



DOCA DE RECREIO DO PORTO DE VILA DO CONDE ESTUDOS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

Ana Catarina Zózimo, Rui Capitão, Maria da Graça Neves,
Conceição Fortes, M. Mendes de Carvalho

LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, tel:+351.21.8443756, fax:+351.21.8443019

Sumário

Na presente comunicação descreve-se o estudo, em modelo matemático, realizado pelo LNEC, com vista à caracterização das condições de agitação marítima na zona do molhe de abrigo da doca de recreio a construir no porto de Vila do Conde.

O estudo compreendeu duas fases: a determinação do regime de extremos na zona adjacente ao porto de Vila do Conde e a caracterização da agitação marítima na zona do molhe de abrigo da doca de recreio, por propagação do regime anterior. A determinação do regime de extremos foi efectuada através da metodologia de transferência de regimes de agitação desenvolvida no LNEC, utilizando o modelo matemático de refacção de ondas irregulares BACKTRACK-REFSPEC e o programa de interpolação INTERPOL. A partir do regime de extremos assim definido na entrada do porto de Vila do Conde, procedeu-se à caracterização da agitação marítima na zona do molhe de abrigo através da aplicação do modelo matemático de refacção –difracção - reflexão DREAMS.

A análise dos resultados obtidos permitiu avaliar as condições de agitação incidente (direcção de propagação e período da onda) para as quais o porto de Vila do Conde se encontra mais desprotegido.

1 Introdução

O porto de Vila do Conde situa-se no estuário do Rio Ave e é constituído por dois molhes, designados por molhe da Sra. da Guia e molhe da Azurara. No interior do porto pretende-se construir uma doca de recreio, constituída por uma bacia de estacionamento, terraplano de apoio e obras de abrigo à agitação gerada no estuário e à que penetra na barra - Figura 1.

Para a caracterização da agitação marítima na zona do molhe de abrigo da doca de recreio a construir, os estudos realizados no LNEC compreenderam duas fases:

- ❖ Caracterização do regime de extremos da agitação marítima na zona adjacente ao porto de Vila do Conde;
- ❖ Caracterização da agitação marítima na zona do molhe de abrigo da doca de recreio de Vila do Conde, por propagação do regime anterior.

A 1.^a fase, Capitão *et al.* (2000), consistiu na determinação do regime de extremos da agitação marítima num ponto junto aos molhes de Vila do Conde, com base nos dados obtidos entre 1984 e 1996 pela bóia-ondógrafo da Figueira da Foz e na utilização da metodologia de passagem costa-largo-costa descrita em Capitão *et al.* (1994). O ponto referido situa-se numa batimétrica próxima de -10.0 m (ZH).

Na 2.^a fase, Fortes e Neves (2000), procedeu-se à propagação de um conjunto de ondas regulares, calculadas com base no regime de extremos anterior, desde a zona de entrada do porto de Vila do Conde até ao seu interior, utilizando o modelo matemático de refacção-difracção-reflexão, DREAMS.

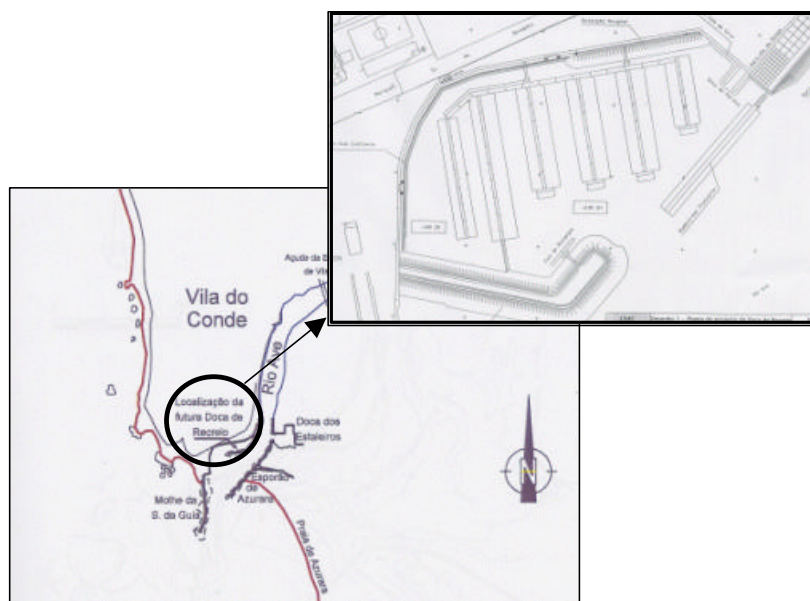


Figura 1 – Porto de Vila do Conde. Adaptado de Fortunato *et al.* (2001)

2 Caracterização do regime de extremos na zona adjacente ao porto de Vila do Conde

2.1 Introdução

Na determinação de um regime de extremos em Vila do Conde (caracterizado pelos valores de altura significativa máxima anual, HS anual, os correspondentes períodos, TZ_A , e direcções de onda, Θ_A), deve-se considerar o maior número de dados disponíveis, durante o maior período de tempo possível. Infelizmente, não existem dados suficientes disponíveis em Vila do Conde. Este problema ocorre frequentemente. Para o contornar, foi desenvolvida uma metodologia que consiste em considerar o regime de agitação num determinado local, baseado em dados observados, que esteja o mais próximo possível do local de estudo (a entrada de Vila do Conde) e, seguidamente, transferir esse regime para o largo, através de modelos matemáticos de refracção de ondas irregulares. Finalmente, transfere-se o regime ao largo para o local de estudo, usando os mesmos modelos matemáticos.

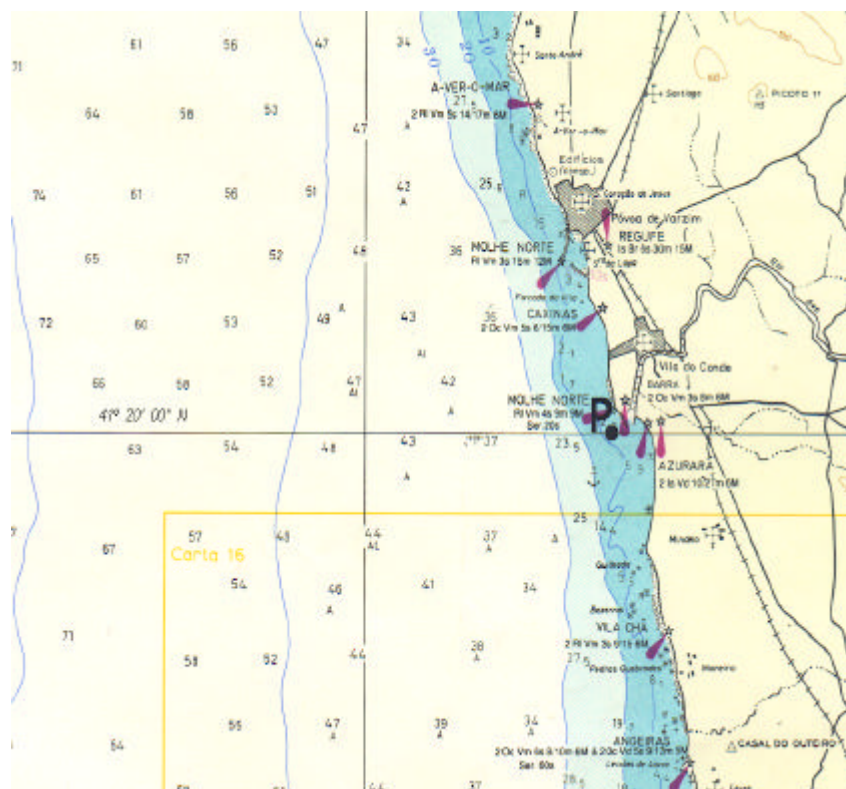
O local escolhido onde o regime é conhecido e disponível é a Figueira da Foz, cerca de 130 km a Sul de Vila do Conde. Esta escolha foi devida a duas razões principais: trata-se de um local onde existe uma razoável quantidade de dados de agitação para o objectivo deste estudo e faz sentido considerar que o clima de ondas ao largo da Figueira da Foz é semelhante ao de Vila do Conde, pois ambos estão localizados na costa oeste de Portugal.

Uma vez calculado o regime de extremos na Figueira da Foz, este é transferido para o largo e do largo para um ponto à entrada do Porto de Vila do Conde: o ponto P, de coordenadas: $41^\circ 20' 00''$ N e $8^\circ 45' 05''$ W e profundidade: -9.2 m (ZH) - Figura 2.

Em resumo, o procedimento é o seguinte:

- ❖ Definição do regime de extremos na Figueira da Foz, baseado em dados registados entre 1984 e 1996;
- ❖ Transferência do regime anterior para o largo, o qual se admite igual ao regime ao largo tanto na Figueira da Foz como em Vila do Conde;
- ❖ Transferência do regime ao largo para o ponto P à entrada do porto de Vila do Conde;
- ❖ Determinação da relação aproximada $TZ=f(HS)$ utilizando os regimes anteriores.

As secções seguintes descrevem em maior detalhe cada um dos itens mencionados.



Longitude 08° 50' 00" W

© Copyright Marinha, Instituto Hidrográfico, 1987

LEGENDA

P - Ponto junto a Vila do Conde, para onde foi transferido o regime de extremos ao largo da Figueira da Foz. Coordenadas de P: 41° 20' 00" N – 8° 45' 05" W, prof.: -9.2 m (ZH).

Figura 2 – Localização do ponto P à entrada do porto de Vila do Conde para onde se realizou a transferência do regime de extremos a partir da Figueira da Foz

2.2 Definição do regime de extremos local com base em dados observados

A obtenção do regime de extremos consiste na determinação da distribuição de HS anual e no cálculo dos valores (extrapolados) com essa distribuição alargada a um conjunto de períodos de retorno e na associação a esses valores de gamas de períodos e direcções. Assim, as amostras são constituídas por valores de HS anual, os correspondentes períodos, TZ_A , e direcções de onda, Θ_A .

A razão para considerar apenas valores anuais deriva do facto de as amostras terem de ser aleatórias (os correspondentes valores devem ser independentes e da mesma distribuição), o que é uma das condições necessárias para a aplicação da função de distribuição de probabilidade de valores extremos, Carvalho e Capitão (1996).

Estabelecidas as amostras de valores (de extremos anuais ou, eventualmente, de extremos de temporais independentes), há que escolher um modelo de distribuição de probabilidade a usar para as extrapolações dos valores das amostras. O programa ADAPTA, Carvalho e Capitão (1990), permite usar seis distribuições de probabilidade por forma a testar o seu ajuste às amostras de extremos: as assintóticas de máximos de Gumbel, de Fréchet e de Kimball, a assintótica de mínimos (Weibull), a exponencial e a lognormal. Para estimar os parâmetros dessas distribuições, o programa ADAPTA usa o método dos mínimos quadrados.

Para distinguir a qualidade do ajuste dos diferentes modelos de distribuição são frequentemente calculados dois parâmetros: o erro padrão das estimativas, e , e o coeficiente

de correlação, r . Pode posteriormente calcular-se outro parâmetro, a estatística do teste Kolmogorov-Smirnov, d , que, juntamente com um dos anteriores parâmetros, permite caracterizar o melhor ou pior ajuste do modelo de distribuição de probabilidade às amostras. Os parâmetros e (ou r) e d podem ser combinados e normalizados por forma a produzirem um único valor que permita avaliar o ajuste. Assim, surge o *parâmetro combinado*, c , calculado como exposto em Carvalho e Capitão (1996).

Escolhido o modelo de distribuição a usar, é possível obter os valores extrapolados da altura de onda para diferentes períodos de retorno, T . Aos valores extrapolados de HS anual podem associar-se direcções e períodos locais, ao utilizar um dos dois métodos seguintes:

- ❖ Tratamento de amostras de valores anuais agrupados por sectores de direcções (gamas de períodos), o que permite associar direcções (períodos) a valores extrapolados;
- ❖ Obtenção de distribuições de amostra conjuntas de alturas e direcções (períodos), a partir de valores máximos mensais, o que fornece informações sobre a associação de alturas e direcções (períodos), no que respeita a valores observados.

Constrói-se, assim, uma tabela de valores, para cada período de retorno, de extremos de alturas de onda locais, de períodos de onda (ou gamas de períodos de onda) e de direcções de onda (ou gamas de direcções) associados a esses valores extremos de altura de onda.

2.3 Metodologia de passagem do regime de agitação da costa para o largo e do largo para a costa

Para a definição dum regime de agitação marítima no local de interesse são utilizados dados de agitação marítima recolhidos por equipamento adequado (normalmente, bóias-ondógrafo, direccionais, se possível) numa zona o mais próxima do local de estudo. Idealmente, esses dados devem ser em número elevado (*i.e.*, obtidos através de observação durante muitos anos) e de qualidade (*i.e.*, sem falhas e com a garantia de que o equipamento de onde provêm funcionou sempre adequadamente durante o período de tempo a que estes se reportam).

Infelizmente, ao longo da costa portuguesa são escassos os locais onde são recolhidos, durante um período de tempo suficientemente longo e de forma sistemática, dados que permitam uma conveniente caracterização do regime de agitação marítima local. Com efeito, dos vários locais onde o Instituto Hidrográfico instalou bóias-ondógrafo, apenas os dados provenientes de Figueira da Foz, de Sines e, mais recentemente, de Faro, permitem realizar uma análise estatística aceitável ao ponto de possibilitar a definição de um regime de agitação marítima local, que seja pelo menos indicativo. Mesmo assim, nos locais referidos (principalmente, Sines), há que ter em conta algumas reservas de aplicação. Nos restantes locais da costa portuguesa, quando existe escassez de dados, o regime serve apenas como indicação.

Para colmatar essa dificuldade, quando há mesmo necessidade de ter uma indicação do regime de agitação marítima num local onde há poucos, ou nenhuns, dados observados, desenvolveu-se uma metodologia, apresentada em Capitão *et al.* (1994), para a obtenção das características da agitação marítima num qualquer ponto da costa, com base em dados recolhidos por bóias-ondógrafo numa zona relativamente próxima do mesmo. Esta metodologia, já aplicada com sucesso a vários locais, consiste na passagem da agitação marítima dum local onde haja dados que permitam obter um regime observado minimamente válido, para o largo, e, a partir daí, transferir o regime do largo para outros locais da costa portuguesa não muito distantes da zona onde foram inicialmente recolhidos os referidos dados. Ambas as transferências são conseguidas com o apoio de vários modelos matemáticos existentes no LNEC - Figura 3.

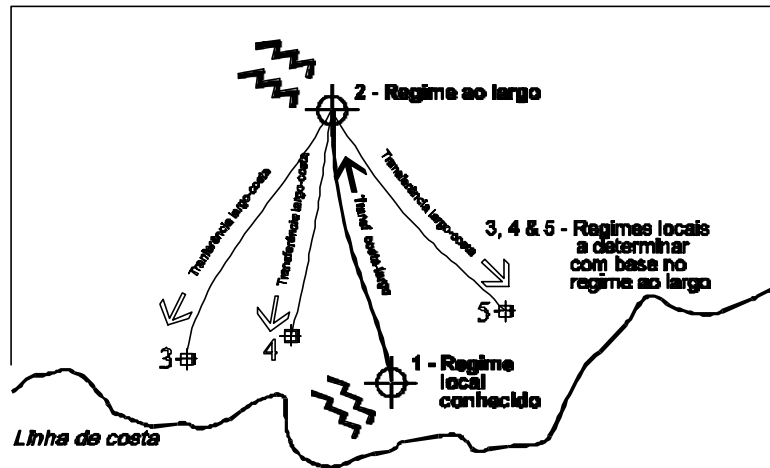


Figura 3 – Metodologia de transferência de regimes de agitação do local (Ponto 1) para o largo (Ponto 2) e do largo para junto à costa (Pontos 3, 4 e 5)

2.3.1 Modelos matemáticos usados na passagem do regime de agitação para o largo e do largo para a costa.

Para a transferência de regimes de agitação, utiliza-se o modelo matemático de refração de ondas irregulares - BACKTRACK e REFSPEC, Covas e Pontes (1988) e o programa de interpolação - INTERPOL - Capitão *et al.* (1994), descritos sumariamente a seguir. Chama-se a atenção para o facto de esta metodologia ser comum à transferência de regimes extremos, médio ou geral definidos no local onde existam dados de bóias-ondógrafo.

BACKTRACK calcula o percurso dos raios de onda para uma dada batimetria. Este programa calcula e desenha os leques de refração e cria um ficheiro contendo, para cada leque correspondente a uma certa frequência, os valores das grandezas características das ondas e uma tabela com os valores das direcções Θ e Θ_0 dos raios no ponto e em águas profundas. Os principais dados de entrada são os valores das coordenadas do ponto de origem dos leques, a frequência de cada leque, os valores mínimo e máximo do ângulo Θ no ponto e o respectivo incremento $\Delta\Theta$, os níveis de maré de referência, bem como os valores da profundidade nos nós de uma quadrícula regular de célula quadrada. Os resultados dos cálculos relativos a cada leque de refração são constituídos pelos desenhos do leque de refração global, por uma listagem dos valores das principais grandezas características da onda referentes a esses leques de refração, e ainda pelo ficheiro acima referido.

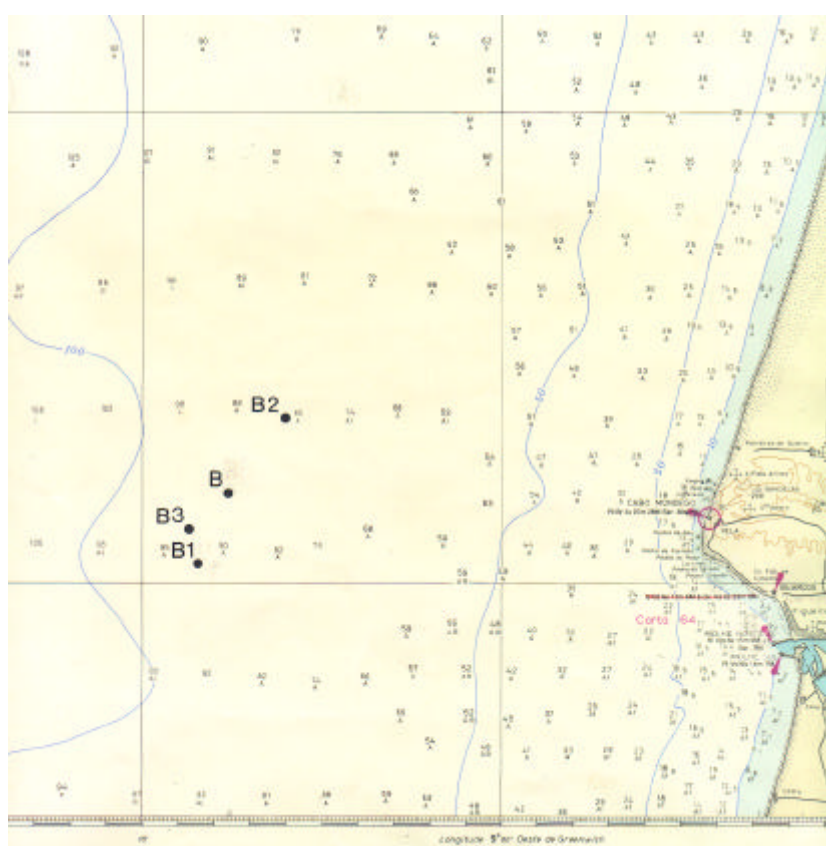
REFSPEC efectua a propagação de ondas irregulares desde o largo até à costa tendo em conta unicamente o fenómeno da refração. Utiliza os resultados do BACKTRACK para determinar num ponto, em águas pouco profundas, a resposta a um espectro de águas profundas. O espectro de águas profundas é definido como o produto de uma função de distribuição direccional (do tipo potência par da função coseno, funções de Gauss ou *stereo-Wave Observation Project*) por um espectro em frequência do tipo Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Newman ou Bretschneider. Este espectro é caracterizado pelo período de pico, direcção espectral média (coincidente com a direcção espectral de pico, uma vez que a função de distribuição direccional é simétrica e não há influência do fundo) e um parâmetro s de dispersão da distribuição direccional. Os resultados produzidos são constituídos, para além da listagem do espectro direccional em direcção e em frequência no ponto considerado, pela relação entre a altura significativa no ponto e em águas profundas, H/H_0 , pelo período de zero ascendente, TZ , pela direcção espectral de pico, Θ , e pela direcção espectral mediana Θ_m .

INTERPOL é um programa usado para estimar, por interpolação, valores numa grelha bi-dimensional de valores tabelados de TZ , Θ e H/H_0 e de dois vectores unidimensionais de valores de cada uma das variáveis independentes TZ e Θ_0 . Os valores de entrada deste programa são os que resultam dos cálculos de REFSPEC (valores de H/H_0 , TZ , Θ e Θ_m em função dos valores correspondentes ao largo TZ_0 e Θ_0) e os resultados são as características do clima de agitação (H , TZ e Θ) ao largo ou num ponto junto à costa, consoante se está a

efectuar a transferência das características da agitação marítima local dum ponto na costa para o largo, ou do largo para um ponto na costa.

2.4 Definição do regime de extremos na Figueira da Foz

O porto da Figueira da Foz encontra-se localizado na costa oeste de Portugal, a norte de Lisboa - Figura 4. Os dados de agitação marítima na Figueira da Foz foram recolhidos com bóia não-direccional DATAWELL WAVERIDER, de 1981 a meados de 1990, e com bóia direccional DATAWELL WAVEC, a partir de Julho de 1990. Note-se que, embora existam dados da bóia-ondógrafo desde 1981, só a partir de 1984 é que há dados de direcções. Estes últimos foram recolhidos visualmente até meados de 1990, altura a partir da qual provêm de bóia-direccional. Por outro lado, a bóia esteve localizada em três posições. A posição média é designada por B e tem as coordenadas $42^{\circ} 12' 30'' \text{ N} - 9^{\circ} 07' 36'' \text{ W}$ e profundidade de -89 m.



© Copyright Marinha, Instituto Hidrográfico, 1985

LEGENDA

-
- B1** - Bóia-ondógrafo na posição: $40^{\circ} 10' 30'' \text{ N} - 9^{\circ} 08' 30'' \text{ W}$, prof.: -92 m (ZH);
 - B2** - Bóia-ondógrafo na posição: $40^{\circ} 13' 30'' \text{ N} - 9^{\circ} 06' 00'' \text{ W}$, prof.: -83 m (ZH);
 - B3** - Bóia-ondógrafo direccional na posição: $40^{\circ} 11' 08'' \text{ N} - 9^{\circ} 08' 44'' \text{ W}$, prof.: -92 m (ZH);
 - B** - Ponto origem dos leques de refração: $40^{\circ} 12' 00'' \text{ N} - 9^{\circ} 07' 36'' \text{ W}$, prof.: -89 m (ZH).
-

Figura 4 – Mapa de localização das posições da bóia-ondógrafo e do ponto origem dos leques de refração na zona marítima adjacente à Figueira da Foz

Deve-se ter em atenção que, a partir de 1990, os dados provêm de bóia-ondógrafo direccional, em que as direcções são referidas ao Norte magnético. A informação sobre a declinação magnética existente nas cartas hidrográficas do Instituto Hidrográfico (IH), em particular na carta número 64, Barra e Porto da Figueira da Foz, 1985, permite concluir que essa declinação é de cerca de $6^{\circ} 30' \text{ W}$ em 1990, decrescendo cerca de $8'$ por ano, o que resulta em cerca de 6° W de 1993 a 1996.

2.4.1 Organização das amostras para o regime de extremos

A partir dos conjuntos de valores tri-horários, extraíram-se os máximos de HS por ano marítimo e por sector de direcções, definindo-se *ano marítimo* como o período de 12 meses entre 1 de Julho de um ano civil e 30 de Junho do ano seguinte. Desta forma, os máximos de HS por ano marítimo, HS anual, podem ser considerados independentes. Os anos marítimos disponíveis são os 12 anos de 1984-85 a 1995-96 - Quadro 1.

Quadro 1 – Meses com dados, na Figueira da Foz

Meses com dados por Anos Marítimos	Inverno Marítimo											
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
84-85												
85-86												
86-87												
87-88												
88-89												
89-90												
90-91												
91-92												
92-93												
93-94												
94-95												
95-96												

Mês razoavelmente completo
 Mês muito incompleto
 Mês sem dados

Neste trabalho, determinou-se o regime de extremos da agitação para cada sector de direcções de onda, observado no local da bóia (note-se que a direcção medida na bóia da Figueira da Foz não é muito distinta da do largo).

Foram considerados 6 sectores de direcções com abertura de 30°, varrendo de Sul a Norte, ou seja, os sectores de 180°-210°, 210°-240°, ..., 330°-360°. Para cada HS máximo anual em cada sector foram anotados os correspondentes valores de Θ , TZ e HM (altura máxima). Verificou-se que:

- ❖ No sector 180°-210°, apenas em 5 anos marítimos, não todos seguidos, ocorriam valores de HS, pequenos e em número muito exíguo. Este sector não foi por isso considerado.
- ❖ O sector 330°-360° foi rejeitado, dado que a amostra obtida é apenas de tamanho 3.

Assim, consideraram-se apenas os 4 sectores: 210°-240°, 240°-270°, 270°-300°, 300°-330° e construíram-se as amostras indicadas no Quadro 2, que permitem a extrapolação do regime de extremos para os sectores de direcções (medidos na bóia) considerados.

Para o sector 240°-270°, existem 11 valores referentes a 12 anos, pelo que o intervalo médio entre observações considerado, para efeitos de extrapolação por distribuição assintótica de extremos, foi de $u=12/11=1.091$.

Feitos os cálculos de ajustamento das 4 amostras de HS anual às distribuições de Gumbel e Fréchet e aplicando o método do parâmetro combinado, desenvolvido em trabalhos anteriores (por exemplo, Carvalho, 1992; Filipe *et al.*, 1999), para escolher quais as distribuições mais adequadas, obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 3.

Quadro 2 – Amostras de HS anual utilizadas e correspondentes Θ e TZ, por sectores de direcções

Sector (°)	210-240			240-270			270-300			300-330		
	Tam. amostra: 7, u = 1			Tam. amostra: 11, u = 1.091			Tam. amostra: 12, u = 1			Tam. amostra: 12, u = 1		
Anos	Θ (°)	HS	TZ	Θ (°)	HS	TZ	Θ (°)	HS	TZ	Θ (°)	HS	TZ
84-85				240	3.45	8.30	280	6.68	10.50	300	6.58	10.10
85-86				250	6.67	10.20	280	4.25	9.80	300	5.80	11.80
86-87				250	3.60	7.20	290	7.46	9.30	300	4.85	11.10
87-88				260	3.27	7.20	290	6.32	10.50	300	6.31	12.00
88-89				250	2.96	7.30	290	8.07	11.50	300	7.06	10.50
89-90	210	1.20	7.00				280	7.24	12.20	300	5.52	9.90
90-91	236	3.34	7.50	258	4.49	7.70	297	5.59	11.90	322	7.04	13.20
91-92	234	3.80	9.20	261	4.05	7.70	293	4.22	12.90	312	6.48	9.20
92-93	236	4.24	7.90	241	4.09	7.60	295	6.57	9.40	315	7.64	10.10
93-94	236	4.17	7.40	253	3.75	7.10	299	4.83	9.30	324	5.77	11.40
94-95	226	2.23	7.30	246	2.98	7.20	298	6.61	13.90	300	6.76	14.30
95-96	230	3.64	6.90	264	4.59	8.00	292	7.98	11.80	301	5.63	11.50

Quadro 3 – Critério do parâmetro combinado

Sector	Distribuição	d	d_0	e	e_0	c	Escolha
210°-240°	Gumbel	0.737	0.898	0.414	0.823	1.721	Gumbel
	Fréchet	0.821	1.000	0.503	1.000	2.000	
240°-270°	Gumbel	0.698	1.000	0.325	1.000	2.000	Fréchet
	Fréchet	0.556	0.796	0.215	0.663	1.459	
270°-300°	Gumbel	0.739	0.876	0.323	0.822	1.698	Gumbel
	Fréchet	0.844	1.000	0.393	1.000	2.000	
300°-330°	Gumbel	0.483	0.885	0.220	0.802	1.687	Gumbel
	Fréchet	0.546	1.000	0.274	1.000	2.000	

Sendo $d_0 = d / d$ máximo na amostra para as diferentes distribuições e $e_0 = e / e$ máximo na amostra para as diferentes distribuições.

Conclui-se que, para os sectores 210°-240°, 270°-300° e 300°-330°, é mais adequada a distribuição de Gumbel e para o sector 240°-270°, a de Fréchet.

Para tentar obter uma relação razoável entre TZ e HS, que permitisse associar valores de TZ a valores extrapolados de HS, fez-se uma regressão linear entre os valores de TZ e HS máximos mensais disponíveis. O resultado está apresentado na Figura 5, donde se conclui que a relação entre TZ e HS é pouco definida, como mostra o valor do coeficiente de determinação, $R^2=0.16$. No entanto, pode dizer-se que há uma tendência para o aumento dos períodos com as alturas.

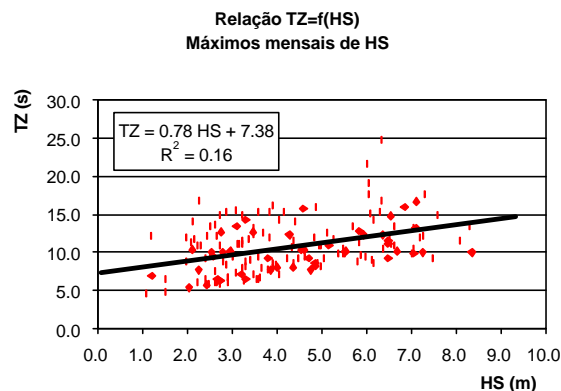


Figura 5 – Figueira da Foz. Máximos mensais de HS. Relação TZ = f(HS)

Fizeram-se também correlações TZ-HS com as amostras dos quatro sectores. Os respectivos gráficos aparecem na Figura 6 e na Figura 7.

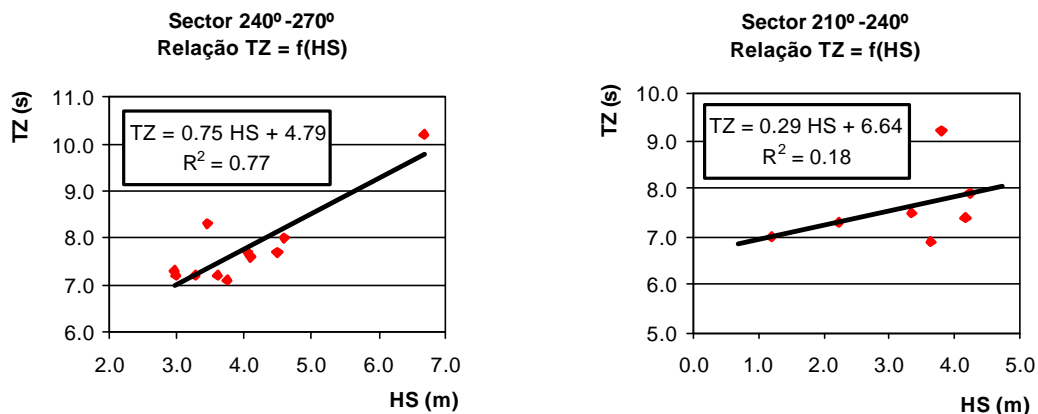


Figura 6 – Figueira da Foz. Relação $TZ = f(HS)$. Amostra de máximos dos sectores 210°-240° e 240°-270°

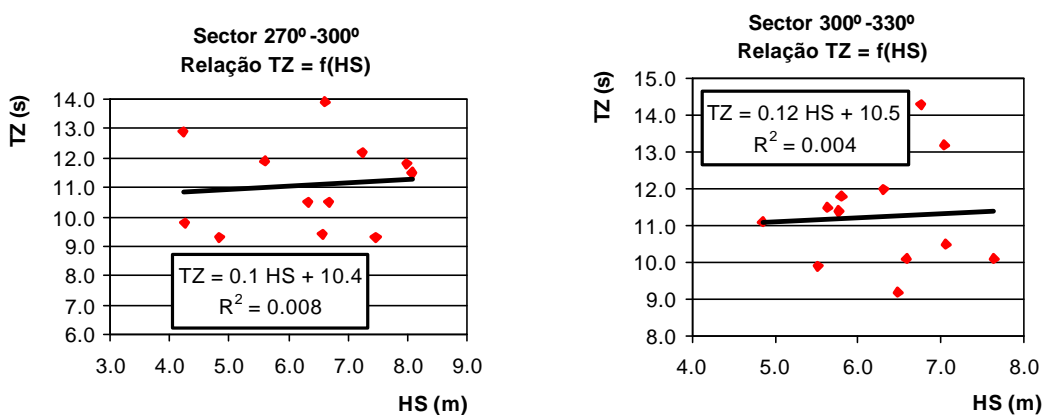


Figura 7 – Figueira da Foz. Relação $TZ = f(HS)$. Amostra de máximos dos sectores 270°-300° e de 300°-330°

Devido à má correlação TZ - HS , não é possível associar períodos às alturas extrapoladas. Por isso, no Quadro 4, apresentam-se gamas de períodos em que o limite inferior fica um pouco abaixo do que a Figura 5 indica, aproximadamente, para os valores extrapolados menores, isto é, os correspondentes aos períodos de retorno de 10 anos. O limite superior é o considerado razoável para ondas de vento. Note-se que, devido a limitações de resolução espectral, não se consideram nos cálculos de refração apresentados na secção seguinte, estados de mar com valores de período de pico maiores do que 20 s, admitindo-se contudo ondas regulares com períodos que podem exceder os 25 s. Estes cálculos e extrapolações produziram os regimes de extremos da agitação marítima indicado no Quadro 4, para os três valores de período de retorno, $T=10$, 50 e 100 anos. Os valores indicados nas colunas 4 a 6 são alturas de onda significativa em metros e N é o tamanho da amostra considerada. A sombreado, aparecem os valores correspondentes às distribuições rejeitadas, de acordo com os critérios habituais.

Quadro 4 – Regimes de extremos na Figueira da Foz, por sectores

Sector	N	Distribuição	Períodos de retorno, T (anos)			Gama de Períodos, TZ (s)
			10	50	100	
300°-330°	12	Gumbel	7.7	9.0	9.5	8 – 25
		Fréchet	7.8	9.7	10.7	8 – 25
270°-300°	12	Gumbel	8.7	11.0	12.0	8 – 25
		Fréchet	9.4	14.0	16.6	10 – 25
240°-270°	11	Gumbel	5.8	7.6	8.4	6 – 25
		Fréchet	5.7	8.4	10.0	6 – 25
210°-240°	7	Gumbel	5.6	7.8	8.8	6 – 25
		Fréchet	8.6	22.9	34.6	6 – 25

Para efeitos da transferência do regime de extremos na Figueira da Foz para o ponto P junto a Vila do Conde, considerou-se o regime indicado no Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo do regime de extremos na bóia da Figueira da Foz

Q (°)	TZ (s)	Período de Retorno, T		
		10 Anos	50 Anos	100 anos
		HS (m)		
300 a 330	8 a 20	7.7	9.0	9.5
270 a 300	8 a 20	8.7	11.0	12.0
240 a 270	6 a 20	5.7	8.4	10.0
210 a 240	6 a 20	5.6	7.8	8.8

2.5 Passagem Figueira da Foz-Largo-Vila do Conde do regime de extremos

2.5.1 Regime de extremos transferido da Figueira da Foz para o largo de Vila do Conde

O regime de extremos definido em 2.4 foi seguidamente transferido para o largo usando a metodologia descrita em 2.3, de modo a obter o regime de extremos ao largo da Figueira da Foz (o qual, tal como mencionado, pode ser considerado igual ao do largo de Vila do Conde).

O espectro empírico de JONSWAP com períodos de pico ao largo entre 4 e 26 s foi utilizado nos cálculos de refração de ondas irregulares.

A função de distribuição direccional do tipo potência par (2s) da função coseno, foi calculada para direcções médias do espectro entre os valores de 190° e 350°. O parâmetro s do expoente 2s da função coseno tomou o valor de 10. O nível de maré considerado foi o nível médio do mar, situado a 2.0 m acima do ZH.

2.5.2 Regime de extremos do largo de Vila do Conde transferido para o ponto P

O regime de extremos ao largo foi transferido para o ponto P utilizando também a metodologia descrita em 2.3. Neste caso, para o espectro de JONSWAP utilizaram-se períodos de pico ao largo entre 6 e 28 s. Para a função de distribuição direccional do tipo potência par (2s) função coseno, considerou-se o valor de s igual a 10. As direcções médias do espectro ao largo variaram entre os valores 190° e 330°. O nível de maré utilizado foi o nível médio do mar.

É de salientar que existem algumas limitações relativamente aos modelos matemáticos de refração de ondas irregulares. De facto, estes modelos de propagação de ondas irregulares não têm em conta a difracção de ondas ou a dissipação de energia por rebentação.

Neste caso, este modelo não representa totalmente o espectro de onda com direcções médias praticamente paralelas à costa, o que nesta área de estudo implica direcções maiores

que 330°. Este facto e o problema da difracção foram as principais razões para que só se possam considerar ondas com direcções menores que 330°. É de salientar a grande rotação de algumas das direcções do largo para a costa, especialmente para ondas dos sectores 270°-300° e 300°-330°, qualquer que seja o período.

No ponto P houve necessidade de limitar superiormente as alturas de onda devido à rebentação, uma vez que nesse ponto a profundidade é reduzida, -9.2 m (ZH). Obteve-se, então, para o nível máximo de maré (preia-mar), o valor da altura de onda significativa máxima fisicamente possível, isto é, 7.9 m. No Quadro 6, apresenta-se um resumo do regime de extremos no ponto P.

De referir também que a fórmula que relaciona TZ com HS, obtida a partir dos valores máximos mensais observados na Figueira da Foz - Figura 5,

$$TZ = 0.78 HS + 7.38 \quad (1)$$

continuará válida para os valores transferidos para o ponto P.

Quadro 6 – Resumo do regime de extremos no ponto P junto a Vila do Conde

s = 10		Regime em Vila do Conde	
T (ano)	HS (m)	TZ (s)	Q (°)
10	4.0 a 7.9	6 a 20	218 a 314
50	5.8 a 7.9		
100	6.1 a 7.9		

Globalmente, o regime de extremos de agitação no ponto P é caracterizado por ondas com direcções compreendidas entre os 218° e 314°, períodos entre os 6 e 20 s e alturas significativas, para os períodos de retorno de, respectivamente, 10, 50 e 100 anos, de 4.0 a 7.9 m, 5.8 a 7.9 m e 6.1 a 7.9 m. Note-se, mais uma vez, que o valor máximo de altura significativa (7.9 m) para os três períodos de retorno foi obtido por limitação da altura de onda de rebentação no ponto P.

Como comentário final sobre esta transferência, chama-se a atenção para as seguintes hipóteses e/ou reservas:

- ❖ Os regimes de agitação de valores observados obtidos no ponto P foram transferidos do largo da Figueira da Foz considerando que este largo não se afastaria significativamente do largo do ponto P, o que é perfeitamente plausível.
- ❖ O modelo de refração utilizado apresenta algumas limitações, na medida em que considera apenas a refração de ondas irregulares por variação do fundo, mas não considera outros efeitos lineares (por ex., difracção) e não lineares (por ex., dissipação de energia). No entanto, dada a suavidade da batimetria do largo até ao ponto P, considera-se que as simplificações deste modelo são perfeitamente válidas.
- ❖ O espectro considerado neste estudo foi um espectro empírico de JONSWAP, de banda estreita (s = 10), no que respeita a direcções. Note-se que se escolheu o espectro de banda estreita por, primeiro, em estudos anteriores se ter verificado que resultados com espectros de diversas bandas (s=1, 5 e 10) eram idênticos e, segundo, ser próximo de um espectro de ondas unidireccional, o qual será usado nos cálculos de agitação marítima a efectuar posteriormente.
- ❖ O leque de direcções locais da Figueira da Foz é extenso. Direcções extremas de, por exemplo, 190° e 350°, associadas a períodos muito baixos (inferiores a 6 s) podem ser geradas por ventos locais sendo portanto desnecessária a sua transferência para o largo e, posteriormente, para os pontos considerados junto à costa.

3 Caracterização da agitação marítima no interior do porto de Vila do Conde

A caracterização da agitação marítima na zona do molhe de abrigo da doca de recreio de Vila do Conde foi efectuada por propagação, utilizando o modelo matemático DREAMS, do regime de extremos determinado anteriormente. O modelo, que se descreve na secção 3.1, foi aplicado a um conjunto de períodos e rumos locais seleccionado com base nos resultados da 1.^a fase deste estudo e que se apresenta na secção 3.2. Os resultados obtidos pelo modelo constam de diagramas referentes aos índices de agitação no interior do porto e são apresentados na secção 3.3.

3.1 Princípios de cálculo do modelo DREAMS

DREAMS é um modelo matemático de elementos finitos para o cálculo da propagação e deformação de ondas marítimas em zonas costeiras, Fortes (1993). Este modelo pode ser aplicado, quer no estudo da penetração da agitação marítima de período curto num porto e baías, quer no estudo da ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidentes. Dado o facto de este modelo não apresentar qualquer limitação quanto ao ângulo de incidência da onda na entrada do domínio de cálculo, o mesmo domínio computacional pode ser utilizado para uma larga gama de direcções de onda incidente.

O modelo baseia-se na equação elíptica de *mild-slope*, Berkhoff (1972), que descreve os efeitos combinados da refacção e difracção de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave como os que ocorrem em portos, baías e zonas costeiras. O método numérico utilizado para a resolução da equação de *mild-slope* é o Método dos Elementos Finitos (MEF).

As condições de fronteira implementadas são: a *condição de radiação*, que permite a saída de perturbações propagantes geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito; a *condição de geração e radiação combinadas*, que simula a entrada e saída de ondas numa fronteira do domínio, como por exemplo as fronteiras abertas; a *condição de reflexão (total ou parcial)*, que simula fronteiras como praias, falésias, molhes ou obras acostáveis.

O modelo calcula índices de agitação (H/H_0 , relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0) ou coeficientes de amplificação e direcções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais à superfície livre e as cristas das ondas constituem resultados opcionais.

Como limitações do modelo, salientam-se o facto do modelo não ter em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas e os galgamentos sobre estruturas portuárias.

A validação do modelo matemático foi feita com casos de teste clássicos da bibliografia tais como o fundo plano inclinado, o baixio circular, os molhes semi-infinitos e a bacia rectangular de Mei e com casos de teste reais, Fortes (1993). O modelo foi também validado com os estudos de ressonância e agitação no porto de Saint Quay-Portrieux e o estudo da ressonância no porto da Baleeira, tendo sido comparados, para estes casos de teste, os resultados de DREAMS com resultados de outros modelos matemáticos e/ou de modelos físicos.

3.2 Caracterização da agitação marítima no interior do porto de Vila do Conde

O domínio de cálculo utilizado por DREAMS na realização dos cálculos de agitação correspondente à zona do porto de Vila do Conde, bem como a batimetria considerada nos cálculos são os apresentados na Figura 8. O levantamento hidrográfico utilizado para a digitalização desta batimetria, à escala de 1:1000, foi fornecido pelo Instituto Marítimo-Portuário (IMP) e é datado de Agosto de 1999.

Com base nos resultados da 1.^a fase e tendo em conta que “a obra projectada para o porto de recreio que se pretende construir tem fundamentalmente que ver com a probabilidade

de agitação com rumos do quadrante S-SW” e que “A agitação de SW é normalmente caracterizada por alturas de onda de 3 a 4 metros com períodos de 9 a 10 segundos”, IMP (1999), seleccionaram-se as condições de cálculo que serviram de condições de entrada ao modelo DREAMS, ou seja, as que correspondem às condições de agitação que se consideram existir na fronteira de entrada do modelo. Assim, o modelo foi aplicado para os rumos locais (no ponto P definido na 1.ª fase) compreendidos entre 215° e 315° e para períodos entre 8 e 20 s, cobrindo com isto, dentre os casos susceptíveis de ocorrer, os que se consideram de interesse para a zona em estudo. Os cálculos foram efectuados para o nível de maré de +4.0 m (ZH). No interior da doca de recreio, a profundidade de cálculo foi considerada constante e igual a 6.0 m (batimétrica -2.0 m (ZH)), dado o nível de maré considerado.

Os coeficientes de reflexão utilizados nos cálculos variam ao longo da linha de costa uma vez que dependem das características da fronteira e, em cada local, das características da onda. Para o cálculo do coeficiente de reflexão de cada zona da fronteira (definindo-se cada zona como trechos com características semelhantes), seguiu-se o procedimento proposto em Seelig e Ahrens (1995) que, para cada período de onda, calcula o coeficiente de reflexão tendo em conta as características do elemento que constitui a fronteira (porosidade, declive do talude, profundidade no pé do talude, entre outras) e o *número de Iribaren*.

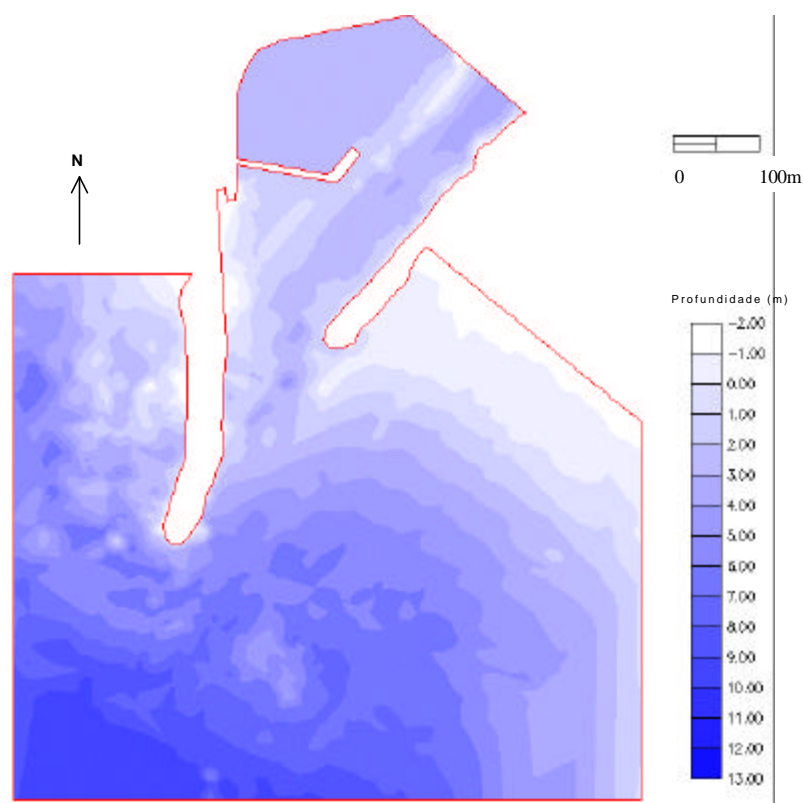


Figura 8 – Domínio de cálculo e batimetria da zona em estudo

3.3 Apresentação, análise e interpretação de resultados

A obra complementar de abrigo projectada para a doca de recreio que se pretende construir consta de dois quebra-mares, sendo um deles flutuante. Dado que existe ainda a possibilidade de este quebra-mar flutuante vir a ser uma estrutura fixa, optou-se neste estudo por considerar os dois casos extremos: a não existência do quebra-mar (hipótese I) e a existência de um quebra-mar vertical (hipótese II) - Figura 9.

Para a hipótese I, os cálculos com o modelo DREAMS foram efectuados para rumos locais de 215°, 225°, 240°, 255°, 270°, 285°, 300° e 315°, e períodos de 8, 12, 14, 16 e 20 s.

Para a hipótese II, só foram efectuados cálculos para as condições consideradas desfavoráveis na hipótese I, isto é, rumos de 215°, 225°, 240°, 255° e 270°, sendo os períodos idênticos aos considerados na hipótese anterior.

Os resultados obtidos constam de diagramas referentes aos índices de agitação no interior do porto, para os diferentes períodos e rumos locais estudados.

Para quantificar os valores do índice de agitação nos pontos de maior interesse para o estudo, escolheram-se os três grupos de pontos (regiões A, B e C) apresentados na Figura 9, para as hipóteses I e II. Nesses pontos, obtiveram-se os valores do índice de agitação correspondentes a cada condição de cálculo (período, direcção) testada.

Com base nesses valores, apresentam-se no Quadro 7 e no Quadro 8, para as hipóteses I e II respectivamente, os valores máximos do índice de agitação para as condições de cálculo estudadas em cada uma das três regiões consideradas mais relevantes: leste do molhe da Sra. da Guia (A), molhe de protecção a construir (B) e no interior da doca de recreio (C).

Da Figura 10 à Figura 12 apresentam-se os diagramas de agitação obtidos para três dos casos de estudos: para a hipótese I, direcções de S-35°-W (215°) e W (270°) e período de 8 s; para as hipóteses I e II, direcção SW (225°) e período de 8 s.

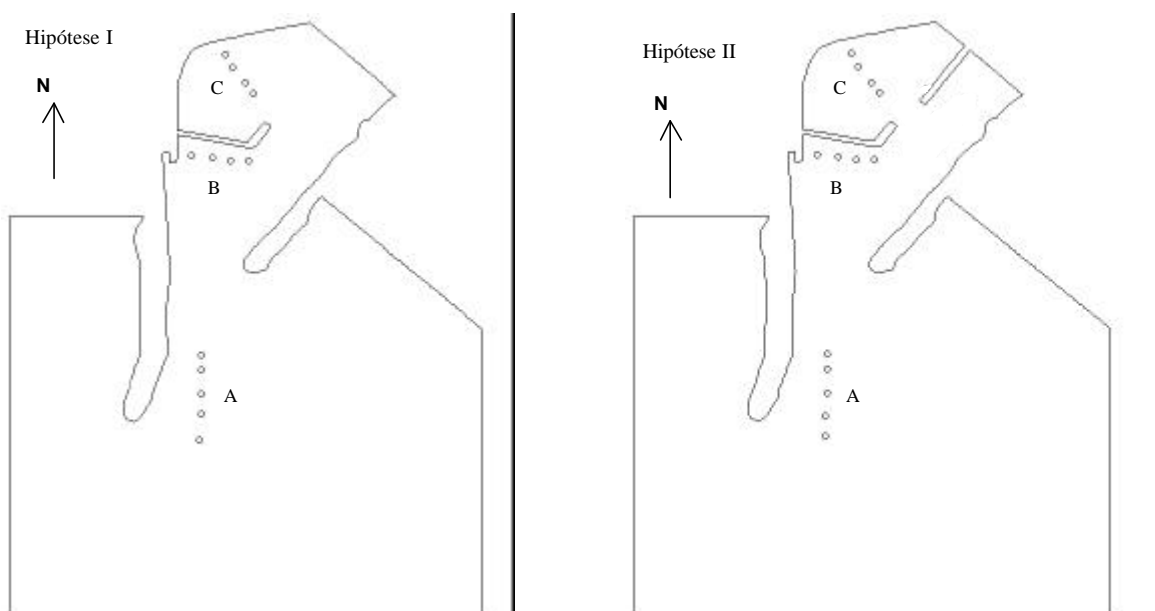


Figura 9 – Porto de Vila do Conde. Pontos de cálculo do índice de agitação para as hipóteses I e II

Quadro 7 – Valores máximos do índice de agitação obtidos nos pontos considerados para a hipótese I

Região	Rumo Local (°)	Período (s)				
		8	12	14	16	20
A	S - 35° - W (215°)	0.83	0.87	0.93	0.98	1.08
	SW (225°)	0.88	0.71	0.81	0.85	0.97
	W - 30° - S (240°)	0.78	1.02	0.94	0.90	0.89
	W - 15° - S (255°)	1.03	0.90	0.92	1.07	0.97
	W (270°)	1.00	0.97	0.89	0.91	0.94
	W- 15° - N (285°)	0.54	0.70	0.61	0.60	0.67
	W- 30° - N (300°)	0.38	0.45	0.45	0.51	0.47
	NW (315°)	0.41	0.34	0.24	0.27	0.31
B	S - 35° - W (215°)	0.47	0.17	0.23	0.28	0.40
	SW (225°)	0.40	0.15	0.19	0.21	0.30
	W - 30° - S (240°)	0.33	0.13	0.18	0.22	0.25
	W - 15° - S (255°)	0.20	0.10	0.14	0.15	0.21
	W (270°)	0.17	0.07	0.11	0.13	0.16
	W- 15° - N (285°)	0.11	0.04	0.07	0.08	0.09
	W- 30° - N (300°)	0.08	0.04	0.05	0.06	0.10
	NW (315°)	0.08	0.03	0.04	0.04	0.06
C	S - 35° - W (215°)	0.10	0.19	0.10	0.10	0.17
	SW (225°)	0.10	0.18	0.08	0.08	0.13
	W - 30° - S (240°)	0.08	0.16	0.07	0.08	0.11
	W - 15° - S (255°)	0.04	0.12	0.06	0.06	0.09
	W (270°)	0.04	0.08	0.04	0.05	0.07
	W- 15° - N (285°)	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04
	W- 30° - N (300°)	0.02	0.05	0.02	0.02	0.04
	NW (315°)	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02

Quadro 8 – Valores máximos do índice de agitação obtidos nos pontos considerados para a hipótese II

Região	Rumo Local (°)	Período (s)				
		8	12	14	16	20
A	S - 35° - W (215°)	0.85	0.87	0.93	0.99	1.09
	SW (225°)	0.92	0.73	0.81	0.85	0.98
	W - 30° - S (240°)	0.82	1.05	0.92	0.90	0.89
	W - 15° - S (255°)	1.03	0.94	0.92	1.07	0.97
	W (270°)	1.01	0.97	0.89	0.91	0.94
B	S - 35° - W (215°)	0.46	0.16	0.26	0.27	0.42
	SW (225°)	0.40	0.15	0.21	0.20	0.32
	W - 30° - S (240°)	0.33	0.12	0.20	0.22	0.27
	W - 15° - S (255°)	0.20	0.09	0.16	0.15	0.22
	W (270°)	0.17	0.07	0.12	0.13	0.17
C	S - 35° - W (215°)	0.06	0.09	0.07	0.10	0.16
	SW (225°)	0.06	0.08	0.05	0.08	0.12
	W - 30° - S (240°)	0.05	0.07	0.05	0.09	0.10
	W - 15° - S (255°)	0.02	0.05	0.04	0.06	0.08
	W (270°)	0.02	0.04	0.03	0.05	0.07

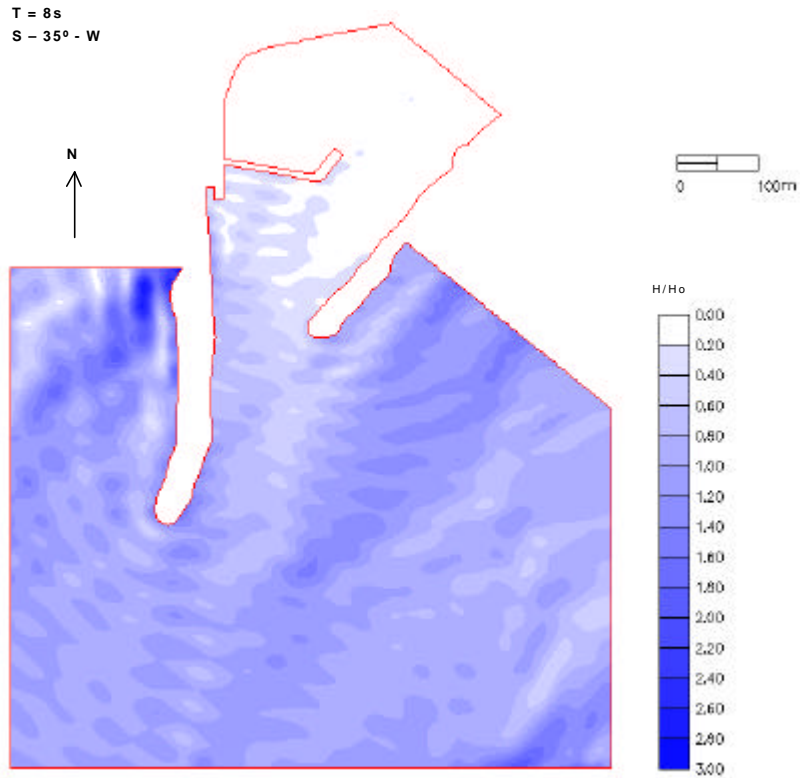


Figura 10 – Porto de Vila do Conde. Diagramas dos índices de agitação para a direcção de propagação local S - 35° - W e período da onda, T = 8 s. Hipótese I

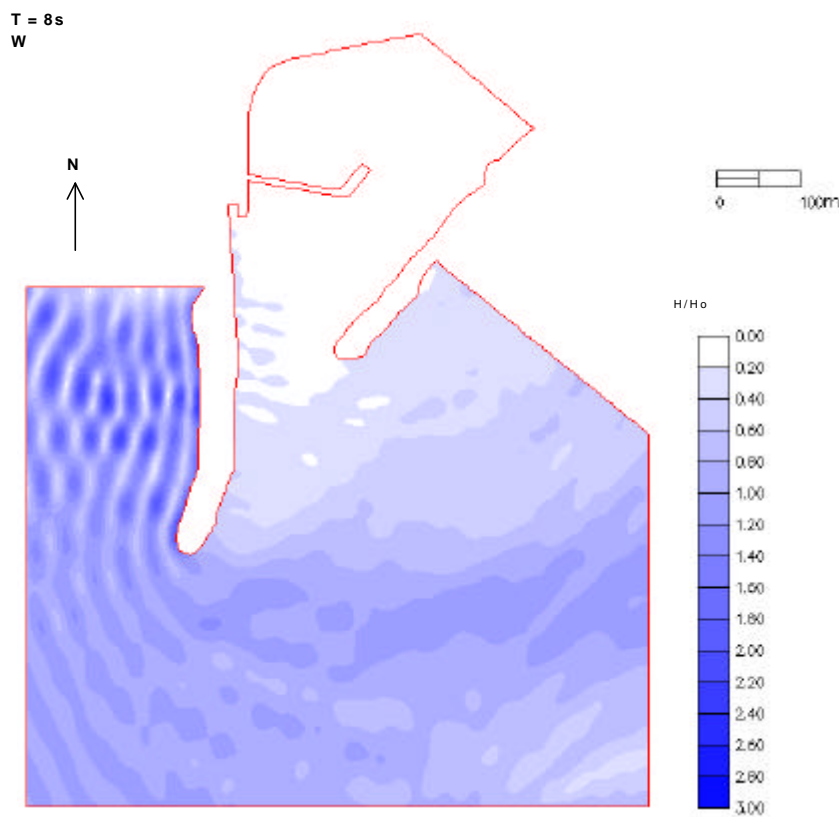


Figura 11 - Porto de Vila do Conde. Diagramas dos índices de agitação para a direcção de propagação local W e período da onda, T = 8 s. Hipótese I

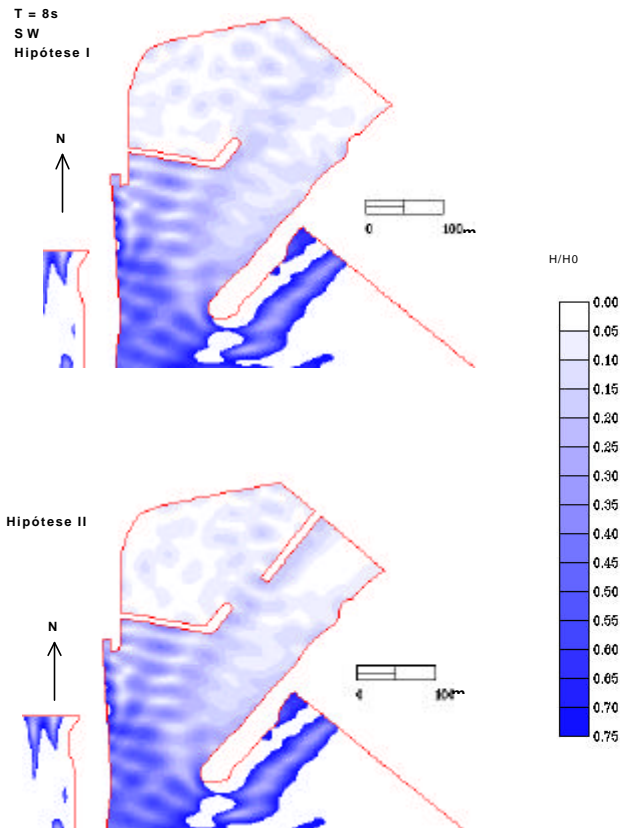


Figura 12 - Porto de Vila do Conde. Diagramas dos índices de agitação para a direcção de propagação local SW e período da onda de $T = 8$ s. Hipóteses I e II

Na análise dos resultados do modelo, deve-se ter em consideração que este modelo não contempla o galgamento (que em condições de temporal pode ocorrer no molhe de N.^a Sra. da Guia e que leva a condições de agitação no interior do porto que não são tidas em conta), a rebentação (que conduz a uma forte dissipação de energia e respectiva redução da altura de onda) e o efeito das correntes na propagação das ondas. Também não foram contempladas as variações de fundos que ocorrem sazonalmente no interior do porto.

Da análise dos resultados apresentados da Figura 10 à Figura 12, no Quadro 7 e no Quadro 8 e dos restantes cálculos de agitação efectuados, Fortes e Neves (2000), pode observar-se que, relativamente às duas hipóteses estudadas:

À entrada do porto (região A):

- ❖ Os valores dos índices de agitação são fortemente influenciados pelo rumo local da agitação incidente;
- ❖ Para todos os períodos testados, a entrada do porto encontra-se pouco protegida para rumos locais rodados para sul de W (W a $S-35^{\circ}$ -W), com valores do índice de agitação que variam entre 0.71 e 1.08; não se observa uma influência significativa da presença do quebra-mar nos valores dos índices de agitação para qualquer dos rumos e períodos testados, o que seria de esperar dada a sua distância relativamente a esta região;
- ❖ Para os rumos locais compreendidos entre W e NW, a entrada do porto encontra-se mais abrigada e os valores máximos dos índices de agitação são inferiores a 0.70, diminuindo, em geral, à medida que a agitação roda para NW;
- ❖ A influência da variação do período não é significativa.

No interior do porto (região B):

- ❖ Para todos os períodos testados, o porto encontra-se menos protegido para rumos locais de S-35°-W;
- ❖ Os valores dos índices de agitação diminuem progressivamente, à medida que a agitação incidente roda de S-35°-W para NW;
- ❖ Para todos os períodos e rumos locais testados, não há uma influência significativa da presença do quebra-mar.

No interior da doca de recreio (região C):

- ❖ De uma forma geral, a doca de recreio está menos protegida para a agitação com rumos locais entre W (270°) e S-35° -W (215°), podendo atingir valores máximos dos índices de agitação de 0.19. Para rumos locais entre W-15°-N (285°) e NW (315°), os índices de agitação no interior da doca de recreio não atingem valores máximos superiores a 0.05.
- ❖ Com a presença do quebra-mar (hipótese II) os valores dos índices de agitação são mais reduzidos para os menores períodos testados. No entanto, a influência dessa presença nos valores máximos não é significativa para períodos superiores a 12 s.

4 Conclusões

Neste trabalho, apresentou-se o *regime de agitação marítima de extremos* junto aos molhes de Vila do Conde, obtido com base nos dados recolhidos pela bóia-ondógrafo da Figueira da Foz - ver Figura 2.

Este regime de agitação resultou da transposição do regime local na bóia-ondógrafo da Figueira da Foz (ver Figura 4) para o ponto P, localizado à profundidade -9.2 m (ZH), utilizando a já conhecida metodologia de passagem costa-largo-costa, Capitão *et al.*(1994).

O *regime de extremos* no ponto P é caracterizado por ondas com direcções compreendidas entre os 218° e 314°, períodos entre 6 e 20 s e alturas significativas, para os períodos de retorno de, respectivamente, 10, 50 e 100 anos, de 4.0 a 7.9 m, 5.8 a 7.9 m e 6.1 a 7.9 m. Note-se que o valor máximo de altura significativa (7.9 m) para os três períodos de retorno foi obtido por limitação da altura de onda de rebentação.

Com base no regime anterior, utilizou-se o modelo matemático DREAMS para o estudo da penetração da agitação no interior do porto de Vila do Conde, considerando direcções no ponto P, compreendidas entre 215° e 315° e períodos entre 8 e 20 s. O nível de maré adoptado foi de +4.0 m (ZH).

No estudo realizado, verificou-se que o porto de Vila do Conde se encontra pouco protegido para a agitação proveniente das direcções de propagação locais de S-35°-W (215°) a W (270°), obtendo-se valores máximos do índice de agitação de 1.08 (à entrada do porto). À medida que a agitação penetra no porto, os valores dos índices de agitação diminuem, verificando-se no interior da doca de recreio valores máximos do índice de agitação iguais a 0.19. Para rumos locais compreendidos entre W e NW, a agitação no interior do porto não é tão significativa, apresentando valores máximos do índice de agitação inferiores a 0.08.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Marítimo-Portuário 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.

Alguns dos resultados aqui apresentados fazem parte do projecto de investigação PO-Waves financiado pela NATO, intitulado "Clima de agitação na costa portuguesa". Os autores agradecem este financiamento. Os autores agradecem também o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projecto "Valorização e

Protecção da Zona Costeira Portuguesa” - Componente 7, intitulada “Modelação de propagação de ondas marítimas em zonas costeiras” .

Referências

- Berkhoff, J.C.W. (1972) - *Computation of combined refraction-diffraction*, Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE, Vancouver.
- Capitão, R.; Fortes, C.J., Reis, T.V., Carvalho, M.M.; Covas, J.A. (1994) - *A method for obtaining deep water wave characteristics based on the local sea wave climate*, Seminário Luso-Francês de Modelação em Hidráulica Marítima, Coimbra, 11-13 Julho.
- Capitão, R.P.; Fortes, C.J.; Carvalho, M.M. (2000) - *Vila do Conde. Doca de Recreio. Estudos de agitação marítima na zona marítima adjacente ao porto – 1.ª fase: Regime de extremos*, Relatório 264/00 – NPP, LNEC, Outubro.
- Carvalho, M.M. (1992)– *Valores extremos da agitação marítima. Figueira da Foz – Tratamento local dos dados existentes*, Relatório 198/92-NPP, LNEC, Lisboa, Dezembro.
- Carvalho, M.M.; Capitão, R. (1990) - *Ajustamento Gráfico de Distribuições*, Relatório 250/90-NPP, LNEC, Lisboa, Novembro.
- Carvalho, M.M.; Capitão, R. (1996) - *Valores Extremos da Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal*, Artigo da revista da “Recursos Hídricos”, APRH, Vol. 17, No. 1, pp. 33-42.
- Covas, J.A.; Pontes, M.T. (1988) - *Modelo matemático de refração de ondas irregulares*, LNEC e LNETI, Março.
- Filipe, A.; Carvalho, M.M.; Capitão, R. (1999) – *Valores extremos da agitação marítima no Algarve. Faro – Tratamento local dos dados existentes*, Relatório 179/99-NPP, LNEC, Lisboa, Julho.
- Fortes, C. J. (1993) - *Modelação matemática da refração e difracção combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos*, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.
- Fortes, C.J.; Neves, M.G. (2000) – *Doca de recreio do porto de Vila do Conde. Estudos de agitação marítima e ensaios de galgamento – 2.ª fase: Caracterização da agitação marítima no interior do porto*, Relatório 308/00 – NPP, LNEC, Lisboa.
- Fortunato, A.B.; Vicente, C.; Freire, P.; Oliveira, A. (2001) - *Doca de recreio do porto de Vila do Conde: estudos de hidrodinâmica e de dinâmica sedimentar*, 2.ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, 17 a 19 de Outubro.
- Instituto Marítimo-Portuário (1999) - *Construção do porto de recreio de Vila do Conde, Vol.2 – Projecto Obras Portuárias*.
- Seelig, W.N.; Ahrens, J.P. (1995) - *Wave reflection and energy dissipation by coastal structures, in “Wave forces on inclined and vertical wall structures”*, ASCE, pp.28-55.