

A VARIABILIDADE DAS EXTRAPOLAÇÕES DO REGIME DE EXTREMOS COM A NATUREZA DAS AMOSTRAS: O CASO DE ESTUDO DO PORTO DE VILA DO CONDE

Rui Capitão¹, Conceição Juana Fortes¹

¹ Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
rcapitao@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

RESUMO

Os valores, quer em número quer em qualidade, que constituem uma amostra de extremos são determinantes para o correcto estabelecimento do regime de extremos de agitação marítima. Um número muito limitado de valores ou a consideração de valores incorrectos na amostra, resultado, por exemplo, da existência de falhas de medição dos equipamentos de aquisição, determinam estimativas de extrapolações incorrectas, com consequências directas sobre o dimensionamento das estruturas marítimas.

Nesta comunicação efectua-se uma análise de sensibilidade à natureza das amostras de extremos, nomeadamente ao seu tamanho, e à possibilidade de, nessa amostra, haver valores que se afastam significativamente da média dos valores máximos observados.

Para esta análise, escolheu-se como caso de estudo o porto de Vila do Conde, onde se procedeu recentemente à determinação do regime de extremos, considerando um conjunto de cerca de 14 anos de dados provenientes da bóia de Leixões, os quais foram transferidos para o largo, e do largo para um ponto junto ao porto. Assim, com base nestes valores transferidos, é definida uma amostra de valores extremos e estabelecido o regime de extremos nesse ponto. A seguir, fazendo variar os critérios de selecção de amostras, obtêm-se amostras alternativas, com as quais são avaliadas as implicações nas estimativas do regime de extremos.

1. INTRODUÇÃO

A adequada determinação do regime de extremos permite o estabelecimento fiável da onda de projecto da obra marítima, o que implica o correcto dimensionamento da obra, em especial a determinação dos mais acertados tipo, peso e disposição dos elementos protectores da obra, e com custo económico mais reduzido possível. Esta situação ocorre também em fase de definição de condições de agitação para realização de ensaios em modelo reduzido em instalações experimentais de hidráulica marítima.

No entanto, o estabelecimento de regimes de agitação marítima é geralmente obstaculizado pela falta de dados de agitação marítima, em especial se o regime que se procura é o de extremos. Neste caso, os valores (quer em número quer em qualidade) que constituem a amostra são determinantes para a correcta definição desse regime. Um número muito limitado ou a selecção de falsos valores, resultado, por exemplo, da existência de falhas de aquisição de dados, muitas vezes devidas ao mau funcionamento dos equipamentos durante fortes períodos de temporal, determinam estimativas de extrapolações incorrectas, que interessa evitar sob pena de se cometerem sobredimensionamentos (ou subdimensionamentos) das estruturas.

Nesta comunicação aborda-se a determinação de regimes de extremos e o modo como estes regimes podem variar de acordo quer com a distribuição de extremos seleccionada, quer com o tamanho da amostra de extremos, quer, principalmente, com a variabilidade desses valores na amostra. Para melhor ilustrar estes aspectos, considera-se o caso do porto de Vila do Conde, onde se procedeu recentemente à determinação do regime de extremos com base num conjunto de cerca de 14 anos de dados provenientes da bóia de Leixões, os quais foram transferidos para o largo, e do largo para um ponto junto ao porto.

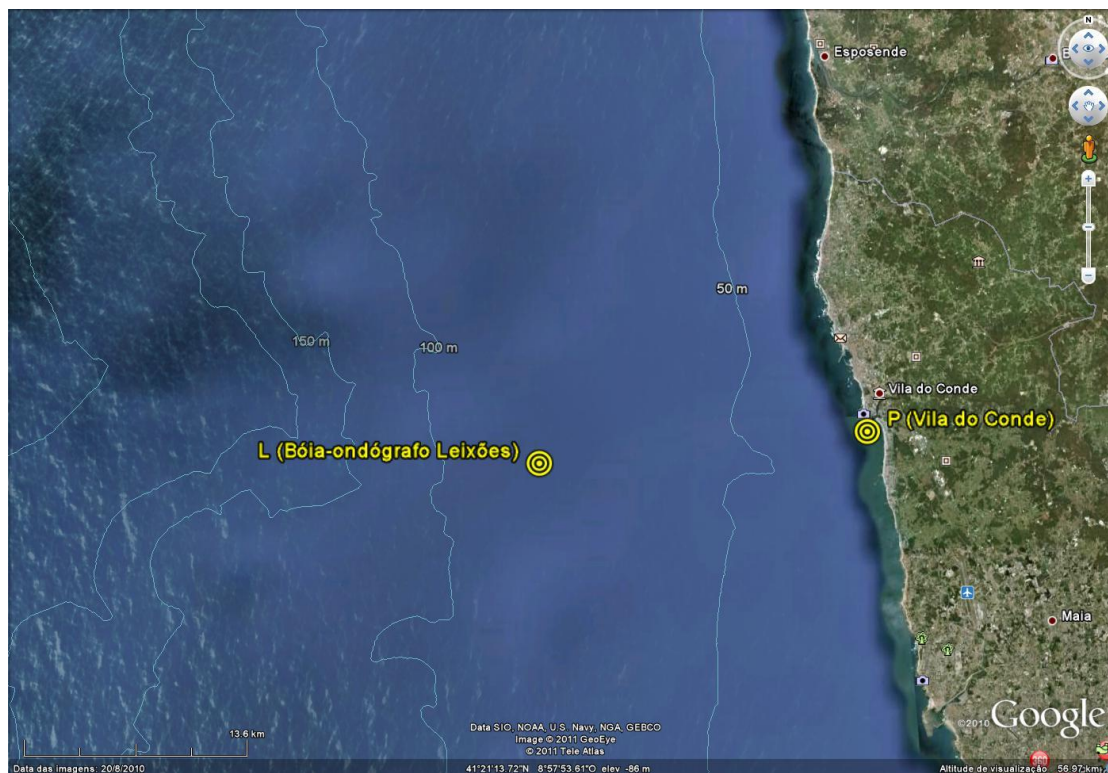


Figura 2 – Localizações relativas da bóia de Leixões (L) e do ponto P, junto à cabeça do molhe Norte do Porto de Vila do Conde (Google Earth© 2011)

Com os dados de agitação marítima obtidos na bóia-ondógrafo de Leixões procedeu-se à sua transferência para o largo e, posteriormente, para o ponto P, em frente à cabeça do molhe, que, assim, representa as características de agitação marítima nesse local. Neste ponto, é depois definido o regime de extremos de agitação.

Para a transposição de dados foi utilizada a metodologia de transferência de regimes TRANSFER (Coli *et al.*, 2002).

3. REGIME GERAL OBSERVADO EM LEIXÕES

Os dados existentes da bóia-ondógrafo de Leixões, Capitão e Fortes (2011), para o período de 17-07-1996 a 31-12-2010 (cerca de 14 anos seguidos, embora contendo períodos de grandes falhas), constam de registos dos parâmetros de onda, obtidos de 3 em 3 horas (quando a bóia está a funcionar em regime normal) ou obtidos de 30 em 30 minutos (quando a bóia está a funcionar em regime de temporal), dos parâmetros HS (altura significativa), TZ (período médio do registo), TP (período de pico do espectro) e Θ (direcção associada a TP). Note-se que uma vez que a bóia-ondógrafo se localiza na costa ocidental, considera-se, seguindo o critério do Instituto Hidrográfico, estar em situação de temporal quando o valor da altura significativa, HS, é superior a 5 m.

Estes dados permitiram definir séries temporais desses parâmetros de onda em Leixões e efectuar um conjunto de análises estatísticas a essas séries.

No Quadro 3, são apresentadas algumas estatísticas descritivas das referidas séries. Estes valores (e todos os que se mostram de agora em diante) correspondem somente aos registos tri-horários (8 registos por dia) medidos, apesar de as transferências “Leixões-largo” e “largo-Ponto P” terem sido efectuadas considerando a totalidade dos registos existentes (incluindo os registos de temporal).

Quadro 3 – Bóia de Leixões. Estatísticas da série total de 30 710 registos tri-horários (de 17 07-1996 a 31-12-2010).

Leixões	HS	TZ	TP	Θ
Média	1.97	6.66	10.81	302.7
Erro-padrão	0.0055	0.0093	0.0141	0.1369
Mediana	1.76	6.50	11.10	306
Moda	1.38	5.20	10.00	321
Desvio-padrão	0.96	1.64	2.48	24.0
Curtose	1.08	-0.03	-0.01	7.1
Assimetria	1.04	0.59	-0.04	-1.7
Intervalo	8.59	10.40	15.40	353
Mínimo	0.35	2.90	2.80	6
Máximo	8.94	13.30	18.20	359
Contagem	30709	30709	30709	30676

Apresenta-se, na Figura 3, uma das séries temporais produzidas, neste caso das alturas de onda HS correspondentes ao período de 17-07-1996 a 31-12-2010. Não se apresentam neste estudo as séries de períodos TZ e de direcções (Θ), nem a relação HS-TZ. Contudo, pode-se, em geral, dizer que os valores de HS em Leixões estão compreendidos entre 0.35 m e 8.9 m, e estão associados a períodos médios entre 2.9 s e 13.3 s e a direcções abrangendo todos os sectores de direcções, com valores em geral à volta de 306° (valor mediano), e desvios-padrão de cerca de 26°.

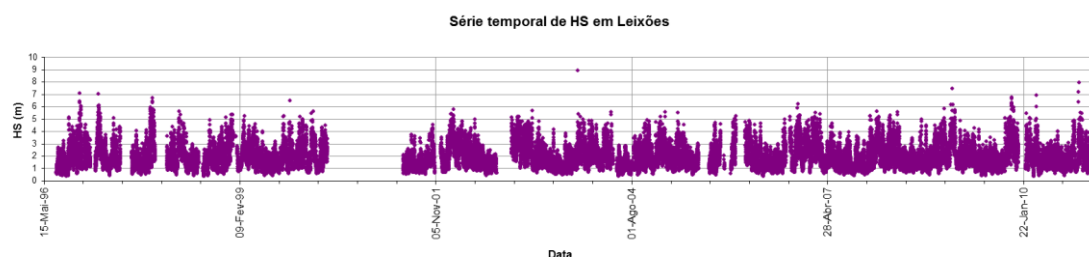


Figura 3 – Leixões. Série temporal das alturas de onda HS

4. REGIME GERAL TRANSFERIDO PARA VILA DO CONDE

Com base na transferência (retro-propagação) dos dados de agitação do local da bóia de Leixões (L) para o largo, considerado também como largo de Vila do Conde, visto ambos os locais pertencerem à mesma zona de agitação marítima, chegou-se a um conjunto de resultados para o largo de Leixões não muito diferentes dos obtidos na bóia de Leixões, dado que esta está já em local considerado ao largo para grande parte dos períodos de onda considerados. Ao largo, os valores de HS estão compreendidos entre 0.35 m e 9.13 m, associados a períodos médios entre 2.7 s e 13.8 s e a direcções entre 171° e 350°. A mediana dos valores de direcção mantém-se idêntica (agora de 306°), assim como o desvio-padrão (agora de 23°).

Estes registos de agitação marítima foram transferidos para o ponto P, localizado em frente ao molhe Norte do Porto de Vila do Conde, Figura 1 e Quadro 1. Para este ponto, considerando o

nível máximo de maré (PM) de 4.0 m (ZH), as estimativas da altura máxima de rebentação (Hb) e da altura significativa máxima (HS*) - calculada a partir da anterior, possíveis nesse local, são as indicadas no Quadro 4 (CEM, 2001).

Quadro 4 – Limitação da altura de onda pela profundidade no ponto (P)

Cota d (m)	Hb = 0.78 d	HS* = Hb / 1.3=0.6 d
9.2 + 4.0	10.30	7.92

O valor de altura significativa referente à preia-mar é o máximo fisicamente possível no ponto P, para o nível de maré considerado.

No quadro seguinte apresentam-se, para o ponto P de Vila do Conde, as estatísticas descritivas da série total dos 30 613 registos existentes tri-horários (excluindo, como se disse, os registos de temporal, e considerando o nível médio de maré de +2.0 m (ZH)). Notar que aos parâmetros HS, TZ, TP e Θ foi adicionado o sufixo “_P” para indicar que aqueles se referem ao ponto P de Vila do Conde (por exemplo, HS_P é a altura significativa (HS) transferida do largo para o ponto P). Como se pode ver, o valor HS*, de 7.92 m, correspondente ao máximo valor possível devido à profundidade, não foi atingido.

Quadro 5 – Ponto P. Estatísticas da série de 30 613 registos tri-horários

Vila do Conde (P)	HS_P	TZ_P	TP_P	Θ_P
Média	1.47	6.66	8.52	282.9
Erro-padrão	0.0041	0.0098	0.0125	0.1372
Mediana	1.32	6.48	8.29	277.7
Moda	1.20	5.14	6.58	322.25
Desvio-padrão	0.72	1.71	2.19	24.0
Curtose	1.73	0.12	0.12	-0.4
Assimetria	1.14	0.64	0.65	0.1
Intervalo	6.77	11.02	14.11	137.47
Mínimo	0.26	2.73	3.49	197.23
Máximo	7.03	13.75	17.60	334.7
Contagem	30613	30613	30613	30613

Da análise dos resultados desta transferência de dados, pode concluir-se o seguinte:

- Os valores de HS junto ao molhe Norte do porto de Vila do Conde (ponto P) sofrem uma razoável redução quando comparados com o largo, devido ao fenómeno da refração. Em P, os valores de HS estão compreendidos entre 0.26 m e 7.0 m, associados aos mesmos períodos médios, entre 2.7 s e 13.8 s, e a um leque de direcções um pouco mais estreito, entre 197° e 335°.
- A direcção das ondas sofre uma rotação no sentido de se estas se apresentarem mais perpendiculares à batimetria, i.e., experimentam uma rotação das gamas das direcções, de 171° e 350°, ao largo, para 197° e 335°, no ponto P. Por outro lado, a mediana alterou-se significativamente, devido à refração, para 277°, sendo o desvio-padrão idêntico ao obtido no largo (agora é de 24°).
- A máxima altura significativa fisicamente possível (ver Quadro 4) não foi atingida.

5. REGIME DE EXTREMOS EM VILA DO CONDE

Para a determinação do regime de extremos de agitação marítima nas imediações do molhe Norte do porto de Vila do Conde, no ponto P, Figura 1, usou-se, como se disse, os dados transferidos de Leixões, descritos na secção anterior.

Generalidades sobre regimes de extremos

A determinação de um regime de extremos de agitação inicia-se com o estabelecimento de amostras apropriadas de valores, a partir dos dados disponíveis. Para um estudo estatístico como este, cada amostra tem de ser aleatória, isto é, as correspondentes observações devem poder ser consideradas: (i) independentes e (ii) provenientes da mesma população (Coles, 2001). Como se explica em Carvalho, 1982, o mais correcto será, portanto, considerar que cada ano produz uma só observação, seja ela a altura máxima anual, HM, ou a altura significativa máxima anual, HS, como será o caso deste estudo. Para garantir a independência das observações, é preferível considerar os máximos observados em cada inverno marítimo, que se estende pelos meses de Outubro a Março e abarca, portanto, dois anos civis¹. Realmente, é mais plausível admitir a independência de máximos de invernos diferentes que apenas de anos diferentes. Neste último caso, seria possível, até, eventualmente, considerar dois valores máximos anuais, provenientes afinal duma mesma tempestade ocorrida de fins de Dezembro a princípios de Janeiro, o que seria incorrecto. Tratar-se-ia de cortar a unidade que constitui o inverno. Por este processo, garante-se a independência das observações e a constância das características das variáveis.

Este método de estabelecer as amostras é uma versão do chamado método dos máximos anuais (AM - Annual Maxima method). Há outros métodos, como o conhecido método do pico acima de limiar (POT - Peak-Over-Threshold method) que, neste caso, não parecem tão adequados como este e portanto não são usados neste trabalho.

Notar também o aspecto da validade das extrapolações. De um modo geral, só no caso em que o modelo da distribuição que se adopta para descrever o comportamento de certa variável tiver sido deduzido de hipóteses verificáveis, Carvalho, 1983, é que se podem fazer extrapolações para além do domínio dos valores observados. Como, no caso das alturas de onda em estudo, os modelos são adoptados empiricamente, quaisquer extrapolações que se façam têm de ser encaradas com reservas, e isto mesmo quando o modelo empírico tenha sido estabelecido a partir de amostras suficientemente grandes. Ora, para o caso das distribuições assintóticas de extremos, Copeiro, 1978, mostrou que, até cerca de 20 valores anuais, os ajustes das diferentes distribuições são todos razoáveis. O problema é que, para além dos 20 anos, as distribuições divergem bastante e, por isso, só com um período de observações significativamente superior a 20 se pode esperar uma definição razoável do modelo de distribuição a escolher. Assim, reforça-se a ideia de que, nos casos presentes, em que as amostras são de tamanho inferior a 20, as extrapolações obtidas devem ser vistas com algumas reservas, por não serem totalmente de confiança. Apesar disso, como indicação, foram apresentadas neste estudo extrapolações até 100 anos. Este problema só será ultrapassado quando houver realmente bastantes mais anos de observações.

No estabelecimento da distribuição de probabilidade a usar para as extrapolações de alturas significativas máximas anuais, HS, são usadas neste trabalho as distribuições assintóticas de máximos tipos I (Gumbel), II (Fréchet) e III (Kimball), ver Carvalho e Capitão, 1990. No entanto, a distribuição de Kimball, uma vez que é limitada à direita, tem pouco interesse para extrapolações, pelo que, em seu lugar, foi neste trabalho usada a distribuição de mínimos do tipo III, conhecida por distribuição de Weibull.

¹ Designa-se por *Verão Marítimo* o período compreendido entre Abril (inclusive) e Setembro (inclusive) de um ano civil. Designa-se por *Inverno Marítimo* o período compreendido entre Outubro (inclusive) de um ano civil e Março (inclusive) do ano civil seguinte.

Usando o programa ADAPTA (Carvalho e Capitão, 1990), usou-se, para todas distribuições consideradas (Gumbel, Fréchet e Weibull) a posição gráfica $i/(N+1)$, recomendada por Gumbel, 1953, em que i é o índice de ordem do valor da amostra e N o respectivo tamanho. Para a estimação dos parâmetros característicos das distribuições, foi utilizado, pela sua simplicidade, o clássico método dos mínimos quadrados.

Para distinguir a qualidade do ajuste dos diferentes modelos às amostras disponíveis de HS foram usados os seguintes parâmetros (Carvalho, 1991), calculados no programa ADAPTA:

- o erro padrão das estimativas, e
- o coeficiente de correlação, r
- a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, d

O ajuste será tanto melhor quanto menor for o valor de d , quanto mais próximo de 1 for o valor de r , e quanto mais próximo de zero for o valor de e .

Para se poder escolher a distribuição ou distribuições a usar, calcula-se um parâmetro, designado por parâmetro combinado, c , que contém informação (normalizada) de dois dos parâmetros acima referidos (e e d), visto que r e e contêm a mesma informação.

$$c = e_o + d_o$$

em que

$$e_o = e / e_{\text{máximo}} \text{ na amostra para as diferentes distribuições}$$

$$d_o = d / d_{\text{máximo}} \text{ na amostra para as diferentes distribuições}$$

Finalmente, há que associar períodos e direcções aos valores extrapolados de HS. Podem considerar-se dois métodos para esse efeito:

- Tratamento de amostras de valores anuais de HS agrupados por sectores de direcções [ou períodos], o que permite associar direcções [ou períodos] a valores extrapolados;
- Obtenção de diagramas de dispersão, ou se o número de dados o permitir, a distribuições de amostra conjuntas, de alturas máximas mensais [HS ou HM] com direcções [ou períodos], o que dá informações sobre a associação de alturas com direcções [ou períodos] e pode conduzir, por exemplo, através de regressão ou por outro método, a associação com alturas extrapoladas.

O primeiro método só é praticável quando haja amostras anuais de tamanho suficientemente grande para permitir que as subamostras por sectores de direcções ou gamas de períodos permitam o trabalho estatístico. Estes métodos de associação a períodos e direcções não foram abordados neste trabalho.

Organização das amostras

A partir dos conjuntos de valores tri-horários, extraíram-se os máximos de HS por Inverno marítimo da totalidade dos dados. Desta forma, os máximos de HS por inverno marítimo podem ser considerados independentes.

Os invernos marítimos disponíveis em Vila do Conde são os referentes aos 13 anos, de 1996-1997 a 2009-2010, correspondentes aos dados observados na bóia de Leixões. Estes dados permitiram construir uma amostra com os máximos anuais, dos invernos marítimos, de HS, com 13 valores, de agora em diante designada por amostra A1. O uso desta amostra A1 traduz o caso usado no estudo de extremos já referido.

No entanto, já depois de efectuado esse estudo de extremos (Capitão e Fortes, 2011), foi disponibilizado novo valor correspondente a parte do inverno marítimo de 2010-2011 (Costa, 2011). Este valor máximo (que pode não ser o verdadeiro máximo), foi obtido, após transferência, a partir da bóia multi-paramétrica “Alfredo M. Ramalho”, equipamento de

medição do projecto Ibérico “RAIA”, localizado ao largo de Leixões na posição 41° 11.61’N/009° 33.95’W, a 40 milhas da costa, na batimétrica dos 1300 metros. Esta bóia, que registou dados de 12 a 17 de Fevereiro de 2011, permitiu assim obter um valor extremo adicional, referente ao inverno de 2010-2011, tornando a amostra de extremos mais completa, agora com 14 valores (amostra A2).

Neste trabalho optou-se por, para além do estudo com as citadas duas amostras A1 e A2, considerar também, de forma artificial, amostras alternativas, de modo a poder ilustrar as implicações que os valores dessas amostras podem ter nas estimativas das extrapolações de HS para grandes períodos de retorno.

Assim, o regime de extremos de agitação em P, foi estimado considerando as seguintes oito amostras (ver Quadro 6):

- A1. Amostra total inicial (Capitão e Fortes, 2011), com 13 valores;
- A2. Amostra total + valor adicional observado (7.92 m), com 14 valores;
- A3. Amostra total + valor adicional “alternativo”, estimado, com 14 valores. Este valor “alternativo”, referente ao último elemento da amostra, foi estimado, por hipótese, como sendo a média aritmética dos 13 valores iniciais, o que deu o valor de 5.35 m;
- A4. Amostra incompleta, com 10 valores (ausência dos 4 últimos elementos);
- A5. Amostra incompleta, com 10 valores (ausência do 2º, 4º, 6º e 8º elementos);
- A6. Amostra incompleta, com 10 valores (ausência do 2º, 6º, 12º e 13º elementos) – os elementos retirados foram os que apresentavam valores mais próximos do valor da média (5.53 m) da amostra A2, de 14 valores;
- A7. Amostra incompleta, com 10 valores (ausência do 1º, 7º, 9º e 14º elementos) – os elementos retirados foram os que apresentavam valores mais distantes do valor da média (5.53 m) da amostra inicial, de 14 valores;
- A8. Amostra muito incompleta, com somente 8 valores (ausência dos 6 últimos elementos);

Uma vez existirem elementos em falta na série de valores anuais de cada amostra, nomeadamente os correspondentes ao inverno marítimo de 200-2001, calculou-se o intervalo médio entre observações, u , cociente entre o número de anos que a série abarca e o número de valores anuais efectivamente existente.

Quadro 6 – Amostras de HS utilizadas

		Amostras de HS (m)							
nº	ano marítimo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	1996-1997	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93		6.93
2	1997-1998	5.70	5.70	5.70	5.70			5.70	5.70
3	1998-1999	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86
4	1999-2000	5.17	5.17	5.17	5.17		5.17	5.17	5.17
5	2000-2001								
6	2001-2002	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13
7	2002-2003	5.42	5.42	5.42	5.42			5.42	5.42
8	2003-2004	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03		7.03
9	2004-2005	4.78	4.78	4.78	4.78		4.78	4.78	4.78
10	2005-2006	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37		
11	2006-2007	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	
12	2007-2008	4.52	4.52	4.52		4.52	4.52	4.52	
13	2008-2009	5.31	5.31	5.31		5.31		5.31	
14	2009-2010	5.38	5.38	5.38		5.38		5.38	
15	2010-2011		7.92	5.35		7.92	7.92		
média		5.35	5.53	5.35	5.43	5.64	5.56	5.12	5.63
u		1.077	1.071	1.071	1.100	1.500	1.500	1.400	1.125

Neste quadro, as células de fundo amarelo referem-se aos valores excluídos na amostra A6, as de fundo azul correspondem aos valores excluídos na amostra A7, as de fundo cinzento dizem respeito aos valores excluídos, da forma acima indicada, nas amostras A4, A5 e A8 e, finalmente, a célula de fundo vermelho, referente à amostra A3, contém a substituição do valor observado (embora possa não ser o verdadeiro máximo) por um valor arbitrário.

As amostras a que se chegou, a partir das quais se fizeram as extrapolações de extremos anuais, para vários períodos de retorno, suscitam desde já os seguintes comentários:

- Há muitas falhas nos dados de base correspondentes aos invernos de 1996-1997, 1997-1998, 1998-1999, 2001-2002, 2002-2003, 2005-2006 e 2009-2010;
- As amostras A1 e A2 provêm de dados (observados em Leixões e depois transferidos para o ponto P) com muitas lacunas, o que significa que podem não conter os efectivos máximos de HS que ocorreram nos diversos invernos marítimos;
- As restantes amostras são artificiais; foram “inventadas” para poder ilustrar os objectivos deste artigo;
- As maiores amostras (A2 e A3) têm apenas tamanho 14, o que, mesmo assim, não é suficiente para permitir extrapolações seguras, como explicam Carvalho e Capitão, 1990, e Copeiro, 1978;
- O inverno marítimo de 2000-2001 não produziu qualquer valor para as amostras consideradas, resultado de uma falha das medições nesse período. Esta dificuldade foi ultrapassada considerando os valores existentes igualmente espaçados no tempo com um intervalo calculado de forma algo artificial, mas que normalmente se usa nestes casos. Esta metodologia foi, aliás, estendida às amostras que contêm mais do que um valor em falta (A5, A6 e A7).

Por estas razões, as extrapolações indicadas devem ser usadas com alguma precaução.

Ajustamento de distribuições

Para cada um dos casos, calculou-se o regime de extremos, de acordo com a teoria descrita no início desta secção, usando o programa ADAPTA (Capitão e Carvalho, 1990). Feitos os cálculos de ajustamento das 8 amostras de HS máximo às distribuições de Gumbel, Fréchet e Weibull, conforme é referido atrás, obtiveram-se os resultados numéricos apresentados nos quadros seguintes. Depois, aplicou-se o método do parâmetro combinado c (Carvalho, 1992; Filipe *et al.*, 1999) para escolher quais as distribuições mais adequadas. Cada quadro mostra os valores obtidos para o parâmetro combinado, c .

Estes cálculos e extrapolações produziram o regime de extremos da agitação marítima indicado no Quadro 7 para os 3 valores de período de retorno, $T = 10, 50$ e 100 anos, considerando a amostra inicial A1. Os valores indicados nas colunas encimadas pelas designações das distribuições são alturas de onda significativa, em metros, N é o tamanho da amostra considerada e u é o intervalo entre observações. Na coluna de fundo amarelo, aparecem os valores correspondentes à distribuição escolhida, de acordo com o critério do parâmetro combinado.

Quadro 7 – Determinação da distribuição de extremos mais adequada e respectivos valores extrapolados e de adaptabilidade em P (amostra A1)

Amostra	N u (ano)	T (ano)	HS (m)		
			Gumbel	Fréchet	Weibull
A1	N = 13 u = 1.0769	10	6.71	6.71	6.49
		50	8.06	8.48	7.08
		100	8.63	9.37	7.26
coeficiente de correlação, r			0.957	0.970	0.905
estatística K-S, d			0.694	0.610	0.954
erro padrão das estimativas, e			0.289	0.242	0.424
parâmetro combinado, $c = d/d_{max} + e/e_{max}$			1.409	1.210	2.000

Os valores a vermelho excedem o máximo HS fisicamente possível no local (P)

Neste caso, conclui-se que a distribuição de extremos mais adequada à amostra A1, considerada no estudo Capitão e Fortes (2011), é a distribuição de Fréchet. Notar, porém, que

esta distribuição é caracterizada por produzir valores extremos elevados para grandes períodos de retorno (e.g, 100 anos), Carvalho e Capitão (1995). Notar também que o valor máximo de HS fisicamente possível no ponto P, de 7.92 m, é ultrapassado pelas estimativas (inscritas a vermelho no quadro) das extrapolações para 50 e 100 anos.

De igual modo, foram efectuados cálculos e extrapolações do regime de extremos da agitação marítima, para os mesmos períodos de retorno, considerando as restantes amostras, A2 a A8, referidas no Quadro 6. No Quadro 8, mostram-se os resultados para essas amostras alternativas.

Quadro 8 – Determinação da distribuição de extremos mais adequada e respectivos valores extrapolados e de adaptabilidade em P (amostras A2 a A8)

Sector (º)	N u (ano)	T (ano)	HS (m)		
			Gumbel	Fréchet	Weibull
A2	N = 14 u = 1.0714	10	7.25	7.25	7.00
		50	8.96	9.62	7.78
		100	9.69	10.84	8.03
		r	0.962	0.975	0.895
		d	0.754	0.658	1.018
		e	0.277	0.226	0.451
		c	1.355	1.147	2.000
A3	N = 14 u = 1.0714	10	6.65	6.65	6.44
		50	7.95	8.32	7.00
		100	8.49	9.15	7.18
		r	0.953	0.966	0.903
		d	0.774	0.688	1.052
		e	0.307	0.262	0.434
		c	1.443	1.258	2.000
A4	N = 10 u = 1.1000	10	6.97	7.00	6.71
		50	8.52	9.15	7.38
		100	9.17	10.24	7.60
		r	0.957	0.968	0.907
		d	0.611	0.582	0.711
		e	0.277	0.240	0.399
		c	1.554	1.420	2.000
A5	N = 10 u = 1.5000	10	7.30	7.29	7.14
		50	9.41	10.36	8.20
		100	10.29	12.00	8.55
		r	0.962	0.970	0.909
		d	0.711	0.629	0.891
		e	0.258	0.230	0.396
		c	1.449	1.287	2.000
A6	N = 10 u = 1.5000	10	7.30	7.28	7.15
		50	9.51	10.51	8.30
		100	10.44	12.26	8.67
		r	0.944	0.953	0.876
		d	0.818	0.751	0.987
		e	0.313	0.288	0.458
		c	1.512	1.390	2.000
A7	N = 10 u = 1.4000	1	5.62	5.64	5.55
		50	6.23	6.36	5.79
		100	6.48	6.69	5.87
		r	0.977	0.970	0.988
		d	0.496	0.526	0.447
		e	0.203	0.229	0.146
		c	1.829	2.000	1.487
A8	N = 8 u = 1.1250	1	7.20	7.26	6.93
		50	8.80	9.49	7.62
		100	9.47	10.62	7.85
		r	0.950	0.959	0.897
		d	0.636	0.573	0.694
		e	0.282	0.255	0.399
		c	1.623	1.465	2.000

Os valores a vermelho excedem o máximo HS fisicamente possível no local (P)

Também aqui, como se pode ver, para todas as amostras excepto a A7, o valor máximo de HS fisicamente possível no ponto P, de 7.92 m, é ultrapassado pelas estimativas das extrapolações para 50 e 100 anos.

Regime de extremos

No Quadro 9 apresenta-se um resumo do regime de extremos no ponto P.

Havendo necessidade de usar este regime de extremos para o projecto de obra marítima nesse local, seriam esses valores máximos (última coluna do Quadro 9) a usar (e os períodos e direcções de onda associados). Assim, por exemplo, para a amostra A1, globalmente o regime de extremos de agitação no ponto P é caracterizado por ondas com alturas significativas de 6.71 m (para o período de retorno $T=10$ anos) e 7.92 m (para os períodos de retorno $T=50$ e 100 anos). O valor máximo de altura significativa, de 7.92 m, para dois períodos de retorno (50 e 100 anos) foi obtido por limitação da altura de onda de rebentação. No caso do período de retorno de 10 anos, verifica-se que a escolha da amostra influencia efectivamente os valores extrapolados de HS: para as amostras A2 e A8, obtiveram-se valores entre 5.55 m e 7.29 m. Para os períodos de retorno de 50 ou 100 anos, e exceptuando a amostra A7, a escolha da amostra não tem influência nos valores de HS extrapolados, pois a altura de onda é sempre limitada pela pequena profundidade local. Neste caso da amostra A7, o facto de se terem eliminado os valores mais distantes da média dos valores da amostra, diminui a variabilidade desta e, conseqüentemente, diminui a inclinação da recta de extrapolação. Tal tem um efeito significativo nos valores associados aos períodos de retorno de 50 a 100 anos, que se tornam menores.

Quadro 9 – Quadro-resumo com valores extrapolados de HS, para as distribuições de extremos seleccionadas.

Amostra	N u (ano)	T (ano)	HS (m) extrapolado	HS (m) em P
A1	N = 13 u = 1.0769	10	6.71	6.71
		50	8.48	7.92
		100	9.37	7.92
A2	N = 14 u = 1.0714	10	7.25	7.25
		50	9.62	7.92
		100	10.84	7.92
A3	N = 14 u = 1.0714	10	6.65	6.65
		50	8.32	7.92
		100	9.15	7.92
A4	N = 10 u = 1.1000	10	7.00	7.00
		50	9.15	7.92
		100	10.24	7.92
A5	N = 10 u = 1.5000	10	7.29	7.29
		50	10.36	7.92
		100	12.00	7.92
A6	N = 10 u = 1.5000	10	7.28	7.28
		50	10.51	7.92
		100	12.26	7.92
A7	N = 10 u = 1.4000	1	5.55	5.55
		50	5.79	5.79
		100	5.87	5.87
A8	N = 8 u = 1.1250	1	7.26	7.26
		50	9.49	7.92
		100	10.62	7.92

Os valores a vermelho excedem o máximo HS fisicamente possível no local (P)

Neste trabalho vai, porém, continuar a usar-se os valores não limitados pela profundidade (penúltima coluna do Quadro 9) para melhor ilustrar os objectivos previstos no trabalho. Para isso, apresenta-se na secção seguinte uma análise da variabilidade das extrapolações com as diversas amostras.

6. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DAS ESTIMATIVAS

Na secção anterior, foi definida primeiramente a amostra possível de valores extremos, considerando critérios pré estabelecidos, e estabeleceu-se o regime de extremos no ponto P. Seguidamente fez-se variar os critérios de selecção da amostra, para se obterem amostras alternativas, de modo a serem avaliadas as implicações destas alterações nas estimativas do regime de extremos, Quadro 6.

Nesta secção vai-se analisar os critérios de selecção da amostra, considerando as amostras alternativas A1 a A8 (e omitindo a limitação da altura de onda por efeito da profundidade local), e vão ser avaliadas as implicações que estas têm nas estimativas do regime de extremos.

Primeiramente, considera-se a amostra de extremos A1, de tamanho já razoável (considerando que há sempre poucos dados), proveniente do estudo de extremos já referido (Capitão e Fortes, 2011) e a amostra A2, que contém mais um valor. Esta situação traduz o caso em que, já depois de efectuado o estudo de extremos em Vila do Conde, ficou disponível novo valor extremo correspondente a parte do inverno marítimo de 2010-2011. Este valor (7.92 m) possibilitou a obtenção de uma amostra de extremos mais completa, de 14 valores (A2).

Os resultados das extrapolações considerando estas duas amostras podem ser consultados na Figura 4 e no Quadro 10, a seguir.

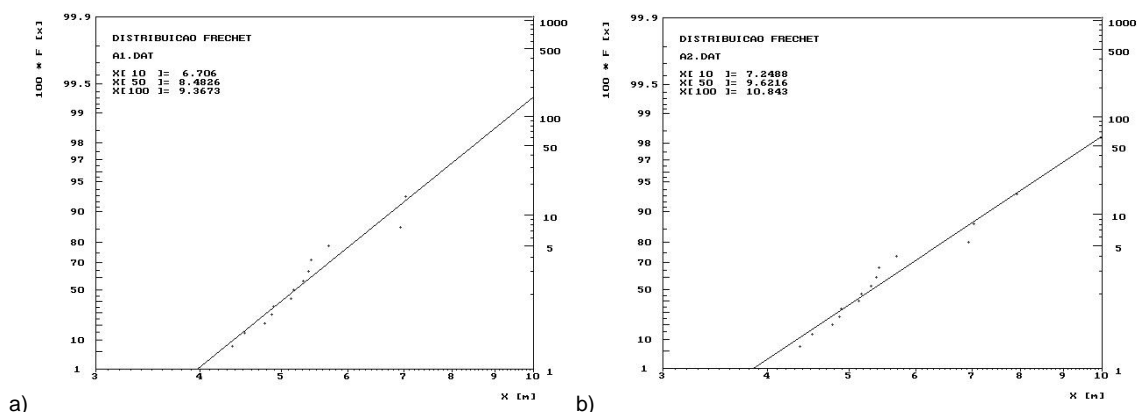


Figura 4 – Comparação entre extrapolações com amostras de extremos de tamanhos a) 13 (A1) e b) 14 (A2).

Esta comparação mostra como a existência (ou não) de mais um valor anual na amostra existente, pode alterar significativamente os valores extrapolados, principalmente para períodos de retorno elevados (e.g., 100 anos).

Quadro 10 – Extrapolações com amostras de extremos de tamanhos 13 (A1) e 14 (A2)

Amostras	N	T (ano)	A1	A2
A1 vs. A2	N = 13 vs. 14	10	6.71	7.25
		50	8.48	9.62
		100	9.37	10.84

Verifica-se que as grandes diferenças encontradas nos valores de HS extrapolados (cerca de 1.5 m para T=100 anos), devem-se fundamentalmente ao facto de o valor que distingue as duas amostras se afastar significativamente da média. Se se considerar, por hipótese, uma amostra (A3) em que o elemento adicional tem valor igual à média dos restantes², não há praticamente diferença nos valores extrapolados – ver Quadro 11.

Quadro 11 – Extrapolações com amostras de extremos de tamanhos 13 (A1) e 14 (A3)

Amostras	N	T (ano)	A1	A3
A1 vs. A3	N = 13 vs. 14	10	6.71	6.65
		50	8.48	8.32
		100	9.37	9.15

Mostra-se agora uma comparação entre extrapolações com amostras de extremos de distintos tamanhos: 8 (A8), 10 (A4), 13 (A1) e 14 (A2) - Quadro 12.

² Este tipo de operação é método habitual que se pode usar quando há falhas nas amostras.

Quadro 12 – Extrapolações com amostras de extremos de distintos tamanhos: 8 (A8), 10 (A4), 13 (A1) e 14 (A2)

Amostras	N	T (ano)	A8	A4	A1	A2
A8 vs. A4 vs. A1 vs. A2	N = 8 vs. 10 vs. 13 vs. 14	10	7.26	7.00	6.71	7.25
		50	9.49	9.15	8.48	9.62
		100	10.62	10.24	9.37	10.84

Apesar de o tamanho da amostra ser um factor que pesa nos resultados finais (valores extrapolados), não são de destacar normalmente muitas diferenças, como se pode ver no Quadro 12, quando a variabilidade das amostras é idêntica, como é o caso.

Claramente, a variabilidade da amostra é o factor principal para a obtenção de uma recta de extrapolação mais ou menos inclinada, com consequentes menores ou maiores (respectivamente) valores extrapolados, qualquer que seja o tamanho da amostra. Por exemplo, Carvalho e Capitão (1995) verificaram, com base num conjunto de dados de qualidade e tamanho idênticos, relativos a Sines, na costa ocidental Sul de Portugal, e a Figueira da Foz, na costa ocidental Norte, que, apesar de para pequenos períodos de retorno (T=10 anos) o regime de extremos da zona Norte ser mais gravoso (o que está de acordo com o que é habitualmente espectável), para grandes períodos de retorno (T=100 anos), é o regime de extremos Sul (Sines) o mais gravoso. Este comportamento tem a ver com o facto de a agitação Sul, apesar de ser em média menor do que a Norte, tem maior variabilidade (maior desvio-padrão em relação à média), o que leva à obtenção de maiores valores extrapolados para períodos de retorno elevados (a recta de extrapolação para Sines é menos inclinada do que para Figueira da Foz).

Se se comparar os resultados das amostras A2 e A3, que têm o mesmo número de valores, mas contêm um único valor diferente (o último), as diferenças são notórias. Como se pode ver na Figura 5, é devido à menor inclinação da recta de extrapolação que se verificam as referidas diferenças. Este problema acontece quando os valores a que se tem acesso provêm de dados com falhas diversas dos equipamentos de medição, ou mesmo com erros de medição.

Quadro 13 – Extrapolações com amostras de extremos com mesmo tamanho, com valor “observado” (A2) e com valor estimado artificial (A3).

Amostras	N	T (ano)	A2	A3
A2 vs. A3	N = 14	10	7.25	6.65
		50	9.62	8.32
		100	10.84	9.15

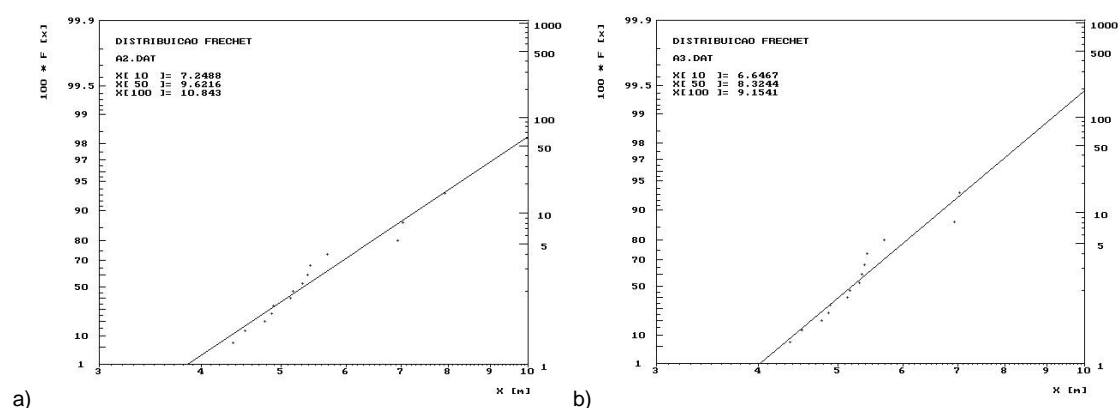


Figura 5 – Comparação entre extrapolações com amostras de extremos do mesmo tamanho, mas com um valor extremo diferente a) valor “observado” (A2), de 7.92 m, e b) valor estimado artificial (A3), de 5.35 m.

Finalmente, considerou-se o conjunto de amostras alternativas (A4, A5, A6 e A7), todas com dez valores, subamostras da amostra A2, em que os 4 valores retirados são-no de forma arbitrária (amostra A4, em que se retirou os 4 anos mais recentes e A5, em que se retirou 4 valores quaisquer), ou de forma deliberada de modo a obter rectas de extrapolação com

inclinação máxima e mínima, considerando amostras em que os 4 valores retirados estão o mais próximos possível do valor médio da amostra inicial (A6) e o mais “distantes” possível desse valor médio (A7). Essas comparações são mostradas no Quadro 14, a seguir.

Quadro 14 – Extrapolações com diferentes amostras de extremos com o mesmo tamanho (10)

Amostras	N	T (ano)	A4	A5	A6	A7
A4 vs. A5 vs. A6 vs. A7	N = 10	10	7.00	7.29	7.28	5.55
		50	9.15	10.36	10.51	5.79
		100	10.24	12.00	12.26	5.87

Como se vê, as diferenças são significativas entre as citadas amostras, mas em especial a amostra A7 produz valores de destaque. Verifica-se que, ao serem retirados à amostra A2 os 4 valores mais próximos da média – amostra A6, ou os 4 valores mais distantes – amostra A7, tem implicações nos valores extrapolados significativas.

Notar, porém, que, para além de a amostra A7 conter valores com muito pouca variabilidade, o que explica uma parte significativa da diferença verificada, os valores mostrados (coluna A7 do Quadro 14) foram obtidos considerando a distribuição de Weibull e não a de Fréchet, como acontece em todos os outros casos. Efectivamente, para aquela amostra, o parâmetro combinado c indicou aquela distribuição como mais adequada. A distribuição escolhida é, assim, também, um factor muito importante nos valores extrapolados finais. Para exemplificar esse aspecto, mostra-se na Figura 6, a seguir, a comparação dos papéis de probabilidade referentes às distribuições de Gumbel, Fréchet e Weibull (escolhida) para essa amostra A7. O Quadro 15 mostra os valores numéricos correspondentes.

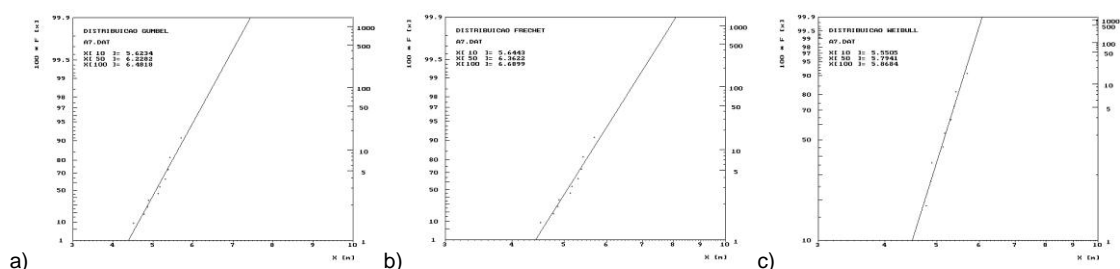


Figura 6 – Comparação entre extrapolações com as três distribuições de extremos consideradas para a amostra A7: a) Gumbel, b) Fréchet e c) Weibull (escolhida).

É notória a menor inclinação da recta de extrapolação referente à distribuição de Fréchet (que motiva maiores extrapolações) e a menor inclinação da recta de Weibull (a escolhida).

Quadro 15 – Extrapolações da amostra A7, para as 3 distribuições testadas (foi seleccionada a de Weibull)

Amostras	N	T (ano)	Gumbel	Fréchet	Weibull
A7	N = 10	10	5.62	5.64	5.55
		50	6.23	6.36	5.79
		100	6.48	6.69	5.87

7. CONCLUSÕES

Nesta comunicação efectuou-se uma análise de sensibilidade ao tamanho da amostra de extremos e à possibilidade de, naquela amostra haver valores “erróneos”, que se afastam significativamente da média dos valores máximos observados. Avaliou-se, deste modo, as implicações que poderão ocorrer nos valores da onda de projecto. Para este efeito utilizou-se o caso de estudo do porto de Vila do Conde.

Determinou-se o regime de agitação marítima de extremos junto aos molhes de Vila do Conde, no ponto P, com base nos dados obtidos pela bóia-ondógrafo de Leixões. O regime de extremos de agitação obtido resultou da transposição do regime local na bóia-ondógrafo de

Leixões para P, utilizando a metodologia de passagem costa-largo-costa, *Coli et al.*, 2002, e da utilização do método dos mínimos anuais para o estudo dos extremos.

A determinação do regime de extremos foi concretizada através da (a) identificação da amostra de extremos A1, constituída por valores máximos anuais de HS, no ponto P, com base nos valores tri-horários transferidos de Leixões; (b) ajuste de diversas distribuições de extremos à amostra considerada; (c) selecção da distribuição mais adequada e, finalmente, com base nessa distribuição, (d) cálculo do regime de extremos local para vários períodos de retorno.

De seguida, consideraram-se amostras alternativas a A1 (A2 a A7), de modo a serem avaliadas as implicações destas alterações nas estimativas do regime de extremos. Verificou-se que para o caso em estudo, no ponto em frente ao molhe de Vila do Conde, para o período de retorno de 10 anos, há claramente uma influência do tamanho e dos valores de cada amostra nas estimativas de HS extrapoladas. O mesmo não se passa para os períodos de retorno mais elevados, 50 e 100 anos, porque os valores extrapolados de HS para qualquer das amostras (com excepção da amostra A7, que apresenta menor variabilidade entre os valores que constituem a amostra) são limitados pela profundidade do ponto. Este constitui, por isso, um caso particular. De modo a analisar casos mais gerais (em que a profundidade do local não seja condicionante), consideraram-se os valores das amostras A1 a A8 não limitados pela profundidade, e realizaram-se várias comparações de modo a ilustrar como a existência (ou não) de um ou mais valores anuais nas amostras de extremos pode alterar significativamente os valores extrapolados, principalmente para períodos de retorno elevados, e como a distribuição escolhida, de acordo com um certo critério, pode também modificar essas extrapolações.

Concluiu-se que, apesar de o tamanho da amostra pesar nos resultados finais (valores extrapolados), as escolhas quer dos próprios valores extremos (maior variabilidade implica menor inclinação da recta de extrapolação, e consequentes maiores valores de extrapolações), quer da distribuição de extremos que explique a amostra considerada (a distribuição de Fréchet produz geralmente rectas de extrapolação menos inclinadas do que a distribuição de Gumbel e, principalmente, do que a distribuição de Weibull, o que conduz a maiores valores extrapolados também) são determinantes para uma correcta determinação dos valores extrapolados de altura significativa, assim como para os períodos e direcções de onda àqueles associados (aspecto não tratado neste trabalho).

Como nota final sobre este trabalho, chama-se a atenção para o seguinte:

1. Os dados utilizados, provenientes da bóia-ondógrafo de Leixões, têm lacunas, por vezes em períodos de temporal e por vezes durante extensos períodos (notar por exemplo a ausência de dados durante todo o inverno marítimo de 2000-2001). Consequentemente, as amostras a que se chegou, a partir das quais se fizeram as extrapolações de extremos anuais, podem não conter os efectivos máximos de HS que ocorreram nos diversos invernos marítimos;
3. As amostras de extremos consideradas, mesmo as maiores (tamanho 14), pecam por serem pequenas;
4. As amostras A3 a A8 são artificiais; foram “inventadas” para poder ilustrar os objectivos deste artigo;
5. Os valores extrapolados de HS em P foram, quase sempre, limitados a 7.92 m, altura que corresponde ao valor máximo de HS fisicamente possível naquele local;
6. Não foram indicadas as associações aos valores extremos de altura de ondadas sectores de direcções respectivos, assim como gamas de períodos de onda.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, I.P. (IPTM), promotor do estudo Capitão e Fortes (2011), a autorização dada para utilização dos dados de base e dos resultados obtidos nesse estudo.

REFERÊNCIAS

- Capitão, R.; Fortes, C.J.E.M. (2011). Regime de extremos de agitação marítima no molhe Norte do Porto de Vila do Conde. Relatório 161/2011 – NPE, LNEC, Maio de 2011.
- Carvalho, M.M. (1982). Sobre a especificação da solicitação a adoptar para o dimensionamento de estruturas marítimas, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa.
- Carvalho, M.M. (1983). Modelação estocástica da agitação marítima, Programa de Investigação, LNEC, Lisboa.
- Carvalho, M.M. (1992). Valores extremos da agitação marítima. Figueira da Foz – Tratamento local dos dados existentes. Relatório 198/92-NPP, LNEC, Lisboa, Dezembro de 1992.
- Carvalho, M.M.; Capitão, R. (1990). Ajustamento Gráfico de Distribuições. Relatório 250/90-NPP e Relatório 2/90-A - NATO PO-WAVES. Lisboa, Outubro de 1990.
- Carvalho, M.; R. Capitão (1995). Extreme Wave Height off the Western Coast of Portugal. Proceedings of the International Conference OMAE'95, ASME, Copenhagen, Denmark.
- CEM (2001) - Coastal Engineering Manual. Department of the Army, USACE, Washington, DC. Versão provisória disponível na internet.
- 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.
- Coles, S. G. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer Series in Statistics, ISBN 1852334592.
- Copeiro, E. (1978) - Extremal prediction of significant wave height, Proceedings of the 16th Conference on Coastal Engineering, Hamburg, 1978.
- Costa, M.S. (2011). Dados, não tratados, da bóia multi-paramétrica “Alfredo M. Ramalho”, referentes ao dia 16-02-2011. Comunicação pessoal (correio electrónico). Março de 2011.
- 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 de 1999.