

Validação Experimental de um Modelo CFD para Previsão da Transmissão de Ondas em Quebra-mares Submersos de Geotubos

Adriano Henrique Tognato¹, Tiago Zenker Gireli² & Conceição Juana Fortes³

Resumo

Este trabalho apresenta a validação de um modelo de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para a previsão da transmissão de ondas em quebra-mares submersos construídos com geotubos. A validação foi realizada pela comparação entre os coeficientes de transmissão de ondas (K_t) obtidos em simulações numéricas e em ensaios físicos em escala geométrica 1:20, conduzidos no Canal de Ondas Irregulares 2 (COI2) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Foram avaliados 96 cenários com estrutura, abrangendo seis configurações geométricas e diferentes combinações de altura de onda incidente (H_i), borda livre (R_c) e profundidade local (h). O modelo numérico foi desenvolvido no software FLOW-3D® HYDRO, com abordagem RANS-VOF, modelo de turbulência RNG e rastreamento da superfície livre pelo método *Volume of Fluid*. Os resultados indicaram elevada concordância entre os modelos físico e numérico, com R^2 de 0,9848, REQM de 0,0349 e EPAM de 4,90%. A análise por submergência relativa mostrou maiores desvios nas condições de menor submergência, associadas à maior complexidade da interação onda-estrutura. A comparação qualitativa também evidenciou comportamento semelhante entre os modelos quanto ao emolamento, à turbulência e à quebra de onda. Os resultados confirmam a aplicabilidade do modelo CFD para análises hidrodinâmicas de quebra-mares submersos de geotubos.

Palavras-Chave – Quebra-mar submerso, Modelo CFD, Modelo Físico, Transmissão de Ondas.

Abstract

This study presents the validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD) model for predicting wave transmission over submerged breakwaters constructed with geotextile tubes. Validation was performed through comparison between wave transmission coefficients (K_t) obtained from numerical simulations and physical model tests conducted at a 1:20 geometric scale in the Irregular Wave Flume 2 (COI2) at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC). A total of 96 structural scenarios were evaluated, comprising six geometric configurations and different combinations of incident wave height (H_i), freeboard (R_c), and local water depth (h). The numerical model was developed in FLOW-3D® HYDRO using a RANS-VOF approach, the RNG turbulence closure, and free-surface tracking through the Volume of Fluid method. The results showed strong agreement between the physical and numerical models, with $R^2=0.9848$, RMSE = 0.0349, and MAPE = 4.90%. The analysis according to relative submergence indicated larger deviations under low-submergence conditions, which were associated with the increased complexity of wave-structure interaction. Qualitative comparisons also revealed similar behaviour between the models regarding wave shoaling over the structure, turbulence intensification, and wave breaking. The results confirm the applicability of the CFD model to the hydrodynamic assessment of submerged geotextile tube breakwaters.

Keywords – Submerged breakwaters, CFD model, Physical modeling, Wave transmission.

INTRODUÇÃO

1) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (a208330@dac.unicamp.br)

2) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (zenker@unicamp.br)

3) LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente -DHA, Portugal(cjfortes@lnec.pt)

Quebra-mares submersos são estruturas amplamente empregadas para proteger áreas costeiras da energia das ondas e restaurar praias afetadas pelo processo erosivo. Sua utilização é comum em várias regiões do mundo, pois possuem um processo construtivo relativamente simples e podem ser constituídos por uma ampla variedade de materiais (Elias; Shirlal, 2022). Quebra-mares construídos com geotubos são classificados como estruturas de “engenharia leve” pelo menor impacto ambiental em relação a obras com enrocamento de rocha ou blocos de concreto armado (Pilarczyk, 2000). Entre as vantagens construtivas, destaca-se o preenchimento in situ dos geotubos por bombeamento hidráulico com areia da própria praia, preservando as características sedimentares locais (Ten Voorde *et al.*, 2009). Além disso, a fabricação de geotubos em tamanhos padronizados resulta em unidades de armadura uniformes, o que reduz o custo financeiro por unidade de volume e encurta o prazo de obra (Pilarczyk, 2008).

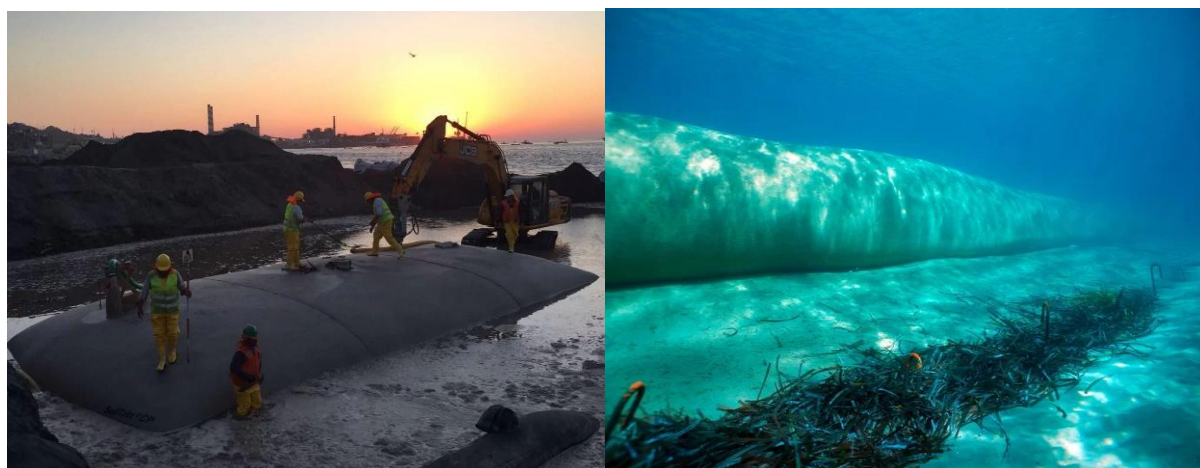


Figura 1: Quebra-mares submersos construídos com geotubos.

Fonte: (HUESKER 2026).

Apesar das supracitadas vantagens, uma revisão apresentada por Bar e Drimer (2023) indica que este tipo de estrutura, em muitos, projetos apresentaram desempenho insatisfatório. Em grande parte, devido ao subdimensionamento. Os autores sugerem que a ineficiência observada nos projetos avaliados é oriunda da utilização de parâmetros empíricos de dimensionamento inadequados, dado que grande parte dos projetos foram desenvolvidos utilizando parâmetros empíricos concebidos para outros tipos de materiais. Deste modo, o principal obstáculo a ser superado para a utilização deste tipo de estrutura costeira de proteção é a necessidade de ferramentas de dimensionamento e análise de desempenho adequadas (Fitriadhy *et al.*, 2023).

O desempenho de um quebra-mar submerso é comumente avaliado pelo coeficiente de transmissão (K_t), parâmetro adimensional que expressa a razão entre a altura de onda a sotamar e a barlarar da estrutura, quanto menor o valor de (K_t), maior a atenuação de energia provocada pela estrutura (Lara *et al.*, 2006). De acordo Pilarczyk (2000), o dimensionamento hidrodinâmico de quebra-mares submersos basicamente consiste no estudo da variação do coeficiente de transmissão (K_t), dado uma altura de ondas incidentes (H_i), em função da variação de importantes parâmetros de projeto como a borda livre em relação a crista (R_c), a largura da crista (c_w), profundidade de submersão (h) e a inclinação do talude da estrutura ($\cot \alpha$).

Como a interação hidrodinâmica-estrutura é complexa, as transformações de ondas que ocorrem sobre e ao redor quebra-mares submersos como transmissão, quebra, reflexão e refração dificilmente podem ser previstas sem o apoio de ferramentas de modelagem física ou numérica (Higuera *et al.*, 2023).

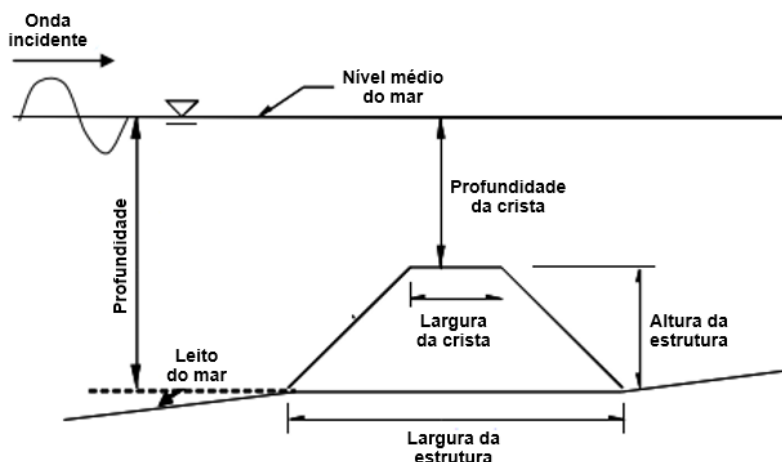


Figura 2: Parâmetros básico de projeto para quebra-mares submersos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Como a interação hidrodinâmica-estrutura é complexa, as transformações de ondas que ocorrem sobre e ao redor quebra-mares submersos como transmissão, quebra, reflexão e refração dificilmente podem ser previstas sem o apoio de ferramentas de modelagem física ou numérica (Higuera *et al.*, 2023).

Embora os modelos físicos sejam fundamentais para a compreensão dos processos costeiros, sua aplicação em estudos de grande escala enfrenta limitações relacionadas à dinâmica do protótipo em escala reduzida, além de custos e tempo elevados (Hughes, 1993; Van der Meer, 2005). Nesse contexto, a modelagem numérica consolidou-se como uma ferramenta eficaz, oferecendo maior flexibilidade e eficiência na representação de diferentes cenários (Higuera *et al.*, 2023). Ainda assim, a validação dos resultados numéricos em casos limite, por meio de modelos físicos ou de medições de campo, permanece essencial para assegurar sua confiabilidade.

Esse contexto fomentou o desenvolvimento de tanques de ondas numéricos (*Numerical Wave Tanks* - NWTs), desenvolvidos para simular de forma confiável a interação entre estruturas e hidrodinâmica costeira. O tanque de ondas deve ser capaz de simular: transformações de ondas, arraste de ar, turbulência, interação fluido-estrutura, fluxo multifásico etc. Para isso, é preciso resolver as equações de Navier-Stokes, que descrevem o fluxo viscoso e rotacional (Dentale *et al.*, 2018). A técnica computacional empregada para solucionar essas equações é conhecida como Fluidodinâmica Computacional (em inglês, *Computational Fluid Dynamics* - CFD).

Diante da necessidade de verificar a capacidade preditiva de modelos numéricos aplicados a quebra-mares submersos de geotubos, este trabalho tem como objetivo validar experimentalmente um modelo de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para a previsão da transmissão de ondas. Para isso, foram consideradas seis configurações geométricas, definidas a partir da variação da largura de crista (cw) e da altura da estrutura ($hstr$), resultando em diferentes inclinações de talude ($\cot \alpha$). Os cenários foram submetidos a distintas condições hidrodinâmicas, caracterizadas pela altura de onda incidente (H_i), borda livre (R_c) e profundidade local (h). O desempenho do modelo foi avaliado pela comparação entre os coeficientes de transmissão de ondas (K_t) oriundos das simulações CFD, e aqueles medidos em ensaios físicos em escala reduzida.

Para esse fim, o domínio numérico foi configurado para reprodução dos cenários ensaiados em canal de ondas, incluindo a geometria das estruturas, as condições hidrodinâmicas e as posições de medição. A correspondência entre os modelos permite verificar a capacidade do CFD de representar os processos de transformação e transmissão de ondas sobre as estruturas, fornecendo

respaldo à sua aplicação em análises hidrodinâmicas de quebra-mares submersos de geotubos (Dentale *et al.*, 2018). Além disso, a integração entre modelagem física e numérica expande a compreensão desses processos e contribui para o aprimoramento de modelos aplicados ao dimensionamento de estruturas costeiras (Didier *et al.*, 2017).

MÉTODO:

A modelagem é uma ferramenta poderosa para o entendimento e análise de processos e de sistemas complexos, possibilitando o estudo e avaliação de situações, ou casos de difícil reprodução. Na engenharia a expressão “modelo” é usada para descrever a simulação de protótipos que visam antever os efeitos do projeto ou esquema proposto, transformando dados de entrada (geometria, condições de contorno, força, etc.) em dados de saída (vazões, níveis, pressões, etc.), notabilizando a técnica como uma ferramenta indispensável para tomadores de decisão em diversas áreas, capaz de produzir soluções técnicas e econômicas de forma otimizada em um mundo de crescente competitividade (Versteeg; Malalasekera, 2007).

Modelo Físico – Canal de Ondas:

Foram definidas seis configurações geométricas distintas de quebra-mares submersos, a partir da variação da largura de crista (cw), da largura de base (B) e da altura da estrutura (hstr). A largura de crista varia entre 5 e 20 m, enquanto a largura de base (B) situa-se entre 15 e 25 m. As alturas das estruturas (hstr) variam de 4,10 a 6,15 m, em função do número de camadas sobrepostas de geotubos. Cada geotubo possui dimensões de 5 m de largura e 2,05 m de altura, o que permite a configuração modular das seções estruturais. As diferentes combinações de empilhamento influenciam diretamente a inclinação do talude (cot α): estruturas com duas camadas verticais apresentam inclinação de aproximadamente 50°, enquanto aquelas com três camadas resultam em inclinação próxima de 45°. A figura a seguir ilustra as configurações de quebra-mares ensaiadas.

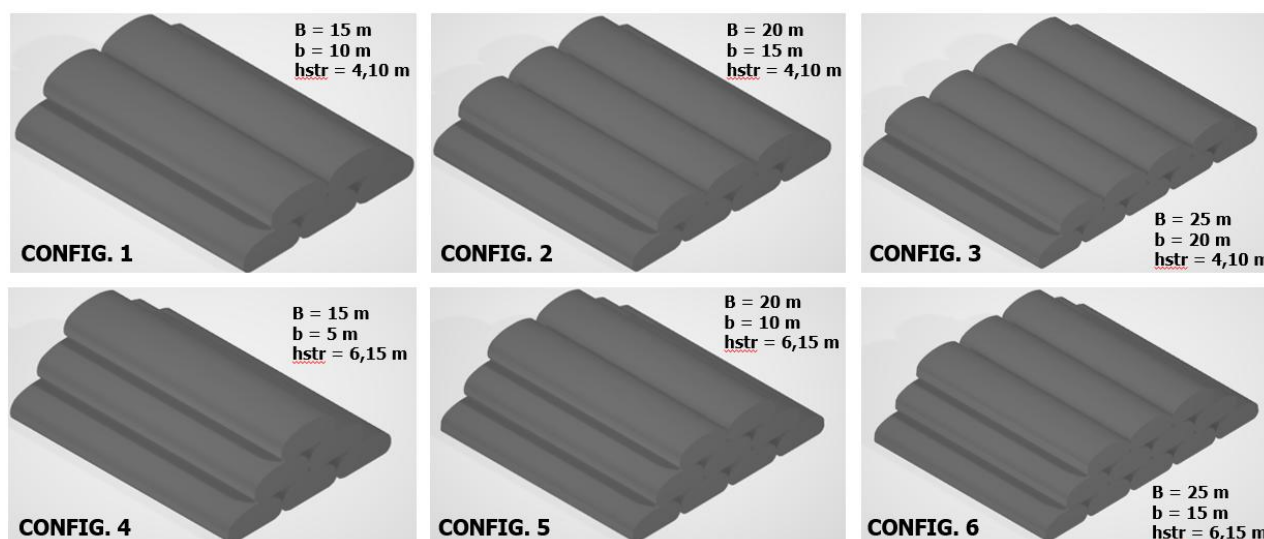


Figura 3: Configurações de quebra-mar submerso de geotubos adotadas.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados Canal de Ondas Irregulares 2 (COI2), do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Laboratório Nacional de Engenharia (LNEC), localizado em Lisboa, Portugal. As alturas de onda variam de 1 a 4 metros, o período é de 10 segundos e as submergências variam entre 0 e 1,5 vezes a altura de onda incidente (H_i). A escala adotada no modelo é 1:20.



Figura 4: Ensaios no COI2 LNEC.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para isolar o efeito da estrutura na transmissão de ondas, desconsiderando a dissipação associada ao fundo do canal, o coeficiente de transmissão (K_t) foi determinado com base na razão entre alturas de onda medidas na mesma posição. Assim, (K_t) foi calculado como a razão entre a altura média de onda ($H_{méd}$) registrada na Sonda 6 (S6) com a estrutura instalada e a altura média medida na mesma sonda na condição sem estrutura. Dessa forma, garante-se que a comparação reflita exclusivamente a influência da presença do quebra mar.

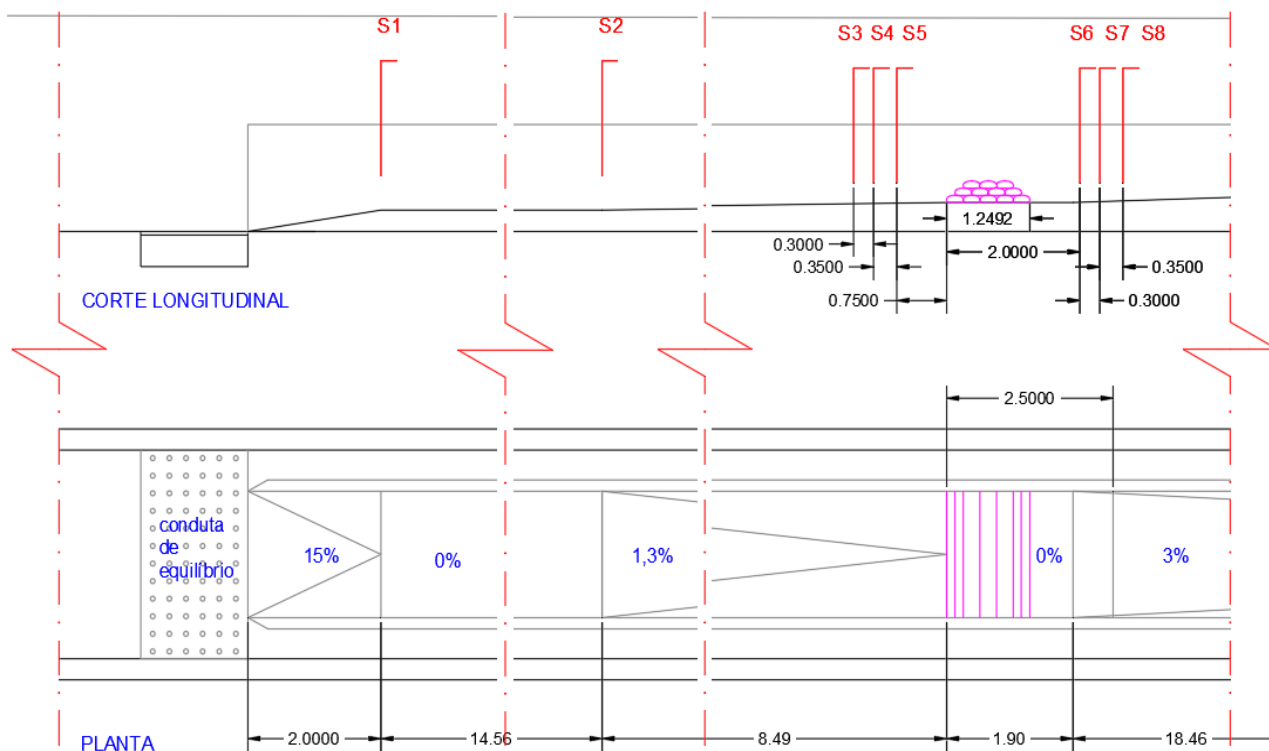


Figura 5: Dimensões do canal de ondas desenvolvido para as simulações.

Fonte: elaborado pelo autor.

Cada cenário hidrodinâmico foi definido pela combinação de quatro valores de altura de onda incidente (H_i), quatro condições de borda livre (R_c) e duas alturas de estrutura (h_{str}), que, por sua vez, influenciam a profundidade local (h), totalizando 32 cenários distintos sem a presença da estrutura. Para cada um desses cenários, foram simuladas três configurações geométricas distintas de quebra mar, associadas a cada altura de estrutura, resultando em 96 cenários com estrutura. No total, foram analisados 128 cenários no modelo físico.

Tabela 1: Parâmetros adotados e composição dos cenários simulados (modelo experimental e CFD).

Grupo de cenários	Parâmetro ou configuração	Valores adotados
Condições de onda	Altura de onda incidente, H_i	1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 m
Condições de submergência	Borda livre, R_c	0,10 m; 0,50 m; 1,0 H_i ; 1,5 H_i
Configuração vertical	Altura da estrutura, h_{str}	4,10 e 6,15 m
Configuração horizontal	Geometria do quebra-mar	Três configurações para cada h_{str}
Cenários sem estrutura	Combinação de H_i , R_c e h_{str}	$4 \times 4 \times 2 = 32$ cenários hidrodinâmicos
Cenários com estrutura	Cenários hidrodinâmicos + estrutura	$32 \times 3 = 96$ cenários

Modelo Numérico – CFD:

A modelagem numérica do escoamento foi realizada com o software FLOW-3D® HYDRO 2023 desenvolvido pela Flow Science Inc. O software oferece uma ampla gama de modelo físicos e opções de solução numérica. De acordo com Dentale *et al.* (2018), o procedimento de modelagem que apresenta os melhores resultados em simulações de tanque de ondas, que visam o estudo da interação fluido-estrutura, é conhecido como RANS-VOF. Logo, o procedimento adotado envolve a solução das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (em inglês, *Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS) utilizando o Método de Volumes Finitos (MVF) em uma malha estruturada no plano cartesiano. Para solucionar o problema de fechamento das equações RANS é utilizado o modelo de turbulência RNG. A superfície livre é rastreada pelo modelo multifásico VOF (*Volume of Fluid Method*), desenvolvido por Hirt e Nichols (1981).

Neste trabalho, a malha computacional foi definida a partir de testes de sensibilidade, com o objetivo de estabelecer um equilíbrio adequado entre a incerteza numérica e o custo computacional. A configuração adotada resultou em um total de 5.304.000 células, com dimensões uniformes de (ΔX , ΔY , $\Delta Z = 0,50$ m). Além da configuração de fenômenos físicos fundamentais, como gravidade, viscosidade e turbulência, foi incorporado o modelo de arraste de ar, em função da ocorrência de processos de ar associados à quebra de ondas. A condição de contorno do tipo “waves” foi aplicada na entrada do domínio computacional (X_{min}) e como condição inicial. Na saída (X_{max}), foi implementada uma camada absorvedora com o objetivo de minimizar reflexões indesejadas. Na superfície superior (Z_{max}), adotou-se a condição de pressão atmosférica, e, na base do domínio (Z_{min}), foram definidas as propriedades representativas do fundo do canal.

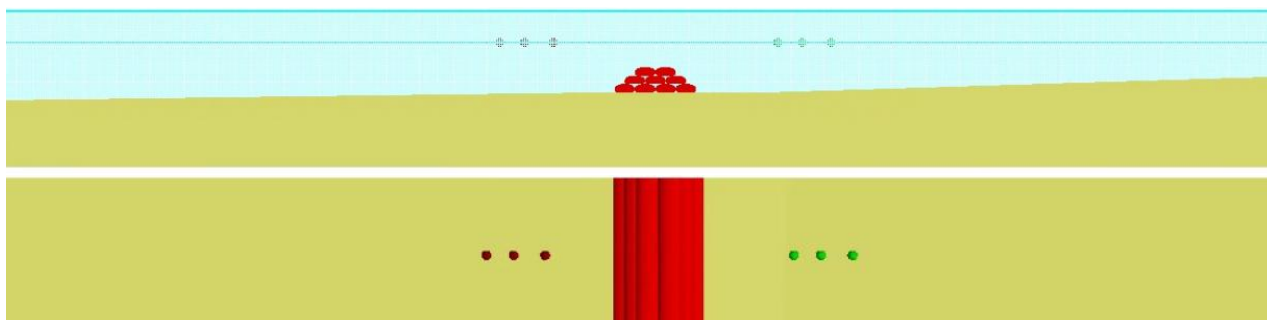


Figura 6: Reprodução do COI2 dentro do modelo CFD.

Fonte: elaborado pelo autor.

Foram posicionadas oito sondas de medição no modelo CFD, nas mesmas coordenadas adotadas no modelo físico, garantindo a comparabilidade direta dos resultados. O coeficiente de transmissão (K_t) obtido nas simulações numéricas foi determinado a partir do mesmo procedimento aplicado aos dados do modelo físico, assegurando consistência metodológica entre as abordagens. A validação do modelo CFD foi realizada por meio da comparação entre os valores de K_t obtidos em ambos os modelos, sendo avaliadas as diferenças absolutas e relativas, expressas em termos percentuais. Tais resultados são apresentados na sequência.

Adicionalmente, foi realizada uma análise dos erros de previsão em função da submergência relativa, expressa pela razão (R_c/H_i). Para cada cenário, foi calculado o resíduo assinado, definido por $(K_{t_CFD} - K_{t_Físico})$ e o erro absoluto, correspondente a $|K_{t_CFD} - K_{t_Físico}|$. Valores positivos de resíduo indicam superestimação da transmissão pelo modelo numérico, enquanto valores negativos indicam subestimação. Os resultados foram agrupados conforme as faixas discretas de (R_c/H_i) avaliadas e analisados separadamente para as estruturas com ($h_{str} = 4,10$) m e ($h_{str} = 6,15$) m. Por fim, foi realizada uma verificação visual qualitativa da ocorrência de empolamento e quebra de ondas sobre as estruturas. Para cenários representativos, foram comparadas as imagens e os registros de superfície livre obtidos no modelo físico com as configurações instantâneas simuladas no modelo CFD, buscando verificar a correspondência entre as duas abordagens.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A avaliação do desempenho do modelo CFD em reproduzir a transmissão de ondas foi conduzida a partir do cálculo da raiz do erro quadrático médio (REQM) e do erro percentual absoluto médio (EPAM), permitindo quantificar, respectivamente, a grandeza média das diferenças e a diferença percentual média entre os resultados numéricos e experimentais. Os resultados obtidos foram de REQM igual a 0,0349 e EPAM igual a 4,90%. A Figura 7 exibe gráfico de dispersão com linha de identidade (1:1), em laranja, que indica elevada concordância entre os coeficientes de transmissão (K_t) obtidos pelo modelo CFD e pelo modelo físico, com os pontos concentrados próximos à linha de concordância.

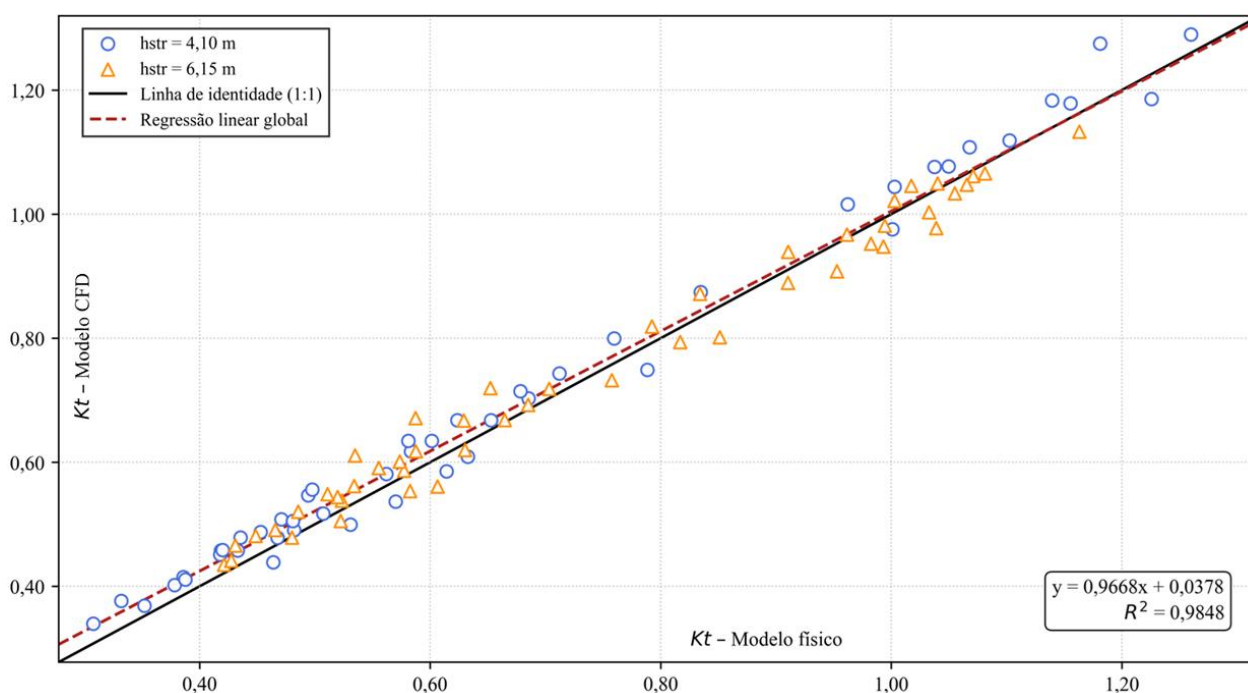


Figura 7: Gráfico de dispersão (Modelo CFD x Modelo Físico).

A linha de tendência ($y = 0,9668x - 0,0378$) traduz uma boa aderência do modelo numérico, com leve tendência à subestimação em valores menores de K_t . O elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9848$) reforça a forte correlação entre os dados, indicando que o modelo CFD reproduz adequadamente o comportamento observado experimentalmente.

As Figuras 8 e 9 permitiram identificar com maior clareza em quais condições a previsão numérica se afasta mais dos resultados físicos. De modo geral, os maiores erros médios concentraram-se nas faixas de menor submersão relativa, com destaque para $R_c / H_i = 0,025$, exibido na Figura 9, referente a $h_{str} = 6,15$ m.

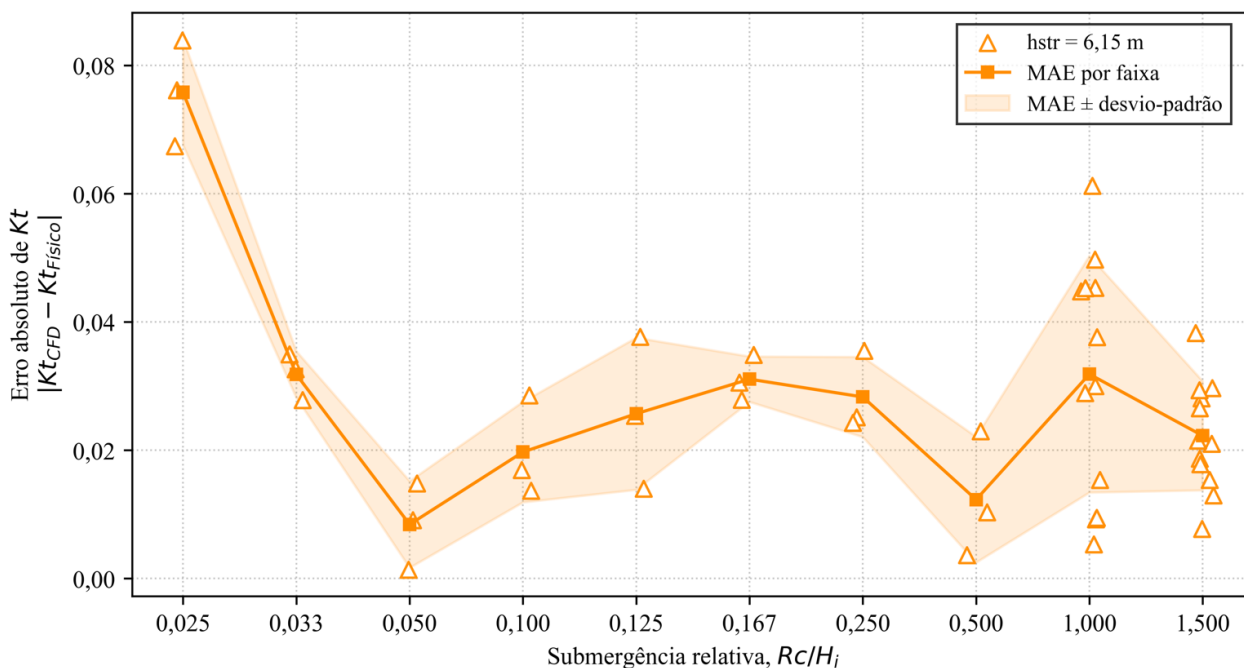


Figura 8: Distribuição de erro absoluto. Cenários com $h_{str} = 6,15$ m.

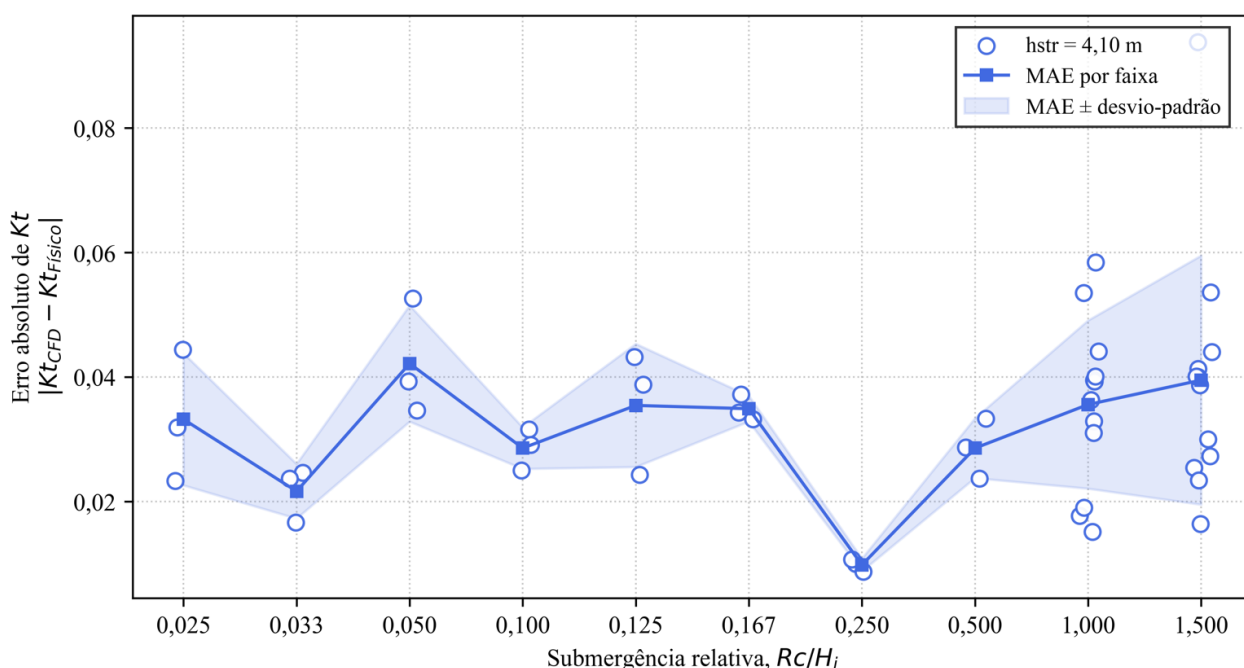


Figura 9: Distribuição de erro absoluto. Cenários com $h_{str} = 4,10$ m.

Nos cenários com $h_{str} = 4,10$ m, os erros médios são mais distribuídos entre as faixas, embora também se observem valores mais elevados nas menores submergências e maior dispersão em $R_c / H_i = 1,00$ e $1,50$. Esses resultados indicam que a previsão se torna mais sensível quando a crista da estrutura está próxima da superfície livre, pois a interação onda–estrutura envolve simultaneamente transmissão, reflexão, turbulência, galgamento, empolamento e possíveis processos de quebra sobre a crista. Ainda assim, os erros permanecem limitados e o modelo reproduz adequadamente a tendência global observada nos ensaios físicos. Esse comportamento é compatível com o indicado por Calabrese *et al.* (2008), que destacam que diferentes condições de submergência relativa podem alterar significativamente os processos de transformação e transmissão de ondas.

Por fim, nos ensaios experimentais foi verificado comportamento de interação onda–estrutura semelhante ao reproduzido pelo modelo CFD. Nas condições em que a crista se aproximou da superfície livre, observou-se o empolamento da onda sobre a estrutura, acompanhado pela intensificação da turbulência e, em alguns casos, pela ocorrência de quebra sobre ou imediatamente a jusante do quebra-mar submerso. Embora as limitações de espaço deste artigo de congresso não permitam detalhar todos os cenários e condições avaliados, as Figuras 11 e 12 apresentam exemplos representativos dessa dinâmica, reforçando a coerência qualitativa entre o modelo físico e as simulações numéricas.

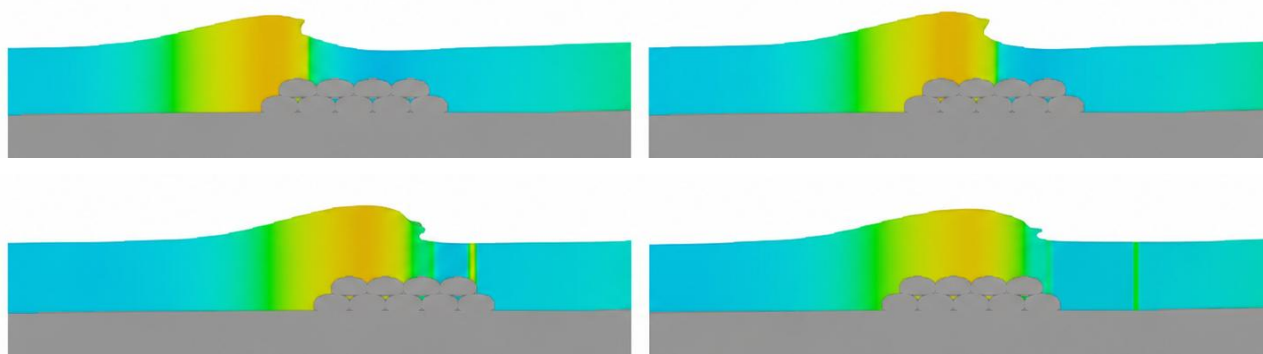


Figura 11: Empolamento e quebra de onda gerada pelo quebra-mar submerso. Modelo CFD.

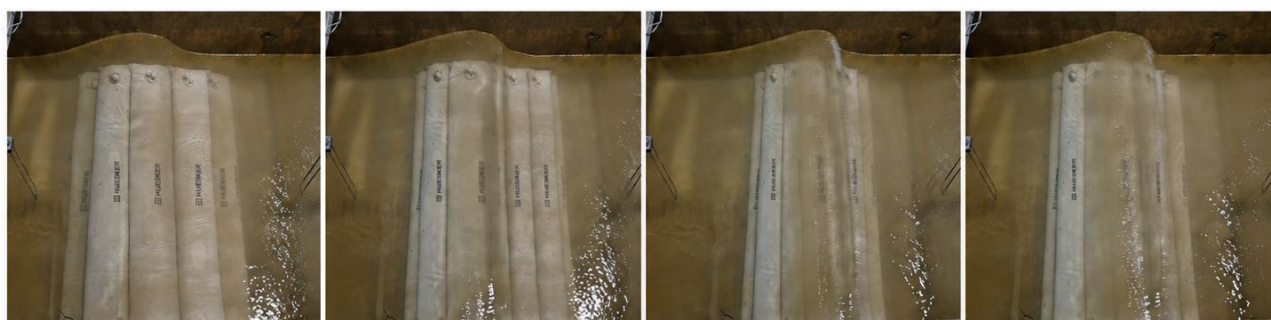


Figura 12: Empolamento e quebra de onda gerada pelo quebra-mar submerso. Modelo Experimental.

CONCLUSÕES:

Este trabalho validou experimentalmente um modelo CFD para a previsão da transmissão de ondas em quebra-mares submersos construídos com geotubos. A metodologia considerou 96 cenários com estrutura, abrangendo seis configurações geométricas e diferentes combinações de altura de onda incidente, borda livre e profundidade local, reproduzidos numericamente a partir das condições estabelecidas nos ensaios físicos realizados no COI2 do LNEC Portugal. A comparação entre os coeficientes de transmissão obtidos no modelo físico e nas simulações CFD demonstrou elevada

concordância, evidenciada pelo coeficiente de determinação de $R^2=0,9848$, REQM de 0,0349 e EPAM de 4,90%. A proximidade dos resultados em relação à linha de identidade indica que o modelo numérico representa adequadamente a tendência global de transmissão de ondas observada experimentalmente.

A análise dos erros por faixas de submergência relativa mostrou que os maiores desvios tendem a ocorrer nas condições de menor submergência, nas quais a crista da estrutura se aproxima da superfície livre. Nessas situações, o processo de interação onda–estrutura torna-se mais complexo, envolvendo empolamento, reflexão, intensificação da turbulência e quebra de onda sobre ou imediatamente a jusante do quebra-mar submerso. Ainda assim, os erros permaneceram baixos ao longo dos cenários avaliados, corroborando a qualidade representativa do modelo numérico.

A verificação qualitativa reforçou a consistência do modelo, uma vez que os padrões de interação onda–estrutura observados nos ensaios experimentais foram semelhantes aos reproduzidos nas simulações CFD. Dessa forma, o modelo desenvolvido mostra-se confiável para avaliar o desempenho hidrodinâmico de quebra-mares submersos de geotubos, contribuindo para a compreensão dos mecanismos de transmissão de ondas e para o desenvolvimento futuro de metodologias de pré-dimensionamento dessas estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) pela disponibilização do canal de ondas irregulares, fundamental para a realização dos ensaios experimentais.

A Flow Science Inc. pela licença de pesquisa acadêmica do software FLOW-3D® HYDRO 2023 R2 utilizada na modelagem numérica. A HUESKER BRASIL pela confecção e fornecimento dos geotubos em escala 1:20 utilizadas na modelagem física dos quebra-mares submersos.

REFERÊNCIAS

- BAR, D; DRIMER, N. Preliminary Design Tools for Hydrodynamic Aspects of Submerged Impermeable Breakwaters. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 236, 2023.
- CALABRESE, M; BUCCINO, M; PASANISI, F. Wave breaking macrofeatures on a submerged rubble mound breakwater. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 1, n. 3-4, p. 216-225, 2008.
- DENTALE, F. *et al.* A CFD approach to rubble mound breakwater design. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 10, n. 5, p. 644–650, 2018.
- DIDIER, E; TEIXEIRA, P; NEVES, M. G. Desenvolvimento de um tanque de ondas numérico RANS-VOF 3D para aplicações em engenharia costeira e marítima. nov. 2017.
- ELIAS, T; SHIRLAL, K. G. Preliminary investigation on stability and hydraulic performance of geotextile sand container breakwaters filled with sand and cement. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 15244, 9 set. 2022.
- FITRIADHY, A. *et al.* 3D Computational Fluid Dynamic Investigation on Wave Transmission behind Low-Crested Submerged Geo-Bag Breakwater. **CFD Letters**, v. 15, n. 10, p. 12–22, 2023.
- FLOW 3D. **Flow 3D HYDRO – User Manual**. Estados Unidos: Flow Science Inc., 2023.
- HIGUERA, P. *et al.* Advances In coastal and ocean engineering: Numerical modeling of water waves in coastal and ocean engineering. 2023.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.
- HUESKER BRASIL LTDA. SoilTain®: soluções de proteção costeira. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.huesker.com.br/geossinteticos/produtos/formas-texteis/soiltain-solucoes-de-protecao-costeira/>. Acesso em: 5 maio 2026.
- LARA, J. L; GARCIA, N; LOSADA, I. J. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. **Coastal Engineering**, v. 53, n. 5–6, p. 395–417, 2006.
- PILARCZYK, K. W. **Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering**. [s.l.] CRC Press, 2000.
- PILARCZYK, K. W. Alternatives for coastal protection. **Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 23, p. 181-188, 2008.
- SHARIFAHMADIAN, A. **Numerical Models for Submerged Breakwaters: Coastal Hydrodynamics and Morphodynamics**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2015.
- TEN VOORDE, M; DO CARMO, J. S. A; NEVES, M. G. Designing a preliminary multifunctional artificial reef to protect the Portuguese coast. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n. 1, p. 69-79, 2009.
- VAN DER MEER, J. W. *et al.* Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. **Coastal Engineering**, v. 52, n. 10-11, p. 915-929, 2005.
- VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson Education, 2007.