



FORÇAS NA SUPERESTRUTURA DO QUEBRA-MAR DA ERICEIRA: EFEITOS DE POSSÍVEL SUBIDA DO NÍVEL DO MAR

Fábio PEREIRA¹, Maria Graça NEVES², Enrique MACIÑEIRA³, Enrique PEÑA³, Maria Teresa REIS²

1. FCT/UNL, Campus da Caparica 2829-516 Caparica, Portugal, fmm.pereira@campus.fct.unl.pt

2. NPE, DHA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, gneves@lnec.pt, treis@lnec.pt

3. Water and Environmental Engineering Group, Universidade da Coruña, Campus de Elviña 15071 A Coruña, Espanha, enrique.macineira@udc.es, epena@udc.es

RESUMO

Esta comunicação apresenta uma análise dos coeficientes de segurança ao derrubamento e ao deslizamento na superestrutura do quebra-mar do Porto da Ericeira quando sujeito à acção de temporais, calculados com base nas forças obtidas por aplicação das fórmulas aplicáveis a este caso de estudo. Dada a previsão de subida do nível do mar na costa oeste portuguesa, é importante analisar a sua influência no agravamento das forças nas superestruturas destas estruturas e, conseqüentemente, na estabilidade da superestrutura. Para tal, foram calculadas as forças horizontais e verticais e respetivos coeficientes de segurança que se exercem na superestrutura do quebra-mar utilizando as condições de agitação no pé da estrutura obtidas de modelos de *hindcast* considerando os níveis de maré atuais e para uma projeção de subida do nível do mar de 5 mm/ano. A análise de resultados permitiu concluir que o efeito da subida do nível do mar reduz ligeiramente a segurança desta superestrutura para o cenário considerado, não sendo a alteração significativa.

Palavras-Chave: forças verticais, forças horizontais, estabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As conseqüências das alterações climáticas são, atualmente, um motivo de preocupação, especialmente nas zonas costeiras. No caso específico de Portugal, dada a extensão da linha de costa, com cerca de 950 km de comprimento, que alberga aproximadamente 75% população e onde se situam os grandes ativos económicos, sociais e ambientais do país, é premente o conhecimento das possíveis conseqüências da subida do nível do mar. Uma das conseqüências mais relevantes das alterações climáticas no litoral de Portugal Continental, segundo Andrade et al. (2008), é o aumento do nível médio do mar que, na década de 2000, foi de 2,5mm/ano. O efeito desta possível subida na estabilidade das estruturas portuárias existentes deve, pois, ser analisada. Nesta comunicação analisa-se o efeito de uma possível subida de nível do mar na estabilidade da superestrutura do quebra-mar do porto da Ericeira, localizada na costa oeste portuguesa. Assim, o trabalho foi estruturado da seguinte forma: após a introdução, no ponto 2 faz-se uma breve descrição da zona de estudo, das características geométricas do molhe do porto da Ericeira e apresenta-se as características da agitação e níveis de maré que solicitaram a estrutura no período entre 1 de janeiro de 2009 e 30 de dezembro de 2018, obtidos por *hindcast* no pé da estrutura; no ponto 3 descreve-se a metodologia utilizada na análise da estabilidade da superestrutura e apresentam-se e discutem-se os resultados, especialmente no que se refere à influência na estabilidade da superestrutura de um cenário de subida do nível do mar de 5 mm/ano. Por último, apresentam-se as principais conclusões do estudo.

2. ZONA DE ESTUDO

2.1. Molhe do porto da Ericeira

O porto da Ericeira, construído nos anos setenta, tem como principal objetivo proporcionar abrigo a uma pequena frota de pesca artesanal. É constituído por um molhe, que também funciona como cais de acostagem, e uma rampa de varadouro. O quebra-mar tem aproximadamente 440 m de comprimento (Fig. 1).



Fig. 1. Porto da Ericeira (adaptado de Google Earth, 2020) e secção Secção transversal do molhe da Ericeira.

O porto é constituído por um quebra-mar de estrutura mista, com o tronco composto por manto exterior de tetrapodos de 300 kN, com uma inclinação 3(H):2(V) e um manto interior protegido por enrocamento de 20 a 40 kN, com a mesma inclinação e a cabeça por blocos cúbicos Antifer de 400 kN. Este quebra-mar sofreu estragos ao longo da sua vida útil, tendo a última intervenção, 2008, passado pela total reabilitação e requalificação deste, já que cerca de 200 m estavam em completa ruína e os restantes 200 m apresentavam elevado estado de degradação. Este molhe sofreu ainda danos significativos em 2009, durante a fase de construção, devido à forte agitação.

O quebra-mar tem uma superestrutura de 6,5 m largura e cota de coroamento à + 9 m (ZH), com a base da sua fundação à cota +4,5 m (ZH). Na figura 1 apresentam-se as características do perfil transversal PP, assinalado nessa figura. O cais acostável está à cota +5 m (ZH) e a cota do pé da estrutura é -1,24 m (ZH). A superestrutura está protegida pelo manto com uma berma de 4,08 m de largura e cota de coroamento à +10,2 m (ZH).

2.2. Dados de agitação e nível de maré

Consideraram-se as características da agitação e níveis de maré que solicitaram a estrutura no período entre 1 de janeiro de 2009 e 30 de dezembro de 2018, obtidos por *hindcast* no pé da estrutura (Zóximo et al., 2020). Neste período o nível de maré variou entre 0,8 m e 3,7 m. Para analisar o efeito de uma possível subida do nível do mar, acrescentou-se aos níveis de maré um valor de 5 mm/ano (valor duas vezes superior ao da última década) a partir de 2009, atingindo, assim, uma subida máxima de 45 mm em 2018. Durante este período ocorreram 15 temporais, considerando-se como temporal a sequência contínua de estados de mar nos quais a altura de onda significativa (H_s) ultrapassa os 4,5 m, durante pelo menos 24 horas. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresentam-se as características dos picos dos temporais que atingiram valores de altura de onda significativa superiores a 6 m no pé da estrutura, onde H_s é a altura de onda significativa, T_p o período de pico do espectro e β o ângulo entre a direcção principal da agitação incidente e a perpendicular ao molhe.

Tabela 1. Características da agitação nos picos dos temporais com H_s superior a 6m.

Data / hora	H_s (m)	T_p (s)	β (°)
16/2/11 18:00	6,8	11,5	21,8
4/1/14 12:00	6,1	9,95	26,1
9/2/14 18:00	6,3	9,1	32,2
11/3/18 6:00	7,0	10,6	32,4

2.3. Cálculo de forças na superestrutura

Para calcular as forças na superestrutura utilizaram-se as fórmulas disponíveis na literatura e aplicáveis ao caso de estudo, isto é, as fórmulas de Günbak e Gökce (1984) e Martin et al. (1999). As fórmulas de Günbak e Gökce (1984) e Martin et al. (1999) permitem obter as pressões ao nível do muro-cortina e da base da superestrutura e com base nelas é possível a obtenção das respetivas forças horizontais e verticais. As principais diferenças entre

elas residem no facto de a formulação de Günbak e Gökce assumir a atuação simultânea das pressões dinâmica e pseudo-hidrostática, enquanto Martin et al. assume que estas não são simultâneas e no facto de o diagrama de pressões na base ser triangular (nula a sotamar) no caso da formulação de Günbak e Gökce e no caso da formulação de Martin et al. é considerado um diagrama de pressões triangular ou trapezoidal, dependendo da atuação da pressão dinâmica ou da pressão pseudo-hidrostática, respetivamente. A fórmula de Martin et al. é válida em mais de 99% dos dados analisados. As forças horizontais e verticais obtidas com as fórmulas para o período em análise são apresentadas na Fig. 2, para a situação atual e para uma possível subida do nível do mar de 5 mm/ano. Em relação à fórmula de Martin et al., apresenta-se apenas a força relacionada com a pressão de maior valor.

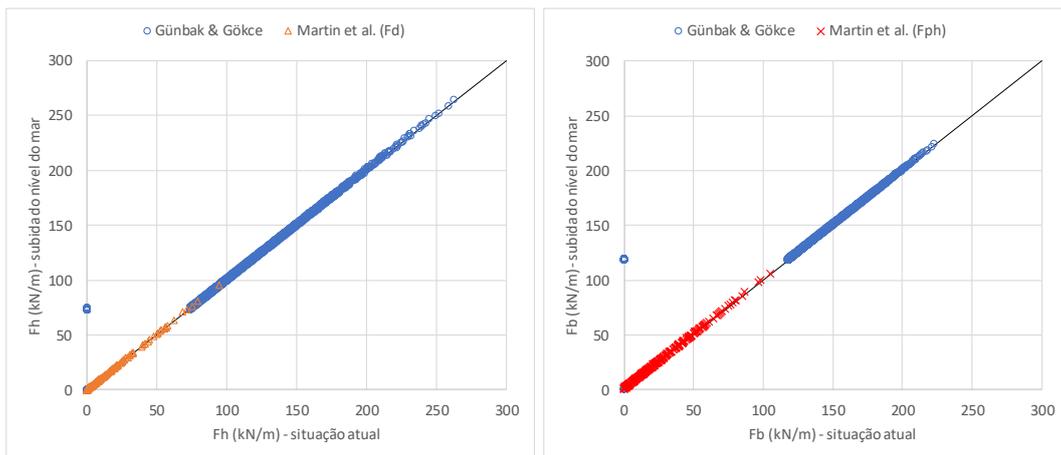


Fig. 2. Forças horizontais e verticais calculadas para a situação atual e com uma subida do nível do mar

Para o período em análise, os valores das forças foram não nulos em 47% e 2% dos dados analisados e válidos para a fórmula de Günbak e Gökce e de Martin et al., respetivamente. As forças horizontais máximas, para a situação atual, foram de 95 kN/m para a fórmula de Martin et al. e de 263 kN/m para a fórmula de Günbak e Gökce. Por sua vez, o máximo das forças verticais para a fórmula de Martin et al. foi de 106 kN/m e para a de Günbak e Gökce foi de 223 kN/m. A influência de uma subida gradual de 5 mm/ano, como se pode verificar na Fig. 2, não leva a uma subida significativa dos valores das forças verticais nem horizontais, com diferenças máximas com a situação atual de 2% para Günbak e Gökce (excepto para menos de 1% dos casos que, com a subida do nível do mar, deixa de ser zero) e de 10% para Martin et al. para valores superiores a 1 kN/m.

2.4. Análise da segurança ao deslizamento e derrubamento

Para analisar a segurança da estrutura ao deslizamento e derrubamento, principais modos de falha da superestrutura de um quebra-mar de taludes, recorreu-se à filosofia dos coeficientes globais de segurança. Tendo como base as ações atuantes e resistentes, isto é, resultante das forças e momentos horizontais e verticais, definem-se os coeficientes de segurança ao deslizamento, C_{des} , e ao derrubamento, C_{der} , que têm em conta os esforços favoráveis e desfavoráveis à estabilidade da superestrutura. Para que haja a estabilidade do sistema, recomenda-se que os coeficientes tomem valores superiores a 1,4 (Martín et al., 1999). Assim, com base nas forças calculadas no ponto 2.3, foi possível verificar a estabilidade da superestrutura ao deslizamento e ao derrubamento (Eq. 1):

$$C_{des} = v(W - F_b)/F_h; \quad C_{der} = M_w - M_b/M_h \quad [\text{Eq. 1}]$$

onde W é o peso próprio da superestrutura, F_b a resultante das forças na base da superestrutura, F_h é a resultante das forças no muro-cortina e M_w , M_b e M_h são os momentos devidos ao peso próprio da superestrutura, à força resultante na base desta e à força resultante no muro-cortina, respectivamente. O coeficiente de atrito, v , entre a base da superestrutura e a fundação foi considerado igual a 0.6.

Os coeficientes de segurança ao deslizamento obtidos com base nas forças calculadas e nos respetivos momentos são apresentados na Fig. 3 para a fórmula de Günbak e Gökce. Nesta figura são comparados os coeficientes obtidos para a situação atual com os calculados considerando uma possível subida do nível do mar de 5 mm/ano no período em análise. Este coeficiente de segurança é inferior a 1,2 para a fórmula de Günbak e Gökce em 74

casos na situação atual passando para 77 casos com a subida do nível do mar. A influência da subida do nível do mar nos valores dos coeficientes de segurança ao deslizamento com base na fórmula de Günbak e Gökce é pequena e, como esperado, aumenta com o aumento da subida do nível considerada. Para a fórmula de Martin et al. quer para a situação atual quer com subida de nível do mar, o coeficiente de segurança ao deslizamento é sempre superior a 1,2. Os coeficientes de segurança ao derrubamento são sempre superiores a 1,2 para ambas as fórmulas.

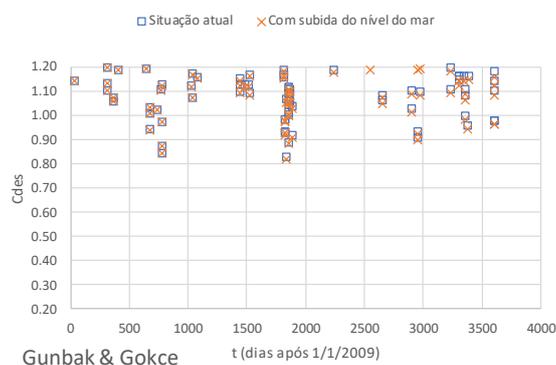


Fig. 3. C_{des} para a situação atual com a fórmula de Günbak e Gökce e considerando uma subida do nível do mar

3. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresenta-se a análise da influência de uma possível subida do nível do mar de 5 mm/ano na estabilidade da superestrutura do quebra-mar do Porto da Ericeira. Para tal calcularam-se as forças e respetivos coeficientes de segurança ao derrubamento e deslizamento, utilizando as condições de agitação entre 2009 e 2018, obtidas por *hindcast* no pé da estrutura. Verificou-se que existem duas fórmulas aplicáveis à superestrutura do quebra-mar da Ericeira: Günbak e Gökce (1984) e Martin et al. (1999). Do cálculo das forças com estas fórmulas verificou-se que uma possível subida do nível do mar de 5 mm/ano levava a uma subida máxima das forças verticais e horizontais de 2% (Günbak e Gökce) e 10% (Martin et al.). Com base nas forças calcularam-se os coeficientes de segurança ao deslizamento e derrubamento. Da análise dos coeficientes de segurança calculados verificou-se que uma possível subida do nível do mar de 5 mm/ano leva a uma ligeira redução da segurança da estrutura, mas não significativa, o que pode estar relacionado com o facto da superestrutura estar totalmente protegida pela berma do manto exterior e destas fórmulas não terem em conta a possível ocorrência de galgamento com a subida do nível do mar.

É de referir, no entanto, que não foi considerado o modo de falha na fundação e esse modo de falha é mais exigente do que o deslizamento, portanto os seus coeficientes de segurança seriam mais baixos. Da mesma forma, ressalta-se que não se considerou o cálculo dinâmico da superestrutura, pois não há registo contínuo de medições de pressão ou de forças. Isso é especialmente importante porque, ao realizar um cálculo dinâmico, não são integradas apenas as ações que atuam na estrutura, mas também a sua duração. Portanto, embora o coeficiente de segurança instantâneo (escorregamento ou deslizamento) seja menor que 1,0, a estrutura não falha. Isto explica porque, embora tenham ocorrido casos entre 2009 e 2018 em que o coeficiente de segurança foi menor que 1,0, isso não se tenha traduzido em falha da superestrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto BSAFE4SEA - *Breakwaters SAFETY control through a FORecast and decision support SystEm Analysis*, Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C., Freitas, M. C., Tabora, R., Carvalho, M.R., Santos, F. D. (2008) “Sector de Zonas Costeiras”, in *Estratégia Nacional de Adaptação aos Impactos das Alterações Climáticas Relacionadas com os Recursos Hídricos*, Agência Portuguesa do Ambiente, Ed. Agência Portuguesa do Ambiente, 2008, p.14.



- Zózimo, A. C., Fortes, C.J.M.E., Reis, M. T., Pinheiro, L., Smithers, N. (2020) - Desenvolvimento do sistema to-sealert para aplicação ao porto da Ericeira. Congresso da Água, Lisboa, março (submetido)
- Günbak, A.R., Gökce, T. – Wave screen stability of rubble mound breakwaters. International Symposium of Maritime Structure in Mediterranean Sea. Atenas, Grécia 2009-2112.
- Martin, F. L., Losada, M. A., Medina, R. – Wave loads on rubble mound breakwater crown walls. Coastal Engineering (Elsevier). ISSN 0378-3839. 37:2 (1999), p. 149-174.