



## AUTOMATIZAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DO GALGAMENTO EM MODELOS FÍSICOS

Conceição J.E.M. Fortes; Rute Lemos; Carolina Martinez, Luís Gabriel Silva; Rui Reis;  
Tiago Soares; João Joaquim

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil; EPCG; NOVA FCT

[jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt), [cmartinez@lnec.pt](mailto:cmartinez@lnec.pt), [lgsilva@lnec.pt](mailto:lgsilva@lnec.pt), [rreis@lnec.pt](mailto:rreis@lnec.pt),  
[tiago.soares@epcg.pt](mailto:tiago.soares@epcg.pt), [j.joaquim@campus.fct.unl.pt](mailto:j.joaquim@campus.fct.unl.pt).

### Resumo

Os processos de espraiamento e galgamento de ondas são críticos para a segurança e o projeto de estruturas costeiras e portuárias. Em sede de projeto, recorre-se a ensaios em modelo físico para a análise de parâmetros relacionados com o galgamento, nomeadamente o caudal médio galgado por unidade de metro linear de estrutura, o número de eventos de galgamento e o alcance do galgamento. Estes parâmetros são importantes para o dimensionamento e operacionalidade das estruturas marítimas, em geral, e dos quebra-mares de talude em particular.

Tradicionalmente, em modelos físicos, o caudal médio galgado é medido com recurso a um reservatório que se coloca atrás do local da estrutura aonde se pretende medir esse galgamento. O alcance do galgamento é feito de forma visual. O número de eventos de galgamento é quantificado pela contagem manual dos máximos dos valores registados numa sonda colocada no coroamento da estrutura. Todas estas metodologias são normalmente morosas e, em alguns casos, apenas qualitativas. No sentido de tornar a análise dos parâmetros de galgamento mais automática, célere e quantitativa, têm vindo a ser desenvolvidos programas em Matlab e Python para análise de registos efetuados com sondas resistivas e de vídeos do ensaio.

O presente estudo apresenta algumas das metodologias desenvolvidas e identifica as principais vantagens e desvantagens.

### Determinação do caudal médio galgado

O caudal médio galgado por unidade de metro linear de estrutura pode ser determinado por dois métodos:

- Método direto, baseado na medição do volume de água recolhido num reservatório (método tradicional). A água que galga a estrutura é conduzida por uma rampa até um reservatório, Figura 1a), durante o ensaio e, depois deste finalizado, é bombeada para um tubo acrílico graduado, procedendo-se à leitura da altura de água nesse tubo, Figura 1b). O volume calcula-se através da multiplicação da altura atingida pela água nesse tubo graduado pela área desse tubo;
- Método indireto, baseado na análise dos registos (Figura 1c) de uma sonda resistiva colocada no reservatório, processados com o programa MATLAB-GALG (Fortes e Santos, 2021).

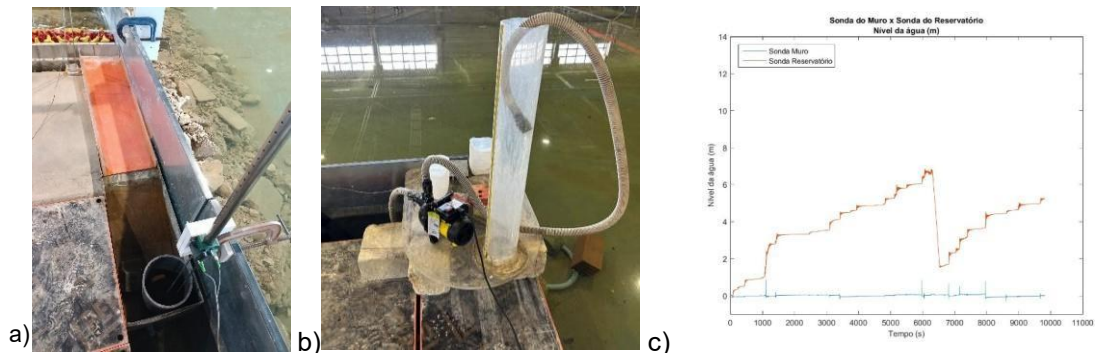


Figura 1. a) Rampa e reservatório com a sonda; (b) Sistema de bombagem para o tubo acrílico graduado; (c) registo do nível de água na sonda dentro do reservatório e no coroamento.



O programa MATLAB-GALG, efetuado em Matlab, baseia-se na análise do sinal medido com uma sonda colocada dentro do reservatório e calcula a diferença do valor máximo atingido pelo registo no fim do ensaio com o valor mínimo observado no início (uma vez que o reservatório tem de ter um mínimo de água para a sonda funcionar), desde que o volume de água não exceda a capacidade do reservatório. Quando tal acontece (o volume excede o reservatório e há que esvaziar o mesmo durante o ensaio para o tubo graduado, provocando uma diminuição dos valores de nível de água no reservatório, i.e., ocorre uma descarga), o programa incrementa ao valor final do registo, todas as descargas observadas durante o ensaio.

O programa ainda aplica uma média móvel para a retirada do ruído (oscilações da superfície livre, principalmente devido à ondulação gerada durante a entrada da água no reservatório) que se verifica no registo. O filtro depende do tamanho da janela considerada, o parâmetro *window size*, o qual se traduz num alisamento da série temporal medida pela sonda. Para cada conjunto de condições de agitação, a influência do período de pico de onda leva à necessidade de uma calibração prévia do tamanho da janela (*window size*) a utilizar no alisamento. Esta calibração foi efetuada mediante a comparação com alguns resultados da medição no reservatório.

O programa MATLAB-GALG foi aplicado a vários ensaios em modelo físico no caso do estudo do quebr-mar do porto da Praia da Vitória, e os resultados numéricos e medidos foram semelhantes, com erros relativos da ordem dos 15%. Esses erros estão relacionados com limitações de ambas as metodologias. Por um lado, a medição no reservatório é particularmente deficiente quando existem galgamentos de grande volume ou com grande impacto que extravasam a rampa ou o reservatório. Por outro lado, os resultados numéricos dependem do tamanho da janela utilizada pelo filtro, a qual deve ser calibrada previamente. Verificou-se também que para caudais pequenos (inferiores a 0.5 l/s/m), os resultados numéricos apresentam maior erro, em consequência da falta de precisão da sonda.

### **Quantificação dos eventos de galgamento**

A quantificação dos eventos de galgamento pode ser feita através de duas metodologias complementares. A primeira baseia-se na análise visual dos gráficos representativos das séries temporais das sondas instaladas no coroamento e no reservatório (Figura 2) permitindo distinguir entre salpicos e lâminas/massas de água, com validação por vídeo quando necessário.

A segunda recorre ao programa MATLAB-EVENTOS (Lemos, 2024), que determina automaticamente o número de eventos de galgamento e se baseia na determinação da elevação da superfície livre, utilizando uma análise de zero ascendente, onde apenas são consideradas as cristas, ou seja, os valores acima do nível de repouso da água no início do ensaio.

Contudo, devido à existência de pequenas oscilações da superfície livre que, ao cruzarem o “zero” são falsamente consideradas como eventos de galgamento, é também necessário aplicar um filtro e efetuar uma calibração prévia do tamanho da janela (*window size*) a utilizar no alisamento. A calibração é feita mediante o ajuste do valor do *window size*, de modo que o número de eventos obtido pelo algoritmo seja concordante com o observado nos gráficos de séries temporais correspondentes a ensaios representativos de cada período de pico, onde o número de eventos fosse facilmente contabilizado.

O programa MATLAB-EVENTOS foi aplicado a vários ensaios em modelo físico e verificou-se que os resultados numéricos eram bastante semelhantes aos contabilizados visualmente nos gráficos das séries temporais, com um erro absoluto de 12 eventos para os ensaios com  $T_p=12$  s, 3 eventos para  $T_p=16$  e  $T_p=20$  s e 1 evento para  $T_p=18$  s.



Figura 2. Sondas colocadas na face interior do coroamento (esquerda); no interior do reservatório de galgamento (direita) e gráficos das respetivas séries temporais.

### Alcance do galgamento

O alcance dos galgamentos pode ser determinado através da análise visual do vídeo do ensaio utilizando uma câmara de filmar instalada no modelo ou através da análise digital do mesmo vídeo com uma aplicação e interface em Python (Joaquim, 2025), Wave Bunny, que utiliza a metodologia TimeStack (Lemos et al., 2023), de modo a automatizar e tornar mais célere e amigável todo o processo.

A análise TimeStack envolve a marcação de um transecto definido por dois pontos, numa das *frames* do vídeo. Este transecto (Figura 3a), marcado na zona de interesse de medição do alcance do galgamento, permite que o algoritmo extraia, ao longo do filme, os pixels correspondentes ao transecto, possibilitando a construção de uma imagem designada *TimeStack* (Figura 3b). A Figura 4 ilustra as principais etapas do processo de análise de imagem com a metodologia *TimeStack*. Os resultados são os parâmetros estatísticos relacionados com o alcance máximo, médio, mediano e valores de excedência de 2%.

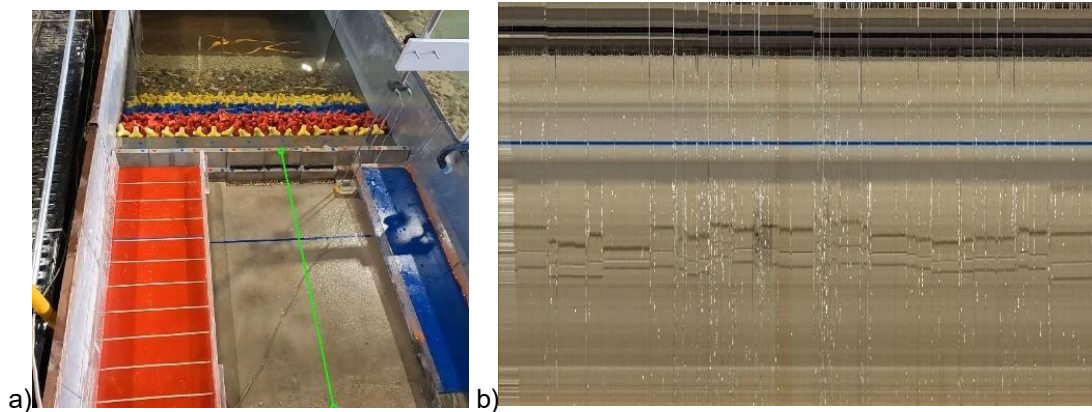


Figura 3. Definição do transecto e imagem *TimeStack*.



Figura 4. Encadeamento do processo de análise de imagem com a metodologia *TimeStack*.



A aplicação e a interface WaveBunny foi desenvolvida em Python utilizando bibliotecas como o OpenCV, Decord, PIL, Numpy e Scipy (Joaquim, 2025). A interface gráfica foi construída com o Tkinter e o CustomTkinter, garantindo facilidade de utilização. É importante salientar que os parâmetros dos filtros e a *frame rate* podem ser alterados com recurso ao cursor de barras existente na interface, sem necessidade de acesso ao programa. A arquitetura modular desta aplicação facilita a reprodutibilidade, a manutenção e a expansão futura.

A ferramenta foi validada utilizando conjuntos de dados de vídeo de campo e de laboratório. Os dados de campo incluíram gravações de Peniche e da Praia da Vitória, nos Açores, enquanto foram realizados testes laboratoriais nas Lajes das Flores. WaveBunny identificou com sucesso, quer os eventos de galgamento quer o seu alcance, ambiente laboratorial, mostrando consistência com a análise visual. A ferramenta processou vídeos de longa duração de forma eficiente e foi robusta em relação a condições variáveis de iluminação e ruído ambiental. A interface gráfica do utilizador (GUI) permitiu uma fácil navegação e verificação dos resultados.

## 6. Conclusões

Este estudo apresentou várias técnicas para a quantificação do galgamento de uma estrutura em ensaios em modelo físico reduzido, em termos do caudal médio galgado, número de eventos e alcance do galgamento.

Em qualquer das metodologias, a obtenção de resultados credíveis depende essencialmente de uma calibração prévia, principalmente relacionada com os parâmetros dos filtros que utilizam e das condições ambientais em que são obtidos os registos da sonda e os vídeos. Com efeito, é muito importante garantir no caso da utilização de sondas resistivas que as mesmas estejam protegidas do impacto do galgamento, no sentido de se diminuir o ruído do sinal. No caso dos vídeos, o seu posicionamento, a qualidade do mesmo e a correta iluminação do local são os fatores mais importantes.

Seja como for, estas metodologias mostraram ser boas alternativas às metodologias tradicionais, permitindo uma maior automatização, quantificação, adaptabilidade e redução de erros humanos. O desenvolvimento de interfaces amigáveis para os programas MATLAB-EVENTOS e MATLAB-GALG será uma mais-valia no sentido de tornar a sua aplicação mais fácil. Por sua vez, o WaveBunny, tem potencial para ser aplicado em ambiente real como ferramenta de monitorização de estruturas marítimas.

## Agradecimentos

Agradece-se ao projeto LIFE-GARACHICO (LIFE20 CCA/ES/001641) e ao programa e projeto de investigação do LNEC E2I – SAFEPOR e WISER, respetivamente.

## Referências

- Fortes, C.J.E.M., Santos, L. (2021). "Programa MATLAB-GALG para cálculo do volume de galgamento e caudal médio galgado".
- Joaquim, J. (2025). "Programa Python de aplicação da metodologia *TimeStack* para cálculo do número de eventos e alcance do galgamento em obras marítimas". Tese de licenciatura em Eng. Informática, Faculdade Nova de Lisboa.
- Lemos, R. (2024). "Programa MATLAB-EVENTOS para avaliação dos eventos de galgamento".
- Lemos, R.; Fortes, C.J.E.M., Carvalho, M.; Andriolo, U. (2023). "TimeStack methodology applied to the assessment of run-up and overtopping in 2D and 3D scale model tests". Coastal and Offshore Science and Engineering (COSE) journal, 4/2023; 54-63.
- Pinheiro, L. (2019). "Programa MATLAB-ANALISYS para análise espectral e temporal da agitação marítima".