

Influência da elevação do nível do mar na eficiência de quebra-mares submersos

Patricia Strasser Scheltinga¹, Elisa Cabral Terra², Patrícia Dalsoglio Garcia³ & Tiago Zenker Gireli⁴

Resumo

As mudanças climáticas intensificam os processos erosivos nas praias com o aumento de eventos de ressaca e elevação do nível do mar. Nesse contexto, quebra-mares são frequentemente empregados como medida de mitigação. Entre as alternativas, os quebra-mares submersos têm ganhado destaque por preservarem a paisagem e permitirem a circulação de água sobre a estrutura. Contudo, a sobre-elevação é prejudicial para a eficiência do quebra-mar submerso, e a literatura clássica concentra-se, em grande parte, em recifes submersos com cristas de largura considerável. Paralelamente, estruturas de menores dimensões vêm sendo cada vez mais adotadas para enfrentar a erosão em diferentes trechos do litoral. Assim, é importante compreender a eficiência dessas soluções bem como sua performance diante das mudanças climáticas. Com isto, o estudo avaliou a eficiência de quebra-mares submersos e esbeltos sob diferentes submergências, comparando coeficientes de transmissão obtidos no Mike 21 com equações empíricas da literatura. Observou-se correlação linear entre submergência e altura de onda no tardo: quanto maior a submergência, menor a redução de ondas. O equacionamento de Yoshioka *et al.*, (1993) estimou, em geral, coeficientes de transmissão menores que os da modelagem, indicando eficiência superestimada. Já o ábaco de Hirose *et al.*, (2002) apresentou coeficientes maiores que os do modelo, com aproximação progressiva conforme a submergência aumentava, coincidindo para a submergência de 1,4 m. Desse modo o estudo visa subsidiar estudos futuros sobre dimensionamento de quebra-mares submersos e esbeltos que considerem além da situação de maré atual, mas também a projeção do nível do mar futuro.

Palavras-Chave – Quebra-mar submerso, mudança climática, coeficiente de transmissão, elevação do nível do mar.

Abstract

Climate change intensifies erosive processes on beaches with the increase in storm surge events and sea level rise. In this context, breakwaters are frequently employed as a mitigation measure. Among the alternative's, submerged breakwaters have gained prominence for preserving the landscape and allowing water circulation over the structure. However, over-elevation is detrimental to the efficiency of submerged breakwaters, and the classic literature largely focuses on submerged reefs with crests of considerable width. In parallel, smaller structures are increasingly being adopted to address erosion in different stretches of the coastline. Thus, it is important to understand the efficiency of these solutions as well as their performance in the face of climate change. Therefore, this study evaluated the efficiency of submerged and slender breakwaters under different submergence conditions, comparing transmission coefficients obtained in Mike 21 with empirical equations from the literature. A linear correlation was observed between submergence and wave height at the back end: the greater the submergence, the smaller the wave reduction. The equation by Yoshioka *et al.*, (1993) generally estimated transmission coefficients lower than those of the model, indicating overestimated efficiency. However, the nomogram by Hirose *et al.*, (2002) showed coefficients higher than those of the model, with progressive approximation as submergence increased, coinciding at a submergence of 1.4 m. Therefore, this study aims to support future studies on the design of submerged and slender breakwaters that consider not only the current tidal situation but also the projection of future sea levels.

Keywords – Submerged breakwaters, climate change, transmission coefficient, sea level rise.

1) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (19) 3521-2069 (p226104@dac.unicamp.br)

2) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (19) 3521-2069 (e196352@dac.unicamp.br)

3) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (19) 3521-2069 (pdgarcia@unicamp.br)

4) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (19) 3521-2069 (zenker@unicamp.br)

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas levam a elevação do nível do mar e aumento da ocorrência de ressacas que comprometem a segurança da população costeira e alavanca prejuízos financeiros às comunidades e aos portos (Klein *et al.*, 2016 e Mongor *et al.*, 2017). Os processos erosivos são intensificados (Willians *et al.*, 2018), sendo que 24% das praias arenosas no mundo sofrem com erosão costeira e no Brasil em torno de 40% das praias possuem algum grau de erosão (Luijendijk *et al.*, 2018; MMA, 2018).

A gestão costeira vem como estratégia para gerir o financiamento, a legislação e guiar a tomada de decisão para a mitigação desses processos costeiros, de modo considerar a análise custo-benefício das ações (Cooper e McKenna, 2008). Dentro das propostas de mitigação há a implantação de obras de proteção costeira que a escolha correta e o dimensionamento são relevantes para o sucesso da obra, sendo que a escolha depende das características da região. Entre as obras de proteção há os quebra-mares submersos que se mostraram eficazes em diversas regiões para mitigar a erosão e reduzir a altura de onda (Garcia; Gireli, 2023; Rambabu; Mani, 2005).

O desempenho dos quebra-mares submersos está associado a capacidade de dissipar a energia de onda e assim proteger a costa. Então, o coeficiente de transmissão (K_t) de onda vem como parâmetro para auxiliar projetos, à medida que quantifica a capacidade da redução da onda incidente ao calcular o coeficiente de transmissão como altura significativa de onda no tardo da obra (H_t) dividido pela altura de onda incidente (H_i), varia de $0 < K_t < 1$, onde um valor de 0 implica em nenhuma transmissão (alta, impermeável) e um valor de 1 implica em transmissão completa (sem quebra-mar) (Pilarczyk, 2003). O esquema de quebra-mar submerso e a redução de onda está apresentado na Figura 1.

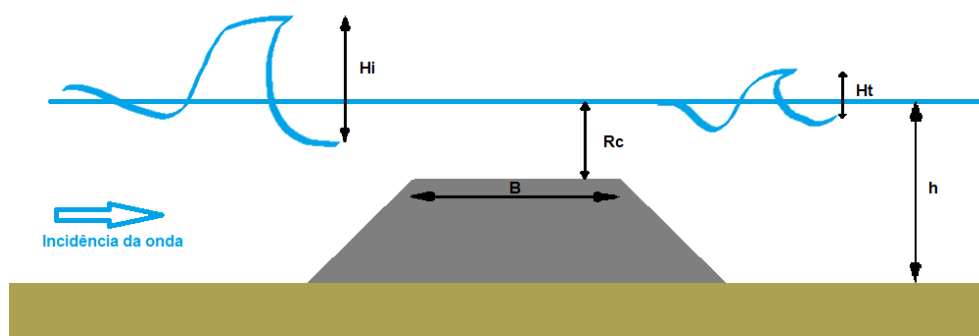


Figura 1 – Características de transmissão.
Fonte: Scheltinga (2026).

Diversos estudos para quebra-mares submersos sobre redução de onda, cálculo de coeficiente de transmissão foram desenvolvidos, entre estes estudos os de Van der Meer *et al.*, 2005, Hirose *et al.*, 2002, Yoshioka *et al.*, (1993) e Uda (1988), em que a submersão do quebra-mar influencia na eficiência deste em reduzir a energia das ondas. Então, a elevação do nível do mar induz uma perda na funcionalidade da estrutura para o horizonte futuro. Diante disso, é necessário novas abordagem no dimensionamento das obras para que estas além de desempenhar seu papel de proteção, também considere as mudanças climáticas (Hassanpour *et al.*, 2024). A manutenção e adequação dos quebra-mares submersos diante da elevação do nível do mar torna-se relevante como estudo para garantir a sua eficiência (Stagnitti *et al.*, 2023). A adequação dos quebra-mares pode ser feita com o alteamento e alargamento da crista, sendo as obras flexíveis como geotubos mais favoráveis a adaptação da estrutura (Garcia *et al.*, 2023).

Neste contexto, o estudo teve como objetivo avaliar a perda da eficiência dos quebra-mares diante o aumento da sobre-elevação do mar, a fim de subsidiar estratégias de adaptação das obras diante das mudanças climáticas e de amparar projetos de quebra-mares submersos ao passo de considerar além da maré atual, mas também a projeção de subida do mar.

MÉTODOS

Diferentes submergências foram analisadas para o quebra-mar, conforme ilustrado na Figura 2, as características do quebra-mares analisado são de crista esbelta de 9 m de largura, posicionado a uma profundidade de 2,7 m e com cota de coroamento no nível 0,0 m estabelecido no modelo, também apresentado na Figura 2.

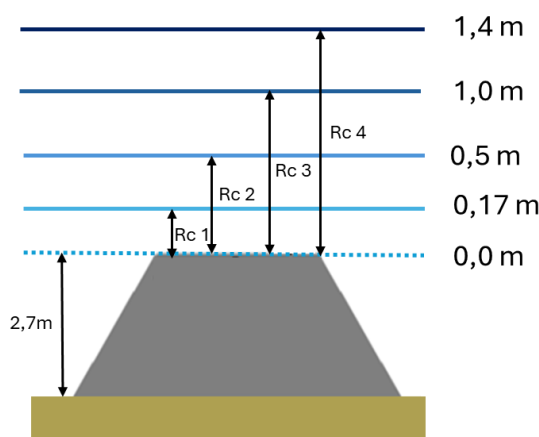


Figura 2 – Representação do quebra-mar e níveis d'água da água simulados.

As ondas de ataque são de aproximadamente 90° em relação a obra e a altura significativa de onda incidente é em torno de 1,7 m. As simulações que apresentam o comportamento das ondas no entorno do quebra-mar submerso foram realizadas com o programa Mike 21, desenvolvido e fornecido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI), em que foi utilizado o *Spectral Wave Module* (SW) com uma malha flexível capaz de representar o quebra-mar submerso.

Os resultados foram expostos em forma de mapas de altura significativa de onda e rumo. Além dos mapas, foram extraídos os resultados em dois pontos da altura significativa de onda, sendo o ponto A offshore para medir a onda incidente e o ponto B no tardo da obra, ambos os pontos estão próximos a região central do quebra-mar. Desta forma pretende-se que não haja influência de difração na altura da onda, ou que esta seja mínima, a fim de analisar somente a redução devido a transmissão da obra. Os pontos A e B estão representados na Figura 3.

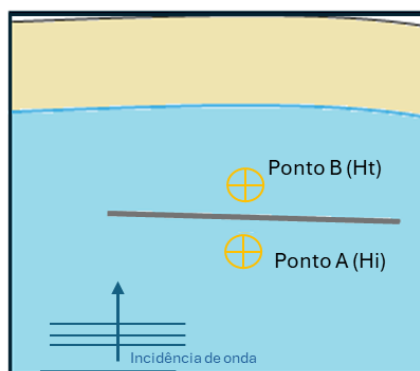
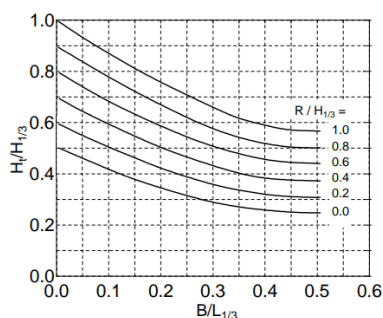
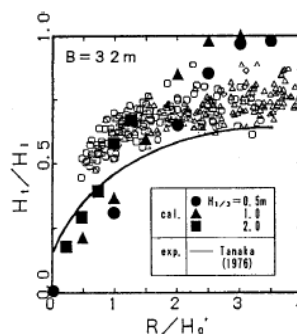


Figura 3 – Posição dos pontos de medição de onda incidente e no tardo do quebra-mar.

Com os valores de altura de onda no tardo da obra obtida no ponto B correlacionou estes com as submergências do quebra-mar. Além disso, foram utilizados os dados de altura de onda nos pontos A e B para os calculados dos K_t para as diferentes submergências. Por fim, estes valores de K_t foram comparados com os esperados pelos ábacos de Hirose *et al.*, (2002) e Yoshioka *et al.*, (1993) que estão expostos na Figura 4.



Hirose *et al.*, (2002)



Yoshioka *et al.*, (1993)

Figura 4 – Relação de transmissão.

Fonte: Hirose *et al.*, (2002) ; Yoshioka *et al.*, (1993).

O ábaco de Hirose *et al.*, (2002) apresenta as variáveis nos quais são coeficiente de transmissão ($K_t = H_t/H_{1/3}$) e o comprimento de onda relativo ($B/L_{1/3}$), em que H_t é a altura da onda no tardo da obra; $H_{1/3}$ é a altura significativa de onda; $L_{1/3}$ é o comprimento de onda ambas medidas no pé da obra; B é a largura da crista do quebra-mar; e R é a submergência da obra em relação ao nível d'água. O ábaco de Yoshioka *et al.*, (1993) apresenta no eixo x o coeficiente de transmissão como (H_t/H_i) em que um e H_i é a altura de onda incidente, e no eixo y é a relação entre a submergência (R) sobre a altura de onda em água profundas (H_0).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas de altura significativa de onda para diferentes submergências do quebra-mar estão expostos na Figura 5, e a relação entre a submergência e a onda no tardo do quebra-mar obtida com o Moledo do Mike 21 e a esperada pelos ábacos de Hirose *et al.*, (2002) e Yoshioka *et al.*, (1993) está apresentada na Figura 6.

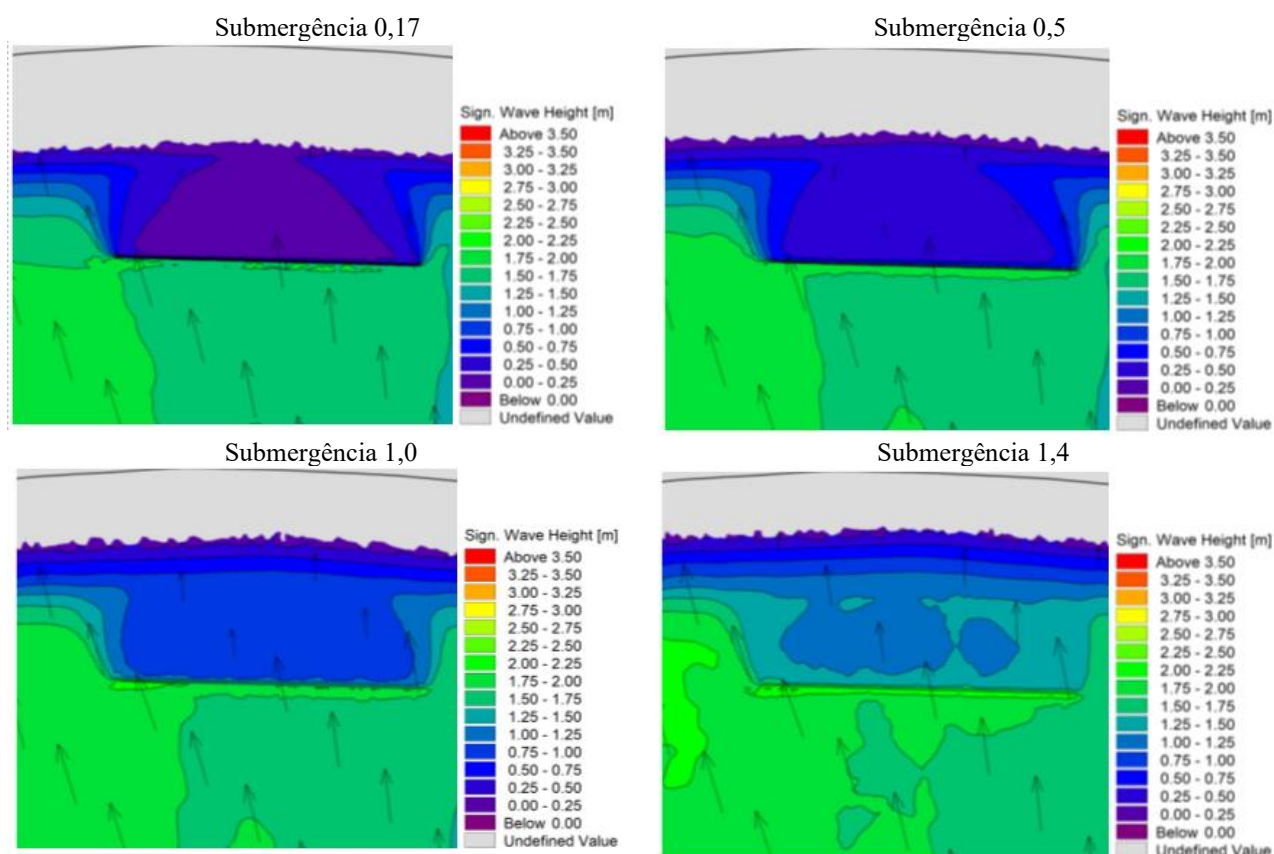


Figura 5 – Altura significativa de onda para o quebra-mar submerso em diferentes submergências.

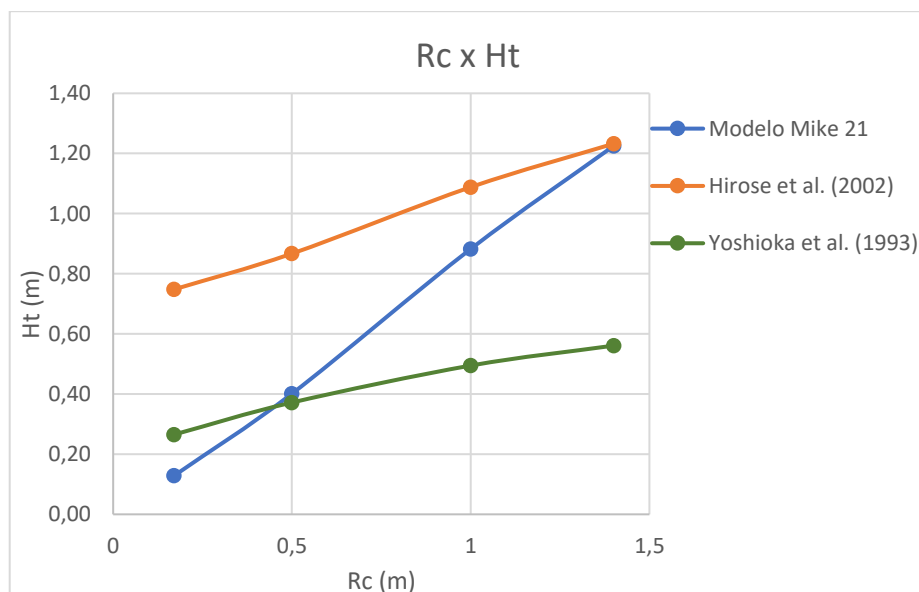


Figura 6 – Altura significativa de onda no tardo do quebra-mar em diferentes submergências.

Os valores obtidos de altura de onda no tardoz da obra e o coeficiente de transmissão tanto para a simulação no Mike 21, quanto para o esperado pelos ábacos estão apresentados respectivamente na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Altura de onda no tardoz da obra esperado por cada modelo para diferentes submergências.

Submergência	Ht (m)	Ht (m)	Ht
R (m)	Modelo Mike 21	Hirose <i>et al.</i> , (2002)	Yoshioka <i>et al.</i> , (1993)
0,17	0,13	0,75	0,27
0,5	0,40	0,87	0,37
1	0,88	1,09	0,49
1,4	1,23	1,23	0,56
Média Ht (m)	0,66	0,98	0,42

Tabela 2 – Coeficiente de transmissão para o quebra-mar em diferentes submergências.

Submergência	Ponto A	Kt	Kt	Kt
R (m)	Hi (m)	Modelo Mike 21	Hirose <i>et al.</i> , (2002)	Yoshioka <i>et al.</i> , (1993)
0,17	1,7	0,08	0,44	0,16
0,5	1,7	0,24	0,51	0,22
1	1,7	0,52	0,64	0,29
1,4	1,7	0,72	0,73	0,33
Média Kt		0,39	0,58	0,25

CONCLUSÃO

A influência da elevação do nível do mar na eficiência de quebra-mares submersos foi que à medida que aumenta a submergência do quebra-mar, menor sua capacidade de reduzir a energia de onda incidente. Ao correlacionar a submergência do quebra-mar e a altura de onda no tardoz da obra obteve uma correlação linear tanto para os resultados do modelo Mike 21 quanto para os esperados pelos ábacos dos estudos de Hirose *et al.*, (2002) e Yoshioka *et al.*, (1993). O ábaco de Yoshioka *et al.*, (1993) estimou valores menores para a altura de onda no tardoz da obra quando comparado com os resultados do modelo Mike 21 e com os esperados pelo ábaco de Hirose *et al.*, (2002) para as diferentes submergências do quebra-mar. Isto se deve ao fato do estudo de Yoshioka *et al.*, (1993) ter sido desenvolvido para um quebra-mar submerso com largura de 32 m de crista, que é maior que a largura simulada no presente estudo, no caso 9 m, visto que os quebra-mares com maiores larguras de cristas têm maior capacidade de reduzir a altura da onda. Os resultados de altura de onda no tardoz da obra esperados pelo ábaco de Hirose *et al.*, (2002) se aproximaram dos valores do modelo Mike 21 à medida que aumentava a submergência, sendo igual o resultado para uma submergência de 1,4 m. Conclui-se que há necessidade de maiores estudos sobre obras submersas com crista esbelta, visto que a maioria dos estudos são voltados para cristas de larguras maiores que 30 m ou para recifes naturais que também tem grandes extensões, no que resulta uma discrepância entre os resultados simulado e os esperados pelos ábacos, a fim de subsidiar a gestão costeira e projetos de engenharia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Danish Hydraulic Institute - DHI pela licença estudantil do Mike 21.

REFERÊNCIAS

D'ANGREMOND, K.; VAN DER MEER, J.W.; DE JONG, R.J. (1996). Wave transmission at low-crested structures, 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando, Florida.

GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z. 2023. Análise do Projeto Piloto da ponta da praia – Santos (SP). XXV Simpósio brasileiro de recursos hídricos. ISSN 2318-0358. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15765>

GARCIA, P. D. & GIRELI, T. Z. (2023). Análise do projeto piloto da ponta da praia – Santos (SP), 2023. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos de Aracajú em 2023-ISSN 2318-0358.

HASSANPOUR, N., CONTESTABILE, P., LARA, J. L., & VICINANZA, D. (2024). Analysis Of Upgrading Low-Crested Structures as an Adaptation Measure to Climate Change for Coastal Protection: A Hybrid Approach. Coastlab 2024 Proceedings, TU Delft. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.770>

HIROSE, N., A. WATANUKI AND M. SAITO, 2002, New Type Units for Artificial Reef Development of Eco-friendly Artificial Reefs and the Effectiveness Thereof, PIANC Congress, Sydney, see also 28th ICCE, Cardiff; 2002; (Tetra Co., Ltd., 6-3-1 Nishi-shinjuku, Shinjuku, Tokyo).

KLEIN, A.H.F., SHORT, A.D., BONETTI, J. Santa Catarina beach systems. In: SHORT, A.D AND KLEIN, A.H.F. (eds), Brazilian Beach Systems. Springer Coastal Research Library. 2016.

LIJENDIJK, A., HAGENAARS, G., RANASINGHE, R. et al. (2018). The State of the World's Beaches. Sci Re p 8, 6641. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>

MC KENNA, J.; COOPER, A.; O'Hagan, A. M. (2008). Managing by principle: A critical analysis of the European principles of Integrated Coastal Zone Management (ICZM), Marine Policy, Volume 32, Issue 6, 2008, Pages 941-955, ISSN 0308-597X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.02.005>.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE – MMA (2018).

MONGOR, K., DRONEN N. K., KAERGAARD KI. H., Kristensen, S. E. Shoreline Management Guidelines. ISBN 979-87-90634-04-9. Publicado por DHI, 2017.

PILARCZYK, K. (2003). Design of low-crested (submerged) structures - An overview. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237368334_Design_of_low-crested_submerged_structures_-_An_overview

RAMBABU, A., C.; MANI, J., S. (2005). Numerical prediction of performance of submerged breakwaters, Ocean Engineering, Volume 32, Issue 10, pp. 1235-1246, ISSN 0029-8018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.10.023>.

STAGNITTI, M., LARA, J., MUSUMECI, R. AND FOTI, E., 2023. Numerical modeling of wave overtopping of damaged and upgraded rubble-mound breakwaters. *Ocean Engineering*, 280: 114798.

UDA, T. (1988). Function and design methods of artificial reef (in Japanese); Ministry of Construction, Japan (see also, Coastal Zone'93).

VAN DER MEER, J.W., BRIGANTI, R., ZANUTTIGH, B., WANG, B., 2005. Wave transmission and reflection at low-crested structures: design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coast. Eng.* 52 (10–11), 915–929. ISSN 0378-3839. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.005>

WILLIAMS, A.T.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PRANZINI, E., & ANFUSO, G. (2018). The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, 156, pp. 4–20. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022>

YOSHIOKA, K.; KAWAKAMI, T.; TANAKA, S.; KOARAI, M.; UDA, T. (1993). Design Manual for Artificial Reefs, in *Coastlines of Japan II*, Coastal Zone'93, ASCE.