

A Influência da Largura de Crista no Coeficiente de Transmissão de Ondas em Quebra-mares Submersos de Geotubos

Tiago Zenker Gireli¹, Adriano Henrique Tognato² & Conceição Juana Fortes³

Resumo

As mudanças climáticas acarretam elevação do nível do mar, aumento do número de ressacas e intensificação da erosão nas praias. Neste contexto, soluções baseadas na natureza ganham força para mitigar estes impactos. Embora quebra-mares submersos de geotubos sejam eficazes em reduzir a altura de onda e conter a erosão, poucos estudos sobre o coeficiente de transmissão (kt) específicos para estes tipos de obras são abordados, e alguns dos existentes não levam em consideração todos os parâmetros inerentes ao processo de transmissão de ondas por estruturas submersas. Assim, este trabalho visa contribuir, avaliando o efeito da largura da crista no coeficiente de transmissão de quebra-mares submersos confeccionados em geotubos com o emprego da modelação física bidimensional. Os resultados comprovaram que para estruturas deste tipo, assim como para estruturas confeccionadas em enrocamento, a largura da crista, assim como a submersão, são parâmetros importantes para uma correta avaliação da eficácia da estrutura em reduzir a altura da onda incidente. Desta forma a largura da crista deve ser incluída como uma das variáveis independentes, de forma a permitir que o projetista faça o correto dimensionamento de quebra-mares submersos confeccionados de geotubos, tornando-os uma solução eficaz para mitigar os impactos da erosão costeira que assola os litorais ao redor do mundo.

Palavras-Chave – Quebra-mar submerso, Modelação Física, Geotubos, Estruturas Costeiras.

Abstract

Climate change is causing sea level rise, increased storm surges, and intensified beach erosion. In this context, nature-based solutions are gaining traction to mitigate these impacts. Although submerged geotube breakwaters are effective in reducing wave height and containing erosion, few studies on the transmission coefficient (kt) specific to these types of structures are addressed, and some existing studies do not consider all the parameters inherent to the wave transmission process through submerged structures. Thus, this work aims to contribute by evaluating the effect of crest width on the transmission coefficient of submerged breakwaters made of geotubes using two-dimensional physical modeling. The results confirmed that crest width, as well as submergence, are important parameters for a correct evaluation of the effectiveness of this type of structure, as has already been demonstrated for conventional structures. Therefore, crest width should be included as one of the independent variables, in order to allow the designer to correctly design submerged breakwaters made of geotubes, making them an effective solution to mitigate the impacts of coastal erosion that plagues coastlines around the world.

Keywords – Submerged breakwaters, Physical Model, Geotubes, Coastal Structures.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas acarretam elevação do nível do mar, aumento do número de ressacas e intensificação da erosão nas praias, acarretando em prejuízos financeiros às municipalidades costeiras (Klein *et al.*, 2016 e Mongor *et al.*, 2017). Estas alterações na linha de costa vêm se intensificando (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).

Neste contexto, soluções baseadas na natureza ganham força para mitigar estes impactos (Zhou *et al.*, 2026), dentre elas, os quebra-mares submersos, cuja eficácia está diretamente associada a sua

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

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

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

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.

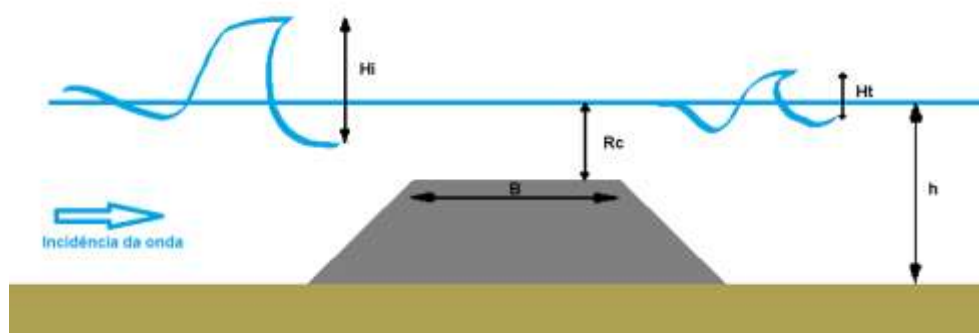


Figura 1 – Características de transmissão.
Fonte: Scheltinga (2026).

Desde o século passado, diversos estudos para avaliação do K_t de quebra-mares submersos foram desenvolvidos, demonstrando que a o principal fator que afeta o K_t de obras submersas é a submergência da obra em relação ao nível d'água, geralmente adimensionalizado a partir de sua relação com a altura da onda incidente (R_c/H_i). Adicionalmente, alguns dos autores também constataram a relevância de outros parâmetros, como o tamanho dos blocos que compõem a estrutura (D_{n50}), a inclinação do talude ($\tan\alpha$) e a largura da crista (B).

Porém, apesar da grande quantidade de estudos nesta temática, poucos são específicos para obras confeccionadas em geotubos, sendo muitas vezes empregadas equações empíricas clássicas para o dimensionamento deste tipo de estrutura, o que pode levar a equívocos na análise, uma vez que a geometria, rugosidade e principalmente porosidade de estruturas em geotubos são bastante distintas daquelas obtidas com os materiais comumente empregados nos estudos, como blocos naturais e artificiais de enrocamento.

Assim, apesar da relevância da equação de Leija et al. (2014), por ser uma das únicas equações desenvolvidas para quebra-mares submersos confeccionados em geotubos, ela leva em consideração apenas a submergência, ignorando os efeitos das outras grandezas envolvidas no processo de dissipação de energia em quebra-mares submersos.

Desta forma, este trabalho visa contribuir, avaliando o efeito da largura da crista no coeficiente de transmissão de quebra-mares submersos confeccionados em geotubos.

MÉTODOS

Para a análise proposta, foi empregada a modelação física bidimensional, empregando, para tanto, o canal de ondas COI2 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC).

O COI2 possui cerca de 70m de comprimento, 3m de largura e 2m de altura e é provido de um gerador capaz de produzir tanto ondas regulares quanto irregulares. Nele foram inseridas

diferentes configurações de quebra-mar (Figura 2) confeccionados em geotubo na escala 1:20, além de 8 sondas para acompanhamento do caminhamento das ondas ao longo do canal (Figura 3).

As estruturas foram ensaiadas com ondas regulares de variando de $H = 1,0\text{m}$, $2,0\text{m}$, $3,0\text{m}$ e $4,0\text{m}$ e período $T = 10\text{s}$, com submergências (R_c) de 0 e aproximadamente 1 vez a altura da onda ensaiada.

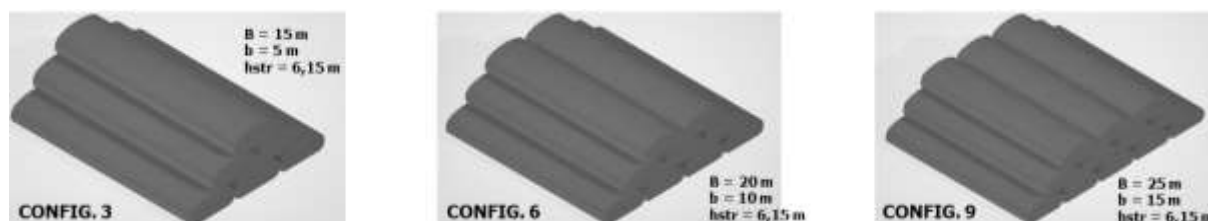


Figura 2. Configurações de estruturas ensaiadas
Fonte: o próprio autor

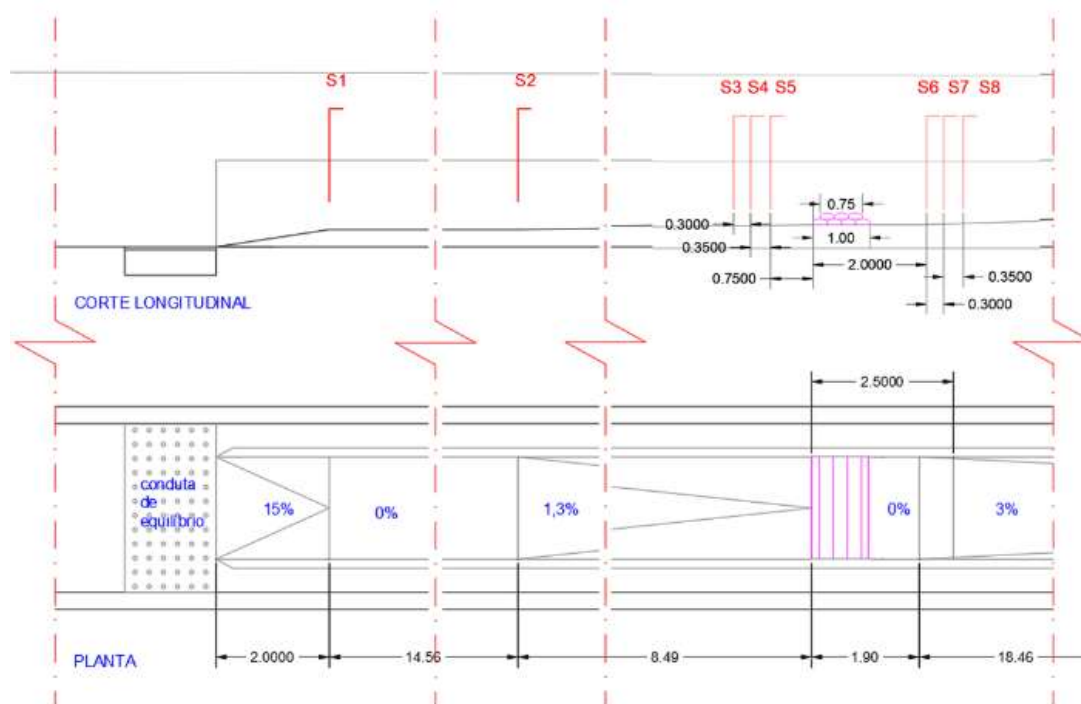


Figura 3. Geometria de fundo, da obra e do posicionamento das sondas no COI2 (LNEC)
Fonte: o próprio autor

Posteriormente, para cada submergência foi calculado o kt e grafado como função da largura de crista, de formar a avaliar seu efeito. Por fim, os resultados foram comparados com os calculados a partir de (1), desenvolvida por Leija et al. (2014).

$$kt = 1.1. \left(1 - e^{-0,422 \left(\frac{R_c}{H_i} + 1 \right)} \right) \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os ensaios realizados, bem como os valores de k_t obtidos experimentalmente.

Tabela 1 – Parâmetro de ensaio e coeficientes de transmissão obtidos experimentalmente.

Ensaio	Config.	H_i (m)	H_t (m)	k_t (°)	R_c (m)	R_c/H_i (°)	B (m)	B/H_i (°)
CL39_3	3	2.772	1.995	0.720	0.00	0.00	5.0	1.8037
CL39_6	6	2.772	1.861	0.671	0.00	0.00	10.0	3.6074
CL39_9	9	2.772	1.694	0.611	0.00	0.00	15.0	5.4111
CL27_3	3	3.097	1.863	0.601	0.00	0.00	5.0	1.6145
CL27_6	6	3.097	1.612	0.520	0.00	0.00	10.0	3.2289
CL27_9	9	3.097	1.490	0.481	0.00	0.00	15.0	4.8434
CL15_3	3	2.000	1.173	0.587	0.00	0.00	5.0	2.5000
CL15_6	6	2.000	1.077	0.538	0.00	0.00	10.0	5.0000
CL15_9	9	2.000	0.957	0.479	0.00	0.00	15.0	7.5000
CL03_3	3	1.002	0.555	0.554	0.00	0.00	5.0	4.9900
CL03_6	6	1.002	0.506	0.505	0.00	0.00	10.0	9.9800
CL03_9	9	1.002	0.436	0.435	0.00	0.00	15.0	14.9701
CL45_3	3	4.386	3.475	0.792	4.00	0.91	5.0	1.1401
CL45_6	6	4.386	3.004	0.685	4.00	0.91	10.0	2.2802
CL45_9	9	4.386	2.759	0.629	4.00	0.91	15.0	3.4203
CL33_3	3	3.605	2.890	0.802	3.00	0.83	5.0	1.3870
CL33_6	6	3.605	2.591	0.719	3.00	0.83	10.0	2.7741
CL33_9	9	3.605	2.023	0.561	3.00	0.83	15.0	4.1611
CL21_3	3	1.848	1.962	1.062	2.00	1.08	5.0	2.7051
CL21_6	6	1.848	1.807	0.978	2.00	1.08	10.0	5.4101
CL21_9	9	1.848	1.752	0.948	2.00	1.08	15.0	8.1152
CL06_3	3	0.957	0.760	0.794	1.00	1.05	5.0	5.2258
CL06_6	6	0.957	0.639	0.668	1.00	1.05	10.0	10.4515
CL06_9	9	0.957	0.593	0.620	1.00	1.05	15.0	15.6773

Já na Figura 4 os valores de k_t estão grafados em relação às larguras de crista, enquanto na Figura 5, a mesma comparação é feita, mas com a largura de crista adimensionalizada em relação à altura da onda incidente. Por fim, a Figura 6 traz uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os esperados por (1).

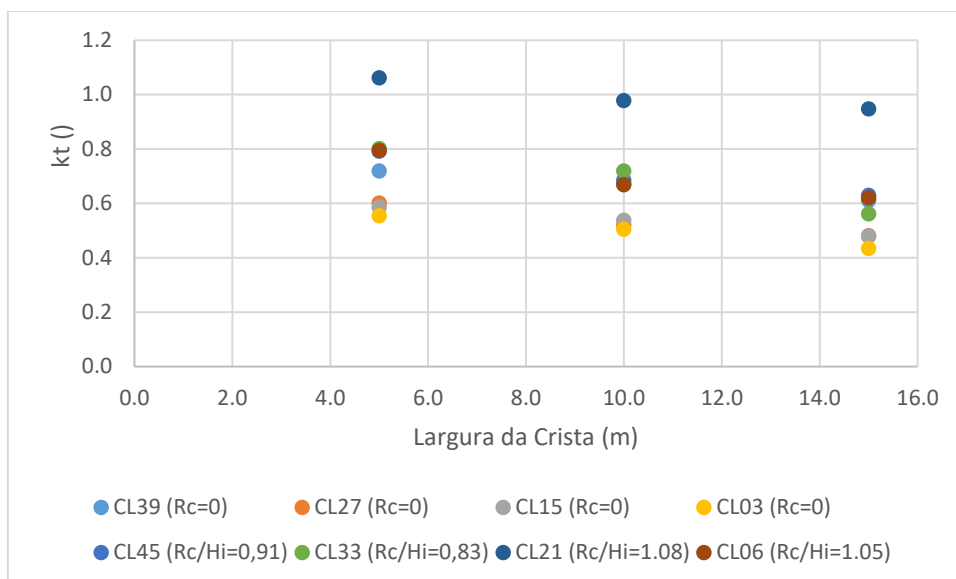


Figura 4. Relação kt x Largura de Crista (m)

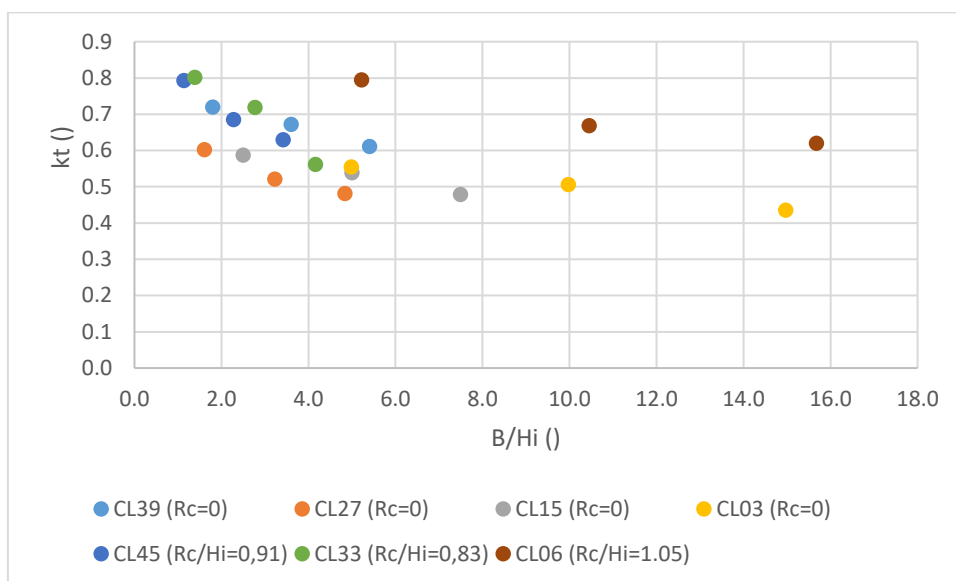


Figura 5 – Relação kt x B/H_i

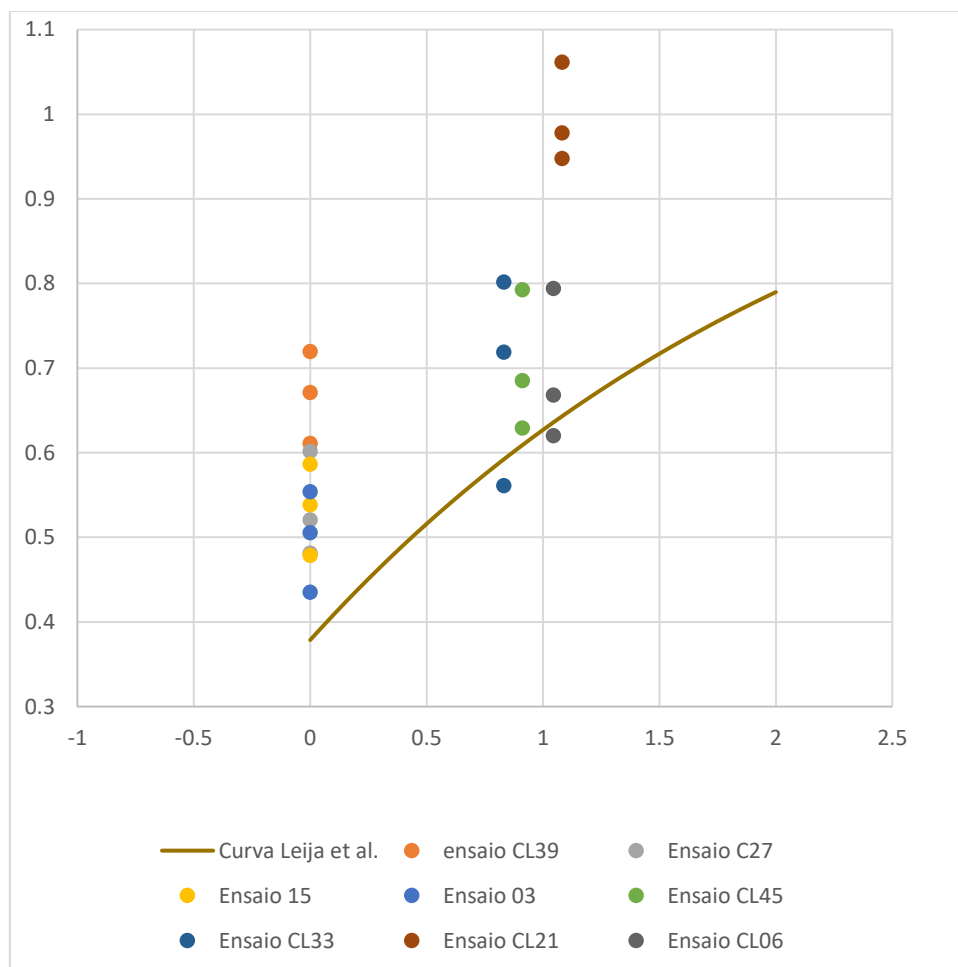


Figura 6 – Comparação dos resultados experimentais com os da equação proposta por Leija et al. (2014)

Da Tabela 1 pode-se perceber que os valores de k_t obtidos experimentalmente variam entre pouco mais de 0,40 até 0,80, a exceção dos ensaios CL21, que para as três configurações se afastaram muito dos demais, tendo, por este motivo, sido desconsiderados nas análises realizadas.

Já da Figura 4, pode-se perceber que apesar do k_t apresentar valores distintos para cada altura de onda ensaiada, em todos os casos o comportamento do coeficiente foi inversamente proporcional à largura da crista da configuração ensaiada, demonstrando assim, que B é uma variável que afeta a eficácia das estruturas submersas em geotubos, assim como obtido por outros autores para estruturas confeccionadas com blocos de enrocamento.

Por sua vez, a análise da Figura 5 mostra que o adimensional B/H_i pode ser uma alternativa para introduzir o efeito de B em equacionamentos futuros. A dispersão verificada, pode ser atribuída à pequena variação na submersão verificada entre os resultados experimentais, além, obviamente da possibilidade de influência de outros parâmetros não mapeados, como a esbeltez da onda, por exemplo.

Por fim, comparando os resultados experimentais com os obtidos a partir de (1), nota-se que na maior parte dos casos, a equação proposta por Leija et al. (2014) superestimou a capacidade da obra em reduzir a altura da onda incidente por não considerar o efeito da largura da crista da obra no k_t .

CONCLUSÃO

Os ensaios realizados em modelo físico bidimensional com quebra-mares submersos colecionados com geotubos permitiu estimar os valores do coeficiente de transmissão de ondas para diferentes configurações de obras, confeccionadas com larguras de crista variáveis.

Os resultados comprovaram que para estruturas deste tipo, assim como para estruturas confeccionadas em enrocamento, a largura da crista, assim como a submergência, são parâmetros importantes para uma correta avaliação da eficácia da estrutura em reduzir a altura da onda incidente.

Assim, equações desenvolvidas para este tipo de material devem buscar incluir o parâmetro B como uma das variáveis independentes, de forma a permitir que o projetista faça o correto dimensionamento da estrutura, tornando-a uma solução eficaz para mitigar os impactos da erosão costeira que assola os litorais ao redor do mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAEPEX, ao CNPq e ao LNEC pelo apoio à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CALABRESE, M., VICINANZA, D., M., B., 2002. Large-scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves. Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Engineering ASCE, 1900_1912

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.

FAN Y., ZHANG X., WANG A., PANG W., LIN Z., YE X., OUYANG K. (2026) Evaluation of Wave Attenuation Performance of an Ecological Submerged Breakwater in the Sheyang Coastal Zone, Jiangsu Province, China. Journal of Marine Science and Engineering, 14 (4), art. no. 364, Cited 0 times.DOI: 10.3390/jmse14040364

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-ku, 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.

LEIJA, M. B. G et al. Experimental Study on Geotextile Tube Applications as Submerged Breakwaters for Beach Protection in Yucatan, Mexico. Coastal Engineering Proceedings, v. 1, n. 34, p. 25, 2014.

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.

SEABROOK, S.R. e HALL, K.R., 1998, Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters, 26th Int. Conf. On Coastal Eng., Copenhagen.

VAN DER MEER, J.W., DAEMEN, I.F.R., 1994. Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures. J. Waterway Port Coast. Ocean Eng. ASCE. 120 (1), 1–19.

VAN DER MEER, Jentsje W. Data on wave transmission due to overtopping. Delft Hydraulics, 1990.

ZHOU Y., HU Z., WANG P.C., LI Y.P. (2026). The efficacy of green and gray coastal structures in storm surge mitigation. Coastal Engineering, 207, art. no. 104972, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2026.104972