



## SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA E ACESSIBILIDADE DE NAVIOS NOS PORTOS DE SINES E AVEIRO

Liliana Pinheiro, Andreia Gomes, Michelle Kleinjan, Ana Catarina Zózimo, Ana Mendonça, Conceição Fortes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

[lpinheiro@lnec.pt](mailto:lpinheiro@lnec.pt), [ahgomes@lnec.pt](mailto:ahgomes@lnec.pt), [495465@student.saxion.nl](mailto:495465@student.saxion.nl), [aczozimo@lnec.pt](mailto:aczozimo@lnec.pt),  
[amendonca@lnec.pt](mailto:amendonca@lnec.pt), [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt)

### Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para determinar as condições de segurança e acessibilidade de navios ao longo do trajeto de acesso ao porto, ilustrando-se a sua aplicação nos casos de estudo dos portos de Sines. Este trabalho insere-se no âmbito do desenvolvimento de novos sistemas de previsão e alerta para a navegação nos portos de Sines e Aveiro.

### Requisitos de segurança em canais de navegação

Para a determinação das dimensões de segurança dos canais de navegação existem diversas normas e recomendações, entre as mais utilizadas referem-se PIANC (1997), ROM (1999), Port Designer's Handbook (2003), British standards (2013) e PIANC (2014).

#### *Largura mínima do canal na entrada*

A largura mínima de um canal retilíneo depende principalmente da dimensão e manobrabilidade dos navios que navegam no canal e dos efeitos do vento e da corrente. A largura do canal é dividida em três zonas ou faixas, conforme mostrado na Figura 1 para tráfego de dois sentidos. A largura de um canal restrito,  $W$ , deve ser medida na parte inferior do leito dragado, a chamada largura de rasto, e deve ser a soma de:

$$W = W_{BM} + W_{Br} + W_{Bg} + W_s + \sum W_i + W_c \quad (1)$$

em que:  $W_{BM}$  – é a largura da faixa de manobra do navio;  $W_{Br}$ ,  $W_{Bg}$  – é a largura da distância de segurança da margem esquerda e direita;  $W_s$  – é a largura da distância de segurança entre navios;  $W_i$  – são as larguras adicionais de segurança que resultam de diversos fatores;  $W_c$  – é a largura adicional devida à curvatura do canal.

A largura da faixa de manobra,  $W_{BM}$ , varia de 1.6 a 2 vezes a largura da boca do maior navio. Navios com superestruturas muito altas podem exigir larguras de canal maiores. Uma tolerância para a guinada do navio pode ser adicionada se o canal estiver exposto a correntes e/ou ventos transversais.

A largura da distância de segurança das margens,  $W_{Bg}$ , é determinada pelo desvio do navio, que é causado pelo efeito de sucção lateral. A largura deve ser de 1 a 2 vezes a largura da boca do navio. A sucção lateral é maior em canais com taludes íngremes e em navios com pouca folga sob a quilha. A distância de segurança entre navios deve ser de, pelo menos, 30 m ou a largura do maior navio.

As larguras adicionais,  $W_i$ , 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.

Se o canal contiver curvas, a largura do canal deve ser aumentada de cerca de 2 vezes a largura da boca do navio de projeto, devido à largura de manobra adicional necessária. As normas e recomendações para determinar as larguras adicionais de segurança têm sido atualizadas ao longo do tempo. As margens de segurança são cada vez maiores, apesar das tecnologias de navegação serem cada vez mais eficientes. Em 2014, o grupo de trabalho 121 da PIANC emitiu

novas recomendações para o projeto de canais de acesso e navegação. Este trabalho reviu, atualizou e expandiu as recomendações do relatório WG30 de 1997. Nas normas BS-2013, após o dimensionamento inicial tradicional, recomenda-se uma posterior simulação numérica da aproximação e partida do navio para confirmar e otimizar o *layout* e as dimensões horizontais do canal.

### Profundidade mínima do canal

O procedimento, comum a todas as normas, para determinar a profundidade da água mínima exigida resulta da soma da profundidade máxima ocupada pela embarcação de projeto, tendo em consideração os fatores que afetam a sua variabilidade (calado estático, condição de carga, afundamento dinâmico da popa, movimentos e rotações devidos a ventos, ondas e correntes), com as margens de segurança para acautelar variações do fundo (imprecisões da batimetria, depósitos de sedimentos e tolerâncias à execução de dragagem).

Assim, a cota de fundo deve estar abaixo do nível de maré mínimo possível (maré astronómica, maré meteorológica, etc.) somado da folga sob a quilha (*UKC – Under-keel Clearance*). A Figura 1 apresenta a determinação da profundidade mínima do canal de navegação. para o nível correspondente à baixa-mar mínima.

A cota de dragagem (referida ao ZH) deve ser determinada a partir da soma dos seguintes fatores

$$D(ZH) = \sum_{i=1}^9 d_i - NM_{min}, \quad (1)$$

onde:  $d_1$  é o calado do navio de projeto (*draft*), correspondente ao carregamento máximo, tendo em conta a densidade da água;  $d_2$  é o movimento vertical do navio devido às ondas;  $d_3$  é a diferença de calados entre a popa e a proa (*trim*) devido ao carregamento do navio;  $d_4$  é o afundamento (*squat*) do navio devido ao efeito de sucção induzido pelas correntes de maior velocidade entre o fundo do canal e o navio;  $d_5$  a  $d_9$  são folgas adicionais de segurança devidas a: abatimento (*set-down*) devido à pressão atmosférica, tipo de fundo, erros de medições, possibilidade de assoreamentos e erros nas dragagens, respetivamente.

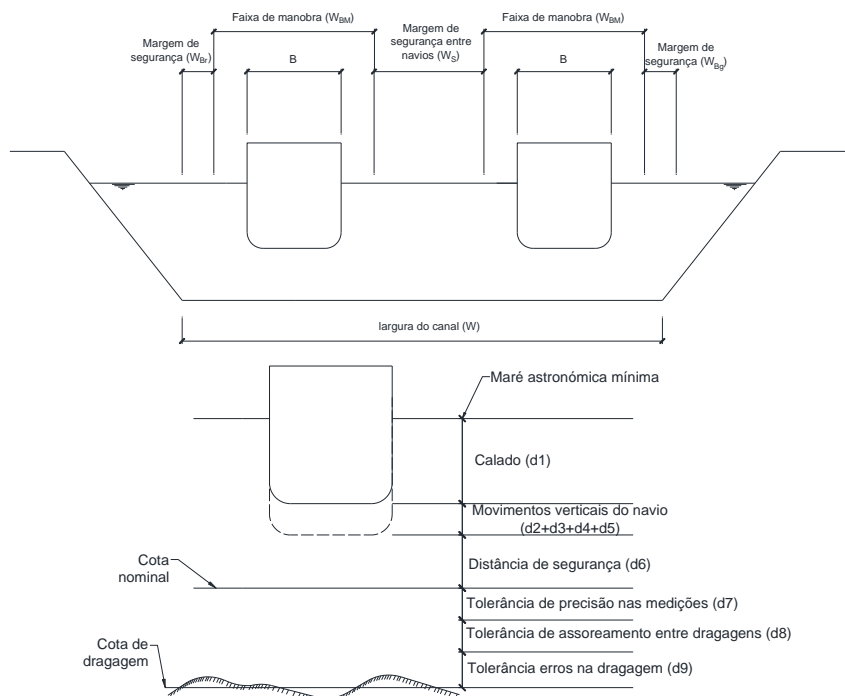


Figura 1. Determinação da profundidade mínima do canal de navegação. Larguras mínimas de segurança. Adaptado de Thoresen (2003).

A parcela  $d_2$  é normalmente estimada em cerca de  $2/3$  da altura de onda significativa ( $H_s$ ) para



navios de pequenas dimensões. Já os navios de grandes dimensões só serão afetados pelas ondas de período ( $T_p$ ) superior a 10 s, quer nos movimentos verticais, quer nos movimentos de rolo e cabeceio. Estes últimos, dependendo do comprimento do navio, podem levar a sub-elevações da popa e proa importantes. O valor máximo real de  $d_2$  depende das dimensões do navio de projeto e do seu comportamento hidrodinâmico sob a ação das ondas. A modelação numérica é a forma mais eficaz de determinar esta parcela.

#### Metodologia para o cálculo de $d_2$

A metodologia aqui proposta tem em conta o regime de agitação local em cada ponto do percurso de acesso ao porto e os vários tipos de navios que demandam o porto, incluindo o navio de projeto.

O primeiro passo consiste no estabelecimento do regime geral ao largo com base em dados de boias-ondógrafo, preferencialmente, ou, na ausência destas, em dados fidedignos (por exemplo de *hindcast*). De seguida, efetua-se a transferência dos regimes de agitação ao largo para um conjunto de pontos ao longo do canal de acesso, através do uso de modelos numéricos. Em cada ponto são determinadas as características limite da agitação marítima (pares de  $H_{smax}$ - $T_p$ ) em condições de operacionalidade impostas ao canal de acesso, ou seja, são descartados dos registos os valores de agitação fora do porto que impossibilitem o acesso.

Quaisquer movimentos impostos a um navio livre no plano horizontal não originam forças ou momentos de restituição uma vez que a posição relativa dos centros de impulsão e de gravidade se mantém inalterada. Já os movimentos nos planos verticais originam momentos binários que obrigam o navio a regressar à sua posição inicial de equilíbrio.

Para a determinação do efeito da agitação nos movimentos verticais dos navios utiliza-se um modelo de simulação 3D da hidrodinâmica em torno do casco do navio. Neste caso utilizou-se o modelo numérico WAMIT - WaveAnalysisMIT (Korsemeier *et al.* 1988), desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica do MIT. Este modelo resolve no domínio da frequência os problemas de radiação e de difração de um corpo flutuante livre. O modelo é linear e pode ser resolvido para ondas com uma amplitude unitária e diferentes frequências, fornecendo assim as chamadas funções de transferência ou *Response Amplitude Operators*, RAOs. A amplitude máxima dos movimentos do centro de gravidade do navio resulta da multiplicação dos RAO pelo valor de  $H_s$ , em condições de operacionalidade do porto correspondente a cada período médio. O movimento vertical máximo do ponto mais desfavorável do casco do navio, ou seja, aquele que tem potencial de atingir movimentos verticais maiores (seja localizado na popa, ou proa do navio) resulta da soma do deslocamento vertical do centro de gravidade, CG, ( $\Delta X_3$ ) e do deslocamento vertical resultante da rotação em torno do eixo Y ( $\Delta X_5$ ), Figura 2. O cálculo do deslocamento vertical do ponto da popa do navio resulta assim:

$$\Delta z = \Delta X_3 + \Delta X_5. \quad (3)$$

Por sua vez  $\Delta X_5$  é dado por:  $\Delta X_5 = \frac{LOA}{2} \sin X_5$ , onde LOA é o comprimento total do navio e  $X_5$  é a rotação em torno do eixo Y.

Por fim, define-se o nível de operacionalidade exigido (percentagem do tempo em que deve ser assegurado o acesso ao porto) e é determinada a profundidade mínima de segurança.

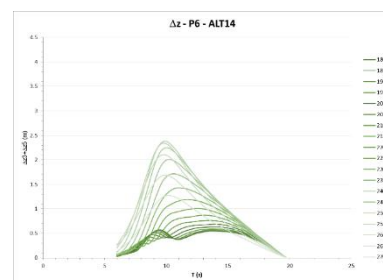
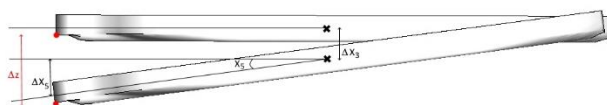


Figura 2. Amplitude de movimento vertical máxima na popa

### Previsão das condições de segurança no acesso aos Portos de Sines e de Aveiro

Na fase de exploração, é possível determinar as condições de segurança que um determinado navio terá no seu trajeto de acesso ao porto ou para fora deste. Com base nas condições de agitação, vento e maré verificadas no local ou medidas numa boia próxima, ou ainda previstas por modelos de previsão para o momento ou para os dias seguintes, são determinados os movimentos expectáveis do navio no plano vertical. O nível e as correntes de maré são determinados com recurso a um modelo hidrodinâmico de circulação, considerando a maré astronómica e a sobrelevação de origem meteorológica. Usando a metodologia apresentada, os valores de UKC previstos ao longo do percurso do navio são calculados e permitem acionar avisos à navegação para os próximos 3 dias. Esta metodologia foi implementada nos sistemas de alerta à navegação dos Portos de Sines e de Aveiro, desenvolvidos no âmbito dos projetos BlueSafePort, que prevê também a segurança dos navios amarrados (Pinheiro *et al.*, 2023), e do projeto C2IMPRESS, respetivamente. No âmbito deste último projeto a mesma metodologia encontra-se a ser implementada no sistema de alerta para o porto da Figueira da Foz.

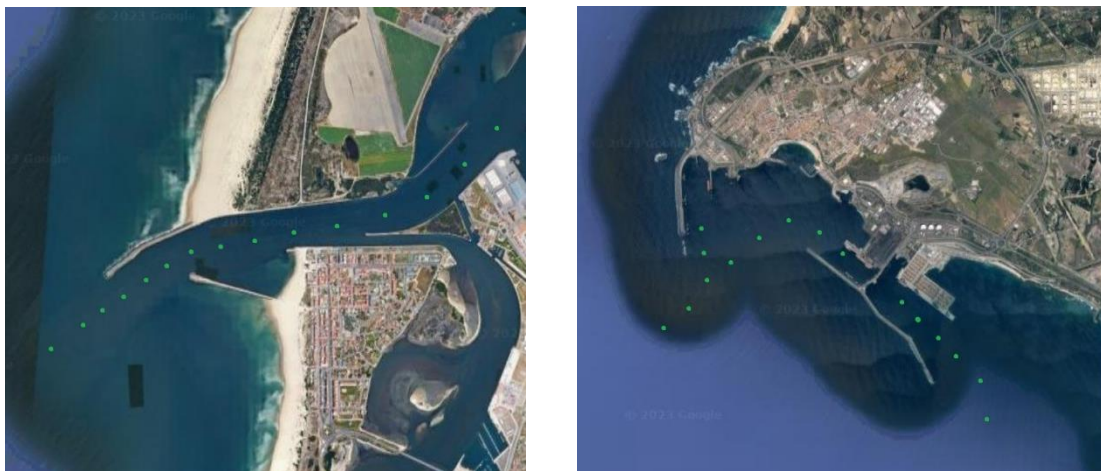


Figura 3. Localização dos pontos de análise sobre as rotas de acesso aos portos de Sines (esq.) e Aveiro (dir.)

### Agradecimentos

Agradece-se aos projetos BLUESAFEPORT (financiado pelo Fundo Azul FA\_04\_2017\_016) e C2IMPRESS (financiado pela União Europeia através do Horizonte Europa, sob o *grant agreement* N.º 101074004) e LIFE-GARACHICO (LIFE20 CCA/ES/001641).

### 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. (1997). "Approach Channels – A guide for design".
- PIANC (2014). "Harbour Approach Channels – Design Guidelines". MarCom WG 121.
- Pinheiro, L. V., Gomes, A. H., Fortes, C. J., & Santos, J. A. (2023). "Implementation and Validation of SAFEPORT System at Sines Harbour". In Defect and Diffusion Forum (Vol. 427, pp. 215–226). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-2sbfir>
- ROM 3.1-99. (1999). "Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación". Puertos del Estado, Madrid.
- Thorsen, C.A. (2003). "Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines". Thomas Telford Limited, ISBN: 978-07277-3228-6.