

PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA ATÉ JUNTO À PRAIA DO PORTO SANTO

Conceição Juana Fortes, Maria da Graça Neves
LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3446, Fax. 351 21 844 3019
jfortes@lnec.pt, gneves@lnec.pt

RESUMO

Esta comunicação descreve o estudo, em modelo numérico, da propagação de ondas regulares desde o largo até à costa, com vista à caracterização das condições de agitação marítima (alturas e direcções de onda) na zona adjacente à praia do Porto Santo. O modelo utilizado foi o modelo de propagação de ondas regulares REFIDIF (Dalrymple e Kirby, 1991).

O modelo foi aplicado para o nível médio anual de maré e para um conjunto de ondas regulares (períodos, direcções de propagação e alturas de onda), que foram estabelecidas com base no regime de agitação marítima ao largo da ilha do Porto Santo, definido em Capitão *et al.* (2003). Realizaram-se cálculos de propagação desde o largo até à zona da praia do Porto Santo, para períodos de onda de 6 s, 8 s e 10 s, alturas de onda de 1 m, 3 m e 5 m e direcções compreendidas entre ENE e WNW.

Os resultados constam de alturas e direcções de onda na zona marítima em estudo. Apresenta-se uma análise da influência da direcção, do período e da altura de onda incidente nas características da agitação na zona junto à praia.

1. INTRODUÇÃO

Porto Santo é uma ilha do arquipélago da Madeira, no Oceano Atlântico, localizada a cerca de 500 Km da costa africana, a nordeste da ilha da Madeira (ver Figura 1). A ilha de Porto Santo, importante destino turístico, tem sete pequenas ilhotas nas suas imediações.

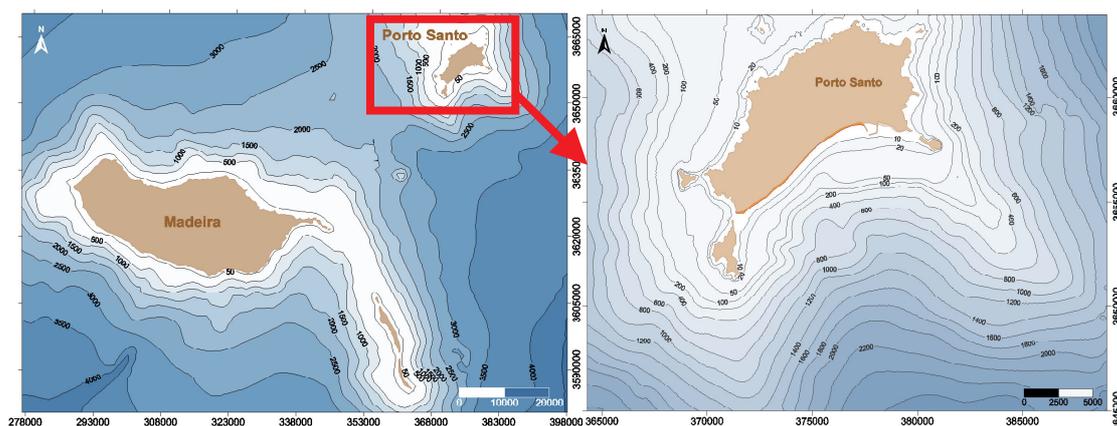


Figura 1 - Arquipélago da Madeira. Ilha do Porto Santo.

Na ilha de Porto Santo encontra-se a maior praia do arquipélago – a Praia do Porto Santo - com 9 km de extensão (ver Figura 2). Esta praia tem vindo a apresentar oscilações da largura da faixa arenosa em alguns dos seus trechos, que têm originado algumas reduções ocasionais da largura da praia com inconvenientes para a sua utilização balnear. Para analisar este problema, o LNEC efectuou um conjunto de estudos com vista a compreender a evolução

morfodinâmica da praia e, desta forma, analisar e identificar se as referidas oscilações resultam de evoluções naturais da morfologia da praia, com carácter reversível, ou de um processo erosivo que possa causar desequilíbrios permanentes da faixa arenosa.



Figura 2 - Praia do Porto Santo.

Uma vez que a agitação marítima é um dos agentes naturais determinantes da dinâmica e do equilíbrio sedimentar da praia, é fundamental conhecer as suas características na proximidade da praia do Porto Santo. Assim, primeiramente estabeleceu-se o regime de agitação marítima na frente da praia do Porto Santo a partir de dados das elevações da superfície do mar registados durante 7 anos (1996 a 2002) numa bóia-ondógrafo localizada junto ao Funchal (Ilha da Madeira), Capitão *et al.* (2003). Com base nesses dados, foi estabelecido um regime de agitação no Funchal que foi transferido para o largo e posteriormente para a zona em frente à Praia de Porto Santo, i.e., para um ponto situado em águas profundas (aproximadamente -1000 m (ZH)). Estas transferências de regimes da costa para o largo e vice-versa são realizadas, mediante a utilização da metodologia de transferência de regimes de agitação marítima, TRANSFER, Coli *et al.* (2002). Esta metodologia consiste na utilização de um modelo de propagação de ondas irregulares para a transferência para o largo de um regime geral de agitação marítima, definido com base em dados de agitação marítima observados numa bóia-ondógrafo, e na posterior transferência do largo para outros locais da costa não muito distantes da zona onde foram inicialmente observados os dados de agitação marítima. A metodologia assenta na utilização de três modelos numéricos, BACKTRACK e REFSPEC, Covas e Pontes (1988) e INTERPOL, Coli *et al.* (2002).

Seguidamente, e com base no regime de agitação marítima nesse ponto ao largo, em frente da praia de Porto Santo, definiu-se um conjunto de condições de agitação regular (direcções, alturas e períodos de onda) que foram propagadas até junto à praia, utilizando o modelo de propagação e deformação de ondas regulares, REFDIF, Dalrymple e Kirby (1991). Obtiveram-se, assim, valores de altura e direcção de onda com os quais se elaboraram diagramas de isolinhas de alturas de onda e cristas de onda na zona marítima adjacente à praia do Porto Santo e gráficos contendo os valores de alturas e direcções da onda em pontos situados sobre a batimétrica -10 m (ZH), equidistanciados de 50 m, aproximadamente, Fortes e Neves (2003).

Finalmente, com base nos resultados de agitação junto à praia, procedeu-se ao estudo da dinâmica sedimentar da praia do Porto Santo. Caracterizou-se, também, a vulnerabilidade da praia face aos agentes naturais e à ocupação humana da sua orla e propuseram-se medidas e intervenções que impeçam a degradação e promovam o seu melhoramento, Climaco *et al.* (2003).

A presente comunicação refere-se apenas aos estudos de propagação de ondas desde o largo até junto à praia de Porto Santo, e por conseguinte, tem como objectivo descrever a aplicação do modelo numérico REFDIF na zona marítima adjacente à praia, bem como apresentar e analisar os resultados obtidos.

2. PRINCÍPIOS DE CÁLCULO DO MODELO REFDIF

O modelo matemático REFDIF é um modelo de propagação e deformação da agitação marítima em zonas de profundidade variável, desenvolvido por Dalrymple e Kirby (1991). Este modelo efectua a propagação de ondas regulares em zonas de declive suave e na presença de correntes, tendo em conta os efeitos da refacção e difracção (apenas na direcção perpendicular à direcção principal de propagação da onda), empolamento, dissipação de energia (por atrito ou por percolação do fundo e rebentação das ondas), e efeitos não-lineares. É um modelo essencialmente adaptado para a modelação de grandes áreas costeiras.

O modelo baseia-se na aproximação parabólica da equação de declive suave de Berkhoff (1972). Para zonas de águas profundas e intermédias, os autores desenvolveram um modelo baseado na teoria de Stokes de 3ª ordem. Para águas pouco profundas, esta teoria perde validade, pelo que os autores propuseram uma modificação empírica da relação de dispersão da teoria de Stokes de 3ª ordem, ajustando-a à relação da teoria da onda solitária. O efeito principal desta alteração consiste no aumento da celeridade da onda em relação à obtida pela relação de dispersão linear e na diminuição em relação à da onda de Stokes de 3ª ordem, efeito este que se repercutirá nos cálculos da altura de onda.

A modelação da dissipação de energia por rebentação é efectuada de acordo com o modelo de Dally *et al.* (1985), que se baseia no facto de a onda atingir uma altura estável num fundo plano, após rebentar. Assim, os autores propuseram que a taxa de dissipação de energia fosse proporcional à diferença dos fluxos de energia entre uma dada posição e a zona onde a altura de onda é estável.

As equações do modelo são resolvidas pelo método das diferenças finitas (MDF), discretizadas sobre uma malha de espaçamento rectangular, utilizando um esquema iterativo implícito linha-a-linha no sentido de propagação. Quanto às condições de fronteira lateral, o modelo permite a utilização de uma condição de reflexão total ou, em alternativa, uma condição de fronteira aberta; em relação às condições iniciais pode-se especificar um campo de ondas monocromáticas ou um campo de ondas definido por um espectro direccionado.

Para a aplicação do modelo, deve-se garantir que:

- o fundo é de inclinação suave (até um valor do declive de 1:3);
- o ângulo entre a direcção de propagação da onda e a direcção de propagação principal, não deve ultrapassar os 60°, devido à utilização da aproximação parabólica de ângulo largo;
- a escolha da relação de dispersão a utilizar no modelo, de entre as três disponíveis, é feita pelo utilizador e depende dos valores esperados para o parâmetro de Ursell no problema em estudo.

É de salientar que em determinados locais como, por exemplo, na zona de sombra de uma ilha ou ilhéu, a direcção da onda calculada pelo modelo REFDIF pode tornar-se indefinida devido quer às reduzidas alturas de onda que normalmente aí se verificam quer aos efeitos de cruzamento de ondas provenientes de diferentes direcções.

Este modelo, por ser parabólico, não deve ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes, pois a componente de onda reflectida é desprezada.

Para a aplicação do modelo REFDIF, são necessários dados de batimetria da zona a modelar, das características das malhas, das opções de cálculo e das condições iniciais de agitação. O modelo fornece as alturas e as direcções de propagação da onda em qualquer zona, incluindo a de rebentação.

3. CONDIÇÕES DE CÁLCULO DO MODELO REFDIF

As características (rumo, período e altura de onda) das ondas monocromáticas utilizadas nos cálculos de propagação da agitação marítima desde o largo até à zona adjacente à praia

de Porto Santo, com o modelo REFDFIF, foram definidas com base no regime geral observado ao largo apresentado em Capitão *et al.* (2003) e correspondem a:

- Nível de maré: nível médio anual, correspondente à cota +1.40 m em relação ao zero hidrográfico (ZH);
- Direcções de onda: de WNW a ENE, espaçadas de 22.5° (11 direcções no total);
- Para cada direcção de onda:
 - Períodos de onda, T, de 6 s, 8 s, 10 s;
 - Alturas de onda, H_o , de 1.0 m, 3.0 m, 5.0 m.

Foram testadas todas as combinações possíveis entre estes períodos e alturas, embora possa não ser realista considerar a ocorrência de valores de altura de onda elevados (3 m e/ou 5 m) associados aos períodos mais baixos (6 s e/ou 8 s). É de salientar que o principal objectivo dos cálculos com o modelo REFDFIF foi analisar a propagação de ondas regulares desde o largo até junto à da praia do Porto Santo independentemente da frequência de ocorrência da mesma.

A batimetria da zona de interesse do estudo, utilizada nos cálculos com o modelo numérico, foi obtida através da digitalização das batimétricas representadas nos seguintes levantamentos e cartas do Instituto Hidrográfico:

- Carta nº 101 – Arquipélago da Madeira. Escala 1:150000. 3ª edição Outubro de 1989.
- Carta nº 36401 – Ilha do Porto Santo (Planos da baía e do porto do Porto Santo). Escala 1:50000.
- Carta nº 36401 – Plano A - Baía do porto do Porto Santo. Escala 1:15000.

Com base nestes levantamentos, obteve-se por digitalização, a batimetria da zona de interesse do estudo, ver Figura 3.

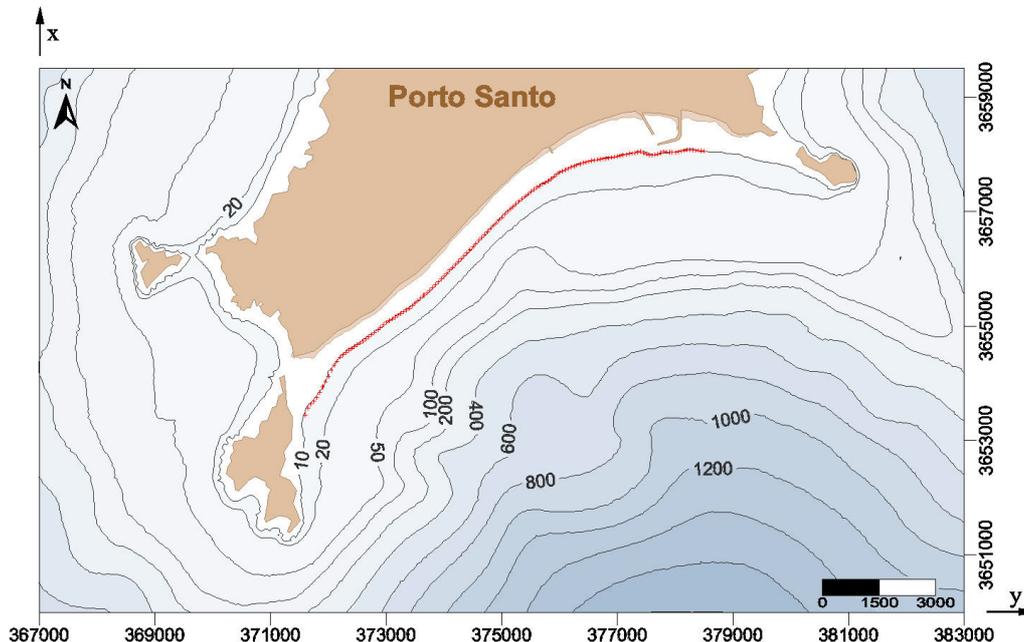


Figura 3 - Batimetria da zona adjacente à praia do Porto Santo.

Dada a larga gama de direcções de onda a testar (WNW a ENE) e as características da batimetria na zona, foram utilizados diferentes domínios de cálculo para o modelo REFDFIF, de acordo com as direcções de onda a propagar. Deste modo, é garantido no domínio em estudo e, principalmente, na zona de interesse, a praia do Porto Santo, que o valor do ângulo entre a

direcção de propagação da onda e a direcção de propagação principal, não ultrapassa os 60°, condição essencial para aplicação do modelo REF2DIF.

A discretização dos diferentes domínios de cálculo foi efectuada com uma malha bidimensional, de diferenças finitas, cujo espaçamento nas direcções x e y é igual a 6.25 m.

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Para as condições de agitação (altura, direcção e período de onda) referidas no ponto 3, os resultados obtidos pelo modelo constam dos valores da altura e direcção da onda em cada ponto da malha. Estes resultados podem ser visualizados sob a forma de diagramas de isolinhas dos valores das alturas de onda e das cristas das ondas na totalidade do domínio em estudo, Fortes e Neves (2003).

Tal como foi referido, um dado importante para o estudo da morfodinâmica da praia, é o valor das alturas e direcções de onda obtidos na proximidade da praia. Assim, obtiveram-se estes valores sobre a batimétrica -10 m (ZH), em pontos equiespaçados de 50 m aproximadamente, entre os valores da coordenada y entre 371500 e 379500 (Figura 4). Para efeitos de análise e interpretação destes resultados, dividiu-se o domínio em três zonas (zona I a zona III), como se indica na Figura 4. Para estas três zonas, calcularam-se os valores máximos da altura de onda sobre a batimétrica -10 m (ZH), valores estes que se apresentam no Quadro 1. Calcularam-se também os valores máximos do índice de agitação, apresentados no Quadro 2, determinados através da divisão de cada valor de altura de onda máxima apresentada no Quadro 1 pela respectiva altura de onda incidente.

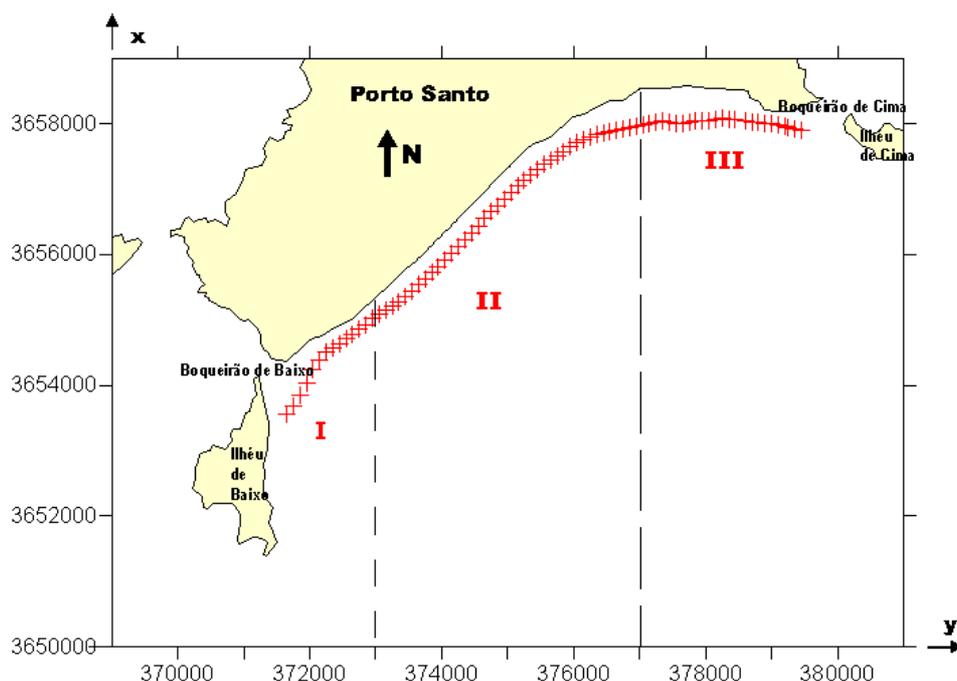


Figura 4 - Zonas I, II e III da praia de Porto Santo. Localização dos pontos sobre a batimétrica -10 m (ZH).

Nas secções seguintes apresentam-se os principais resultados dos cálculos de propagação de ondas, ilustrados com alguns gráficos representativos e analisa-se a influência da direcção, do período e da altura da onda incidente nos resultados obtidos junto à praia do Porto Santo, isto é, sobre a batimétrica -10 m (ZH).

Quadro 1 - Máximos da altura de onda na batimétrica dos -10 m (ZH), nas zonas I , II e III.

Direcção da onda	Zona	Máximos da altura de onda na batimétrica -10 m (ZH)								
		T= 6 s			T=8 s			T=10 s		
		Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m	Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m	Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m
WNW	I	0.44	0.94	1.04	0.37	0.76	0.84	0.37	0.74	0.73
	II	0.08	0.10	0.11	0.04	0.14	0.14	0.05	0.19	0.17
	III	0.04	0.05	0.06	0.03	0.08	0.08	0.05	0.15	0.16
W	I	0.57	0.99	0.90	0.50	0.88	0.79	0.48	0.81	0.75
	II	0.09	0.14	0.14	0.08	0.19	0.14	0.10	0.18	0.16
	III	0.05	0.06	0.05	0.07	0.10	0.13	0.10	0.18	0.23
WSW	I	0.77	0.97	1.02	0.64	0.85	0.92	0.70	0.90	0.89
	II	0.23	0.29	0.34	0.21	0.32	0.50	0.31	0.58	0.91
	III	0.17	0.40	1.24	0.24	0.58	0.97	0.26	0.67	1.15
SW	I	0.47	0.84	1.18	0.59	1.06	1.46	0.59	1.27	2.13
	II	0.35	1.35	2.37	0.43	1.05	1.89	0.56	1.34	2.01
	III	0.91	2.48	3.65	0.82	2.23	3.68	0.77	2.27	3.66
SSW	I	0.49	1.64	2.77	0.54	1.57	2.71	0.73	1.97	3.09
	II	0.91	2.71	4.46	0.91	2.71	4.54	0.99	3.15	5.24
	III	0.95	2.83	4.68	1.08	3.19	5.20	1.20	3.48	5.70
S	I	0.92	2.65	4.34	0.82	2.36	3.87	1.04	2.91	4.71
	II	0.95	2.77	4.61	0.96	2.86	4.77	1.06	3.16	5.23
	III	0.96	2.86	4.74	1.14	3.30	5.28	1.26	3.62	5.84
SSE	I	0.92	2.76	4.59	0.98	2.91	4.71	1.20	3.59	5.71
	II	0.93	2.78	4.62	0.94	2.84	4.73	1.06	3.15	5.22
	III	0.95	2.82	4.68	1.13	3.25	5.18	1.24	3.56	5.68
SE	I	0.92	2.76	4.59	0.96	2.84	4.71	1.05	3.14	5.28
	II	0.94	2.77	4.62	1.07	3.06	4.92	1.10	3.24	5.30
	III	0.91	2.75	4.54	1.01	3.00	4.81	1.15	3.26	5.37
ESE	I	0.93	2.78	4.64	0.95	2.84	4.71	0.99	2.98	4.25
	II	0.92	2.75	4.58	0.93	2.80	4.61	1.00	2.94	4.43
	III	0.80	2.35	3.81	0.93	2.70	4.47	1.08	3.19	4.98
E	I	0.94	2.80	4.65	0.96	2.86	4.67	0.99	3.03	4.97
	II	0.93	2.68	4.24	0.91	2.53	4.11	1.52	4.20	6.36
	III	0.35	1.16	2.18	0.55	1.55	2.74	0.68	1.96	3.69
ENE	I	0.57	1.73	3.18	0.47	1.55	2.78	0.56	1.52	2.46
	II	0.24	1.25	2.31	0.56	1.66	2.78	0.93	2.90	4.45
	III	0.44	1.36	1.79	0.35	1.30	1.54	0.48	1.19	1.71

Quadro 2 – Máximos dos índices de agitação na batimétrica -10 m (ZH), nas zonas I, II e III.

Direcção da onda	Zona	Máximos dos índices de agitação na batimétrica -10 m (ZH)								
		T= 6 s			T= 8 s			T= 10 s		
		Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m	Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m	Ho=1m	Ho=3m	Ho=5m
WNW	I	0.44	0.31	0.21	0.37	0.25	0.17	0.37	0.25	0.15
	II	0.08	0.03	0.02	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.03
	III	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.05	0.05	0.03
W	I	0.57	0.33	0.18	0.50	0.29	0.16	0.48	0.27	0.15
	II	0.09	0.05	0.03	0.08	0.06	0.03	0.10	0.06	0.03
	III	0.05	0.02	0.01	0.07	0.03	0.03	0.10	0.06	0.05
WSW	I	0.77	0.32	0.20	0.64	0.28	0.18	0.70	0.30	0.18
	II	0.23	0.10	0.07	0.21	0.11	0.10	0.31	0.19	0.18
	III	0.17	0.13	0.25	0.24	0.19	0.19	0.26	0.22	0.23
SW	I	0.47	0.28	0.24	0.59	0.35	0.29	0.59	0.42	0.43
	II	0.35	0.45	0.47	0.43	0.35	0.38	0.56	0.45	0.40
	III	0.91	0.83	0.73	0.82	0.74	0.74	0.77	0.76	0.73
SSW	I	0.49	0.55	0.55	0.54	0.52	0.54	0.73	0.66	0.62
	II	0.91	0.90	0.89	0.91	0.90	0.91	0.99	1.05	1.05
	III	0.95	0.94	0.94	1.08	1.06	1.04	1.20	1.16	1.14
S	I	0.92	0.88	0.87	0.82	0.79	0.77	1.04	0.97	0.94
	II	0.95	0.92	0.92	0.96	0.95	0.95	1.06	1.05	1.05
	III	0.96	0.95	0.95	1.14	1.10	1.06	1.26	1.21	1.17
SSE	I	0.92	0.92	0.92	0.98	0.97	0.94	1.20	1.20	1.14
	II	0.93	0.93	0.92	0.94	0.95	0.95	1.06	1.05	1.04
	III	0.95	0.94	0.94	1.13	1.08	1.04	1.24	1.19	1.14
SE	I	0.92	0.92	0.92	0.96	0.95	0.94	1.05	1.05	1.06
	II	0.94	0.92	0.92	1.07	1.02	0.98	1.10	1.08	1.06
	III	0.91	0.92	0.91	1.01	1.00	0.96	1.15	1.09	1.07
ESE	I	0.93	0.93	0.93	0.95	0.95	0.94	0.99	0.99	0.85
	II	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	1.00	0.98	0.89
	III	0.80	0.78	0.76	0.93	0.90	0.89	1.08	1.06	1.00
E	I	0.94	0.93	0.93	0.96	0.95	0.93	0.99	1.01	0.99
	II	0.93	0.89	0.85	0.91	0.84	0.82	1.52	1.40	1.27
	III	0.35	0.39	0.44	0.55	0.52	0.55	0.68	0.65	0.74
ENE	I	0.57	0.58	0.64	0.47	0.52	0.56	0.56	0.51	0.49
	II	0.24	0.42	0.46	0.56	0.55	0.56	0.93	0.97	0.89
	III	0.44	0.45	0.36	0.35	0.43	0.31	0.48	0.40	0.34

4.1 Influência da direcção de onda incidente

Relativamente às características da onda junto à praia do Porto Santo, estas dependem da direcção da onda incidente, como seria de esperar. Desta forma, apresenta-se de seguida a análise das características da agitação sobre a batimétrica dos -10 m (ZH) por direcção de onda incidente.

A análise dos diagramas de isolinhas dos valores de altura de onda e das cristas de onda, Fortes e Neves (2003), do Quadro 1 e do Quadro 2, permite constatar que:

➤ Direcções de onda incidentes entre WNW e SW

A agitação que atinge a zona junto à praia é o resultado da agitação que penetra no canal localizado entre a ilha do Porto Santo e o ilhéu de Baixo, denominado Boqueirão de Baixo (ver Figura 4), e a que contorna este ilhéu por difracção. Este facto conduz a uma diminuição da agitação incidente desde o largo até à batimétrica dos -10 m (ZH) (valores máximos do índice de agitação inferiores a 0.91 em todas as zonas da praia, ver Quadro 2). À medida que a direcção de onda incidente roda de WNW para SW, aumentam os valores de altura de onda na zona junto à praia, já que diminui a influência da protecção do ilhéu de Baixo.

A título de exemplo, apresentam-se na Figura 5 e na Figura 6, os resultados do modelo REFDIR que correspondem aos valores das alturas de onda em todo o domínio para uma onda incidente de período de 10 s, de altura de 1.0 m, com direcções de WNW, W, WSW e SW. Apresenta-se ainda, na Figura 7, os diagramas das cristas das ondas para as condições de agitação de $T=10$ s, altura de 1.0, com direcções de W e SW.

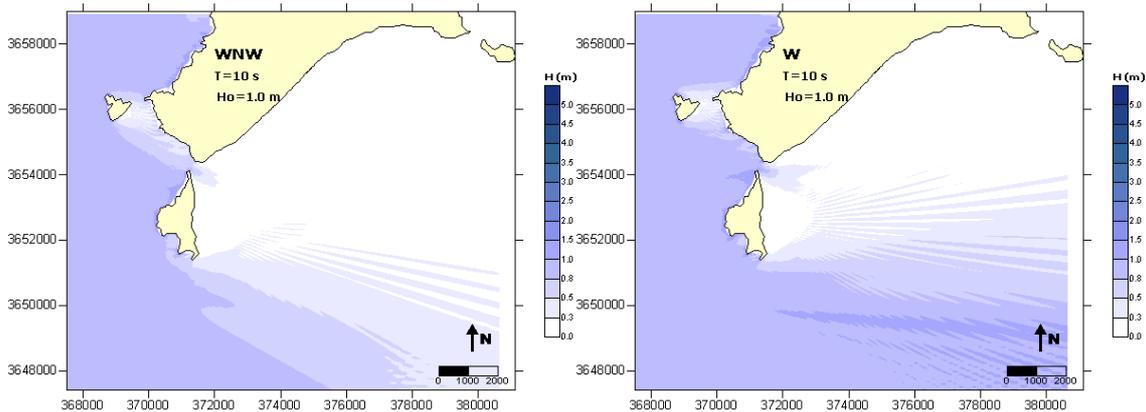


Figura 5 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de WNW e W.

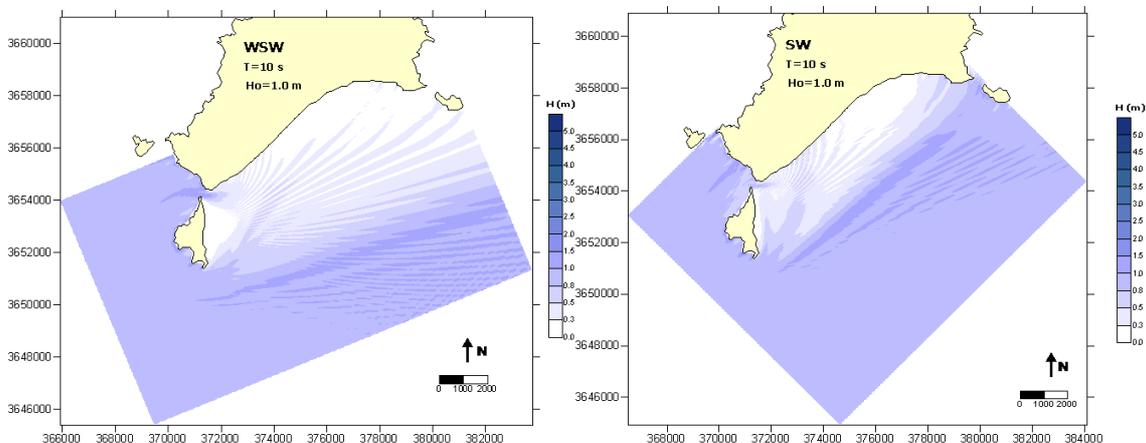


Figura 6 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de WSW e SW.

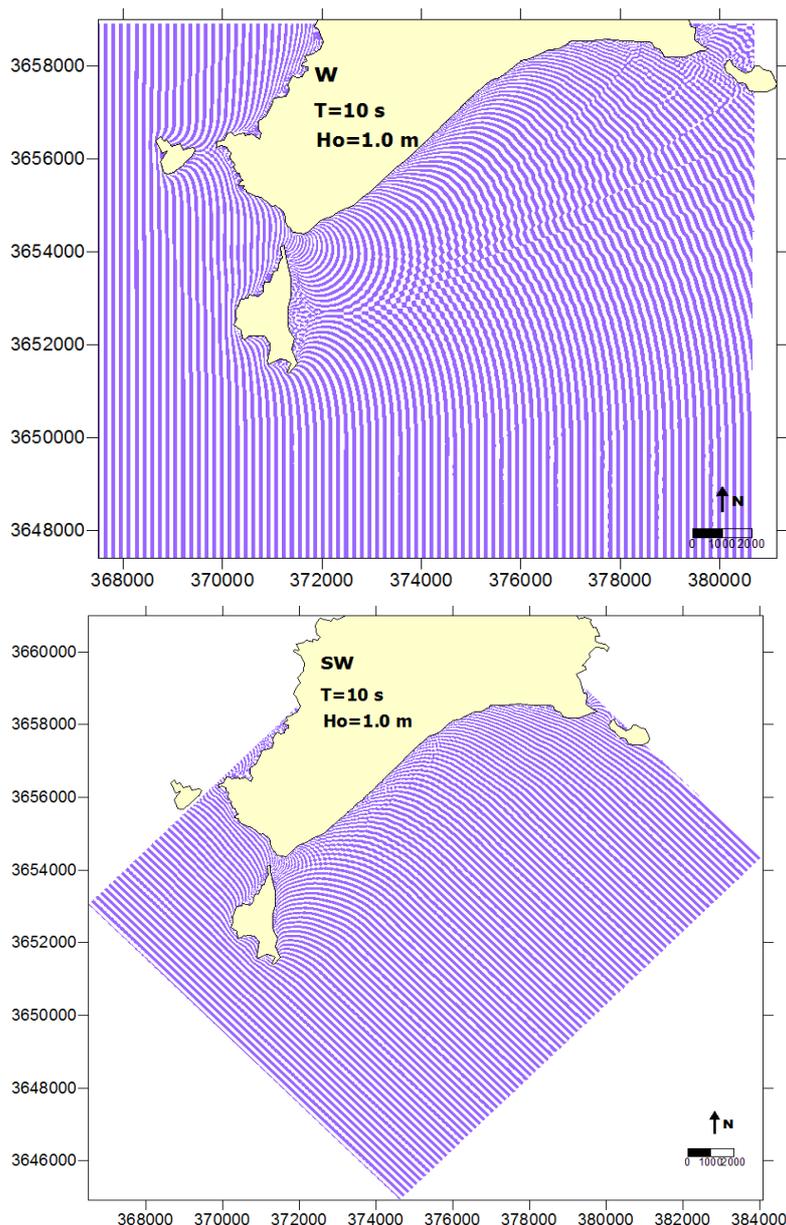


Figura 7 - Cristas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de W e SW.

➤ Direcções incidentes entre SSW e ESE

Estas são as direcções para as quais a praia está mais exposta à agitação incidente, sem grande protecção dos ilhéus, como se pode constatar pelos valores dos índices de agitação (ver Quadro 2) que são, para estas direcções, da ordem de 1.0 ou superior. Em particular, para períodos mais elevados, verifica-se que a agitação que atinge uma grande extensão da zona junto à praia (zonas II e III) é da mesma ordem de grandeza ou mesmo superior à da agitação incidente (Figura 8 a Figura 10, Quadro 1 e Quadro 2). No entanto, principalmente no caso da direcção de SSW, esta agitação é influenciada pela difracção em torno do ilhéu de Baixo, e por conseguinte verificam-se menores valores de altura de onda junto à praia. Tal pode ser constatado da Figura 8 à Figura 10 onde se apresentam os resultados do modelo REFDIF para uma onda incidente de período de 10 s, altura de 1.0 m com direcções de SSW, S, SSE, SE e ESE. Para o caso da direcção de S, apresentam-se

também os resultados do modelo correspondentes a um período de 8 s e altura de 1.0 m. Na Figura 11 apresentam-se os diagramas das cristas das ondas para as condições de agitação incidente de $T= 10$ s, $H_o= 1.0$ m, proveniente de S e SE.

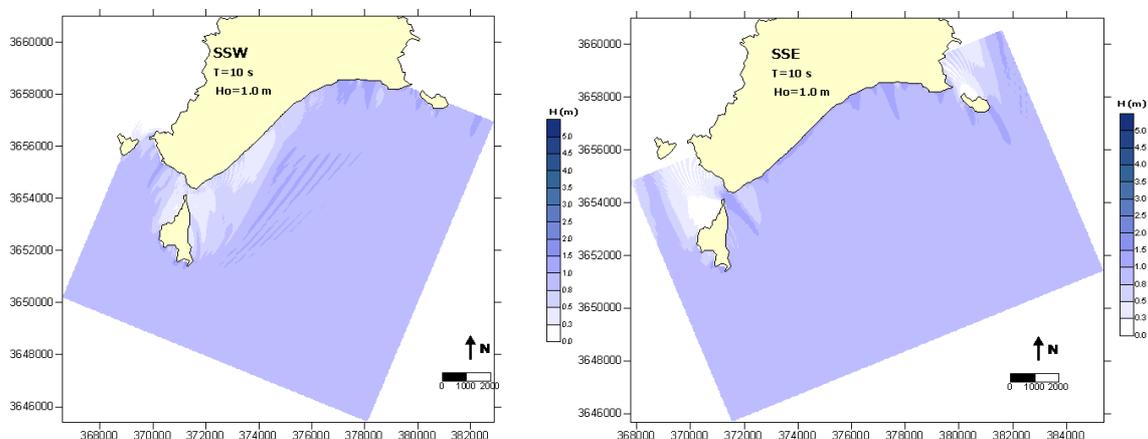


Figura 8 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de SSW e SSE.

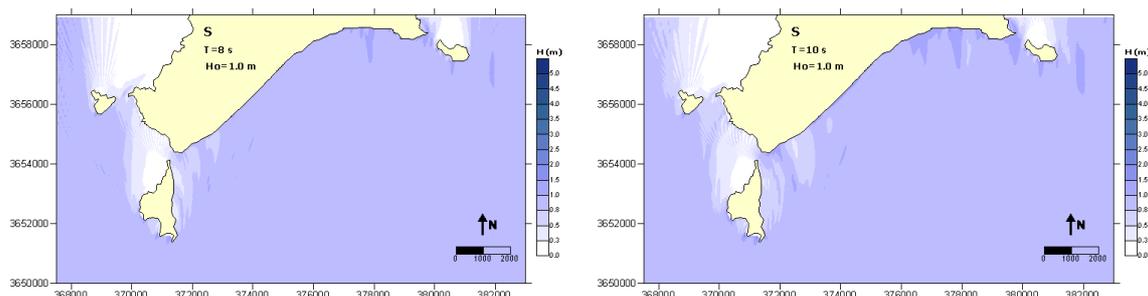


Figura 9 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de períodos $T=8$ s e 10 s e altura de 1.0 m. Direcção da onda de S.

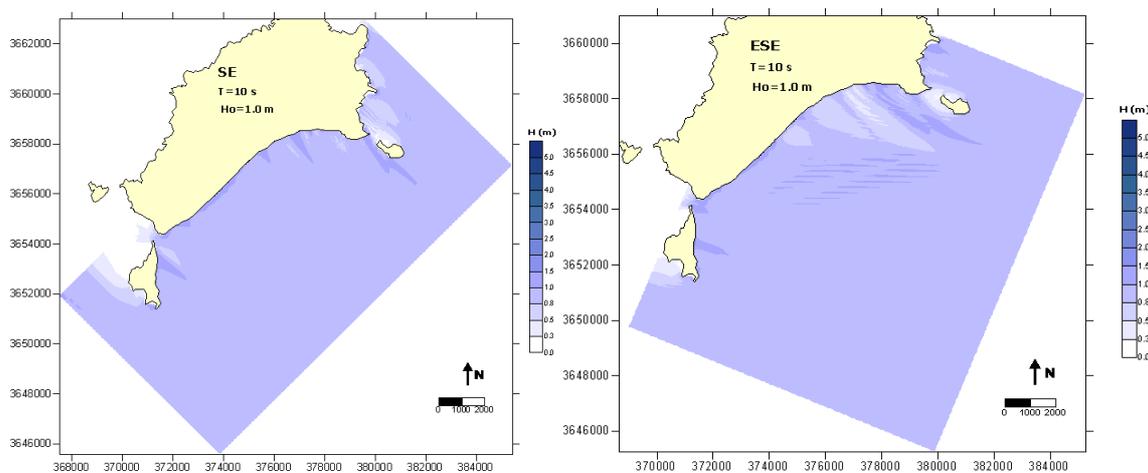


Figura 10 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de SE e ESE.

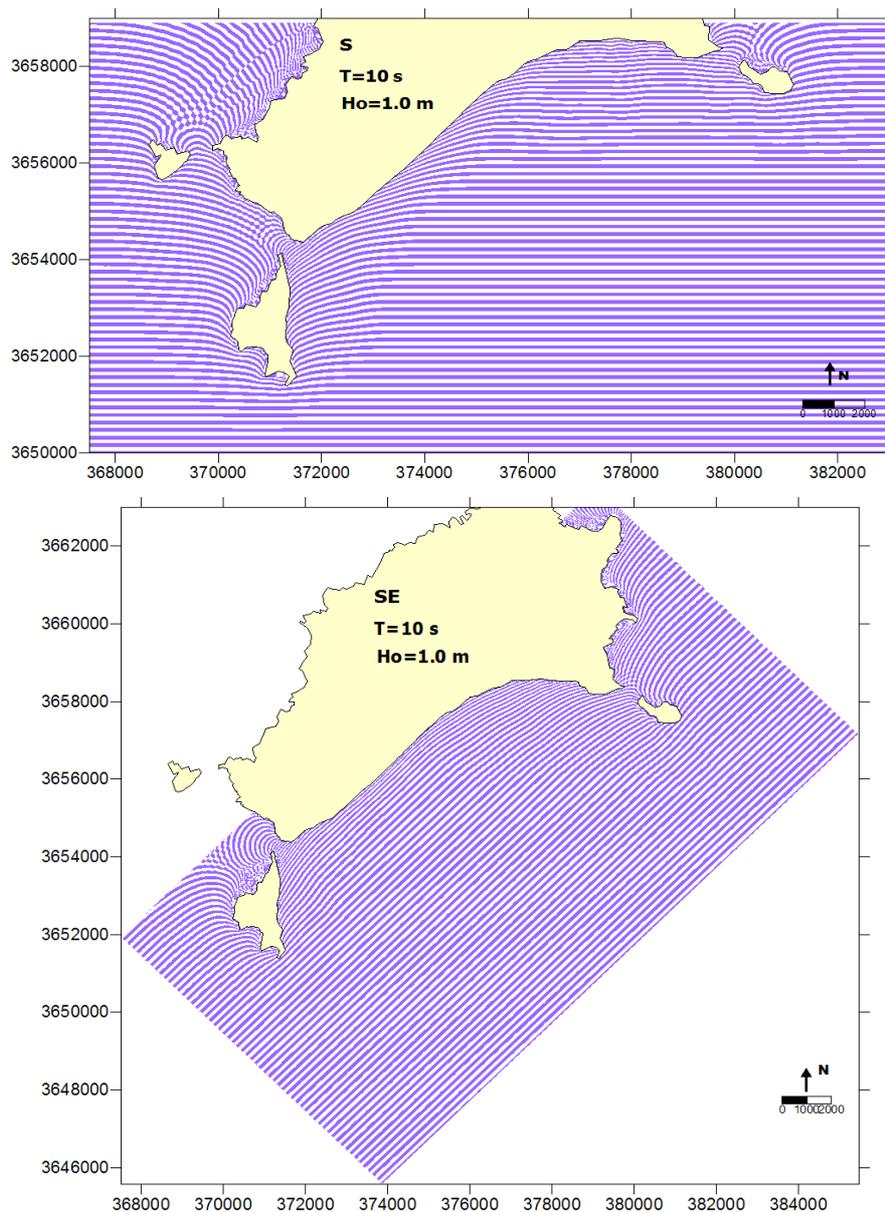


Figura 11 - Cristas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de S e SE.

➤ Direcções de E e ENE

A agitação que atinge a zona junto à praia é resultado da agitação que contorna o ilhéu de Cima por difracção e a que penetra no canal do Boqueirão de Cima. À medida que a direcção incidente roda de E para ENE, a agitação na zona junto à praia vai diminuindo, devido ao efeito da protecção do ilhéu. No entanto, na zona II ocorre uma concentração de energia, que é mais evidente para o período de 10 s, devido às características da batimetria na zona próxima e a sudoeste do ilhéu de Cima, semelhante à de um “baixo” com uma orientação aproximada de SE. Esta configuração leva à ocorrência de elevados valores da altura de onda na zona II, enquanto que as restantes zonas apresentam valores muito reduzidos de agitação. Tal pode ser constatado no Quadro 1 e Quadro 2, e na Figura 12, onde se apresentam os resultados do modelo REFDIF para uma onda incidente de período de 10 s, altura de 1.0 m com direcções de E e ENE. Na Figura 13, apresenta-se o diagrama das cristas das ondas para agitação incidente de $T=10$ s, $H_o=1.0$ m, proveniente de E.

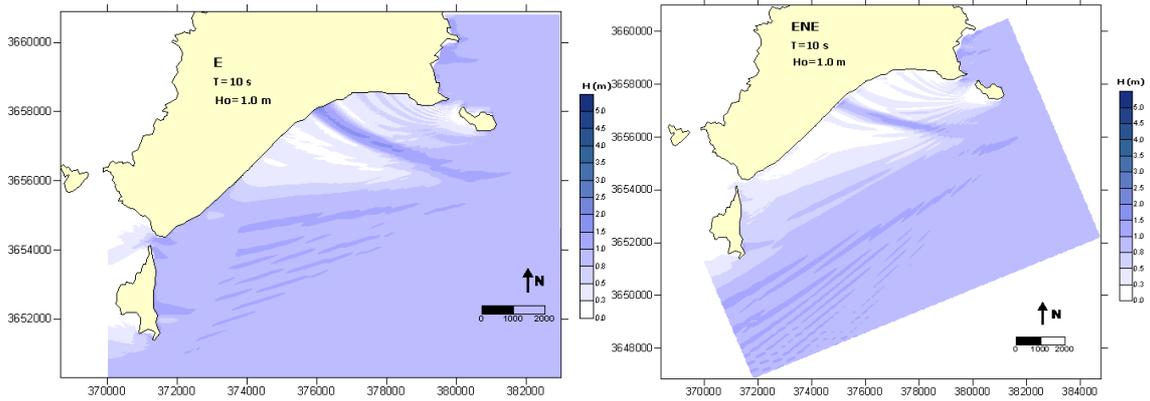


Figura 12 - Alturas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcções de onda incidente de E e ENE.

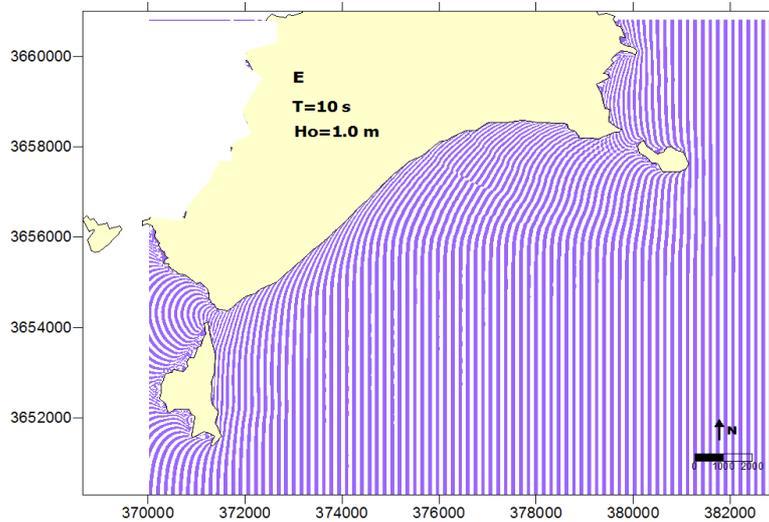


Figura 13 - Cristas de onda. Cálculos efectuados para uma onda incidente de período $T=10$ s e altura de 1.0 m. Direcção de onda incidente de E.

A fim de ilustrar melhor os efeitos descritos, apresentam-se na Figura 14 e na Figura 15 os valores da direcção da onda em pontos sobre a batimétrica dos -10 m (ZH), para as direcções de W, SW, S, SE e E.

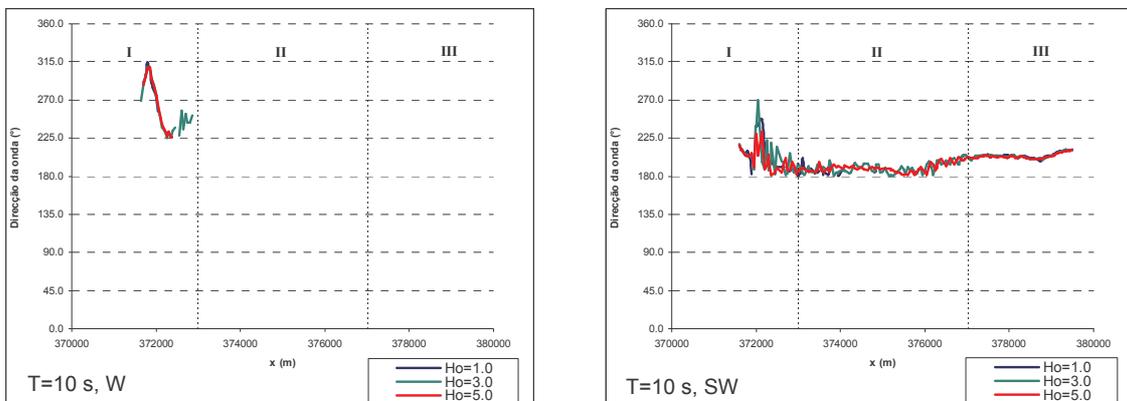


Figura 14 - Valores da direcção da onda na batimétrica -10 m (ZH), para uma onda incidente de período $T=10$ s e alturas de 1.0 m, 3.0 e 5.0 m. Direcções de onda incidente de W e SW.

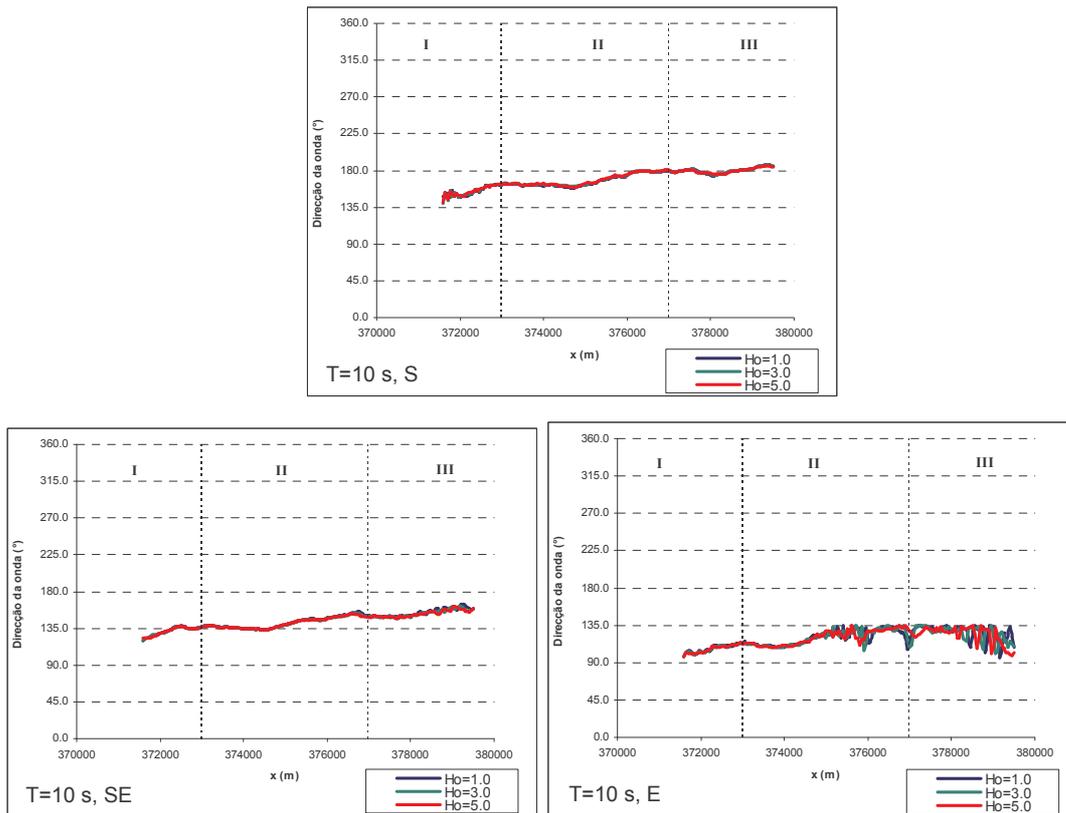


Figura 15 - Valores da direcção da onda na batimétrica -10 m (ZH), para uma onda incidente de período $T=10$ s e alturas de 1.0 m, 3.0 e 5.0 m. Direcções de onda incidente de S, SE e E

Das figuras anteriores pode-se verificar que:

- para as direcções incidentes de W e E (quando a altura de onda incidente é 1.0 m) a direcção da onda na batimétrica dos -10 m (ZH) tornou-se indefinida em determinadas zonas da praia, devido às reduzidas alturas de onda aí verificadas;
- para a direcção incidente de SW, as direcções que atingem a zona I sofrem uma grande variabilidade devido aos efeitos de difracção em torno do ilhéu de Baixo. No caso das zonas II e III a direcção junto à praia é próxima de SSW;
- para a direcção incidente de S e SE a direcção da onda junto à praia não sofre grandes alterações a não ser no sentido de se dispor perpendicularmente às batimétricas;
- para a direcção incidente de E, as direcções que atingem a zona II e III sofrem uma grande variabilidade devido aos efeitos de difracção em torno do ilhéu de Cima. No caso da zona I a direcção junto à praia é próxima de SSE;

4.2 Influência do período e da altura da onda incidente

A análise do Quadro 1 e do Quadro 2 bem como dos diagramas das isolinhas dos valores de altura de onda permite tirar algumas conclusões gerais quanto à influência do período da onda na agitação que atinge a zona junto à praia (batimétrica -10 m (ZH)).

Para direcções de onda incidente entre WNW e W não há grandes alterações dos valores de altura de onda na zona junto à praia com o período da onda incidente.

No entanto, para direcções de WSW a SW verifica-se uma maior influência do período da onda incidente na variação dos valores de altura de onda na zona junto à praia: à medida

que o período da onda aumenta verifica-se uma maior variabilidade dos valores de altura de onda ao longo da batimétrica -10 m (ZH), formando zonas de concentração e de divergência de energia. Este facto pode ser observado da Figura 16 à Figura 18 onde se apresentam os valores da altura de onda na batimétrica dos -10 m (ZH), correspondentes a períodos de onda de 6 s, 8 s e 10 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcções de W e SW.

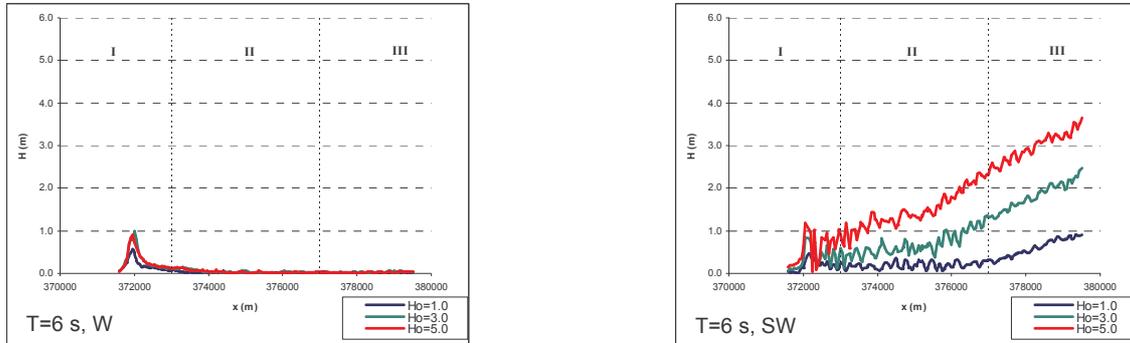


Figura 16 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados para o período de onda de 6 s, alturas de onda de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcções de onda de W e SW.

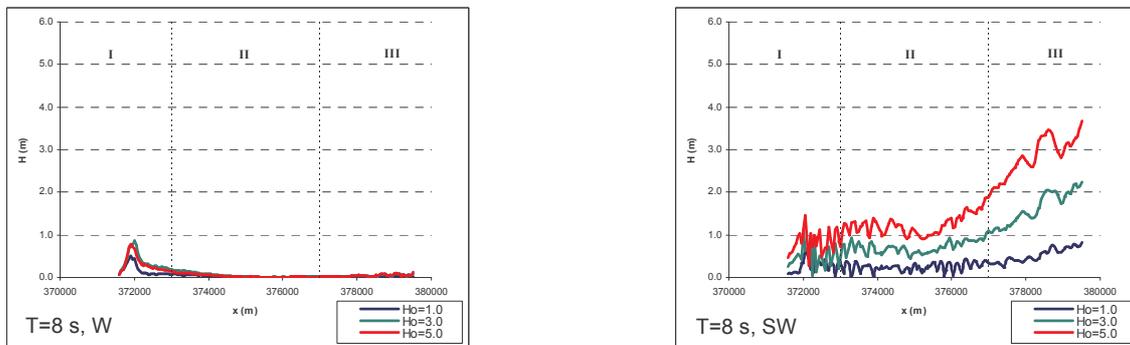


Figura 17 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados para o período de onda de 8 s, alturas de onda de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcções de onda de W e SW.

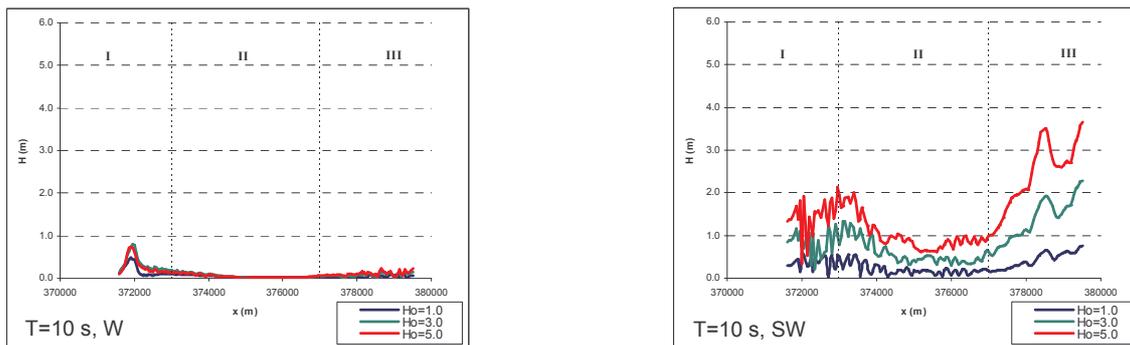


Figura 18 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados para o período de onda de 10 s, alturas de onda de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcções de onda de W e SW.

Para as direcções entre SSW e ESE existe uma clara influência do período da onda incidente nos valores de altura de onda na zona junto à praia, ou seja, ao longo da batimétrica -10 m (ZH): as alturas de onda nas zonas II e III são praticamente da mesma ordem de grandeza para o período de 6 s, dispondo-se de forma mais irregular à medida que o período da onda aumenta - ver, por exemplo, da Figura 19 à Figura 21 onde se apresentam os valores da altura de onda na batimétrica -10 m (ZH), correspondentes a períodos de onda incidente de 6 s, 8 s e 10 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de S e ESE.

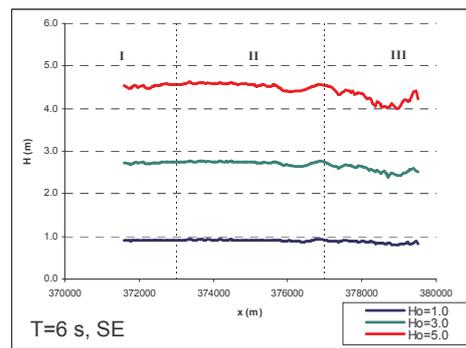
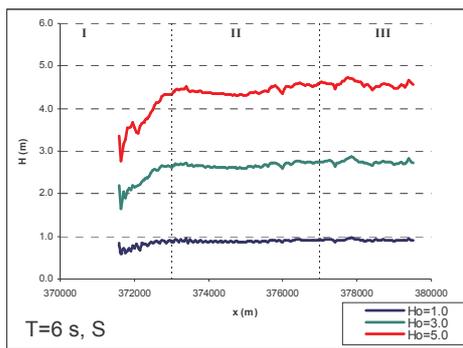


Figura 19 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 6 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de S e SE.

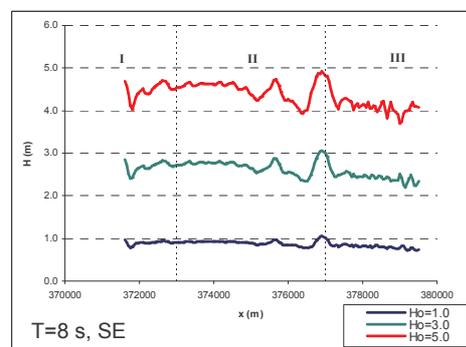
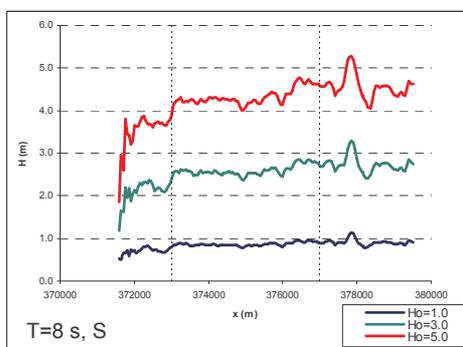


Figura 20 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 8 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de S e SE.

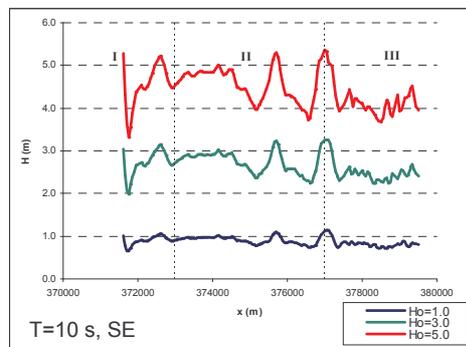
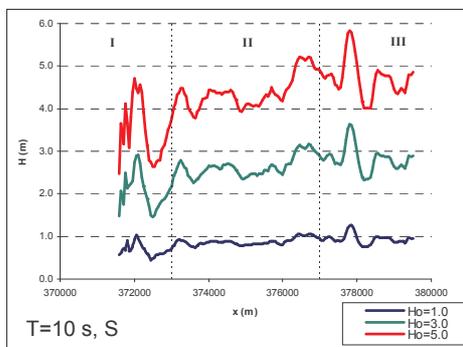


Figura 21 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 10 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de S e SE.

Para as direcções entre E e ENE, verificam-se algumas alterações dos valores de altura de onda com a alteração do período da onda: para o período de 6 s, dá-se um decrescimento das alturas de onda ao longo da batimétrica -10 m (ZH) da zona I para a zona III, enquanto que para períodos mais elevados este comportamento já não é tão evidente. Com efeito, principalmente para o caso do período de 10 s, verificam-se maiores valores de altura de onda na zona II do que nas restantes zonas. Como já foi referido, tal é devido às características da batimetria na zona próxima e a sudoeste do ilhéu de Cima, semelhante à de um “baixio” com uma orientação aproximada de SE. Esta configuração leva à ocorrência de elevados valores da altura de onda na zona II, enquanto que as restantes zonas apresentam valores muito reduzidos de agitação. Apresentam-se da Figura 22 à Figura 24, os valores da altura de onda

na batimétrica -10 m (ZH), correspondentes a períodos de onda de 6 s, 8 s e 10 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de E e ENE que ilustram este comportamento.

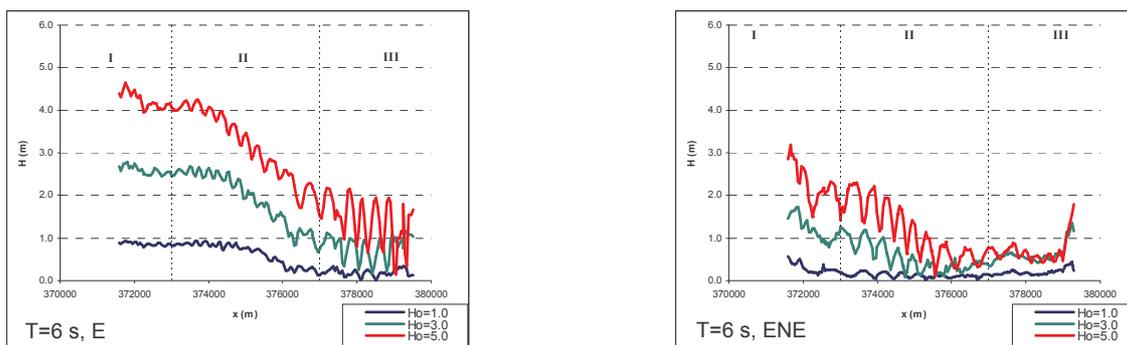


Figura 22 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 6 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de E e ENE.

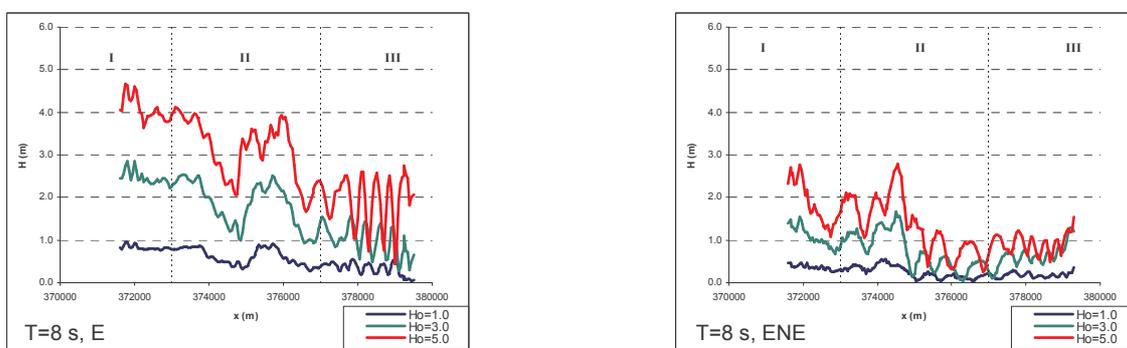


Figura 23 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 8 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de E e ENE.

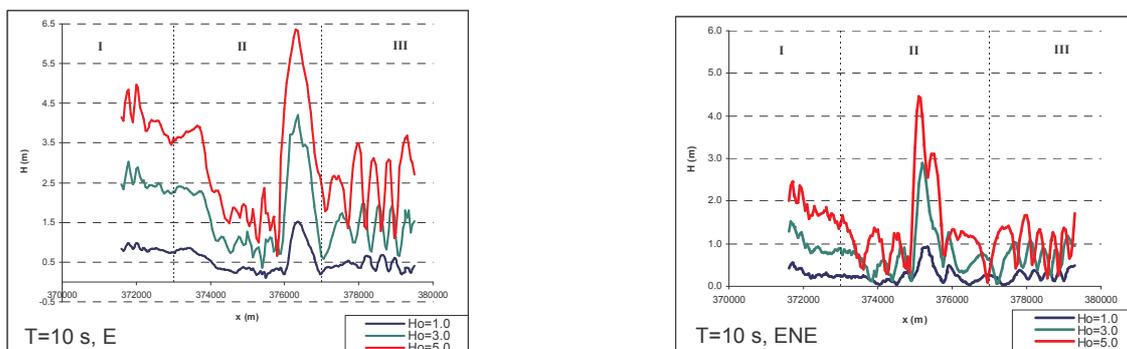


Figura 24 - Valores da altura de onda. Cálculos efectuados com o modelo REFDFIF, para o período de onda de 10 s, alturas de 1.0 m, 3.0 m e 5.0 m e direcção de E e ENE.

Relativamente à influência da altura de onda incidente nas alturas de onda na zona junto à praia, verifica-se que:

- Para as direcções de WSW a ENE, à medida que a altura de onda incidente aumenta, aumentam os valores da altura de onda junto à praia, ver Quadro 1 e da Figura 19 à Figura 24. Nas restantes direcções, Figura 16 a Figura 18, este comportamento não é tão notório, dados os reduzidos valores de altura de onda que se verificam em qualquer das zonas da praia;

- É de salientar que para as direcções entre SW e ESE, os valores máximos dos índices de agitação são da mesma ordem de grandeza, qualquer que seja a altura de onda incidente.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, descrevem-se os estudos de propagação da agitação marítima desde o largo até à zona da praia do Porto Santo, realizados com o modelo numérico REFDFIF, para diferentes condições de agitação incidente.

Os cálculos foram efectuados para ondas incidentes com períodos de 6 s, 8 s e 10 s, alturas de onda de 1 m, 3 m e 5 m e direcções de propagação entre WNW e ENE. Estas condições foram definidas com base no regime geral observado ao largo da Ilha do Porto Santo, definido em Capitão *et al.* (2003). Foram testadas todas as combinações possíveis entre estes períodos e alturas de onda, embora possa não ser realista considerar a ocorrência de valores de altura de onda elevados (3 m e/ou 5 m) associados aos períodos mais baixos (6 s e/ou 8 s). O nível de maré corresponde ao nível médio: +1.4 m (ZH).

Os resultados dos estudos com o modelo de propagação e deformação de ondas marítimas REFDFIF, mostraram que, relativamente às direcções de onda:

- Para as direcções incidentes entre WNW e SW, a agitação sofre uma redução significativa, dada a protecção principalmente do ilhéu de Baixo (valores máximos do índice de agitação inferiores a 0.91 em todas as zonas da praia). À medida que a direcção de onda incidente roda de WNW para SW, aumentam os valores de altura de onda na zona junto à praia, já que diminui a influência da protecção do ilhéu de Baixo;
- Para as direcções incidentes entre SSW e ESE, a praia está mais exposta à agitação incidente, sem grande protecção dos ilhéus de Baixo e de Cima, como se pode constatar pelos valores dos índices de agitação, que são da ordem de 1.0 ou superior;
- Para as direcções de E e ENE, e à medida que a direcção incidente roda de E para ENE, a agitação na zona junto à praia vai diminuindo, devido ao efeito da protecção do ilhéu de Cima. No entanto, ocorre uma concentração de energia na zona II, que é mais evidente para o período de 10 s.

A influência do período da onda incidente nas alturas de onda na zona junto à praia torna-se significativa para as direcções entre SSW e ESE. Para estas direcções, as alturas de onda ao longo da batimétrica -10 m (ZH) (zonas II e III) são praticamente da mesma ordem de grandeza para o período de 6 s, dispondo-se de forma mais irregular à medida que o período da onda aumenta. Para as direcções entre E e ENE, e para o período de 6 s, dá-se um decréscimo das alturas de onda ao longo da batimétrica -10 m (ZH) da zona I para a zona III da praia, enquanto que para períodos mais elevados, este comportamento já não é tão evidente.

Verificou-se também que à medida que a altura da onda incidente aumenta, aumentam os valores da altura de onda junto à praia, para as direcções de WSW a ENE. Para as restantes direcções este comportamento não é tão notório, dados os reduzidos valores de altura de onda que se verificam em qualquer das zonas da praia.

É de notar que não foi possível determinar os valores da direcção de onda em algumas zonas para as direcções de onda incidente entre WNW e SW, já que a altura de onda era muito reduzida. Nas restantes direcções incidentes, a direcção da onda junto à praia é função do período e da direcção da onda incidente e dos efeitos de refacção e difracção que a onda sofre na sua propagação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à APRAM a autorização para publicação dos resultados destes estudos. Expressam os seus agradecimentos, também, aos técnicos experimentadores Franklin Carvalho e Branca Branco pelo apoio na revisão do texto e na produção das figuras.

REFERÊNCIAS

- Berkhoff, J.C.W. (1972) – “*Computation of combined refraction-diffraction*”. Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE, Vancouver.
- Capitão, R.C.; Fortes, C.J.E.M; Coli, A. B. (2003) – “Manutenção e melhoramento da praia de Porto Santo. Relatório 1: Caracterização e Propagação da Agitação Marítima. Volume 1: Regimes de agitação marítima”, Relatório 238/03 – NPE, LNEC, Agosto.
- Climaco *et al.* (2002) – “Manutenção e melhoramento da praia de Porto Santo. Relatório 3: Estudo da dinâmica sedimentar da praia do Porto Santo. Relatório /03 – NEC, LNEC, Outubro (em preparação).
- Coli, A.B.; Santos, J.A.; Fortes, C.J.; Capitão, R.; Carvalho, M.M. (2002) – Metodologia de propagação de regimes de agitação marítima do largo para a costa: análises dos modelos BACKTRACK-REFSPEC e SWAN. 6º Congresso da Água, Porto, Portugal.
- Covas, J.A.; Pontes, M.T. (1988) – Modelo matemático de refração de ondas irregulares, Relatório conjunto LNEC/LNETI, Lisboa. Dally, W.R.; Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. (1985) “*Modelling wave transformations in the surf zone*”. J. Geophysical Research, Vol. 90, (6), pp. 11917-11927.
- 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, January.
- Fortes, C.J.E.M; Neves, M.A. (2003) – “Manutenção e melhoramento da praia de Porto Santo. Relatório 1: Caracterização e Propagação da Agitação Marítima. Volume 2: Cálculos de refração-difração com o modelo numérico REF/DIF”, Relatório 237/03 – NPE, LNEC, Agosto.