



## COMPARAÇÃO DE DADOS METEOCEÂNICOS E MODELOS ESTATÍSTICOS NO DIMENSIONAMENTO DE PROTEÇÕES CONTRA A EROÇÃO DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Rui Figueiredo<sup>1,2</sup>; Tiago Fazerer-Ferradosa<sup>1,2</sup>; João Chambel<sup>1,2</sup>; Paulo Rosa Santos<sup>1,2</sup>;  
Francisco Taveira Pinto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da U. do Porto; <sup>2</sup> Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental  
[ruifig@fe.up.pt](mailto:ruifig@fe.up.pt), [tferradosa@fe.up.pt](mailto:tferradosa@fe.up.pt), [up201304674@fe.up.pt](mailto:up201304674@fe.up.pt), [pjrsantos@fe.up.pt](mailto:pjrsantos@fe.up.pt), [fpinto@fe.up.pt](mailto:fpinto@fe.up.pt)

### Resumo

As estruturas eólicas *offshore* usam geralmente fundações fixas no fundo marinho que são suscetíveis a fenómenos de erosão localizada. O dimensionamento de proteções para este tipo de estruturas requer a definição das ações hidrodinâmicas e cargas que estas devem ser capazes de suportar durante a sua vida útil. Neste contexto, *hindcasts* que forneçam estimativas das variáveis meteoceânicas necessárias podem desempenhar um papel fundamental. No entanto, não é claro até que ponto a escolha de diferentes conjuntos de dados de *hindcast* pode influenciar o dimensionamento de proteções contra a erosão num determinado local. Além disso, a definição de cargas de projeto requer estimar estados de agitação marítima extremos com períodos de retorno que excedem as durações das séries temporais disponibilizadas pelos *hindcasts*, utilizando técnicas estatísticas inferenciais. Isto introduz incerteza adicional no processo de modelação, que é agravada pelo facto de diferentes modelos estatísticos poderem apresentar diferentes desempenhos quando aplicados a diferentes *hindcasts*. É portanto necessária uma melhor compreensão dos efeitos produzidos por estas escolhas de modelação no dimensionamento e otimização das proteções. Neste contexto, o presente estudo compara diferentes *hindcasts* de ondas para o Mar do Norte e analisa de que forma é que a sua seleção, bem como a posterior aplicação de vários modelos estatísticos, influencia as probabilidades de falha estimadas para o manto resistente de fundações para monopilares em condições *offshore*, tendo em conta um critério de dimensionamento dinamicamente estável. Os resultados mostram que a escolha do *hindcast* afeta significativamente a probabilidade de falha estimada para este tipo de proteções contra erosões localizadas.

**Palavras-Chave:** *Hindcast* de ondas; Modelos ambientais conjuntos; Proteções contra erosão; Probabilidade de falha; Dimensionamento meteoceânico.

### 1. Introdução

Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente nas energias renováveis marinhas e no papel que estas poderão desempenhar na transição para um sistema energético mais limpo e sustentável. Entre as tecnologias de energias renováveis marinhas existentes, a eólica *offshore* é considerada a mais promissora e, nos últimos anos, a sua capacidade instalada tem vindo a aumentar em todo o mundo (Arrambide *et al.*, 2019). Tipicamente, as estruturas eólicas *offshore* utilizam fundações fixas no fundo marinho que podem representar uma parte significativa do seu custo global (Tang *et al.*, 2022). Tais fundações estão sujeitas a fenómenos de erosão localizada, necessitando assim de sistemas de proteção adequados. Neste contexto, a otimização deste tipo proteções pode contribuir de forma significativa para a redução do custo das estruturas eólicas *offshore*, aumentando, conseqüentemente, a sua competitividade em relação a outras fontes de energia.

No entanto, a modelação do processo de erosão em fundações fixas e o dimensionamento de proteções adequadas são problemas complexos do ponto de vista técnico, aos quais está associado um conjunto significativo de incertezas. Uma das principais fontes de incerteza está relacionada com a determinação das ações hidrodinâmicas às quais uma estrutura eólica *offshore* e as suas fundações estarão expostas ao longo da sua vida útil. A elaboração desse tipo de estimativas deve ser baseada em séries temporais robustas e suficientemente longas para um conjunto de variáveis ambientais de interesse (Ferradosa *et al.*, 2019). Idealmente, para



esse efeito devem ser utilizadas medições *in situ* (e.g., provenientes de boias de medição), mas na prática, esse tipo de dados não está muitas vezes disponível. Neste contexto os *hindcasts* podem desempenhar um papel crucial, uma vez que podem fornecer estimativas multi-década, consistentes e espacialmente contínuas para as variáveis meteoceânicas relevantes. No entanto, a modelação do tipo *hindcast* para estados de mar está ela própria associada a incertezas (Weisse e Feser, 2003), não sendo claro até que ponto isso pode influenciar o dimensionamento de proteções contra a erosão localizada em estruturas *offshore*.

Assim, o presente estudo efetua uma análise comparativa de três *hindcasts* multi-década de ondas disponíveis para o Mar do Norte, e analisa de que forma a seleção de modelos de *hindcast* pode afetar o dimensionamento de proteções contra a erosão, nomeadamente em termos da estimativa da probabilidade de falha para o manto resistente de fundações do tipo monopilar. Nesse sentido, para cada um dos conjuntos de dados de *hindcast*, são utilizados vários modelos estatísticos para representar as distribuições conjuntas de altura de onda significativa e período de pico de onda numa determinada localização. É aplicado posteriormente um método de estabilidade dinâmica para o dimensionamento do manto resistente (De Vos *et al.*, 2012), e os resultados obtidos são comparados entre os diferentes modelos *hindcast* e modelos estatísticos para uma gama de diâmetros medianos dos blocos. Este estudo procura assim contribuir para uma tomada de decisão mais informada nesta área onde, devido à grande escala das estruturas, pequenas diferenças nos pressupostos adotados em projeto podem resultar em diferenças consideráveis nos custos globais e, conseqüentemente, na atratividade de soluções de energia *offshore*.

## 2. Caso de Estudo

O caso de estudo selecionado encontra-se à latitude de 52.606°N e à longitude de 4.419°E, onde se situa o parque eólico *offshore Egmond aan Zee* (Figura 1). Este parque eólico, localizado entre 10 a 18 km da costa dos Países Baixos na região do Mar do Norte, possui 36 turbinas eólicas com fundações do tipo monopilar, cada uma com uma capacidade nominal de 3 MW (NoordzeeWind, 2008). A escolha de um caso de estudo numa localização onde existe um parque eólico *offshore*, para o qual está disponível informação sobre as características das turbinas instaladas (Esteban *et al.*, 2019), é vantajosa uma vez que providencia uma base de discussão dos resultados obtidos de um ponto de vista mais prático, além de permitir análises comparativas à posteriori com as estruturas reais existentes.

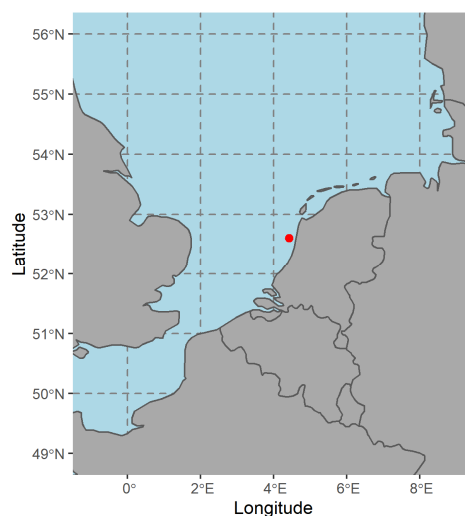


Figura 1. Localização do caso de estudo (parque eólico *offshore Egmond aan Zee*).



O parque eólico *Egmond aan Zee* está localizado no domínio espacial abrangido pelos três *hindcasts* de ondas utilizados neste estudo. O primeiro é o *CMEMS Copernicus Marine Service North West European Shelf reanalysis product NORTHWESTSHELF\_REANALYSIS\_WAV\_004-015* (Saulter, 2021), doravante referido apenas como *CMEMS*. O segundo é o conjunto de dados *coastDat-2 WAM-North\_Sea* (Groll e Weisse, 2017). O terceiro é o *North Sea Wave Database NSWD* (Lavidas e Polider, 2019). A Tabela 1 resume as propriedades espaciais e temporais dos três *hindcasts*. Para mais informação e detalhes, sugere-se a consulta das referências providenciadas. Importa referir que no caso do *NSWD*, foi assumido um espectro *JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Observation Project*) com um fator de pico de 3.3 e foi aplicado para o período de pico a fórmula  $T_p = 1.1T_{m-1,0}$  (CIRIA *et al.*, 2007).

Tabela 1. Propriedades espaciais e temporais dos conjuntos de dados de *hindcast* adotados.

		Conjunto de dados		
		CMEMS	coastDat-2	NSWD
Resolução Espacial	Latitude	0.017°	0.050°	0.025°
	Longitude	0.017°	0.075°	0.025°
Cobertura Temporal	De	1980-01-01	1949-01-01	1980-01-01
	A	2021-08-31	2014-12-31	2017-12-31
Resolução Temporal		3 horas	1 hora	1 hora

A Figura 2 e a Tabela 2 representam, respetivamente, os gráficos de dispersão e a tabela-resumo com as estatísticas descritivas para as três bases de dados, indicando que existem diferenças significativas entre as distribuições quer de  $H_s$ , quer de  $T_p$  para a localização do parque eólico *Egmond aan Zee*. É possível observar que o *hindcast* *coastDat-2* contém os valores estimados mais elevados, nos extremos, tanto para  $H_s$  como para  $T_p$ , sendo a sua distribuição aquela que apresenta os valores mais elevados de assimetria (positiva) e de curtose, o que reflete caudas direitas mais longas e pesadas. No entanto, aparte dos valores localizados acima dos quantis 99.9%, o *NSWD* apresenta geralmente as estimativas mais elevadas para  $H_s$ . Relativamente a  $T_p$ , a base de dados do *NSWD* fornece geralmente as estimativas mais baixas, possui um valor máximo bastante mais baixo e apresenta uma distribuição praticamente simétrica. As diferenças entre os valores obtidos do *CMEMS* e do *coastDat-2* para a variável  $T_p$  são menos pronunciadas, embora as estimativas fornecidas pelo último tendam a ser ligeiramente superiores.

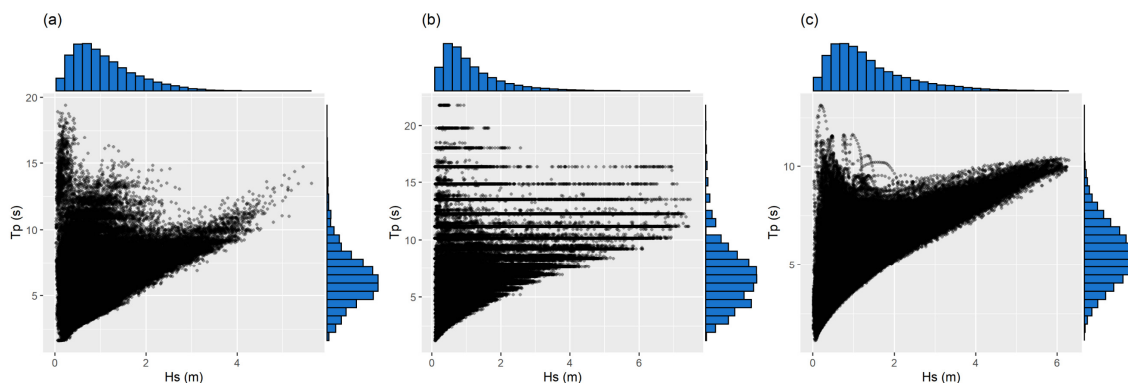


Figura 2. Gráficos de dispersão e distribuições marginais: (a) *CMEMS*; (b) *coastDat-2*; (c) *NSWD*.



Tabela 2. Estatísticas descritivas e quantis de  $H_s$  e  $T_p$  para os três conjuntos de dados adotados.

Estatística	CMEMS		coastDat-2		NSWD	
	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
<b>Média</b>	1.099	6.32	1.156	6.56	1.380	5.52
<b>Mediana</b>	0.939	6.19	0.895	6.30	1.118	5.46
<b>Desvio-Padrão</b>	0.704	2.03	0.882	2.46	0.988	1.47
<b>Assimetria</b>	1.112	0.86	1.790	1.01	1.336	0.23
<b>Curtose</b>	1.287	2.11	4.253	2.16	1.809	-0.10
<b>Mínimo</b>	0.022	1.64	0.084	1.25	0.011	1.16
<b>Quantil 25%</b>	0.570	5.02	0.541	4.84	0.660	4.48
<b>Quantil 50%</b>	0.939	6.19	0.895	6.30	1.118	5.46
<b>Quantil 75%</b>	1.475	7.46	1.502	7.63	1.835	6.50
<b>Quantil 90%</b>	2.096	8.79	2.328	9.23	2.790	7.45
<b>Quantil 95%</b>	2.489	9.90	2.955	11.17	3.431	8.03
<b>Quantil 99%</b>	3.228	12.55	4.295	14.86	4.588	9.19
<b>Quantil 99.9%</b>	4.148	16.36	6.012	17.99	5.661	10.14
<b>Máximo</b>	5.638	19.42	7.485	21.76	6.293	13.14
<b>Número de pontos</b>	121 752		578 544		333 121	

### 3. Métodos

#### 3.1 Modelação Estatística para Variáveis Metoceânicas

Neste estudo, são adotados três métodos para a obtenção de modelos estatísticos conjuntos para a distribuição bivariada do  $H_s$  e  $T_p$ . O primeiro método consiste na abordagem de modelação condicional, onde a distribuição conjunta das duas variáveis é estimada assumindo que a distribuição marginal de  $H_s$  segue uma distribuição de *Weibull*, e a distribuição marginal de  $T_p$  segue uma distribuição lognormal com os parâmetros de localização e de escala condicionados pelo valor de  $H_s$  (Bitner-Gregersen, 2015). Esta abordagem é prática comum no desenvolvimento de projetos de engenharia metoceânicos (DNV GL, 2021). O segundo método é o método condicional de excedência proposto por Heffernan e Tawn (2004), que consiste numa abordagem condicional à teoria multivariada de valores extremos. Nesta abordagem, a cauda conjunta da distribuição bivariada é estimada através da modelação da distribuição condicional de uma variável dado um valor elevado da variável condicionante, baseada em argumentos assintóticos. Este método tem estado recentemente em foco no dimensionamento metoceânico (Ewans e Jonathan, 2014; Vanem *et al.*, 2019). A aplicação destes dois métodos foi efetuada utilizando a biblioteca de R ECSADES (Liu, 2020). O terceiro método é baseado na aplicação de cópulas. As cópulas são distribuições de probabilidades multivariadas em que cada variável possui uma distribuição de probabilidade marginal uniforme; a cópula descreve a estrutura de dependência entre as variáveis. Neste estudo, para este método, as distribuições marginais do  $H_s$  e do  $T_p$  são modeladas como uma distribuição de *Weibull* e uma distribuição lognormal, respetivamente (*e.g.*, Vanem, 2016). Tal como o modelo de *Heffernan-Tawn*, também as cópulas têm recebido atenção da comunidade científica no contexto do dimensionamento metoceânico (Fazeres-Ferradosa *et al.*, 2018b, 2019). Para a escolha da família de cópulas e para a estimativa dos respetivos parâmetros em cada conjunto de dados, foi utilizado a biblioteca de R VineCopula (Nagler *et al.*, 2021).



### 3.2 Estimativa do Dano em Proteções contra Erosões Localizadas em Monopilares

A estimativa do dano para um conjunto de proteções hipotéticas para fundações do tipo monopilar foi executada considerando um critério de dimensionamento de estabilidade dinâmica, onde o movimento dos blocos que constituem o manto resistente é permitido até certo ponto. Esta abordagem contrasta com a das proteções estáticas, em que os blocos do manto resistente não se podem mover; assim, a aplicação de proteções dinâmicas permite em geral a utilização de blocos com diâmetros mais reduzidos (Fazeres-Ferradosa *et al.*, 2018a). Esta abordagem, proposta por De Vos *et al.* (2012), é adotada para estimar o número de dano  $S_{3D}$  para proteções dinâmicas, que consiste num parâmetro adimensional que representa a quantidade de camadas de blocos que se moveram de um determinado local da proteção. Considera-se que ocorreu a falha da proteção quando  $S_{3D} > 1$ . Foram consideradas proteções com valores de  $D_{50}$  entre os 0.10 m e os 0.30 m, em incrementos de 0.02 m.

### 3.3 Computação da Probabilidade de Falha

Para cada conjunto de dados e modelo estatístico conjunto adotado, foi aplicado o método de amostragem aleatória de Monte Carlo para simular pares de valores de  $H_s$  e  $T_p$  correspondentes a um período de 100 anos. De seguida, para cada realização e para cada  $D_{50}$  considerado, foram calculados os respetivos valores de  $S_{3D}$ . Assim, para um determinado conjunto de dados, modelo estatístico e diâmetro mediano dos blocos, a probabilidade de falha é dada por

$$P_f = \frac{\#(S_{3D} \geq 1)}{N} \quad [1]$$

onde  $\#(S_{3D} \geq 1)$  representa o número de realizações onde se considera que existe a falha da proteção e  $N$  é o número total de realizações (Fazeres-Ferradosa *et al.*, 2018a).

## 4. Resultados

Tendo sido estabelecidas nove distribuições conjuntas para  $H_s$  e  $T_p$ , correspondentes a cada um dos três conjuntos de dados de *hindcast* e utilizando as três abordagens de modelação estatística acima descritas, foram gerados 100 anos de dados simulados, que se apresentam nos gráficos de dispersão da Figura 3. Observe-se que enquanto a construção de todos os modelos implicou estimar os respetivos conjuntos de parâmetros, a abordagem baseada nas cópulas envolveu ainda a escolha de uma família de cópulas. Para este caso, foi utilizada uma cópula *Tawn* de tipo 1 com rotação de 180° para os três conjuntos de dados, uma vez que de forma geral foi a que apresentou o melhor ajuste entre as várias famílias de cópulas apresentadas em Nagler *et al.* (2021). A Figura 3 apresenta também os gráficos de dispersão dos dados empíricos para cada um dos três *hindcasts*. A sobreposição dos dados simulados com os dados empíricos não só permite avaliar visualmente quão apropriados são os modelos construídos, mas também facilita a sua análise e discussão. A Figura 4 exhibe as probabilidades de falha estimadas para proteções contra erosão ( $P_f$ ) para cada *hindcast* e modelo estatístico considerados, ao longo da gama de valores considerada para o diâmetro mediano ( $D_{50}$ ) dos elementos da proteção.

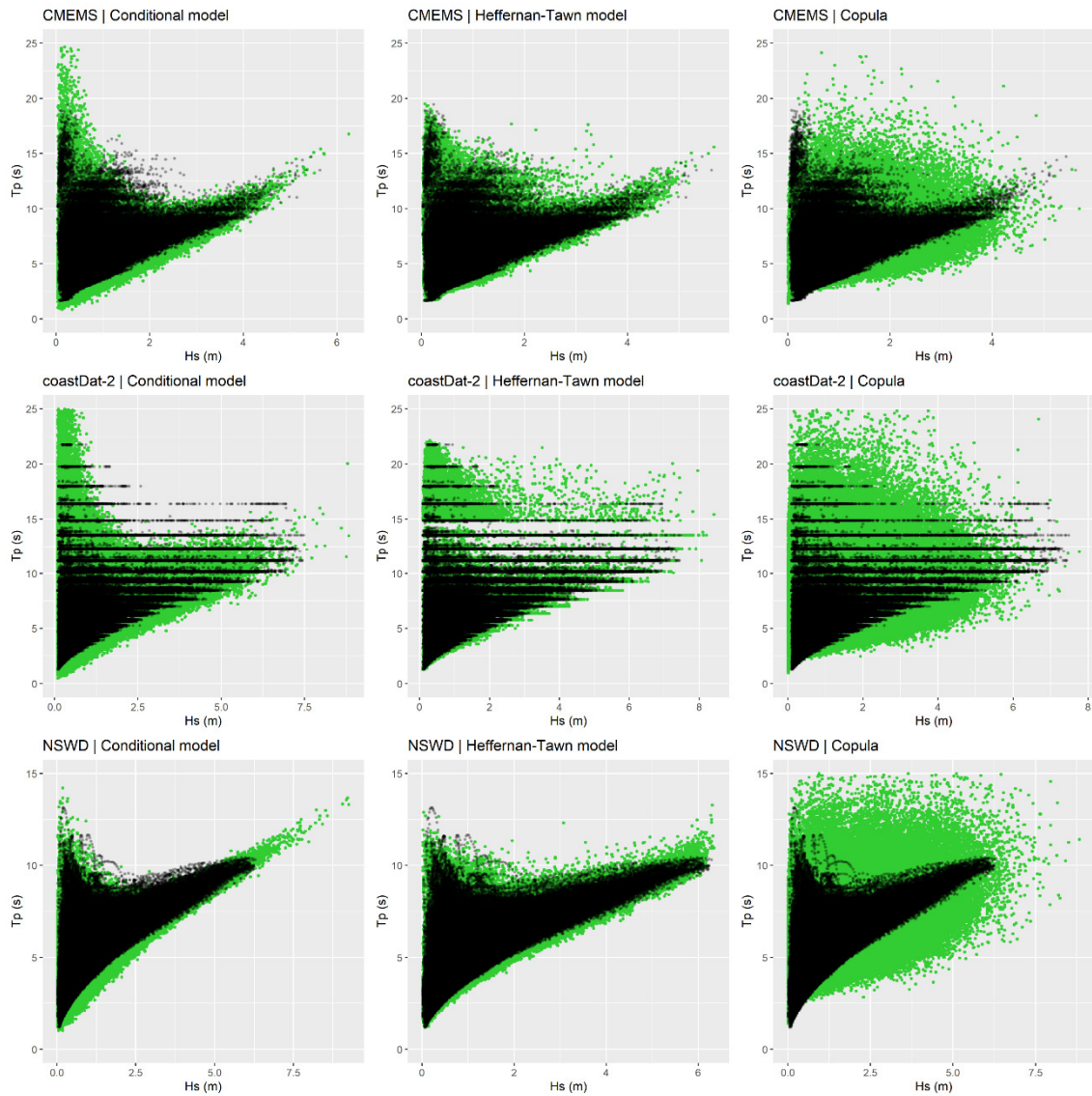


Figura 3. Gráficos de dispersão dos dados simulados a partir das distribuições conjuntas estimadas com base na abordagem de modulação condicional, modelo condicional de excedência de *Heffernan-Tawn*, e em cópulas *Tawn* tipo 1 com rotação de 180° (primeira, segunda e terceira coluna, respetivamente), apresentados a verde. A cada linha de painéis corresponde um dos três *hindcasts* adotados, com os seus dados respetivos exibidos a preto.

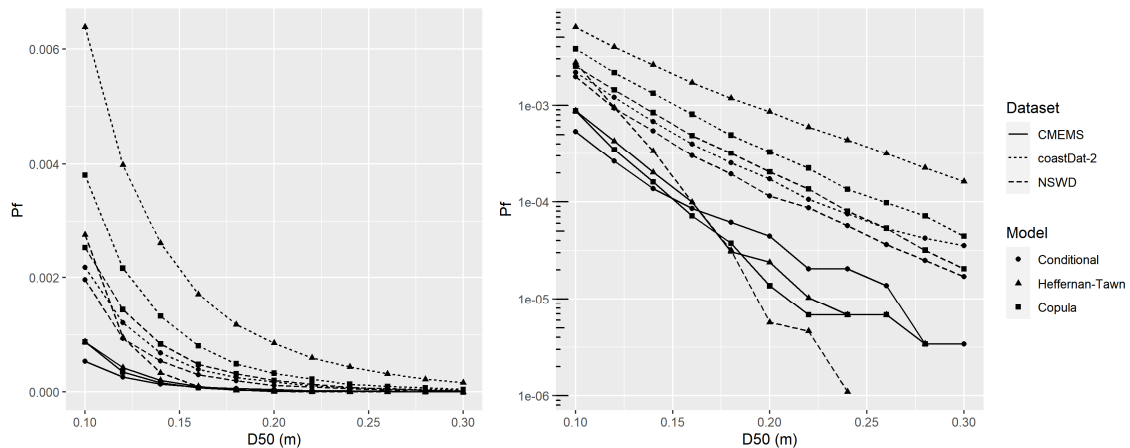


Figura 4. Estimativa das probabilidades de falha do manto resistente da proteção para diferentes diâmetros medianos dos blocos  $D_{50}$ , com base na aplicação dos diferentes conjuntos de dados *hindcast* e modelos estatísticos (esquerda: probabilidades representadas em escala linear; direita: probabilidades representadas em escala logarítmica).

## 5. Análise e Discussão dos Resultados

A análise das estimativas de  $H_s$  e  $T_p$  fornecidas pelos conjuntos de dados de *hindcast* apresentados na Secção 2 destaca a existência de diferenças significativas e não sistemáticas entre os mesmos; por exemplo, não existe um conjunto de dados que forneça consistentemente as estimativas conjuntas mais elevadas ou mais baixas para ambas as variáveis. Isto confirma a existência de um nível significativo de incerteza associada à escolha do *hindcast* para a previsão de variáveis meteoceânicas num determinado local. Esta fonte de incerteza irá necessariamente propagar-se ao longo da cadeia de modelação até às estimativas da probabilidade de falha das proteções contra erosões localizadas; assim, é fundamental compreender como é que a primeira influencia a segunda.

Além da incerteza introduzida pela escolha do *hindcast* na computação da probabilidade de falha das referidas proteções, existe também uma incerteza considerável associada à escolha do modelo estatístico para simulação de pares de valores extremos de  $H_s$  e  $T_p$ , necessário para o dimensionamento meteoceânico. Apesar deste tema ter sido previamente estudado, ainda que de forma limitada (Fazeres-Ferradosa *et al.*, 2019), a combinação destas duas fontes de incerteza não foi até agora abordada na literatura. No entanto, este tema é relevante uma vez que por princípio, modelos estatísticos alternativos podem ter desempenhos diferentes quando ajustados a conjuntos diferentes de dados de *hindcast*. Para o presente caso de estudo, a Figura 3 e a Figura 4 confirmam que as três abordagens de modelação fornecem de facto resultados significativamente diferentes para os três *hindcasts*. Os gráficos de dispersão da Figura 3 mostram que o modelo de Heffernan-Tawn apresenta um bom ajuste para os três conjuntos de dados, representando adequadamente as partes das distribuições mais relevantes do ponto de vista do dimensionamento meteoceânico, *i.e.* valores elevados para a variável  $H_s$ . Da mesma forma, a abordagem de modelação condicional também aparenta fornecer representações adequadas para as distribuições bivariadas, exceto para o *hindcast* NSWd, onde os valores extremos para  $H_s$  parecem ser sobrestimados. A cópula aplicada – Tawn tipo 1 com rotação de  $180^\circ$  – aparenta ser a menos adequada, uma vez que as estimativas para  $T_p$  são claramente superdispersivas para valores elevados de  $H_s$ , o que é particularmente evidente para os conjunto de dados do CMEMS e do NSWd. Melhorias na abordagem com base em cópulas poderiam ser conseguidas através da construção de uma cópula com extra-parametrização, conforme sugerido por Vanem (2016). A Figura 4 mostra que a influência da abordagem de modelação nas probabilidades de falha das proteções não é sistemática. Por exemplo, o modelo *Heffernan-Tawn* produz as maiores probabilidades de falha dos três modelos estatísticos usados para o conjunto



de dados do coastDat-2, enquanto fornece os menores valores de  $P_f$  para o *hindcast* NSWd.

A Figura 4 destaca também a sensibilidade de  $P_f$  à escolha dos diferentes *hindcasts* e modelos estatísticos. Observa-se que os valores de  $P_f$  estimados para cada valor de  $D_{50}$  considerado variam significativamente para toda a gama de valores do diâmetro. Para valores reduzidos de  $D_{50}$ , as probabilidades de falha das proteções são naturalmente mais elevadas, resultando em gamas de valores de  $P_f$  superiores, em termos absolutos. Porém, em termos relativos, as gamas de valores de  $P_f$  aumentam com o aumento dos valores de  $D_{50}$ . Este comportamento é compreensível, uma vez que são necessárias combinações cada vez mais extremas de  $H_s$  e  $T_p$  para se atingir a falha de proteções com blocos de maior diâmetro, e é na estimativa de valores extremos que a incerteza tende a ser superior. Por exemplo, para  $D_{50} = 0.10\text{ m}$ ,  $P_{f_{max}} - P_{f_{min}} = 6.4 \times 10^{-3} - 5.4 \times 10^{-4} = 5.8 \times 10^{-3}$  e  $P_{f_{max}}/P_{f_{min}} \cong 12$ , enquanto que para  $D_{50} = 0.30\text{ m}$ ,  $P_{f_{max}} - P_{f_{min}} = 1.6 \times 10^{-4} - 3.4 \times 10^{-6} = 1.6 \times 10^{-4}$  e  $P_{f_{max}}/P_{f_{min}} \cong 48$  (exceto os três casos em que  $P_f = 0$ ). Considerando a introdução da incerteza combinada associada à escolha do *hindcast* e do modelo estatístico, no presente caso de estudo, a estimativa mais alta e mais baixa obtida para  $P_f$ , para todos os valores de  $D_{50}$  considerados, difere em pelo menos uma ordem de magnitude. Também é possível observar que, apesar das diferenças significativas entre as distribuições dos dados simulados pelos três modelos estatísticos para cada conjunto de dados de *hindcast*, as probabilidades de falha aparentam ser mais sensíveis à escolha deste último. No entanto, deve ser tido em conta que estes dois componentes de modelação não são independentes, conforme referido anteriormente.

## 6. Conclusões

Os resultados do presente estudo confirmam a hipótese de que a escolha do conjunto de dados de um determinado *hindcast* influencia significativamente o cálculo da probabilidade de falha em proteções contra a erosão em fundações de estruturas *offshore*, nomeadamente em monopilares. Uma vez que não é geralmente possível determinar qual o *hindcast* e/ou modelo estatístico mais adequado para a representação de condições de agitação num dado local de forma definitiva, uma das soluções poderá passar por modelar a incerteza através da aplicação de *ensembles* multi-modelo (e.g., Figueiredo *et al.*, 2018; Osinski e Radtke, 2020). No entanto, o presente estudo deverá, numa primeira fase, ser alargado de forma a incluir casos de estudo adicionais, particularmente em localizações com diferentes características, a fim de se perceber até que ponto os resultados aqui apresentados poderão ser generalizados. Importa ainda referir que a avaliação do nível de dano em proteções contra erosões localizadas em fundações fixas no fundo marinho está associada a outras fontes de incerteza que não são habitualmente consideradas (Negro *et al.*, 2014). Futuramente, tais incertezas deverão ser tidas em conta em análises probabilísticas de fiabilidade para este tipo de proteções, a fim de otimizar o seu dimensionamento.

## 7. Agradecimentos

Este trabalho é suportado pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-032170 (projeto ORACLE), financiado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (POCI) e FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC); pelo projeto PTDC-ECI-EGC-5177-2020 (projeto POSEIDON) financiado através de fundos nacionais pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. T. Fazeres-Ferradosa é financiado pelo programa Estímulo ao Emprego Científico Individual da FCT (2020.02393.CEECIND).

## 8. Referências Bibliográficas

Arrambide, I., Zubia, I., e Madariaga, A. (2019). "Critical review of offshore wind turbine energy production and site potential assessment". *Electric Power Systems Research*, 167(October 2018), 39–47. doi:10.1016/j.epsr.2018.10.016



- Bitner-Gregersen, E. M. (2015). "Joint met-ocean description for design and operations of marine structures". *Applied Ocean Research*, 51, 279–292. doi:10.1016/j.apor.2015.01.007
- CIRIA, CUR, e CETMEF. (2007). "The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)". London: C683, CIRIA.
- De Vos, L., De Rouck, J., Troch, P., e Frigaard, P. (2012). "Empirical design of scour protections around monopile foundations. Part 2: Dynamic approach". *Coastal Engineering*, 60(1), 286–298. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.11.001
- DNV GL. (2021). "DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads - Recommended Practice".
- Esteban, M. D., López-Gutiérrez, J.-S., Negro, V., e Sanz, L. (2019). "Riprap Scour Protection for Monopiles in Offshore Wind Farms". *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(12), 440. doi:10.3390/jmse7120440
- Ewans, K., e Jonathan, P. (2014). "Evaluating environmental joint extremes for the offshore industry using the conditional extremes model". *Journal of Marine Systems*, 130, 124–130. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.03.007
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Romão, X., Reis, M. T., e Neves, L. das. (2019). "Reliability assessment of offshore dynamic scour protections using copulas". *Wind Engineering*, 43(5), 506–538. doi:10.1177/0309524X18807033
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Romão, X., Vanem, E., Reis, M. T., e das Neves, L. (2018a). "Probabilistic design and reliability analysis of scour protections for offshore windfarms". *Engineering Failure Analysis*, 91(April), 291–305. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.04.035
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Vanem, E., Reis, M. T., e Neves, L. das. (2018b). "Asymmetric copula-based distribution models for met-ocean data in offshore wind engineering applications". *Wind Engineering*, 42(4), 304–334. doi:10.1177/0309524X18777323
- Figueiredo, R., Schröter, K., Weiss-Motz, A., Martina, M. L. V., e Kreibich, H. (2018). "Multi-model ensembles for assessment of flood losses and associated uncertainty". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1297–1314. doi:10.5194/nhess-18-1297-2018
- Groll, N., e Weisse, R. (2017). "A multi-decadal wind-wave hindcast for the North Sea 1949–2014: coastDat2". *Earth System Science Data*, 9(2), 955–968. doi:10.5194/essd-9-955-2017
- Heffernan, J. E., e Tawn, J. A. (2004). "A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion)". *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 66(3), 497–546. doi:10.1111/j.1467-9868.2004.02050.x
- Lavidas, G., e Polinder, H. (2019). "North sea wave database (NSWD) and the need for reliable resource data: A 38 year database for metocean and wave energy assessments". *Atmosphere*, 10(9), 1–27. doi:10.3390/atmos10090551
- Liu, Y. (2020). "ecsades: Environmental contours for safe design of ships and other marine structures". Retrieved from <https://github.com/ECSADES/ecsades-r>
- Nagler, T., Schepsmeier, U., Stoeber, J., Brechmann, E. C., Graeler, B., e Erhardt, T. (2021). "VineCopula: Statistical Inference of Vine Copulas". Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=VineCopula>
- Negro, V., López-Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., e Matutano, C. (2014). "Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines". *Renewable Energy*, 63, 125–132. doi:10.1016/j.renene.2013.08.041
- NoordzeeWind. (2008). "Off shore Windfarm Egmond aan Zee General report".
- Osinski, R. D., e Radtke, H. (2020). "Ensemble hindcasting of wind and wave conditions with



- WRF and WAVEWATCH III® driven by ERA5". *Ocean Science*, 16(2), 355–371. doi:10.5194/os-16-355-2020
- Saulter, A. (2021). "North West European Shelf Production Centre - Quality Information Document - NWSHELF\_REANALYSIS\_WAV\_004\_015".
- Tang, Z. hao, Melville, B., Singhal, N., Shamseldin, A., Zheng, J. hai, Guan, D. wei, e Cheng, L. (2022). "Countermeasures for local scour at offshore wind turbine monopile foundations: A review". *Water Science and Engineering*, (xxx). doi:10.1016/j.wse.2021.12.010
- Vanem, E. (2016). "Joint statistical models for significant wave height and wave period in a changing climate". *Marine Structures*, 49, 180–205. doi:10.1016/j.marstruc.2016.06.001
- Vanem, E., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., e Taveira-Pinto, F. (2019). "Statistical description and modelling of extreme ocean wave conditions". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*, 172(4), 124–132. doi:10.1680/jmaen.2019.20
- Weisse, R., e Feser, F. (2003). "Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models". *Coastal Engineering*, 48(4), 211–225. doi:10.1016/S0378-3839(03)00027-9