

INFLUÊNCIA DA MODELAÇÃO BI-VARIADA DOS PARÂMETROS ESPECTRAIS NO PARÂMETRO DE DANOS DE PROTECÇÕES CONTRA EROSÕES LOCALIZADAS

Influence of Bi-variate Modelling of Spectral Parameters in the Damage Number of Scour Protections

TIAGO FAZERES-FERRADOSA ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾, MARIA TERESA-REIS ⁽³⁾ e LUCIANA DAS NEVES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, dec12008@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽³⁾ Investigadora Auxiliar, LNEC,
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, treis@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Professora Auxiliar Convidada, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, lpneves@fe.up.pt

Resumo

As fundações fixas *offshore*, como os monopilares, encontram-se frequentemente sujeitas ao fenómeno de erosões localizadas. A utilização de proteções contra erosões localizadas, na base da fundação, tende a mitigar a ocorrência de falhas estruturais relacionadas com a perda de momento resistente da fundação, com o fenómeno de ressonância e com a frequência de vibração natural da estrutura. Contudo, o dimensionamento da proteção depende da incerteza associada aos dados ambientais, nomeadamente, da altura de onda significativa espectral e do período de pico. Este trabalho propõe um modelo bi-variado para os parâmetros espectrais e analisa a sua influência na avaliação de segurança de uma proteção inspirada no parque eólico *offshore* Horns Rev 3. Os resultados mostram que a modelação correlacionada da altura de onda e do período de pico espectral da onda afetam o dimensionamento da proteção e respetivo parâmetro de danos.

Palavras-chave: Proteção, erosões localizadas, parâmetro de danos, modelação bi-variada, parâmetros espectrais.

Abstract

Fixed-bottom offshore foundations, e.g. monopiles, are often subject to scour phenomena. The employment of scour protections is a possible mitigation measure to account for structural failure, commonly related to resonance, to the natural frequency of the structure or the loss of moment capacity. However, the protection's design is dependent on the uncertainty related to the spectral parameters, namely, the significant wave height and the peak period. This research proposes a bi-variate model for both spectral parameters. Moreover, it analyses the model's influence on the safety assessment of the scour protection. The results show that the correlated modelling of the spectral significant wave height and the peak period affect the design of the scour protection and the assessment of its damage number.

Keywords: Scour protection, scour, damage number, bi-variate modelling, spectral parameters.

1. Introdução

O fenómeno de erosões localizadas encontra-se frequentemente na origem de problemas estruturais, relacionados com as fundações fixas *offshore*, nomeadamente, os monopilares habitualmente utilizados em parques eólicos *offshore* (Matutano *et al.*, 2013).

A maioria das turbinas eólicas *offshore* são dimensionadas para um limite máximo de deslocamento no topo, o que implica a definição de limites para a frequência natural da estrutura de suporte da turbina (Prendergast *et al.*, 2015). A ocorrência de erosões localizadas tende a gerar, não só a perda de momento resistente, mas também a excedência dos limites de dimensionamento associados à frequência de vibração da estrutura, o que pode levar à rotura por fadiga ou a falhas de operacionalidade da turbina (Zaaijer e Tempel, 2004).

Assim sendo, a utilização de proteções contra erosões localizadas torna-se uma medida indispensável à mitigação dos riscos associados ao dimensionamento deste tipo de fundações em ambiente marítimo.

As proteções do tipo rip-rap são, porventura, as mais utilizadas nestes casos, devido à disponibilidade de material e baixo custo de implementação (Melville e Coleman, 2000). No entanto, as metodologias de dimensionamento que lhes estão associadas possuem uma natureza semi-empírica vincada, que na maioria das situações conduz a um dimensionamento demasiado conservador, ou seja, pouco otimizado (De Vos *et al.*, 2011).

A falta de otimização da proteção reflete-se na elevada percentagem que a fundação tem nos custos globais da estrutura associada à turbina, cerca de 30% (Bhattacharya, 2014).

Uma das principais razões conducentes a um dimensionamento excessivamente conservador da proteção prende-se com a incerteza relacionada não só com o fenómeno de erosões localizadas, mas também com a incerteza associada à previsão das características do estado de mar (Negro *et al.*, 2014). À semelhança de outras estruturas em ambiente marítimo, o dimensionamento das proteções rip-rap *offshore* é essencialmente dominado pela altura de onda e período associado (Vanem, 2016), sendo que neste caso particular também a existência de correntes desempenha um papel importante nas solicitações ambientais (De Vos *et al.*, 2011; 2012).

O presente trabalho dedica-se ao estudo desta incerteza, no sentido de otimizar o dimensionamento das proteções *offshore* do tipo rip-rap, empregues em monopilares de turbinas eólicas. Deste modo, propõem-se dois modelos estatísticos para a previsão da altura de onda e período de pico, que serão posteriormente utilizados para analisar o parâmetro de danos da proteção utilizada como exemplo. O objetivo dos modelos passa por prever os valores de dimensionamento das variáveis referidas, tendo em conta a correlação existente entre elas e frequentemente ignorada nas metodologias de dimensionamento tradicionais. A proteção analisada no presente caso é dimensionada de acordo com o critério de estabilidade dinâmica, proposto em De Vos *et al.* (2012) e mais tarde aplicado por Schoesitter *et al.* (2014) e Whitehouse *et al.* (2014).

2. Estabilidade Dinâmica da Proteção e Parâmetro de Danos

Habitualmente, as proteções do tipo rip-rap são dimensionadas, tendo em vista a estabilidade estática do seu manto resistente, isto é, de modo a que os blocos de enrocamento, colocados no manto, não se possam mover atendendo às condições de agitação e de correntes marítimas associadas a um certo período de retorno. Este tipo de dimensionamento pode ser consultado em De Vos *et al.* (2011) ou Fazeres-Ferradosa *et al.* (2016), e baseia-se na estabilidade estática do manto resistente, sendo que assim se evita qualquer exposição da camada de filtro granular ou de geotêxtil utilizada na proteção. Tendo em vista a ausência de movimento dos blocos, o dimensionamento é realizado com base na tensão crítica de arrastamento, neste caso induzida pela presença de ondas e correntes (Whitehouse, 1998; Sumer e Fredsøe, 2002).

A tensão crítica de arrastamento corresponde à tensão mínima necessária para que um determinado bloco de diâmetro médio, D_{50} , e massa volúmica, ρ_s , inicie o seu movimento. A estabilidade estática é obtida para um diâmetro médio dos blocos suficientemente grande para o qual a sua tensão crítica de arrastamento é superior à tensão máxima de arrastamento presente no local de implantação da fundação.

Trabalhos de modelação física permitiram concluir que a estabilidade estática conduz a um sobredimensionamento da proteção, e.g. De Vos *et al.* (2012), Schoesitter *et al.* (2014), Fazeres-Ferradosa e Taveira-Pinto (2015) ou Fazeres-Ferradosa (2016).

As proteções com estabilidade dinâmica permitem a existência de movimentos controlados dos blocos do manto resistente, desde que a camada de filtro não fique demasiado exposta. Em Den Boon *et al.* (2004), e De Vos *et al.* (2012), sugere-se que a exposição do filtro não exceda uma área equivalente a $4D_{50}^2$.

Ao permitir a ocorrência de movimento nos blocos do manto resistente, permite-se uma redução do tamanho dos mesmos, sendo que esta redução permite uma otimização dos custos de transporte e construção da proteção, contribuindo, assim, para uma solução com menor custo do que aquele que se obtém com o dimensionamento estático.

Dado que a estabilidade dinâmica permite que a tensão de arrastamento crítica esteja, até um certo ponto, abaixo da tensão de arrastamento induzida pelas condições habituais, o dimensionamento de proteções por esta via implica a definição de um novo critério de dimensionamento. Em De Vos (2008) e De Vos *et al.* (2012) propõe-se a utilização do parâmetro de danos, de certo modo semelhante ao parâmetro de danos utilizado noutras estruturas como é o caso dos quebramares (Vidal *et al.*, 2006).

De acordo com De Vos *et al.* (2012) o parâmetro de danos da proteção pode ser definido de acordo com a Eq. [1]:

$$\frac{S_{3D}}{N^{b_0}} = a_0 \frac{U_m^3 T_{m-1,0}^2}{\sqrt{gd} (s-1)^{\frac{3}{2}} D_{n50}^2} + a_1 \left(a_2 + a_3 \frac{\left(\frac{U_c}{w_s} \right)^2 (U_c + a_4 U_m)^2 \sqrt{d}}{g D_{n50}^{\frac{3}{2}}} \right) \quad [1]$$

em que g é a aceleração da gravidade, d é a profundidade de água, N é o número de ondas considerado numa tempestade, U_c corresponde à velocidade média da corrente marítima no local, s é o rácio entre a massa volúmica dos blocos ρ_s e da água ρ_w , w_s é a velocidade de queda dos blocos, U_m é a velocidade orbital de fundo associada à altura de onda usada para dimensionamento e $T_{m-1,0}$ é o período de onda, obtido pelo quociente entre o momento de ordem zero e de ordem menos um, do espectro de onda associado ao período de pico T_p e altura de onda significativa espectral, *i.e.* $H_{m0} = 4(m_o)^{0.5}$.

As constantes b_0 , a_0 , a_2 e a_3 são respetivamente iguais a 0.243, 0.00076, -0.022 e 0.0079 de acordo com as regressões apresentadas em De Vos *et al.* (2012). As constants a_1 e a_4 são obtidas pela Eq. [2] e Eq. [3], respetivamente, tendo em vista a consideração de correntes e ondas uni-direccionais ($\vec{W}; \vec{C}$) ou opostas ($\vec{W}; \vec{C}$), bem como, os efeitos não lineares da agitação marítima estimados pelo número de Ursell (U_r).

$$a_1 = \begin{cases} 0 & \text{para } \frac{U_c}{\sqrt{gD_{n50}}} < 0.92 \text{ e } \vec{W} \vec{C} \\ 0 & \text{para } \frac{U_c}{\sqrt{gD_{n50}}} \geq 0.92 \text{ ou } \vec{W} \vec{C} \end{cases} \quad [2]$$

$$a_4 = \begin{cases} 1 & \text{para } \vec{W} \vec{C} \\ \frac{U_r}{6.4} & \text{para } \vec{W} \vec{C} \end{cases} \quad [3]$$

Aquando da introdução do parâmetro de danos (adimensional) proposto na Eq. [1], De Vos *et al.* (2012) concluíram que para $S_{3D} \leq 1$ as proteções obtidas em modelo físico à escala geométrica 1:50 respeitando a semelhança de Froude, para as diversas condições de escoamento, apresentavam a referida estabilidade dinâmica, associada a um menor diâmetro médio dos blocos de enrocamento (D_{50}). Contudo, a avaliação de S_{3D} encontra-se extremamente dependente dos valores de dimensionamento utilizados na Eq. [1], pois, a altura de onda significativa e o período de pico, afetam diretamente o cálculo de U_m e de $T_{m-1,0}$. No presente caso considerou-se válido um espectro JONSWAP com um *peak enhancement factor*, γ , de 3.3, pelo que se torna válida a relação apresentada na Eq. [4]:

$$T_p = 1.107T_{m-1,0} \quad [4]$$

Deste modo, o modelo utilizado para a previsão de H_{m0} e de T_p é crucial para uma correta previsão do parâmetro de danos e respetivo dimensionamento da proteção.

3. Caso de Estudo

Neste trabalho apresenta-se a estimativa do parâmetro de danos com base em dois modelos estatísticos diferentes, aplicados aos parâmetros espectrais H_{m0} e T_p . Para os devidos efeitos consideraram-se os dados de agitação marítima e de correntes presentes no local de implantação do parque eólico *offshore* Horns Rev 3. Os detalhes referentes a este caso de estudo podem ser consultados em DMI (2013).

Horns Rev 3 está localizado no sector Dinamarquês do Mar do Norte, 20-35 km a Noroeste de Blåvands Huk e a 45-60 km da cidade de Esbjerg. Esta área tem profundidades relativamente baixas que variam entre 10 e 22 m. Os fundos móveis são essencialmente constituídos por sedimentos não coesivos (Kristensen *et al.*, 2013). O local de implantação da proteção corresponde às seguintes coordenadas: Latitude 55.725°N e Longitude 7.750°E. A agitação marítima do caso de estudo foi obtida através do modelo WAM, validado com recurso a observações do local durante o período de um ano (DMI, 2013). A referida modelação resultou na obtenção de uma série temporal de H_{m0} e T_p correspondente a 10 anos e 4 meses, relativas ao intervalo de tempo entre 01-01-2003 e 01-05-2013, com um output horário. Deste modo, a série disponível para obtenção dos modelos estatísticos totalizou um total de 90 553 pares ($H_{m0}; T_p$).

A amostra dos referidos dados foi depois utilizada para obter o ajuste através do modelo paramétrico da Cópula Gaussiana e do modelo não paramétrico bi-variado com base na Estimativa de Densidade de Kernel (BKDE). O parâmetro de danos calculado em função das estimativas de H_{m0} e T_p para cada modelo assumiu $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ para o uso da Eq. [1]. Utilizou-se ainda $N = 3000$ ondas de acordo com os pressupostos do modelo físico apresentado por Schoesitter *et al.* (2014). Considerou-se ainda $d = 18 \text{ m}$. A velocidade média da corrente (U_c) foi considerada igual a 0.4 m/s , de acordo com os dados reportados por DMI (2013). Para as características da proteção rip-rap assumiu-se uma massa volúmica de enrocamento igual a $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$. A velocidade de queda dos blocos foi calculada de acordo com De Vos (2008).

4. Modelação Bi-variada dos Parâmetros Espectrais

Habitualmente, o período de vida útil de uma turbina eólica *offshore* é de 20-25 anos (Matutano *et al.*, 2013 e DNVGLa, 2017). No entanto, o sector da energia do vento *offshore* tenha demonstrado a necessidade e tendência para estabelecer normas e regulamentos que permitam, por um lado, dimensionar novos projetos para períodos mais longos, da ordem dos 50 anos e, por outro, para estender a atividade dos empreendimentos existentes para períodos semelhantes, ou seja, considerando mais 25 anos de pleno funcionamento (DNVGL, 2017a). Deste modo, importa saber para o período de vida útil da fundação e da turbina, quais os valores de altura e período de onda a serem considerados para efeitos de dimensionamento e avaliação do parâmetro de danos da proteção utilizada para mitigar o efeito das erosões localizadas.

Os pares obtidos através da reconstrução histórica com recurso ao WAM, geraram uma amostra de 10 anos e 4 meses. Contudo, torna-se necessária a obtenção dos valores correlacionados de H_{m0} e T_p associados a períodos mais longos, para uma previsão robusta das condições ambientais do local, durante o intervalo de exploração do empreendimento. Neste sentido, a utilização de modelos estatísticos bi-variados, ajustados à amostra referida podem permitir a estimativa de valores extremos e correlacionados para períodos de retorno maiores do que a amostra em si.

Apesar de a literatura da especialidade, e.g. Massel (2013), recomendar que não se prevejam valores com períodos de retorno três vezes mais longos do que a amostra, neste caso, maiores do que aproximadamente 30 anos, a falta de dados para um dado local, bem como a postura conservadora adotada por muitas das metodologias de dimensionamento, leva que a esta regra seja por vezes negligenciada. Assim sendo, e apesar desta limitação, a utilização de modelos estatísticos para a previsão de H_{m0} e T_p continua a ser uma ferramenta vital para um dimensionamento que procura ter em conta a incerteza associada aos dados ambientais.

Um modelo frequentemente aplicado para modelar as características de estados de mar, passa pela utilização método da Estimativa da Densidade de Kernel. Por exemplo, Ferreira e Guedes-Soares (2002), Wist *et al.* (2004) e Muraleedharan *et al.* (2015) utilizaram-no com sucesso para a previsão de alturas de onda significativas e períodos de pico, à semelhança deste trabalho. O referido método foi implementado com recurso à package "MASS R" do *software* R, de acordo com Venables e Ripley (2002).

A Estimativa de Densidade de Kernel não implica a existência de uma função explícita para descrever a função de densidade de probabilidade conjunta de H_{m0} e T_p , algo que se torna extremamente vantajoso quando as distribuições teóricas não são capazes de proporcionar um bom ajuste aos dados amostrais.

No entanto, a inexistência de uma função explícita pode conduzir a dificuldades quando se tentam prever valores extremos que de algum modo não são expressos pela amostra em si.

Por outro lado, sendo um modelo não paramétrico baseia-se puramente na amostra original utilizada como base, pelo que a sua capacidade de previsão de valores extremos é muito limitada pela qualidade dos dados. Na Figura 1 apresenta-se uma amostra aleatória de 10 000 pares de altura de onda significativa espectral e período de pico associado, obtida a partir da implementação do modelo bi-variado da Estimativa de Densidade de Kernel (BKDE). Os valores obtidos são comparados com os dados originais (provenientes do WAM). Como se pode constatar visualmente, os valores obtidos encontram-se bastante próximos dos dados originais.

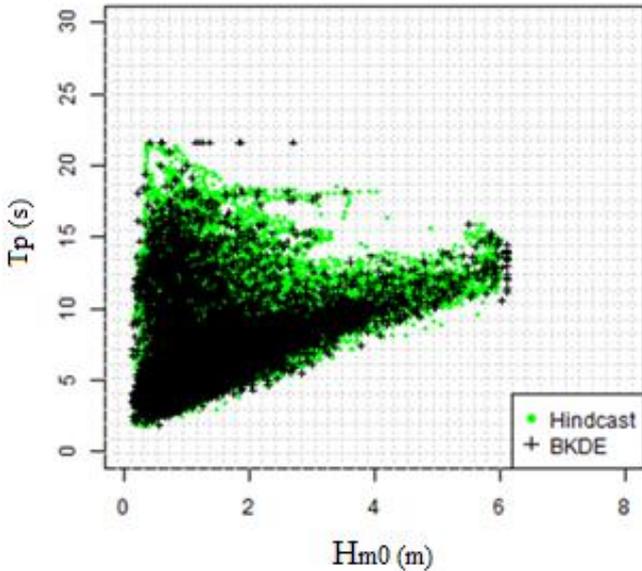


Figura 1. Comparação entre os dados originais e a amostra aleatória de 10 000 pares de valores H_{m0} e T_p obtidos não-parametricamente.

Uma alternativa ao modelo apresentado na Figura 1 passa pela aplicação da Cópula Gaussiana. Para uma descrição da teoria de cópulas, bem como a aplicação da cópula Gaussiana aqui implementada, recomenda-se a consulta de Nelsen (2006) e Vanem (2016). A utilização de um modelo bi-variado, com base na teoria de cópulas, implica uma avaliação prévia da distribuição marginal de H_{m0} e T_p .

No presente caso de estudo, avaliaram-se diversas distribuições tendo-se optado pela distribuição marginal com a menor distância de Kolmogorov-Smirnov e Wasserstein (Villani, 2009) (Quadro 1).

Quadro 1. Distâncias de Kolmogorov-Smirnov e Wasserstein para as distribuições marginais de H_{m0} e T_p .

Distribuição	KS H_{m0}	KS T_p	WS H_{m0}	WS T_p
Normal	0.0972	0.0633	0.1856	0.1151
Exponencial	0.3129	0.5125	0.7098	1.5276
Rayleigh	0.1068	0.4091	0.1244	1.0733
GEV	0.1523	0.1167	0.3411	0.2517
Generalized Pareto	0.2542	0.4451	0.4414	1.0856
Lognormal	0.0242	0.0419	0.0592	0.0756
Weibull	0.0711	0.0795	0.1254	0.1731
Weibull 3p	0.0711	0.0474	0.162	0.0997

Entre a distribuição testada e a distribuição empírica das variáveis em causa concluiu-se que a melhor distribuição era a Lognormal Para a construção da Cópula Gaussiana utilizou-se a medida de dependência de τ de Kendall (τ_K), tendo esta sido calculada com base nos dados originais de acordo com o procedimento descrito em Nelsen (2006) e Durante e Sempi (2015).

Os dados obtidos evidenciaram τ_K igual a 0.534 o que evidencia uma correlação positiva entre alturas de onda calculadas com o momento espectral de ordem zero e os períodos de pico. Este facto era expectável, sendo que do ponto de vista do fenómeno “agitação marítima” se compreende que alturas de onda maiores tendem a estar associadas a períodos de pico maiores. O valor obtido para τ_K encontra-se de acordo com os valores reportados para os parâmetros espectrais referentes a outros locais, e.g. Rendón-Conde e Heredia-Zavoni (2015), Montes-Iturrizaga e Heredia-Zavoni (2016) ou Vanem (2016). Estes valores adimensionais variam aproximadamente entre 0.20 e 0.80 dependendo do local, sendo que valores indicativos de correlações negativas não se encontram reportados na literatura. Em virtude do valor obtido para a medida de correlação τ_K e através do Método da Máxima Verosimilhança obteve-se como parâmetro da cópula Gaussiana $\theta = 0.42$.

A referida cópula apresenta a vantagem de fornecer uma função explícita para a função densidade de probabilidade conjunta de H_{m0} e T_p . No entanto, a sua construção de natureza simétrica radial, com dependência igual nas caudas superior e inferior (Nelsen, 2006), e o facto de assumir dependência teórica nula em ambas as caudas, contribuiu para um ajuste que não é capaz de representar a assimetria no espaço $(H_{m0}; T_p)$ como se pode observar na Figura 2.

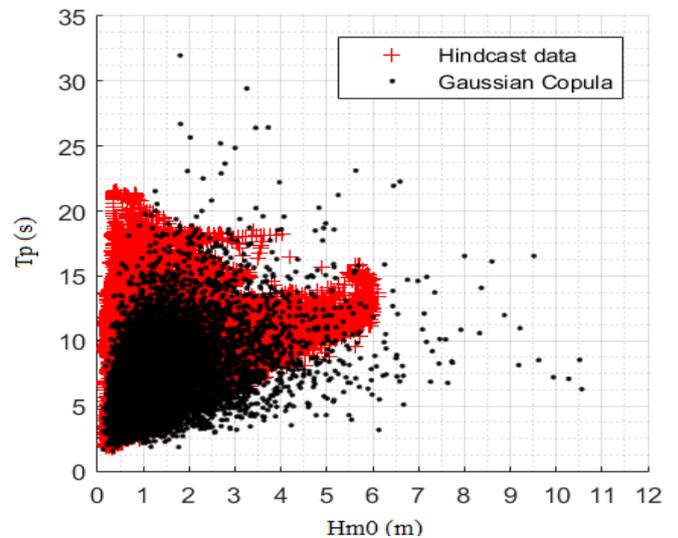


Figura 2. Comparação entre os dados originais e a amostra aleatória de 10 000 pares de valores H_{m0} e T_p obtidos com a cópula Gaussiana.

Apesar da Figura 2 demonstrar que o ajuste visual, entre a cópula sugerida e os dados originais, aparenta ser pior que o demonstrado pelo BKDE (Figura 1), torna-se importante referir que a utilização de cópulas mais complexas e modelos de cópulas não simétricos (Durante e Salvadori, 2010 e Vanem, 2016), poderá conduzir a resultados mais satisfatórios.

Ainda assim, cópulas simétricas como a Gaussiana, a de Frank, Clayton ou Gumbel têm vindo a ser utilizadas com frequência e com sucesso razoável na modelação de características de estados de mar, nomeadamente, em Jäger e Napoles (2015) ou Jane *et al.* (2016).

A Figura 2 demonstra ainda que os valores de altura de onda ultrapassam consideravelmente o máximo obtido na amostra original ($H_{m0} = 6.11 m$). Este facto poderá dever-se não apenas à falta de qualidade de ajuste do modelo bi-variado proposto, mas também ao peso demasiado elevado atribuído à cauda superior pela distribuição Lognormal considerada para ambas as variáveis. Torna-se perentória a existência de uma investigação mais detalhada sobre este ponto, no sentido de clarificar este aspeto.

Note-se, ainda, que este modelo tende a prever valores de altura de onda que podem não ter correspondência física com a realidade, em virtude dos limites de rebentação considerados para uma profundidade de água de 18 m. Este facto implica desde logo uma correção do ponto de vista do ajuste da distribuição marginal da altura de onda.

A referida correção passa pelo truncamento dos valores gerados a partir da referida distribuição marginal. Para o efeito considerou-se o recomendado em USACE (2002) que considera para a agitação irregular um índice de rebentação 0.6, i.e $H/d < 0.6$ em que H é a altura de onda e d a profundidade de água. Existem ainda outros limites de rebentação (USACE, 2002), igualmente importantes, que não são abordados no presente trabalho

5. Influência dos Modelos Bi-variados na estimativa do Parâmetro de Danos da Proteção

Em última análise, a modelação estatística das alturas e períodos de onda influencia o dimensionamento da proteção que se pretende colocar na fundação considerada. No sentido de avaliar a referida influência e com base na geração aleatória associada a cada modelo, efetuou-se o dimensionamento dos blocos da proteção com as características mencionadas no ponto 3.

As normas e recomendações práticas do dimensionamento de fundações de turbinas eólicas *offshore* recomendam valores de dimensionamento que se encontram frequentemente associadas a períodos de retorno de 10 anos para as correntes, de 50 anos e 100 anos para as alturas de onda (DNVGL, 2017b), ou o percentil 98% para o efeito característico das ações combinadas sobre a fundação.

O Quadro 2 apresenta os valores dos parâmetros espectrais associados ao período de retorno (T_r) de 50 anos, de acordo com cada modelo e segundo DMI (2013), e o parâmetro de danos obtido para um diâmetro médio (D_{50}) de 0.4 m, conforme sugerido em Energinet (2014) e Vattenfall (2017). Não só se demonstra que a análise bi-variada dos parâmetros espectrais influencia a avaliação do parâmetro de danos da proteção, como os modelos bi-variados indicam que este parâmetro é bastante menor, do que o valor obtido segundo DMI (2013), onde se utiliza o método “*Peak Over Threshold*” para obter a altura de onda associada ao período de retorno de 50 anos.

Quadro 2. Parâmetro de danos para $D_{50}=0.4 m$ de acordo com cada modelo.

	H_{m0}	T_p	S_{3D} Opposing	S_{3D} Unidirecional
DMI (2013)	6.1-7.4	16	0.95-1.86	1.19-2.12
Gaussian Copula	5.1	12	0.09	0.22
BKDE	4.93	16.7	0.5	0.57

Dado que o “*Peak Over Threshold*” apresentado em DMI (2013) providencia apenas uma modelação da altura de onda e a referência não apresenta o respetivo valor de T_p , assumiu-se neste caso um período de pico de 16 s, ligeiramente superior aos 15 s encontrados para a cauda superior da amostra original.

Os modelos bi-variados tornam patente o sobredimensionamento da proteção para D_{50} igual a 0.4 m, que havia sido sugerido em Energinet (2014). Os valores obtidos referem-se às situações em que as ondas e correntes incidem sobre a proteção unidirecionalmente ou com direção oposta.

No Quadro 3 apresenta-se o valor ótimo do diâmetro dos blocos, com base na estabilidade dinâmica, considerando como aceitável o limite $S_{3D} = 1$ proposto por De Vos *et al.* (2012).

Quadro 3. Diâmetro médio para $S_{3D}=1$ de acordo com cada modelo e assumindo um dimensionamento com estabilidade dinâmica.

	H_{m0} (m)	T_p (s)	D_{50} Oposta (m)	D_{50} Unidirecional (m)
Gaussian Copula	5.1	12	0.16	0.16
BKDE	4.93	16.7	0.22	0.24

Como se pode observar, a aceitação de um parâmetro de danos até 1, permite uma redução significativa do diâmetro do enrocamento utilizado no manto resistente. A redução de D_{50} é notória em ambos os modelos, mesmo considerando o BKDE, em virtude do seu melhor ajuste aos dados originais, obtém-se uma redução de 40% para correntes e ondas unidirecionais com a Estimativa de Densidade de Kernel. Embora a cópula Gaussiana evidencie alturas de onda maiores do que o BKDE a diferença no período de pico conduz a diâmetros menores para a proteção.

Os valores não diferem muito atendendo à direção da corrente, facto este que pode ser justificado por se ter assumido uma velocidade média de apenas 0.4 m/s, que representa menos de um terço do valor considerado no caso de estudo apresentado em De Vos *et al.* (2012).

6. Conclusões

O presente trabalho focou-se na aplicação de dois modelos estatísticos bi-variados, com o intuito de modelar os parâmetros espectrais envolvidos no dimensionamento dinâmico de proteções rip-rap, tipicamente aplicadas em fundações fixas de turbinas eólicas *offshore*.

Partindo do caso de estudo do parque eólico *offshore* Horns Ver 3, foi possível concluir que a modelação efetuada conduz a uma otimização do diâmetro médio dos blocos da proteção, quando comparada com o modelo de previsão utilizado no relatório meta-ocênico da obra (DMI, 2013).

Concluiu-se, igualmente, que a Estimativa de Densidade de Kernel forneceu um melhor ajuste comparativamente aos dados originais. Por outro lado, constatou-se que a simetria radial da cópula Gaussiana e o possível uso da distribuição Lognormal para H_{m0} e T_p podem ter estado na origem de um ajuste de pior qualidade, quando comparado com BKDE e os dados originais. Investigações futuras poderão passar pela utilização de modelos de cópulas não simétricos. Provou-se que a modelação bi-variada da altura de onda espectral e do respetivo período de pico têm influência significativa no dimensionamento de proteções rip-rap contra erosões localizadas.

Agradecimentos

Os autores do presente trabalho agradecem ainda ao Professor Xavier Romão pelas discussões frutíferas sobre a implementação dos modelos bi-variados, bem como, pela ajuda na implementação do script para o método da Copula Gaussiana. Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do Programa Doutoral INFRARISK, bolsa de doutoramento PD/BD/113454/2015 e pelo projeto europeu MARINET – proposal 61 – “Optimising the design of scour protection around offshore foundations”.

Referências

Bhattacharya, S. (2014). Challenges in Design of Foundations for Offshore Wind Turbines. Engineering and Technology Reference, 1-9.

De Vos, L. (2008). *Optimisation of Scour Protection Design for Monopiles and Quantification of Wave Run-Up - Engineering the Influence of an Offshore Wind Turbine on Local Flow Conditions* - PhD Thesis. Ghent: University of Ghent.

De Vos, L., Rouck, J. d., Troch, P., e Frigaard, P. (2011). *Empirical Design of Scour Protections Around Monopile Foundations - Part 1 - Static Approach*. Coastal Engineering, 58, 540-553.

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, 286-298.

den Boon, J. H., Sutherland, J., Whitehouse, R., Soulsby, R., Stam, C. J., Verhoeven, K. e Hald, T. (2004). *Scour Behaviour and Scour Protection for Monopile Foundations of Offshore Wind Turbines*. European Wind Energy Conference & Exhibition. London, UK: EWEC.

DMI (2013). *Horns Rev 3 Offshore Wind Farm - Metaocean*. Copenhagen, Denmark: DMI - Danish Meteorological Institute & Orbicon A/S.

DNVGL (2017a). DNVGL - ST- 0262 - Lifetime extension of wind turbines. Norway: Det Norske Veritas AS.

DNVGL (2017b). DNV OS J101 - Design of Offshore Wind Turbine Structures. Norway: Det Norsk Veritas AS.

Durante, F., e Salvadori, G. (2010). *On the Construction of Multivariate Extreme Models Via Copulas*. Environmetrics 21, 143-161.

Durante, F. e Sempi, C. (2015). *Principles of Copula Theory*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Energinet (2014). *Horns Rev 3 Offshore Wind Farm - marine mammals - technical report 043*. Denmark: Energinet, Orbicon A/S, BioConsult SH GmbH & Co.KG.

Fazeres-Ferradosa, T. (2016). *Risk Analysis Applied to Scour Dynamical Protection Systems for Offshore Foundations Optimisation*. Projeto de Tese de Doutoramento. FEUP. Porto

Fazeres-Ferradosa, T. e Taveira-Pinto, F. (2015). *Pre-Assessing the Feasibility of a Design Performance Function for Scour Protection Systems in Offshore Foundations*. Conference Proceedings of the 36th IAHR World Congress (pp. 1-9). The Hague: International Association of Hydro-Environment Engineering and Research.

Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., das Neves, L. e Reis, M. T. (2016). *Design of Scour Protections and Structural Reliability Techniques*. In *Epicum, Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change* (pp. 527-531). London: Taylor & Francis Group.

Ferreira, J. e Guedes-Soares, C. (2002). *Modelling Bivariate Distributions of Significant Wave Height and Mean Wave Period*. Applied Ocean Research. vol. 24. issue 1., 31-45.

Jäger, W. e Napoles, O. M. (2015). *Sampling Joint Time Series of Significant Wave Heights and Periods in the North Sea*. Safety and Reliability of Complex Engineered Systems, 4287-4294.

Jane, R., Valle, L. D., Simmonds, D. e Rabya, A. (2016). *A Copula-Based Approach for the Estimation of Wave Height Records Through Spatial Correlation*. Coastal Engineering. vol. 117, 1-18.

Kristensen, H., Gurieff, H. L., Steer, J. e Richardt, N. (2013). *Horns Rev 3 Results Report - Geo investigation 2012*. Rambøll og Energinet.

Matutano, C., Negro, V., López-Gutiérrez, J.-S. e Esteban, M. D. (2013). *Scour Prediction and Scour Protections in Offshore Wind Farms*. Renewable Energy. vol. 57, 358-365.

Melville, B. e Coleman, S. (2000). *Bridge Scour*. USA - Colorado: Water Resources Publications.

Montes-Iturrizaga, R. e Heredia-Zavoni, E. (2016). *Reliability Analysis of Mooring Lines Using Copulas to Model Statistical Dependence of Environmental Variables*. Applied Ocean Research. vol. 59., 564-576.

Muraleedharan, G., Lucas, C., Martins, D., Guedes-Soares, C. e Kurup, P. (2015). *On the distribution of Significant Wave Height and Associated Peak Periods*. Coastal Engineering, vol. 103, 42-51.

- 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. Vol. 63, 125-132.
- Nelsen, R. (2006). *An Introduction to Copulas*. New York: Springer.
- Prendergast, L., Gavin, K. e Doherty, P. (2015). *An Investigation into the Effect of Scour on the Natural Frequency of an Offshore Wind Turbine*. Ocean Engineering. vol. 101 (1), 1-11.
- Rendón-Conde, C. e Heredia-Zavoni, E. (2015). *Reliability Assessment of Mooring Lines for Floating Structures Considering Statistical Parameter Uncertainties*. Applied Ocean Research. vol. 52., 295-308.
- Schoesitter, P., Audenaert, S., Baelus, L., Bolle, A., Brown, A., das Neves, L. e Whitehouse, R. (2014). *Feasibility of a Dynamically Stable Rock Armour Layer Scour Protection for Offshore Wind Farms*. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. 1-10). San Francisco, California: American Society of Mechanical Engineers.
- US Army Corps Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*. USA: USACE - Army Publications.
- Vanem, E. (2016). *Joint Statistical Models for Significant Wave Height and Wave Period in a Changing Climate*. Marine Structures. vol. 49, 180-205.
- Vattenfall. (2017). corporate.vattenfall.dk. Retrieved 01 11, 2018, from https://corporate.vattenfall.dk/globalassets/danmark/vores_vindmoller/horns_rev_3/hr3_nyhedsbrev_01.pdf
- Venables, W. e Ripley, B. (2002). *Modern Applied Statistics with S - Fourth Edition*. New York: Springer.
- Vidal, C., Medina, R. e Lomonaco, P. (2006). *Wave Height Parameter for Damage Description of Rubble Mound Breakwater*. Coastal Engineering, Volume 53, Issue 9, 711-722.
- Villani, C. (2009). *The Wasserstein Distances In Heidelberg, Optimal Transport*. Grundlehren der mathematischen Wissenschaften (A Series of Comprehensive Studies in Mathematics). vol. 338. Berlin: Springer.
- Whitehouse, R. (1998). *Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Applications*. London: Institution of Civil Engineers.
- Whitehouse, R., Brown, A., Audenaert, S., Bolle, A., Schoesitter, P., Haerens, P. e Taveira-Pinto, F. (2014). *Optimising Scour Protection Stability at Offshore Foundations*. Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion (pp. 593-600). Pearth, Australia: CRC Press.
- Wist, H. T., Myrhaug, D. e Rue, H. (2004). *Statistical Properties of Successive Wave Heights and Successive Wave Periods*. Applied Ocean Research. vol. 26. issues 3-4., 114-136.
- Zaaijer, M. B., e Tempel, J. (2004). *Scour Protection: A Necessity or a Waste of Money?*. Proceedings of the 43th IEA Topical Expert Meeting, (pp. 43-51). Stockholm.