



RISCOS PARA A NAVEGAÇÃO NO PORTO DA FIGUEIRA DA FOZ EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Liliana Pinheiro¹; Ana Catarina Zózimo¹; Conceição Juana Fortes¹; Rui Capitão¹; Maria Manuel Cruz²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil; ² Administração do Porto de Aveiro
lpinheiro@lnec.pt, acozimo@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt,
mariamanuel.cruz@portodeaveiro.pt.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para avaliar os riscos para a navegação no porto da Figueira da Foz. Pretende-se ainda incorporar projeções climáticas nos regimes de agitação existentes, e verificar as implicações que estas têm na segurança da navegação no acesso ao porto. Para tal utiliza-se a nova ferramenta numérica, TRANSIT, implementada no sistema de alerta precoce, HIDRALERTA. A análise do regime de agitação presente baseia-se em dados de hindcast de agitação marítima provenientes da base de dados do ECMWF, abrangendo um período de 45 anos. Os regimes de extremos são estabelecidos através da análise estatística da altura significativa, período e direção das ondas para os anos 2030, 2050, 2070 e 2100. Estas condições, juntamente com as projeções de subida do nível do mar são reproduzidas e simula-se a segurança das manobras dos navios, em termos de movimentos máximos horizontais e verticais ao longo do canal de navegação. De acordo com os limiares existentes para o risco admissível, quer de segurança, quer de operacionalidade, são avaliadas as alterações previstas até 2100.

Introdução

Os portos portugueses, situados ao longo da costa atlântica, encontram-se frequentemente expostos à ação de tempestades e eventos meteorológicos extremos, que podem comprometer tanto a segurança de pessoas, bens e do meio ambiente, como a própria operacionalidade portuária. Sendo infraestruturas de elevada relevância económica e estratégica, a avaliação dos riscos associados à agitação marítima assume um papel fundamental para as autoridades portuárias. As alterações climáticas introduzem desafios adicionais, ao intensificarem esses riscos e colocarem em causa a segurança operacional e a integridade estrutural das infraestruturas costeiras. As projeções climáticas apontam, para além da subida do nível médio do mar, para uma intensificação dos regimes de tempestades, traduzida por um aumento das alturas e períodos de onda, bem como por mudanças nas direções dominantes. Estes cenários configuram condições extremas para as quais muitas das estruturas marítimas existentes não foram originalmente dimensionadas. O presente estudo incide sobre o porto da Figueira da Foz, um porto atlântico de relevância estratégica localizado na foz do rio Mondego. O porto é protegido por dois quebra-mares de talude e apresenta uma configuração geométrica complexa, exigindo manobras de elevada precisão por parte das embarcações. Acresce ainda a vulnerabilidade ao assoreamento recorrente na zona do anteporto, fenómeno que, combinado com condições de ondulação extrema, pode dificultar significativamente o acesso dos navios e comprometer a sua operacionalidade e segurança.

Segurança em canais de navegação

Apesar dos avanços nas tecnologias de navegação, as margens de segurança constantes nas diversas normas e recomendações (Pinheiro *et al.* 2023a) têm vindo a aumentar, e as normas mais recentes recomendam mesmo o recurso a simulação numérica da manobra dos navios para confirmar e otimizar as dimensões mínimas do canal de navegação, (BS-2013 e PIANC 2014). Num canal existente, a simulação numérica permite determinar as amplitudes dos movimentos dos navios, quer na horizontal, quer na vertical, o que, conhecendo as dimensões disponíveis do canal permite, por sua vez, aferir a segurança da manobra. A margem de segurança a assegurar, quer nos movimentos horizontais, quer nos verticais, resulta de diversos fatores. No caso dos movimentos no plano horizontal, deve assegurar-se uma margem de tolerância, dada por:

$$w_{tot} = \sum_{i=1}^5 w_i + \sum_{i=6}^{11} w_i \quad (1)$$



em que w_i são larguras adicionais de segurança devidas a: 1) velocidade do navio; 2) ventos transversais; 3) correntes transversais; 4) correntes longitudinais; 5) ondulação; 6) ajudas de navegação; 7) tipo de superfície do fundo; 8) profundidade do canal; 9) carga perigosa; 10) velocidade do navio em vias de dois sentidos e 11) intensidade de tráfego em vias de dois sentidos. No caso dos movimentos no plano vertical, a margem de segurança a assegurar é chamada folga sob a quilha (UKC – *Under-Keel Clearance*):

$$UKC = D - d_1 - d_2 - \sum_{i=3}^9 d_i \quad (2)$$

onde D é a cota local (h) somada do nível da maré ($D = h + NM$); d_1 é o calado do navio (varia com a carga do navio); d_2 é o movimento vertical máximo do navio devido às ondas, d_i são as tolerâncias devidas a: d_3 - diferença de calado entre a popa e a proa, varia com a carga do navio; d_4 - agachamento devido à corrente; d_5 - assentamento devido à pressão atmosférica; d_6 - margem de segurança; d_7 - tolerância devida a medições imprecisas; d_8 - tolerância devida à acumulação de sedimentos entre operações de dragagem; d_9 - tolerância devida a erros de dragagem.

As parcelas d_2 e w_5 correspondem à amplitude dos movimentos verticais e horizontais, respetivamente, devidos à ondulação. São normalmente estimados com base num fator de proporcionalidade com a largura de boca do navio, B , e a altura significativa das ondas, H_s , respetivamente, para os movimentos verticais e horizontais. O valor máximo real de d_2 e w_5 depende do comportamento hidrodinâmico do navio sob a ação das ondas e pode ser muito superior ao estimado da forma tradicional. A modelação numérica é a forma mais eficaz de determinar estas parcelas.

Módulo TRANSIT no HIDRALERTA

O HIDRALERTA recebe previsões diárias de vento, ondulação e nível do mar do ECMWF e CMEMS, que são propagadas através de modelos numéricos até ao interior do porto, utilizando os modelos SWAN (SWAN Team, 2006) e DREAMS (Fortes, 1993). Essas previsões ajudam a garantir a segurança e a operacionalidade das estruturas portuárias, as condições de amarração dos navios atracados e a navegação, utilizando os módulos OVERT, MOORNAV e TRANSIT, respetivamente. O módulo TRANSIT permite avaliar, com base nas condições locais de agitação marítima, vento e maré, as condições de segurança associadas à navegação de um determinado navio durante o seu trajeto de acesso ao porto ou de saída deste. O módulo calcula parâmetros essenciais à segurança da manobra, nomeadamente o UKC e o desvio de rota, fornecendo uma estimativa detalhada do desempenho e dos riscos operacionais ao longo do percurso. Para tal são determinadas as amplitudes máximas dos movimentos expectáveis do navio no plano vertical e horizontal, devidos à ação da ondulação incidente, as parcelas d_2 e w_5 .

Para os valores máximos de d_2 e w_5 utiliza-se o modelo hidrodinâmico 3D, WAMIT - WaveAnalysisMIT (Korsemeier et al. 1988). Este modelo resolve no domínio da frequência os problemas de radiação e de difração de um corpo flutuante e fornece as chamadas funções de transferência ou RAOs (*Response Amplitude Operators*). É extraído o envelope máximo de todas as curvas para cada ângulo de ataque da ondulação. A amplitude máxima dos movimentos do centro de gravidade do navio resulta da multiplicação dos RAOs por H_s . O movimento vertical máximo do ponto mais desfavorável do casco do navio, (localizado na popa, ou proa do navio) resulta da combinação dos RAOs X_3 e X_5 (modos de abatimento e cabeceio). Conhecido o período médio da ondulação, os movimentos verticais máximos dos navios são comparados com os limiares operacionais. O mesmo procedimento é feito para os movimentos de avanço, deriva e rolo. Os níveis de risco são quantificados comparando estes resultados com as tolerâncias de movimento dos navios. É implementado um sistema de alerta de quatro níveis para comunicar os riscos. Estes alertas são simbolizados por códigos de cores para apoiar a rápida tomada de decisões pelos responsáveis portuários, Figura 1.



Módulo	TRANSIT		Nível alerta	Módulo	TRANSIT		Nível alerta
	Porta-Contentores 120m	Embarcação de Pesca 70m			Porta-Contentores 120m	Embarcação de Pesca 70m	
HS (m)	2	2	Verde	Avanço (m)	2	2	Verde
	2.5	2.5	Amarelo		2.5	2.5	Amarelo
	3	3	Laranja		3	3	Laranja
	3+	3+	Vermelho		3+	3+	Vermelho
U (km/h)	65	65	Verde	Deriva (m)	2	2	Verde
	75	75	Amarelo		2.5	2.5	Amarelo
	87	87	Laranja		3	3	Laranja
	87+	87+	Vermelho		3+	3+	Vermelho
UKC (m)	2	2	Verde	Roto (°)	7	7	Verde
	1	1	Amarelo		9	9	Amarelo
	0.5	0.5	Laranja		10	10	Laranja
	0.5-	0.5-	Vermelho		10+	10+	Vermelho

Figura 1. Limites e níveis de Alerta para duas embarcações no Porto da Figueira da Foz - PIANC (1997 e 2014).

Usando a metodologia apresentada, os valores de UKC previstos ao longo do percurso do navio são calculados e permitem acionar avisos à navegação. As previsões a 72 horas são atualizadas diariamente e enviadas para uma plataforma Web, que emite boletins diários, enviados por correio eletrónico às autoridades competentes, com alertas de galgamento, segurança dos navios atracados e UKC.

Caso de aplicação no acesso ao porto da Figueira da Foz

Para o porto da Figueira da Foz, foram simulados dois navios: um porta-contentores de 120 m de comprimento, 14 m de boca e 6 m de calado e uma embarcação de pesca com 70 m de comprimento, 12 m de boca e 4 m de calado. Multiplicando os valores máximos previstos de Hs para cada período médio de onda pelo movimento vertical máximo do navio, obtém-se o movimento vertical máximo esperado do casco do navio para cada período de onda, Figura 2. A comparação com as condições atuais permite estimar o aumento previsto do UKC.

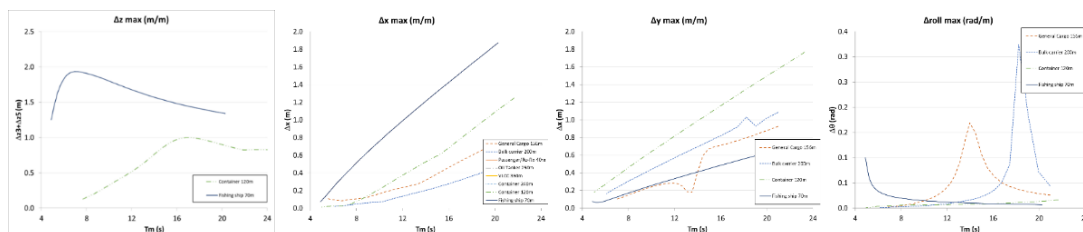


Figura 2. Amplitude dos movimentos máximos, por unidade de Hs, em função do período médio da onda incidente.

A Figura 3 apresenta os pontos utilizados para estimar as características das ondas ao longo do percurso dos navios e um mapa de alerta para o canal de entrada do porto da Figueira da Foz, gerado a partir das previsões de vento, de ondulação e nível do mar. O mapa fornece uma representação espacial dos níveis de risco de navegação ao longo do canal. Esta visualização apoia o planeamento operacional, identificando quando e onde as restrições de navegação devem ser impostas, para garantia da segurança.

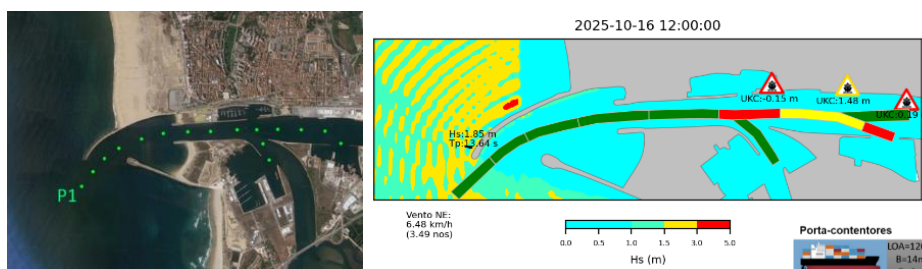


Figura 3. Pontos ao longo da trajetória do navio (esq.). Mapa de alerta do Porta-contentores de 120m de comprimento e calado de 6m (dir.).



Projeções futuras em cenários de alterações climáticas

Foi utilizada uma abordagem que combina dados históricos de agitação com o cenário SSP5-8.5 do IPCC, para fornecer uma avaliação indicativa dos riscos, quantificando os impactos das alterações climáticas na eficiência operacional. Os dados utilizados (Fontes: ERA5/ECMWF e Copernicus Climate Change Service para o cenário SSP5-8.5 do IPCC) permitiram traçar 4 cenários, em que em 3 dos quais foram realizadas Análises de Valores Extremos (EVA):

- FFPROJ0 - ECMWF hindcast 1979 a 2025. Conjunto de dados sobre o clima das ondas que fornece as condições de base, os padrões de variabilidade histórica e com os quais foi efetuada uma EVA;
- FFPROJ1 – EVA com base na série de dados da FFPROJ0 à qual foram adicionados os máximos anuais de Hs para os anos 2041, 2050, 2070 e 2100;
- FFPROJ2 - EVA com base na série de dados da FFPROJ0 à qual foram adicionados os máximos anuais de Hs dos anos 2041 a 2100;
- FFPROJ3 – Máximos anuais de Hs dos anos 2041, 2050, 2070 e 2100.

Os conjuntos de dados de hindcast e da projeção RCP8.5 foram propagados desde o largo até ao canal de acesso com os modelos SWAN e DREAMS, Figura 4. Em cada ponto, são determinados os pares (H_{smax} , T_p) e, combinando os envelopes de Hs máximos (H_{smax}) obtidos para cada projeção e de Δz unitários máximos, obtêm-se os valores máximos de Δz (Δz_{max}).

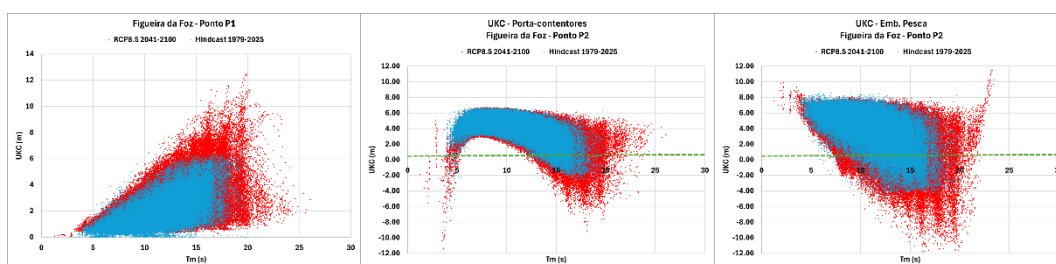


Figura 4. Distribuição Hs-Tp no Ponto P1 em frente ao Porto (esq.). UKC do Porta-contentores (centro). UKC da emb. de Pesca (dir.). Registos de 1979 a 2025 e projeções para 2041 a 2100).

Ao analisar as duas séries de dados (registos de 1979-2025 e projeções para 2041-2100), verifica-se que, para um limiar de UKC=0.5 m, existe um aumento de inoperacionalidade de 27.5%, no caso do porta-contentores e de 20.4% no caso da embarcação de pesca, Quadro 1.

Quadro 1 – Operacionalidade baseada na UKC.

	Porta-contentores 120m		Emb. Pesca 70m	
	Registos de 1979 a 2025	Projeções para 2041 a 2100	Registos de 1979 a 2025	Projeções para 2041 a 2100
nº total registos	135797	526272	135797	526272
nº registos UKC<0.5m	2996	14799	9376	43750
Operacionalidade média annual	97.79%	97.19%	93.10%	91.69%
nº dias médio por ano de inoperacionalidade	8	10	25	30
Diferença de inoperacionalidade	-	+27.5%	-	+20.4%

Na Figura 5 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos pela multiplicação das curvas de H_{smax} por Δz_{max} , em função do período médio da ondulação incidente. Os navios mais pequenos são mais vulneráveis aos movimentos induzidos pelas ondas, podendo atingir, nas condições atuais, amplitudes de 12 m. Estes movimentos podem ser 50% maiores até 2100, de acordo com



as projeções apresentadas. Já os aumentos percentuais mais pronunciados dos movimentos verticais verificam-se no porta-contentores simulado, onde os cenários futuros induziram um aumento dos movimentos verticais dos navios devido à agitação marítima que podem ir até 60% (8% - FFPROJ0, 25% - FFPROJ3, 27% - FFPROJ1, e 60% - FFPROJ2).

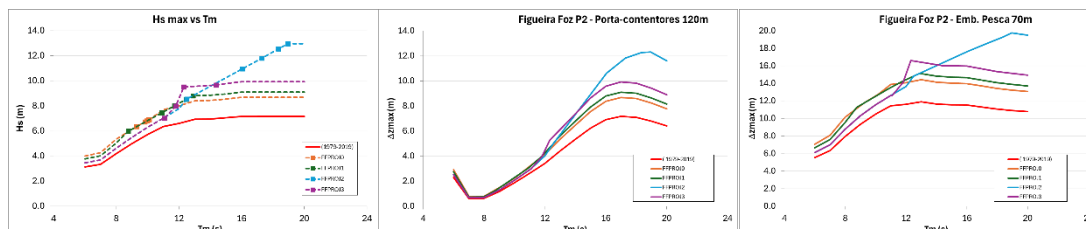


Figura 5. Envelopes Hsmax para cada cenário de projeção. Movimento vertical máximo para o Hs projetado.

Estes resultados reforçam a importância de se considerarem dados de projeções, em lugar de séries históricas.

Discussão

O módulo TRANSIT no HIDRALERTA permite prever e avaliar as condições de segurança da navegação com 72 horas de antecedência. Isto inclui a avaliação do UKC ao longo da rota do navio e a emissão de alertas. Esta aplicação demonstrou como a modelação operacional pode aumentar a eficiência dos portos, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisão ao nível operacional. Relativamente ao efeito das alterações climáticas, verificaram-se alterações preocupantes nos regimes de agitação, com aumento das alturas de onda e maior frequência de tempestades. O efeito sobre os movimentos dos navios é considerável, reduzindo a sua manobrabilidade e segurança, mesmo com subida do nível do mar expectável, tendo como consequência a redução das janelas operacionais do porto. Trata-se de um contributo fundamental para as avaliações de custo-benefício das melhorias planeadas para as infraestruturas, apoiando decisões sobre dragagem de canais, otimização de quebra-mares e objetivos de acessibilidade portuária (por exemplo a operacionalidade média anual).

Agradecimentos

Projetos BLUESAFEPOR (Fundo Azul FA_04_2017_016) e C2IMPRESS *Co-creative improved understanding and awareness of multi-hazard risks for disaster-resilient society*. (União Europeia, Horizonte Europa, N.º 101074004).

Referências Bibliográficas

- BS 6349-1-1. (2013). "Maritime works – Part 1-1: General – Code of practice for planning and design for operations". The British Standards Institution 2013. Published by BSI Standards Limited 2013. ISBN 978 0 580 76228 4
- Fortes, C.J.E.M. (1993). "Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (Análise pelo método dos elementos finitos)". MSc. Eng. Mecânica, IST, Lisboa
- Korsmeyer, F.T., Lee, C.-H., Newman, J.N., & Sclavounos, P.D. (1988). "The analysis of wave interactions with tension leg platforms". OMAE Conference, Houston.
- PIANC (2014). "Harbour Approach Channels – Design Guidelines". MarCom WG 121.
- PIANC. (1997). "Approach Channels – A guide for design".
- Pinheiro, L.V., Gomes, A.H., Kleinjan M., Zózimo A.C., Mendonça, A., Fortes, C.J.E.M. (2023a). Simulação das condições de segurança e acessibilidade de navios nos portos de Sines e Aveiro. 11as JPECP, Leixões, 3 e 4 de outubro.
- SWAN Team (2006). "Swan User Manual version 40.51". Dep. Civil Eng. & Geosciences, Delft UT, Netherlands, 111 pp.