



## GALGAMENTOS DO MOLHE SUL DA PRAIA DA VITÓRIA COMPARAÇÃO RESULTADOS MODELO FÍSICO 2D E FERRAMENTAS DE CÁLCULO

Lucília Luís<sup>1</sup>; Sofia Costa-Freire<sup>1</sup>; João Barros<sup>1</sup>; Rute Lemos<sup>2</sup>; Conceição J.E.M. Fortes<sup>2</sup>; Liliana Pinheiro<sup>2</sup>;  
Luís Gabriel Silva<sup>2</sup>; Carolina Martinez<sup>2</sup>; Tiago Toste<sup>3</sup>; Flávio Pereira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CONSULMAR – Projectistas e Consultores, Lda.; <sup>2</sup>LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;  
<sup>3</sup>Portos dos Açores, S.A.

[lucilia.luis@consulmar.pt](mailto:lucilia.luis@consulmar.pt), [sofia.freire@consulmar.pt](mailto:sofia.freire@consulmar.pt), [joao.barros@consulmar.pt](mailto:joao.barros@consulmar.pt), [rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt),  
[jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [lpinheiro@lnec.pt](mailto:lpinheiro@lnec.pt), [lgsilva@lnec.pt](mailto:lgsilva@lnec.pt), [cmartinez@lnec.pt](mailto:cmartinez@lnec.pt), [ttoste@portosdosacores.pt](mailto:ttoste@portosdosacores.pt),  
[fpereira@portosdosacores.pt](mailto:fpereira@portosdosacores.pt).

### Resumo

Nesta comunicação apresentam-se os resultados do estudo dos galgamentos na zona do novo muro-cortina do Porto Comercial da Praia da Vitória, no âmbito do projeto de prolongamento do cais multiusos. O troço atual do molhe sul, à cota +8,60 m (ZH), é fortemente galgável, propondo-se o prolongamento do muro-cortina existente. Após a fase de estudo prévio, realizaram-se ensaios em modelo físico 2D da solução proposta, que replicava as características do muro existente pela sua comprovada eficácia. Os resultados, referentes ao caudal médio de galgamento (Lemos et al. 2025), foram comparados com as estimativas previamente obtidas através das ferramentas ANNtool (Formentin S.M.et al., 2017), XGB-Overtopping (Den Bieman et al., 2021) e NN-Overtopping (Van Gent et al., 2007) e das formulações do EurOtop (2018). Como os valores reais podem divergir significativamente, um estudo comparativo torna-se essencial para validar tais ferramentas. No caso da Praia da Vitória, acresce o conhecimento do desempenho do muro atual e as previsões do sistema HIDRALERTA, ativo desde 2019, que disponibiliza extensa base de resultados.

### Introdução

O molhe sul do Porto da Praia da Vitória foi construído há quase 40 anos e sujeito posteriormente a reparações, devido essencialmente ao temporal que assolou a costa Leste da ilha Terceira em dezembro de 2001. O molhe divide-se em duas zonas: a primeira, com 700 m e traçado curvo, integra nos últimos 330 m o terminal de contentores com fundos a -12 m (ZH). A segunda estende-se até à cabeça, composta por um quebra-mar galgável, incluindo um troço reto de 450 m, um curvo de 80 m, outro reto de 50 m e a cabeça.

O projeto do prolongamento compreende a ampliação do atual cais à -12,00 m (ZH) em 350 m, garantindo fundos de serviço de -16 m (ZH), de forma a permitir que a estrutura de acostagem possa receber o maior número/tipo de embarcações possível, incluindo a construção de um muro-cortina sobre o coroamento do troço atualmente galgável do molhe e a criação de um terraplano e cais no seu tardoz.

Os valores reais de galgamento podem divergir significativamente das estimativas fornecidas pelas várias ferramentas de cálculo disponíveis, por essa razão, e no âmbito do referido projeto, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico reduzido 2D com o objetivo de avaliar o comportamento aos galgamentos do novo muro-cortina.

Apresenta-se de seguida a solução proposta a nível de estudo prévio e ensaiada em modelo físico 2D, cujos cálculos e medições do caudal médio de galgamento foram posteriormente comparados com os valores calculados, com vista a reforçar a confiança nas ferramentas de cálculo, essenciais nas fases iniciais de conceção dos projetos.

### Solução Projetada e Ensaios em Modelo Físico 2D

O muro-cortina previamente analisado e proposto (Figura 1. esq) replicou aproximadamente a geometria do muro-cortina existente, correspondendo o novo muro a uma estrutura contínua, com 5,6 m de largura, 8,2 m de altura e coroamento à cota +11,2 m (ZH), incluindo deflector de

3,2 m acima da cota +7,1 m (ZH) e dente trapezoidal fundado à cota +3 m. A implantar a 3 m da superestrutura existente, prevendo-se entre esta e o muro, blocos de travamento (largura=1 m) espaçados de 4 m, com preenchimento entre estes com enrocamento (10–30 kN), à semelhança da geometria atual.

Os ensaios em modelo físico reduzido 2D, destinaram-se essencialmente a verificar o comportamento aos galgamentos da eficácia do novo muro-cortina.

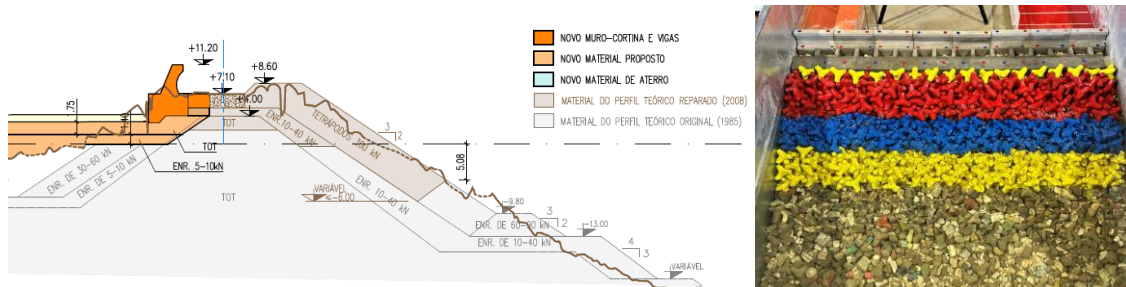


Figura 1. Pormenor do perfil reproduzido no modelo físico (esq), aspeto final do modelo (dir).

O modelo físico foi construído (Figura 1, dir.) no canal de ondas do DHA-LNEC, com 11,7 m de comprimento e gerador de ondas irregulares, segundo a lei de Froude, à escala 1:52. No modelo, o muro foi representado por 9 módulos de 10 m e totaliza um volume 267.25 m<sup>3</sup>/m no protótipo. Para quantificação do galgamento instalou-se um reservatório junto ao muro, instrumentado com sonda para medir o nível de água e calcular o volume galgado.

Os ensaios foram realizados para dois níveis (+1.8 m ZH e +3.0 m ZH), períodos de pico de onda de 12, 16, 18 e 20 s e alturas de onda  $H_{m0}$  de 7 a 11 m.

Cada um dos valores de  $H_{m0}$  atuou no modelo durante um período correspondente a cerca de três horas no protótipo. Salienta-se que o regime de agitação no local da intervenção, caracteriza-se por uma altura de onda significativa centenária de 9,0 m, e uma percentagem inferior a 4% para períodos de pico superiores a 15 s. As condições acima destes valores ensaiadas, serviram apenas para efeito de análise de sensibilidade do comportamento da estrutura quando submetida a ações extremamente raras, assim como para avaliação da sua reserva de resistência ou margem para eventuais incertezas.

### Comparação dos Resultados e Análise

Os resultados das medições dos ensaios em modelo físico 2D, foram comparados com as estimativas previamente obtidas através da aplicação da Eq. 6.5 do EurOtop (2018), complementada com os ajustes das Eq. 6.7 e Eq. 6.8, bem como das redes neuronais ANNtool (Formentin S.M.et al., 2017), XGB-Overtopping (Den Bieman et al., 2021) e NN-Overtopping (Van Gent et al., 2007).

Apesar da geometria da seção projetada/ensaiada ser complexa e não corresponder integralmente às configurações de base das ferramentas aplicadas, compararam-se com os resultados medidos. Todas as condições e parâmetros da geometria cumpriram os intervalos de validade de aplicação das ferramentas, excetuando-se na aplicação ANNtool, em que para as condições  $H_{m0}=11$  m com  $T_p=16$  s (ambos os níveis) e  $T_p=12$  s ao nível +1.8 m ZH, a ferramenta gerou um alerta indicando que o valor estimado para o caudal médio de galgamento pode não ser o mais correto, condições já acima dos valores de dimensionamento.

Na Figura 2, apresenta-se a comparação entre os caudais médios de galgamento estimados ( $q_{est}$ ) através das várias ferramentas e o caudal médio de galgamento medido nos ensaios 2D ( $q_{med}$ ).

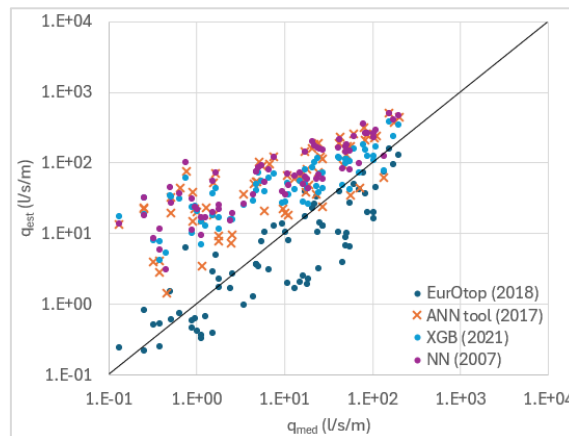


Figura 2. Comparação dos caudais estimados e o caudal medido

Os resultados mostram que as estimativas obtidas pela formulação EurOtop (2018), são na generalidade inferiores aos valores medidos, enquanto as redes neuronais apresentam estimativas superiores. No EurOtop, isso ocorre por não considerar simultaneamente berma e muro-cortina com cotas diferentes, mas sim para ambas a cota do muro-cortina, levando a assumir uma estrutura mais robusta que a real. Já nas redes neuronais, os caudais de galgamento superiores, justificam-se, por não ser considerado o efeito do deflector e dos vazios entre blocos de travamento, cujo efeito na redução do galgamento se verificou bastante significativo nos ensaios em modelo físico 2D.

A Figura 3 apresenta os valores estimados e medidos para cada  $H_{m0}$ , incluindo o intervalo de confiança de 90%, no caso dos resultados obtidos através das redes neuronais: a XGB apresenta o intervalo mais estreito e a ANNtool o mais largo, abrangendo esta última a maioria dos valores medidos na condição de menor período. Verifica-se que as diferenças se reduzem à medida que a altura de onda aumenta e o período diminui.

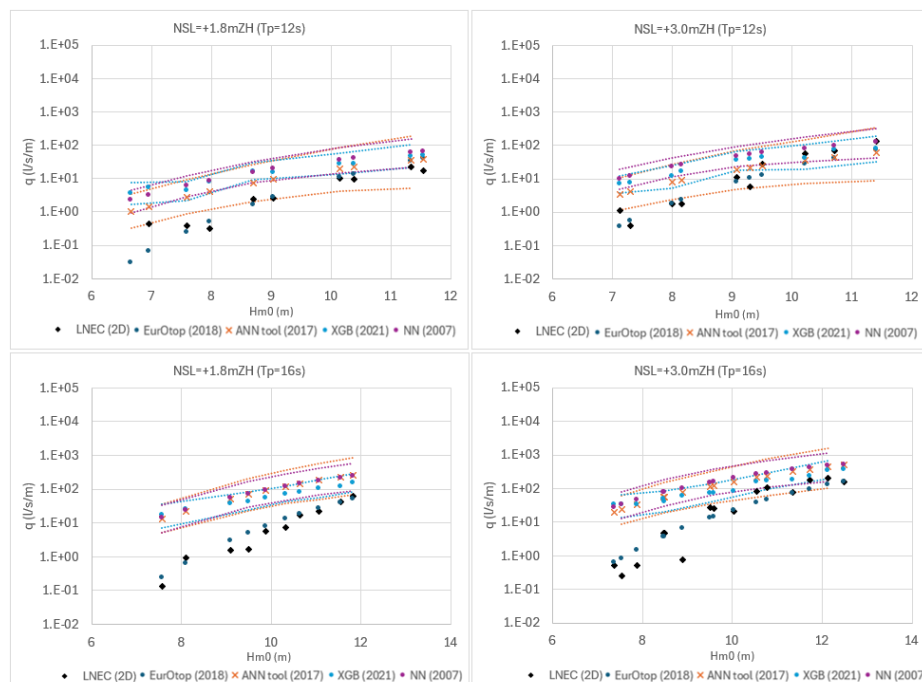


Figura 3. Comparação dos caudais estimados e medidos  
(linhas a pontado – limite do intervalo de confiança a 90% estimado pelas redes neuronais)



## HIDRALERTA

No caso particular do porto da Praia da Vitória, dispõe-se ainda do conhecimento do comportamento/eficiência do muro-cortina na proteção do terraplino atual contra os galgamentos, além de que para este molhe, o sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019) fornece desde 2019, as previsões, a 72 horas, da agitação marítima e consequentes galgamentos, dispondo-se assim de uma extensa base de resultados desses eventos.

Na Figura 4 apresenta-se a previsão do HIDRALERTA para os caudais de galgamento sobre o muro-cortina atual (Troço A) e sobre o molhe sem muro cortina (Troço B), de 2023 a 2024.

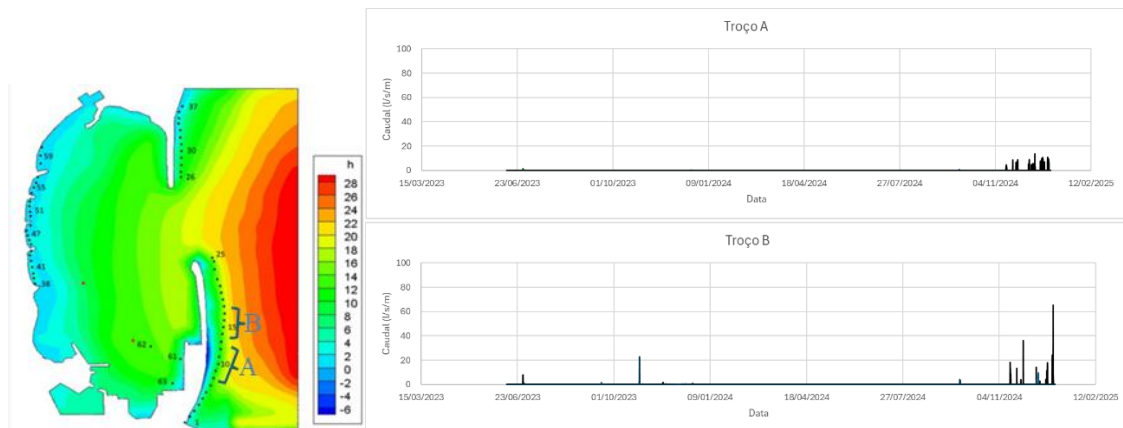


Figura 4. HIDRALERTA (pontos de extração dos galgamentos/troços em análise).  
Galgamentos nos pontos dos Troços A e B no período de 2023 a 2024.

Para os dois troços, o Quadro 1 apresenta os valores médios da percentagem de galgamentos, dos caudais máximos, e superiores a 0.01 l/s/m (valor limite para emissão de alerta a pedestres). Verifica-se que quer a percentagem de galgamento quer os valores de caudal são superiores no Troço B face ao Troço A, resultado desta zona ser protegida por um muro-cortina.

Quadro 1. Características do galgamento nos Troços A e B

Galgamento	Troços	
	A	B
Eventos (%)	0.88	2.65
Q>0.01 l/s/m (%)	0.96	4.01
Qmax (l/s/m)	9.65	32.92

## Conclusões

Com base neste estudo, pode-se concluir que deve haver sempre precaução na utilização deste tipo de ferramentas quando o perfil proposto difere dos que lhes serviram de base, sendo sempre necessária uma criteriosa análise dos resultados por parte do projetista. No entanto, após análise dos resultados obtidos e considerando as fragilidades de cada tipo de ferramenta face à configuração a analisar, de forma qualitativa os resultados mostram coerência com as diferenças existentes, o que prova a sua grande utilidade em fases iniciais de conceção do projeto.

Em relação ao HIDRALERTA, apesar de ainda não se ter forma de confirmar quantitativamente os valores obtidos, a ocorrência de galgamentos tem sido validada através de uma câmara de vídeo e confirmados os eventos estimados.



### Referências Bibliográficas

- den Bieman, J.P., van Gent, M.R., e van den Boogaard, H.F. (2021). “Wave overtopping predictions using an advanced machine learning technique” Elsevier, Coastal Eng., 103830.
- EurOtop (2018). “Manual on wave overtopping of sea defences and related structures”, J.W. van der Meer, N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. de Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch, B. Zanuttigh (Eds.), [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com) (incl. Errata November 2019).
- Formentin, S.M., Zanuttigh, B., e van der Meer, J.W. (2017). “A Neural Network TOOL for predicting wave reflection, overtopping and transmission”. Coastal Engineering Journal, 59, No. 2, 1750006, 31 pp.
- Lemos, R., Silva, L.G., Fortes, C.J.E.M. (2025). “Ampliação do Cais Multiusos do Porto da Praia da Vitória (Ilha Terceira – Açores) Ensaios de estabilidade e galgamentos em modelo físico bidimensional”. Relatório 124/2025 - DHA/NPE, LNEC, abril.
- Poseiro, P. (2019). Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment. Universidade de Lisboa.
- van Gent, M.R., van den Boogaard, H.F., Pozueta, B., e Medina, J.R. (2007). “Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures”, Elsevier, Coastal Engineering, Vol.54, pp. 586-593.