,0	15	+2,0 (ZH)

Para as condições de agitação regular, uma vez que se usou a versão linear do modelo, o valor da altura de onda incidente à entrada da zona de cálculo considerado em todas as simulações foi de 1 metro, correspondendo os resultados do modelo a índices de agitação.

Nos casos em que foi adoptada a agitação irregular, através da adopção do espectro de Jonswap ($\gamma=6$) foi utilizada a forma não linear do modelo CGWAVE que inclui a consideração do fenómeno da rebentação.

As condições de fronteira de entrada e saída da agitação foram impostas no troço semi-circular, Figura 4. Na fronteira de entrada impôs-se a condição de geração-irradiação. Nos restantes troços, impuseram-se condições de reflexão parcial. Os respectivos coeficientes de reflexão foram determinados com base nas características de cada troço e nas características da onda (altura e período), através de várias formulações empíricas e semi-empíricas, com a ajuda do programa DeCRAF (Determinação de Coeficientes de Reflexão com Apoio em Formulações), que visa uma aplicação operacional de várias formulações para determinação dos coeficientes de reflexão (Costa Freire *et al*, 2007).

Inicialmente, e para a adequada aplicação do programa DeCRAF, identificaram-se vários troços com morfologia distinta e estabeleceram-se as respectivas características de cada troço. Assim, para o domínio a estudar apresenta-se, na, a subdivisão em troços.

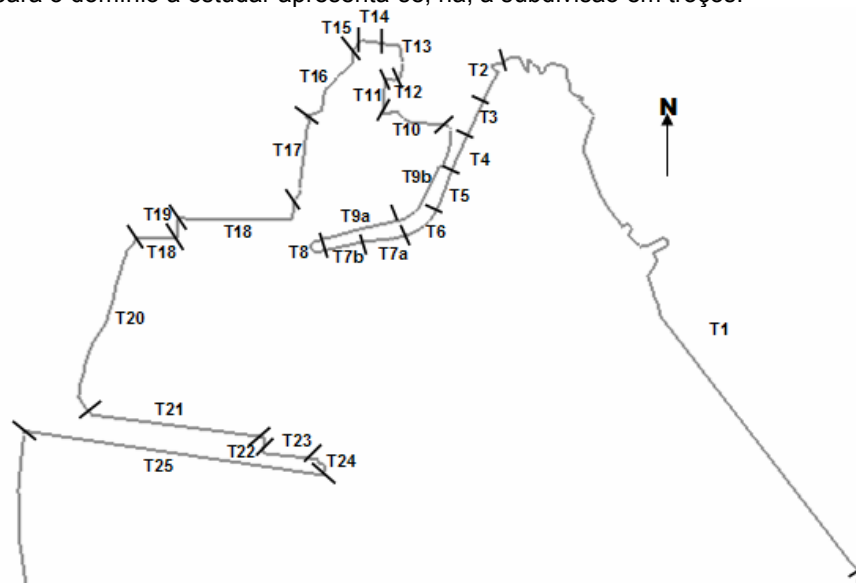


Figura 5 - Subdivisão dos diferentes troços no domínio em estudo.

De seguida são apresentadas as características de cada troço, que servirão de base à determinação dos coeficientes de reflexão (Quadros 3 e 4).

Quadro 3 – Características dos troços T1 a T14.

Troço	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7a	T7b	T8	T9a	T9b	T10	T11	T12	T13	T14
Estrutura	Limite costeiro rochoso		Molhe do núcleo de recreio em enrocamento (talude rugoso impermeável)		Molhe do núcleo de recreio em tetrapostos (talude de elementos - tetrapostos)					Molhe do núcleo de enrocamento (talude rugoso impermeável)			Zona no interior do porto de recreio (parede vertical lisa)		Molhe do núcleo de recreio em enrocamento (talude rugoso impermeável)	Rampa (talude liso impermeável)
α (°)	-	considerou-se como uma praia com um ângulo de 16,5° (30%)	33,69	33,69	33,69	26,57	26,57	33,69	33,69	36,94	36,94	36,94	-	-	36,94	14,04
d_t (m)	-	-	4,00	4,00	4,00	8,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	9,00	4,00	4,00	9,00	2,00
D ou D _{n50} (m)	-	-	1,38	1,58	1,63	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	0,42	0,42	-	-	0,42	-
N	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-	-	2,00	-
P	-	-	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	-	-	0,40	-
H (m)	-	-	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00
Rc (m)	-	-	4,00	4,50	5,00	5,00	5,00	5,00	4,75	2,50	1,20	1,20	1,50	1,50	1,50	-
Imagem da estrutura																

Simbologia:

α (°) – ângulo do talude da estrutura

d_t (m) – profundidade na base da estrutura

D ou D_{n50} (m) – diâmetro característico do enrocamento do manto

N – número de camadas

P – Coeficiente de permeabilidade

H (m) – altura da onda incidente

Rc (m) – altura do coroamento da estrutura acima do nível de repouso

Quadro 4 – Características dos troços T15 a T25.

Troço	T 15	T 16	T 17	T 18	T 19	T 20	T 21 e T 22	T 23 e T 24	T 25
Estrutura	Zona no interior do porto de recreio (parede vertical lisa)	Zona no interior do porto de recreio (parede vertical lisa)	Zona no interior do porto de recreio (talude rugoso permeável)	Cais ferry (parede vertical lisa)	Cais ferry (rampa)	Talude exterior (talude rugoso permeável)	Cais do molhe exterior (parede vertical lisa)	Molhe exterior em Antifer (talude de elementos - antifer)	Molhe exterior em Tetrapodos (talude de elementos - tetrapodos)
α (°)	-	-	45,00	-	-	45,00	-	33,69	33,69
d _t (m)	3,50	2,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
D ou D _{n50} (m)	-	-	1,25	-	-	1,25	-	1,58	1,63
N	-	-	2,00	-	-	2,00	-	2,00	2,00
P	-	-	0,50	-	-	0,50	-	0,40	0,40
H (m)	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00	1,00/2,00
Rc (m)	2,70	2,70	2,70	2,00	0,50	-	2,30	-	-
Imagem da estrutura									

Simbologia:

α (°) – ângulo do talude da estrutura

d_t (m) - profundidade na base da estrutura

D ou D_{n50} (m) - diâmetro característico do enrocamento do manto

N - número de camadas

P - Coeficiente de permeabilidade

H (m) - altura da onda incidente

Rc (m) - altura do coroamento da estrutura acima do nível de repouso



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Com base no programa DeCRAF e nas características dos vários troços antes enunciadas, procedeu-se à determinação dos coeficientes de reflexão. No Quadro 5, Quadro 6 e Quadro 7 apresentam-se os valores dos coeficientes considerados nas simulações numéricas.

Como síntese dos resultados obtidos apresentam-se na Figura 6 os intervalos entre os valores máximos e mínimos obtidos para cada troço.

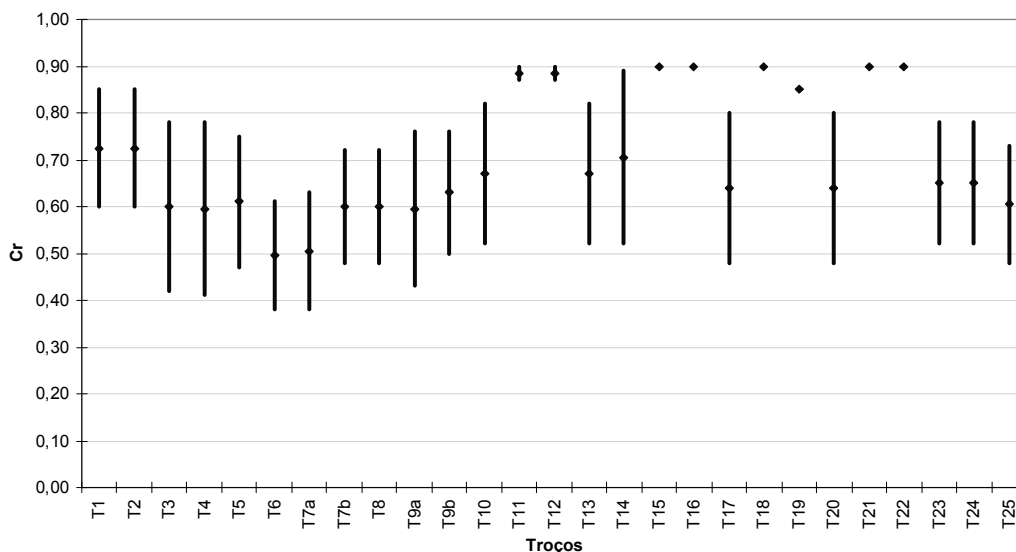


Figura 6 – Gráfico síntese dos valores obtidos do Cr para os vários troços que compõem a fronteira terrestre.

Como se pode observar são os troços 3, 4 e 14 os quais apresentam uma maior dispersão de valores, imediatamente seguidos pelos troços 9a, 10, 13, 17, 20, 5, 23, 24 e 25. Estes troços correspondem a estruturas de taludes em enrocamento permeáveis e impermeáveis e os três últimos a estruturas de talude de blocos artificiais.

Os troços que não apresentam quaisquer diferenças no valor de Cr estão na Figura 6 representados por um ponto e correspondem a estruturas verticais. Esta particularidade deve-se ao facto de que as suas características são bem definidas, levando a que seja mais fácil apurar o correcto valor do coeficiente de reflexão.

A selecção das combinações das condições de fronteira a ensaiar, de forma a limitar o número de simulações e a facilitar a análise dos resultados, foi efectuada com base na combinação dos valores do coeficiente de reflexão de diferentes troços, desde que a formulação utilizada fosse da mesma família, ou seja do mesmo autor, ou baseada nos mesmos parâmetros. Desta forma pretendeu-se uniformizar as condições de fronteira, orientando a análise dos resultados.

No Quadro 5 ao Quadro 7 apresentam-se as diferentes condições de fronteira simuladas em cada simulação numérica.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Quadro 7 – Condições de fronteira aberta e fechada, aplicadas nas simulações efectuadas em modelo numérico – CGWAVE - não linear (Simulações 2, 4, 26 e 28)

Formulações adoptadas	Seelig, 1983 (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T14, T17, T20) Zanuttigh e Van der Meer, 2006b (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25)		Seelig e Ahrens, 1995 (T3, T4, T5, T6, T7a,b, T8, T9a,b, T10, T13, T17, T20, T23, T24, T25) Ahrens et al, 1993 (T14)	
	2	4	26	28
Rumo	S	SE	S	SE
H (m)	2,00	2,00	2,00	2,00
T(s)	15,00	15,00	15,00	15,00
Cr (T1)	0,74	0,74	0,74	0,74
Cr (T2)	0,74	0,74	0,74	0,74
Cr (T3)	0,55	0,55	0,64	0,64
Cr (T4)	0,55	0,55	0,63	0,63
Cr (T5)	0,59	0,59	0,62	0,62
Cr (T6)	0,48	0,48	0,57	0,57
Cr (T7a)	0,48	0,48	0,58	0,58
Cr (T7b)	0,59	0,59	0,67	0,67
Cr (T8)	0,59	0,59	0,67	0,67
Cr (T9a)	0,56	0,56	0,70	0,70
Cr (T9b)	0,56	0,56	0,75	0,75
Cr (T10)	0,56	0,56	0,75	0,75
Cr (T11)	0,87	0,87	0,87	0,87
Cr (T12)	0,87	0,87	0,87	0,87
Cr (T13)	0,56	0,56	0,75	0,75
Cr (T14)	0,72	0,72	0,83	0,83
Cr (T15)	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr (T16)	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr (T17)	0,58	0,58	0,74	0,74
Cr (T18)	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr (T19)	0,82	0,82	0,82	0,82
Cr (T20)	0,58	0,58	0,74	0,74
Cr (T21)	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr (T22)	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr (T23)	0,64	0,64	0,66	0,66
Cr (T24)	0,64	0,64	0,66	0,66
Cr (T25)	0,59	0,59	0,67	0,67

3.4 Apresentação e interpretação de resultados

Foram efectuadas 30 simulações com agitação regular, não se tendo efectuado as simulações 22 e 24 por faltarem alguns valores do coeficiente de reflexão que, apesar de determinados, não verificaram o domínio de aplicação de algumas das formulações.

A opção por se efectuarem inicialmente simulações com agitação regular deve-se ao facto de esta permitir visualizar melhor as diferenças entre o comportamento das várias formulações.

Para as simulações com agitação irregular foram consideradas as simulações 2, 4, 26 e 28, já que a duração destas simulações com o equipamento disponível era de 110 a 130 horas. Estas simulações foram escolhidas após análise dos resultados da agitação regular: as simulações 2 e 4 correspondem aos melhores resultados e as simulações 26 e 28 ao grupo dos piores resultados. Estas simulações correspondem todas ao período de 15s, por serem os resultados correspondentes a este período os que apresentam piores resultados quando comparados com os do modelo experimental.

Para as condições de fronteira, condições de agitação e de reflexão atrás referidas, efectuaram-se os cálculos para ondas regulares com o modelo CGWAVE (SMS9.0) e os cálculos de ondas irregulares com o modelo CGWAVE (SMS10.0). Para cada simulação, foram obtidos:

- Valores do índice de agitação e da altura de onda, no interior do porto de Vila do Porto;



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

- Valores da altura de onda nos 15 pontos seleccionados no domínio em estudo, correspondentes aos pontos de medição nos ensaios em modelo físico.

Para a análise dos resultados, convém reter que existem diferenças entre os modelos numérico e experimental (Fortes et al., 2006):

- A batimetria dos modelos não é exactamente a mesma devido a limitações quer de espaço quer construtivas do modelo físico;
- Os aparelhos de medição apresentam limitações principalmente em zonas onde as alturas de onda são pequenas ou quando ocorre significativa reflexão;
- O modelo numérico não tem em conta a interacção de ondas com consequente geração de harmónicas, a presença de correntes, a rebentação das ondas (só no caso linear), a ocorrência de galgamentos, nem o efeito do atrito no fundo como acontece no caso do modelo físico;
- Os coeficientes de reflexão calculados nos diferentes trechos do domínio são valores aproximados pois não consideram o efeito da direcção da onda e de eventuais interacções entre ondas no interior da bacia;
- Os coeficientes foram estimados para as condições do modelo físico definidas com base no protótipo.

Apresentam-se nas Figuras 7 a 14, de forma gráfica, a comparação dos valores numéricos e experimentais dos índices de agitação de acordo com cada tipo de condição de fronteira e relativos a cada ponto estudado. Nas legendas das figuras as iniciais ME e MNS significam respectivamente, modelo experimental e modelo numérico, simulações 1, 2, 3, etc.

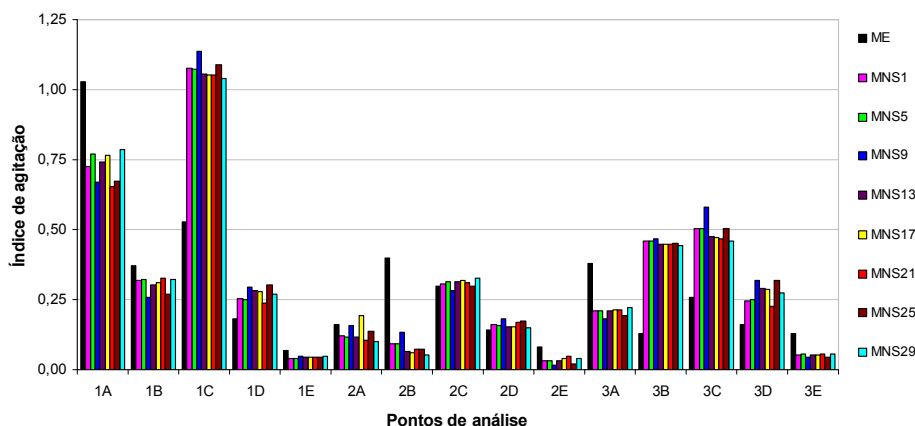


FIGURA 7 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=11s$ e rumo Sul.

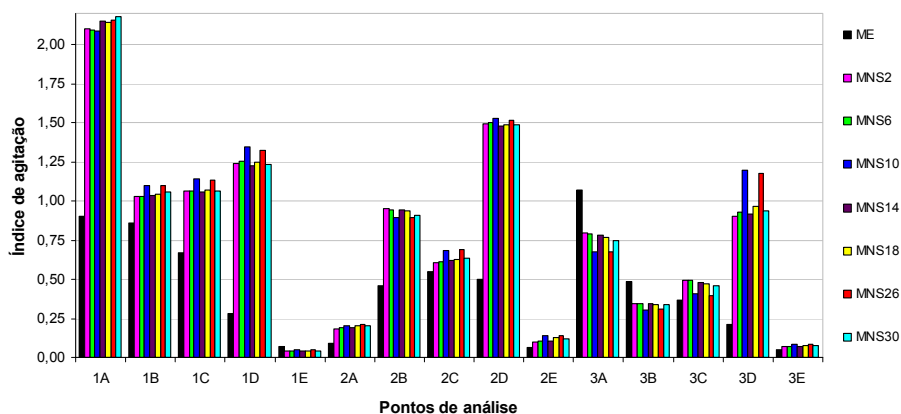


Figura 8 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=15s$ e rumo Sul.

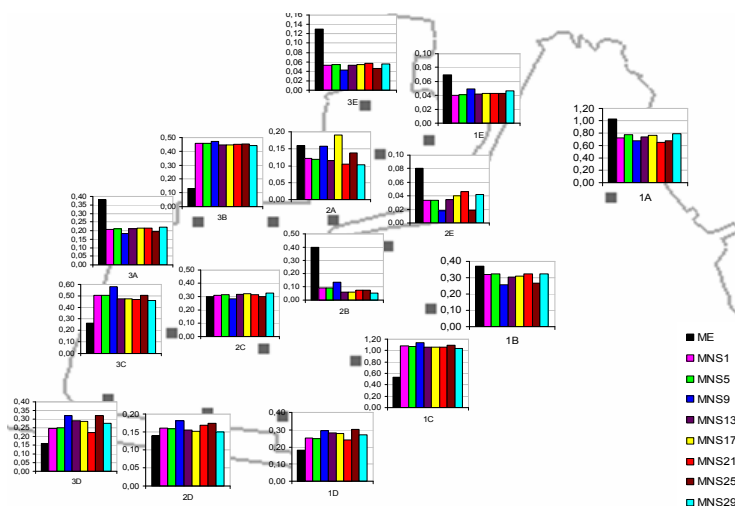


Figura 9 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=11s$ e rumo Sul, distribuídos ao longo da bacia.

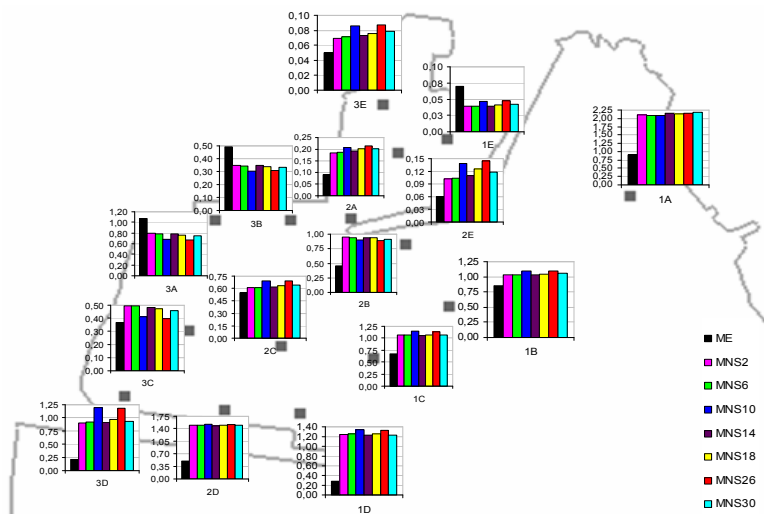


Figura 10 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=15s$ e rumo Sul, distribuídos ao longo da bacia.

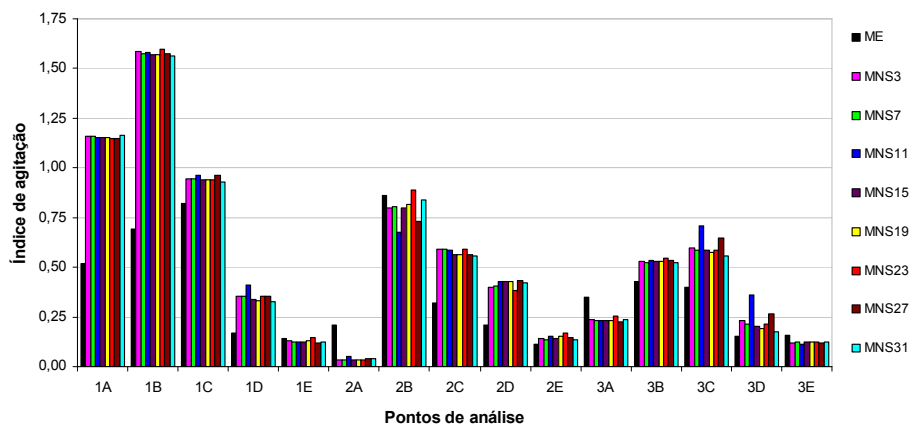


Figura 11 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=11s$ e rumo Sudeste.

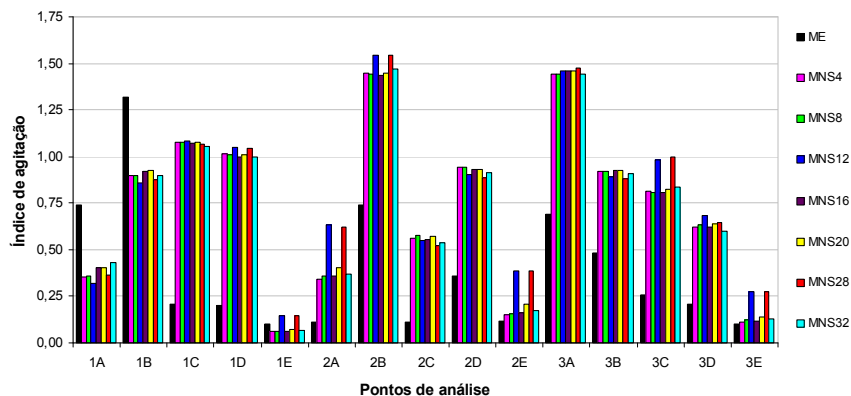


Figura 12 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=15s$ e rumo Sudeste.

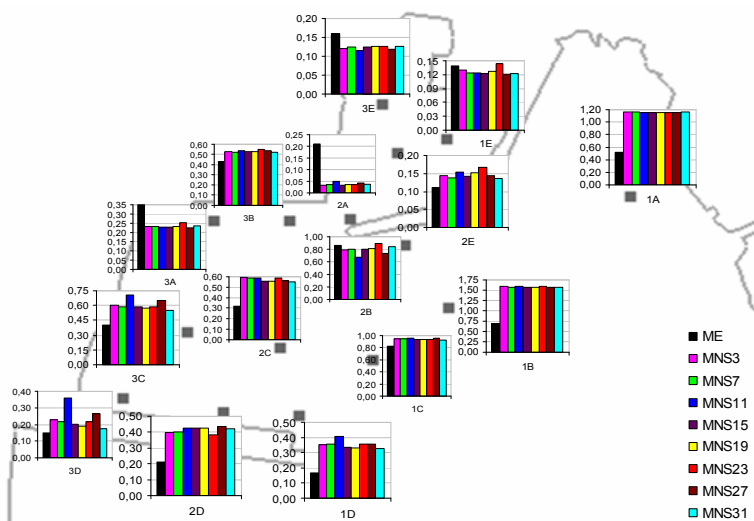


Figura 13 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=11s$ e rumo Sudeste, distribuídos ao longo da baía.

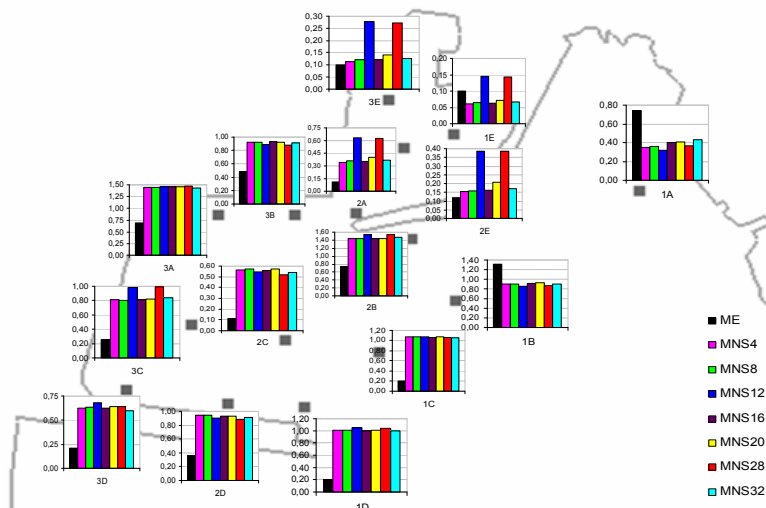


Figura 14 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de $T_p=15s$ e rumo Sudeste, distribuídos ao longo da baía.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Da análise dos resultados do modelo numérico, constata-se que a agitação sofre uma redução à medida que se propaga para o interior do porto, qualquer que seja o período ou a direcção da onda. Esta redução é devida à difracção em torno do molhe exterior e do quebra-mar de protecção da marina. No entanto, existem zonas no interior do porto, nomeadamente na zona do cais ferry e do cais comercial, com valores do índice de agitação superiores a 1,0 devido à existência de reflexões significativas.

Da comparação dos resultados do modelo numérico (simulações com ondas regulares) e experimental, apresentados na Figura 7 à Figura 12, pode observar-se que:

- na generalidade, os valores de H/H_0 obtidos com o modelo numérico são superiores aos obtidos nos ensaios;
- apesar de os resultados numéricos e experimentais serem semelhantes em metade dos pontos em estudo, nos restantes pontos, ocorrem diferenças significativas devidas às limitações quer do modelo numérico quer do modelo físico;
- as diferenças significativas encontradas correspondem, na generalidade, a resultados numéricos superiores aos experimentais, que são mais acentuados nas condições de ondas de $T=15$, rumos Sul e Sudeste, condições que apresentam um elevado número de pontos com valores do índice de agitação inferiores aos obtidos no modelo físico (1E, 3A e 3B e 1A, 1B e 1E respectivamente de acordo com as condições de onda indicadas anteriormente);
- as simulações de condições de onda de $T=11s$ e rumo Sul são as que apresentam menores diferenças relativamente aos resultados experimentais, apresentando igualmente o maior número de pontos com resultados inferiores aos experimentais, nos pontos 1A, 1B, 1E, 2A, 2B, 2E, 3A e 3E;
- como já referido, as diferenças entre os resultados são mais significativas quando os valores obtidos pelo modelo numérico são superiores aos experimentais, podendo variar no máximo entre 127% e 261% para as condições de $T=11s$ e entre 401% e 476% para as condições de $T=15s$;
- as médias dos aumentos relativos às diferenças entre os resultados variam de 74% (S17) a 115% (S9) para $T=11s$ e rumo Sul, de 121% (S1) a 146% (S25) para $T=15s$ e rumo Sul, de 60% (S21) a 88% (S9) para $T=11s$ e rumo Sudeste e de 196% (S1) a 256% (S9) para $T=15s$ e rumo de Sudeste;
- Em geral, a maior concordância entre resultados numéricos e experimentais verifica-se nos pontos mais abrigados, isto é, os de menores índices de agitação - pontos 1E, 2E e 3E.

Da comparação dos resultados do modelo numérico obtidos com base em diferentes valores de C_r , apresentada na Figura 7 à Figura 12, pode observar-se que:

- em geral, existe maior concordância entre resultados nos pontos de medição numéricos e experimentais para 11 s que para 15 s;
- o padrão da agitação para os vários casos é bastante semelhante;
- as maiores diferenças do padrão de agitação encontram-se no interior da bacia mais abrigada, que corresponde à zona onde se obteve maior dispersão nos valores dos coeficientes de reflexão calculados com as diferentes formulações e à zona mais confinada e por isso à zona onde maior é a influência da reflexão dos contornos na agitação.

A “negrito” evidenciam-se as formulações para as quais se conseguiu maior aproximação entre os resultados do modelo numérico e modelo físico.

1. **Seelig, 1983** (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T14, T17, T20), **Zanuttigh e Van der Meer, 2006** (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25) ;
2. **Davidson et al, 1996b** (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T17, T20), **Ahrens et al, 1993** (T14), **Seelig e Ahrens, 1995** (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25) ;



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

- Davidson et al, 1996 (1) (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T17, T20), Seelig e Ahrens, 1995 (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25), Ahrens et al, 1993 (T14) ;
- Davidson et al, 1996 (T3, T4, T9a,b, T10, T17, T20), Zanuttigh e Van der Meer, 2006 (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25), Sutherland e O'Donoghue, 1998b (T14) ;
- Davidson et al, 1996 (2) (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T17, T20), Seelig e Ahrens, 1995 (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25), Ahrens et al, 1993 (T14) ;
- Seelig e Ahrens, 1995 (T3, T4, T5, T6, T7a,b, T8, T9a,b, T10, T13, T17, T20, T23, T24, T25), Ahrens et al, 1993 (T14) ;
- Zanuttigh e Van der Meer, 2006 (T3, T4, T9a,b, T10, T13), Zanuttigh e Van der Meer, 2006 (T14), Davidson et al, 1994 (T17, T20), Zanuttigh e Van der Meer, 2006 (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25) ;
- Sutherland e O'Donoghue, 1998b (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T14, T17, T20) Zanuttigh e Van der Meer, 2006 (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25).

Note-se que as expressões com melhor desempenho são as mais simples, com menos parâmetros envolvidos.

As formulações aplicadas a estruturas permeáveis de taludes não galgáveis são as mais estudadas e, conseqüentemente, levam a que seja este tipo de estrutura aquela para a qual se obtém o coeficiente de reflexão mais correcto, como se pode observar nos resultados obtidos para os pontos 3C, 2A, 1E, 2E e 3E.

Relativamente à análise do período e do rumo, verifica-se que as menores diferenças entre os resultados numéricos e experimentais ocorrem com o menor período e estas são mais notórias no rumo sudeste, ou seja, o rumo ao qual o porto se encontra mais exposto.

Os resultados de agitação irregular apresentam-se de forma gráfica nas Figuras 15 a 18, incluindo-se a comparação dos valores numéricos e experimentais dos índices de agitação de acordo com cada tipo de condição de fronteira e relativos a cada ponto estudado. Nas legendas das figuras as iniciais ME e MNS significam respectivamente, modelo experimental e modelo numérico, simulações 2, 4, etc.

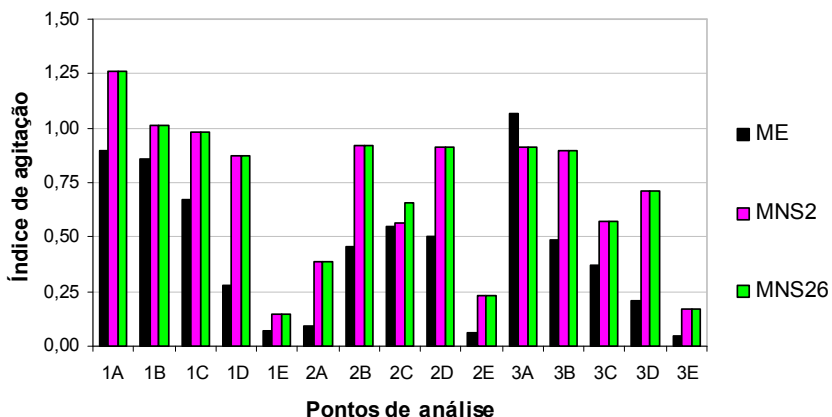


Figura 15 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de agitação irregular $T_p=15s$ e rumo Sul.

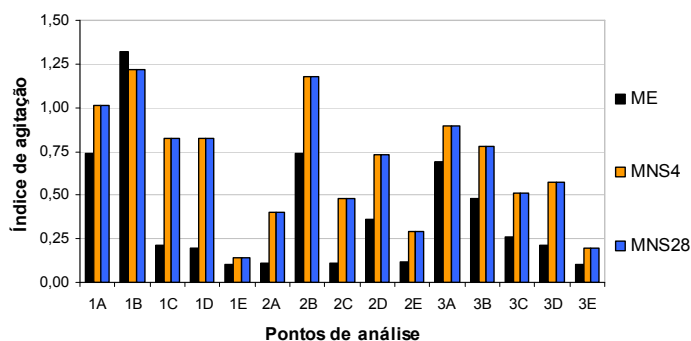


Figura 16 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de agitação irregular $T_p=15s$ e rumo Sudeste.

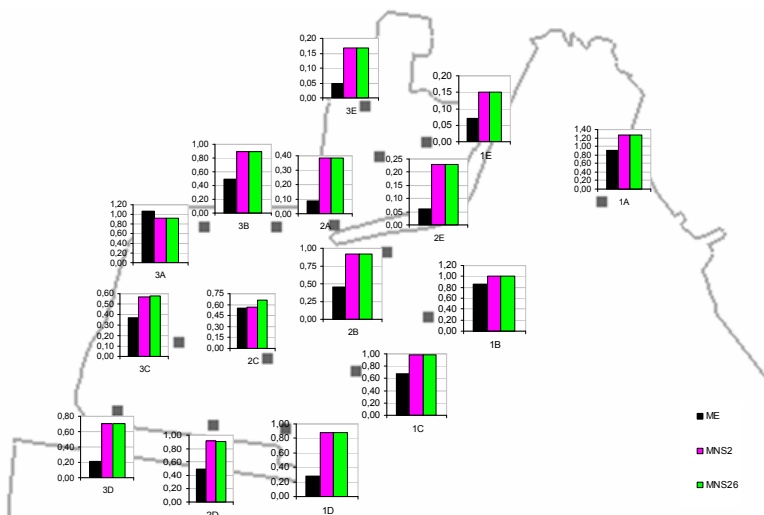


Figura 17 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de agitação irregular $T_p=15s$ e rumo Sul, distribuídos ao longo da bacia.

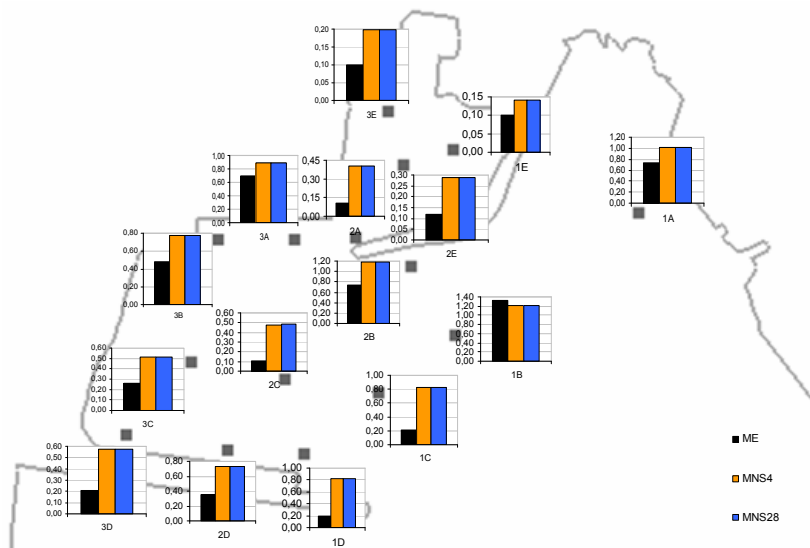


Figura 18 – Comparação dos valores numéricos e experimentais do índice de agitação para a condição de agitação irregular $T_p=15s$ e rumo Sudeste, distribuídos ao longo da bacia.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Da comparação dos resultados do modelo numérico e experimental, representada na Figura 15 à Figura 18, pode observar-se que:

- na generalidade, os valores de H/H_0 obtidos com o modelo numérico mantêm-se superiores aos obtidos nos ensaios, embora menores que os obtidos com agitação regular;
- apesar de os resultados numéricos e experimentais se aproximarem mais, ainda persistem diferenças devidas às limitações quer do modelo numérico quer do modelo experimental;
- as diferenças encontradas continuam a corresponder, agora quase na totalidade, a resultados numéricos superiores aos experimentais, que são mais acentuados na zona do cais comercial e no extremo final do molhe de protecção ao porto de recreio;
- a simulação S2, com condição de onda $H_s=2$ m, $T_p=15$ s e rumo Sul, é a que apresenta menores diferenças relativamente aos resultados experimentais, apesar de ter apresentado um aumento de 10% relativamente à simulação com agitação regular. Apenas o ponto 3A apresenta resultados inferiores aos experimentais e o ponto 2C apresenta apenas uma diferença de 3% relativamente ao resultado experimental;
- qualquer uma das restantes simulações apresenta reduções significativas de H/H_0 , relativamente aos resultados com agitação regular, S4 (15%), S26 (50%) e S28 (90%);
- como já referido, as diferenças entre os resultados são mais significativas quando os valores obtidos pelo modelo numérico são superiores aos experimentais, podendo variar entre aumentos de 3% a 326% para as condições de Sul e de 30% a 339% para as condições de Sudeste;
- as médias dos aumentos relativos às diferenças entre os resultados correspondem a 131% (S2), 132% (S26), rumo Sul e 146% (S4) e 147% (S28), rumo Sudeste;
- mantem-se uma maior concordância entre resultados numéricos e experimentais nos pontos mais abrigados, isto é, os de menores índices de agitação - pontos 1E, 2E e 3E.

Da comparação dos resultados do modelo numérico obtidos com base em diferentes valores de C_r , representadas na Figura 15 a Figura 18, pode observar-se que:

- em geral, existe maior concordância entre resultados numéricos e experimentais nas simulações S2 e S4, embora agora as diferenças entre S2 e S26 e entre S4 e S28 sejam mínimas, da ordem da 3^a a 4^a casa decimal;

Apesar dos valores obtidos pelas várias simulações com agitação irregular serem muito semelhantes, o conjunto de simulações que se aproxima mais dos resultados obtidos pelo modelo experimental foi o de S2 e S4. Nestas simulações adoptaram-se as formulações de **Seelig, 1983** (T3, T4, T9a,b, T10, T13, T14, T17, T20) e **Zanuttigh e Van der Meer, 2006** (T5, T6, T7a,b, T8, T23, T24, T25).

No restante conjunto de simulações, S26 e S28 foram adoptadas as formulações de Seelig e Ahrens, 1995 (T3, T4, T5, T6, T7a,b, T8, T9a,b, T10, T13, T17, T20, T23, T24, T25) e Ahrens et al, 1993 (T14).

Note-se que, adoptando agitação irregular, as diferenças obtidas entre formulações atenuam-se bastante, o que alerta para uma escolha da formulação mais criteriosa tendo em conta o tipo de agitação a simular, regular ou irregular.

Neste caso as formulações de Seelig e Ahrens, 1995 e Ahrens et al, 1993, que se apoiam em vários parâmetros e não apenas num, apresentam também um bom desempenho, mas as formulações de Seelig, 1983 e Zanuttigh e Van der Meer, 2006 correspondem às mais robustas.



4 CONCLUSÕES

Para a avaliação do desempenho de diferentes formulações na quantificação do coeficiente de reflexão, C_r , foram efectuadas simulações com modelo numérico CGWAVE. Nestas simulações foram considerados diferentes valores de C_r nas condições de fronteira de reflexão parcial, de acordo com as distintas formulações adoptadas, e posteriormente os resultados foram comparados com os obtidos em ensaios experimentais.

A comparação entre os resultados numéricos e experimentais permitiu mostrar que:

- para a obtenção do valor mais preciso do coeficiente de reflexão não é necessário que a sua quantificação dependa do maior número de parâmetros que possam caracterizar os processos envolvidos neste fenómeno, desde que todos os processos envolvidos estejam contemplados de alguma forma, como por exemplo através de um parâmetro empírico;
- as formulações de cálculo do coeficiente de reflexão permitem uma aproximação dos resultados obtidos por modelo físico, conduzindo, na generalidade, a aumentos que rondam os 100%;
- as formulações aplicadas a estruturas permeáveis de taludes não galgáveis, que são as mais estudadas, conduzem a valores mais correctos do coeficiente de reflexão;
- o tipo de agitação a simular, regular ou irregular, é bastante relevante, tendo as formulações mais simples demonstrado serem bastante robustas;
- a influência da correcta determinação deste parâmetro na agitação no interior de uma zona abrigada terá maior significado quanto mais confinada for a bacia a estudar. Verificou-se que é nesta circunstância que o modelo matemático se aproxima dos resultados medidos em laboratório, daí a maior sensibilidade ao valor estimado para o coeficiente de reflexão. Nos pontos mais afastados existe maior discrepância entre simulações e medições.

As formulações que no caso de estudo analisado forneceram os melhores resultados para cada tipo de estrutura estudado foram:

- Quebramares de taludes de elementos artificiais – Zanuttigh e Van der Meer, 2006 e Seelig e Ahrens, 1995;
- Rampa (talude liso) – Ahrens et al, 1993;
- Quebramares de taludes de enrocamento (talude rugoso) – Seelig, 1983 e Davidson et al, 1996b.

REFERÊNCIAS

Ahrens, J. P., Seelig, W. N., Ward, D. L. E Allsop, W. (1993). "Wave Runup on and Wave Reflection from Coastal Structures" ASCE, Proceedings, Waves'93, pp.489-502.

Costa Freire, S., Neves, M. G. e Pires Silva A. A. (2007). "Avaliação de Metodologias de Cálculo do Coeficiente de Reflexão. DeCRAF – Programa para Determinação de Coeficientes de Reflexão com Apoio em Formulações." 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária.

Davidson, M.A., Bird, P.A. D., Bullock, G. N., e Huntley, D. A. (1994). "Wave reflection: Field measurements, analysis, and theoretical developments. Inc: Proc. Conf. Coastal Dynamics'94, Barcelona. ASCE, New York, pp. 642-655.

Davidson, M.A., Bird, P.A. D., Bullock, G. N., e Huntley, D. A. (1996). "A new non-dimensional number for the analysis of wave reflection from rubble mound breakwaters." Coastal Engineering, 28 pp93-120.

Davidson, M.A., Bird, P.A. D., Bullock, G. N., e Huntly, D. A. (1996b). "Prediction of Wave Reflection from Rock Structures: An Integration of Field and Laboratory Data." Proc., 25th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, pp. 2077-2086.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Demirbilek, Z. e Panchang, V. (1998). "CGWAVE : A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation," Technical Report CHL-98-26.

Fortes, C.J.E.M.; Silva, L.G.P.; Sousa, I.A. (2005). "Ensaio em modelo reduzido do Porto de Vila do Porto – Santa Maria, Açores." Relatório 361/05-NPE, LNEC, Novembro.

Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L., Sousa, I. A., Silva, L.G.P., Neves, M.G. (2006). "Estudos de Agitação no Porto de Vila do Porto". 8º Congresso da Água. Figueira da Foz, Março (versão electrónica).

Jones N. L. and D. R. Richards (1992). "Mesh Generation for Estuarine Flow Models", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118, 599-614.

Seelig, W. N. (1983). "Wave Reflection from Coastal Structures." Proc. Conference of Coastal Structures, ASCE, Arlington, pp.961-973.

Seelig, W. N. e Ahrens, J. P. (1995). "Wave Reflection and Energy Dissipation by Coastal Structures." Wave Forces on Inclined and vertical Wall Structures, ASCE, pp. 28-51.

Sutherland, J. e O'Donoghue, T. (1998b). "Characteristics of Wave Reflection Spectra." ASCE, J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg. 124(6), pp. 303-311.

Zanuttigh, B., e Van der Meer, J. W. (2006). "Wave Reflection from Coastal Structures." Proc., 30th Coast. Engrg. Conf., ASCE, pp. 4337-4349.