

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE ENTRE DADOS TEÓRICOS E DE CAMPO DA SEDIMENTAÇÃO NO TARDOZ DE QUEBRA-MARES: VALIDAÇÃO E DISCREPÂNCIAS

*Patricia Strasser Scheltinga¹, Elisa Cabral Terra², Gustavo Ribeiro da Silva³, Ivan Mangini⁴,
Tiago Zenker Gireli⁵ e Patrícia Dalsoglio Garcia⁶*

Abstract:

Coastal regions are exposed to flooding, storm surges, and erosion. These events increase due to climate change and anthropogenic activities. Therefore, it is essential to seek solutions to mitigate these events. In this context, breakwaters are often used, having been trained for decades. However, there are still gaps in understanding the conformation of the coastline after the introduction of submerged breakwaters, since in classical literature the beach profile responses were made for emerged breakwaters or for submerged reefs with considerable crest width. Furthermore, works with smaller dimensions have been gaining ground to solve coastal erosions. Therefore, it is important to predict sediment deposition with the intervention of these works with less impact, to guide engineering projects and coastal management. The study seeks to analyze the beach profiles before and after the implementation of a submerged and slender breakwater and compare these field results with the theoretical results calculated by the formulas existing in the literature. The results were accumulated sediment after the implementation of the submerged breakwater, however the sedimented value in the field was shown to be lower than the calculation with the evaluated formulas. Thus, the field and theoretical results had discrepant values, and the formulas in the literature, for calculating protrusion, were not efficient for submerged and slender breakwaters.

Keywords – Submerged breakwater, morphodynamics and sedimentation.

Resumo:

As regiões costeiras estão expostas a inundações, ressacas e erosão. Esses eventos vêm aumentando devido às mudanças climáticas e atividades antropogênicas. Assim é essencial buscar soluções a fim de mitigar estes eventos. Nesse contexto, quebra-mares são frequentemente empregados, sendo estes estudados há décadas. Todavia, ainda existe lacunas para compreender a conformação da linha da costa após a introdução de quebra-mares submersos, visto que na literatura clássica as respostas do perfil praias foram feitas para quebra-mares emersos ou para recifes submersos com largura de crista consideráveis. Além do mais, obras com dimensões menores vem ganhando espaço para solucionar erosões costeiras. Sendo assim é importante a previsibilidade na deposição de sedimentos com intervenção destas obras de menor impacto, a fim de direcionar os projetos de engenharia e a gestão costeira. O estudo busca analisar os perfis praias antes e depois da implantação de um quebra-mar submerso e esbelto, e comparar estes resultados de campo com os resultados teóricos calculados pelas fórmulas existentes na literatura. Os resultados apresentaram acúmulo de sedimento após a implantação do quebra-mar submerso, entretanto o valor sedimentado no campo se mostrou inferior

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, gusribeiro@dac.unicamp.br

4) UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein 951, Campinas, SP, (19) 3521-2069, i237471@dac.unicamp.br

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

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

ao calculado com as fórmulas avaliadas. Desta forma os resultados de campo e teórico tiveram valores discrepantes, e as fórmulas da literatura, para cálculo de saliência, não se mostraram eficientes para quebra-mares submersos e esbeltos.

Palavras-Chave – Quebra-mar submerso, morfodinâmica e sedimentação.

INTRODUÇÃO

As regiões costeiras são densamente povoadas, no caso do Brasil mais da metade da população vive na costa. Além disso, cerca de 40% da costa brasileira sofre com algum tipo de processo erosivo (IBGE, 2022; MMA, 2018). No mundo, aproximadamente 24% das praias arenosas sofrem com a erosão costeira, sendo isso agravado pelas mudanças climáticas que proporcionam aumento de eventos extremos, que estão cada vez mais frequentes, consolidando-se como uma preocupação global à erosão costeira (Luijendijk et al., 2018; IPCC, 2021). Neste contexto, quebra-mares são amplamente empregados para proteger as zonas costeiras de ressacas e conter a erosão, sendo crescente a busca por obras flexíveis, submersas e que gerem menores impactos quando comparados com obras convencionais, que no geral são de enrocamento e emersas.

Estudos anteriores para obras emersas, como os de Sunamara e Mizuno (1987), Pope e Dean (1986) e Harris e Herbich (1986), relacionam o comprimento do quebra-mar e a distância do quebra-mar até a praia com a resposta da linha de costa (como saliência ou tômbolo). Por outro lado, os estudos de Pilarczyk (2003), Andrews (1997), Ahrens e Cox (1990) e Black e Andrews (2001) consideraram não apenas quebra-mares emersos, mas também recifes submersos, analisando seus efeitos na resposta da linha de costa.

Vale destacar o estudo de Black e Andrews (2001), que não apenas classificou a resposta da linha de costa (como saliência ou tômbolo), mas também propôs fórmulas para estimar as dimensões da saliência em estruturas tanto emersas quanto submersas. No entanto, as fórmulas para obras submersas foram derivadas de análises de recifes submersos, cujas cristas são bem maiores do que as de obras de quebra-mares costeiros.

Diante disso, existe uma lacuna na literatura clássica sobre os efeitos de obras de proteção costeira submersa e esbelta, sendo que estas obras nem sempre formam saliência ou quando formam estas podem ser submersas. Alguns exemplos de quebra-mares submersos implementados na Austrália, Emirados Árabes, Coreia do Sul e Brasil são expostos respectivamente nos estudos de Jackson et al., (2007); Oh e Shin, (2006), Chien et al., (2014) e Garcia et al. (2018).

Neste contexto o objetivo do estudo foi analisar os resultados de campo e os resultados teóricos sobre a resposta da linha de costa após a implantação de quebra-mar submerso com largura de crista esbelta, de forma a fornecer dados e parâmetros para subsidiar previsões de acúmulo de areia para esse tipo de obra, além dos resultados auxiliarem decisões de projetos de proteção costeira.

METODOLOGIA

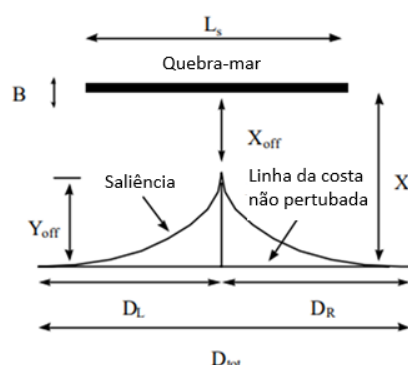
Primeiramente foram analisados os quebra-mares submersos apresentados nos estudos de Jackson et al., (2007); Oh e Shin, (2006), Chien et al., (2014) e Garcia et al. (2018), dentre estes foram escolhidos os que o tiveram formação de saliência.

Para este estudo, foram escolhidos os quebra-mares submersos apresentados nos estudos do Oh e Shin, (2006) e Garcia et al. (2018), respectivamente na região de Yeongjin-ri na Coreia do Sul e na região de Santos no Brasil. Sendo que na região de Yeongjin-ri existe 4 quebra-mares submersos, sendo escolhido somente um deles para análise, visto que dois destes tinham presença de corais

próximos que influenciam no acúmulo de areia, e no outro quebra-mar a formação de acúmulo de areia não se apresentou proeminente.

A nomenclatura empregada neste estudo segue a convenção estabelecida na literatura, sendo as siglas L_s para o comprimento do quebra-mar; B para a largura da crista do quebra-mar; X para a distância entre o quebra-mar e a linha de costa intocada (*shoreline undisturbed*) anterior à construção da estrutura; X_{off} para a distância entre o quebra-mar e a nova linha de costa após a instalação da estrutura; Y_{off} para o comprimento da saliência formada em direção ao mar; e D_{tot} para a largura total da saliência costeira. A nomenclatura está apresentada no Figura 1.

Figura 1 – Nomenclaturas adotadas.



Fonte: Pilarczyk (2003), traduzido pelo autor.

Para obter as dimensões dos quebra-mares foram utilizados os dados apresentados nos estudos de Oh e Shin, (2006) e Garcia et al. (2018) e foi utilizado as imagens do Google Earth ® para complementar as características dos quebra-mares que não foram apresentadas nos estudos.

Para a obtenção das dimensões da saliência formada no protótipo de Yeongjin-ri foram realizadas medições na imagem do Google Earth ®. Já para o protótipo de Santos utilizou-se os dados de levantamento topo batimétrico coletados e disponibilizados pela Universidade Estadual de Campinas do ano de 2023 e a partir deste levantamento os dados foram tratados no programa Civil3D®, de domínio da Autodesk, e foi gerada uma superfície de elevação com as curvas de nível que possibilitou a medição, através do Civil3D®, das dimensões da saliência submersa formada em Santos.

Após isso, calculou-se a saliência teórica para ambos os quebra-mares submersos através das fórmulas da literatura, estas estão expostas na Equação 1 de Black e Andrews (2001) e na Equação 2 de Black e Andrews (2001).

$$\text{Quebra – mar submerso: } \frac{X_{off}}{L_s} = 0,5 \left(\frac{L_s}{X} \right)^{-1,27} \quad (1)$$

$$\frac{Y_{off}}{D_{tot}} = 0,12 \quad (2)$$

Os resultados das dimensões da saliência do protótipo e dos cálculos teóricos foram comparados através do cálculo da porcentagem, que consistiu na divisão do resultado do protótipo pelo resultado teórico.

Os dados dos levantamentos topo batimétricos disponibilizados pela Universidade Estadual de Campinas para os anos 2016 e 2023 foram tratados com o Civil3D® de autoria da Autodesk, e assim foram elaboradas as superfícies de elevação, a superfície de comparação, o perfil do terreno e extraídos os volumes de erosão / assoreamento da superfície de comparação entre os anos de 2016 e 2023, a fim de comparar o antes e depois da instalação da obra submersa, uma vez que o quebra-mar no protótipo de Santos foi executada em 2018. A análise de volume de erosão/ assoreamento no tardo foi realizado pois, mesmo com a formação de saliência, o balanço sedimentar pode ser zero e somente haver uma reconfiguração da linha da costa devido a ocorrência da difração gerada pela presença da obra.

RESULTADOS

A imagem obtida com o Google Earth® para o protótipo de Yeongjin-ri está exposto na Figura 2, nesta figura também estão apresentadas as dimensões medidas com a ferramenta de medir do Google Earth®.

Figura 2 – Dimensões da saliência do protótipo de Yeongjin-ri.



A Figura 2 apresenta que o quebra-mar de Yeongjin-ri possui 150 metros de comprimento (L_s), 50 metros de largura de crista (B) e está a 195 metros da linha da costa considerada intocada (X) e o comprimento da saliência é de 30 metros (Y_{off}) e a largura da saliência é de 560 metros (D_{tot}).

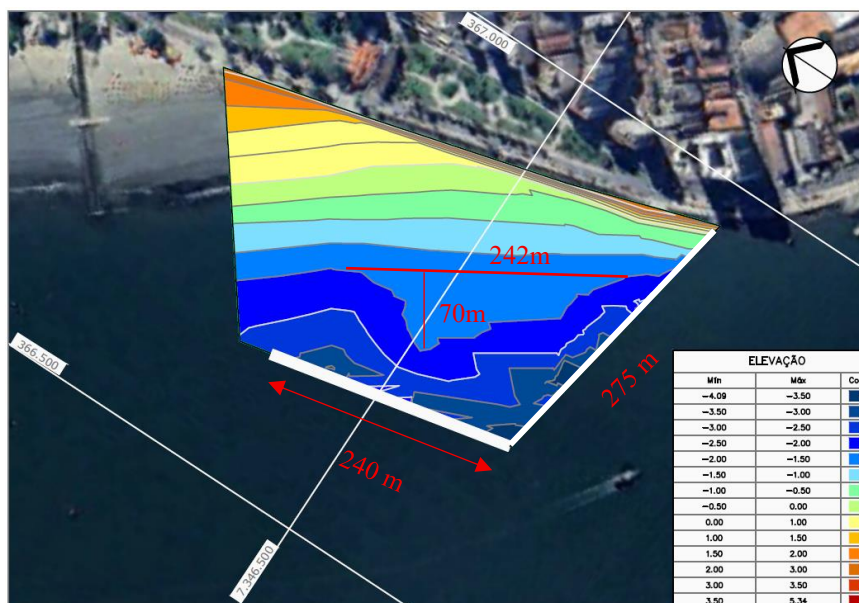
Os valores obtidos com as equações (1) e (2) da literatura foram 90,34 metros (Y_{off}) de comprimento e 752,86 metros (D_{tot}) de largura. Ao comparar estes valores calculados com as dimensões medidas no protótipo de Yeongjin-ri, observou que o comprimento (Y_{off}) medido foi 67% menor que o calculado, e a largura (D_{tot}) medida foi 26% menor que o calculado pelas equações da literatura, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores obtidos com as eq. (1) e eq. (2) para o quebra-mar de Yeongjin-ri

| Dados (m) | | | |
|-----------|---|--------------------------|--------------|
| X | 195 | | |
| Ls | 150 | | |
| | Valores calculados pelas fórmulas da literatura (m) | Valores de protótipo (m) | Variação (%) |
| X_{off} | 104,66 | 165 | 58% |
| Y_{off} | 90,34 | 30 | -67% |
| D_{tot} | 752,86 | 560 | -26% |

Para analisar o protótipo de Santos, primeiro gerou-se a superfície de elevação e as curvas de nível com os dados do levantamento topo batimétrico do ano de 2023, através do Civil 3D®. Este está exposto na Figura 3, nesta figura também está apresentado as dimensões medidas no referido software.

Figura 3 – Dimensões da saliência submersa do protótipo de Santos.



A Figura 3 apresenta o quebra-mar de Santos que possui 240 metros de comprimento (Ls), cota de coroamento na -0,5m DHN, 5 metros de largura de crista (B), distância de 250 metros da linha da costa considerada intocada (X) e a saliência emersa é zero. Entretanto, houve a formação de uma saliência submersa com comprimento de 70 metros (Y_{off}) e largura de 242 metros (D_{tot}), sendo esta na cota -2,00 DHN.

Vale salientar que o quebra-mar possui um enraizamento de 275 metros com 1,9 metros de altura acompanhando o terreno, indo do muro da praia da cota 0,0m DHN até ao quebra-mar a uma profundidade de 3,5 m DHN.

Os valores obtidos com as equações (1) e (2) da literatura foram 123,61 metros (Y_{off}) de comprimento e 1030,12 metros (D_{tot}) de largura. Ao comparar estes valores calculados com as dimensões medidas no protótipo de Santos, observou-se que o comprimento (Y_{off}) medido foi 43% menor que o calculado, e a largura (D_{tot}) medida foi 77% menor que o calculado pelas equações da literatura, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores obtidos com as eq (1) e eq (2) para o quebra-mar de Santos

| Dados (m) | | | |
|-----------|---|--------------------------|--------------|
| X | 250 | | |
| L_s | 240 | | |
| | Valores calculados pelas fórmulas da literatura (m) | Valores do protótipo (m) | Variação (%) |
| X_{off} | 126,39 | 180 | 42% |
| Y_{off} | 123,61 | 70 | -43% |
| D_{tot} | 1030,12 | 242 | -77% |

A análise do antes e depois da instalação do protótipo de Santos, realizada a partir da observação do topo batimetria de dois anos antes (2016) e de cinco anos depois (2023) da construção do quebra-mar, em que as superfícies de elevação dos levantamentos topo batimétricos dos anos de 2016 e 2023 estão apresentados nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 – Superfície de elevação antes da presença do quebra-mar em Santos.

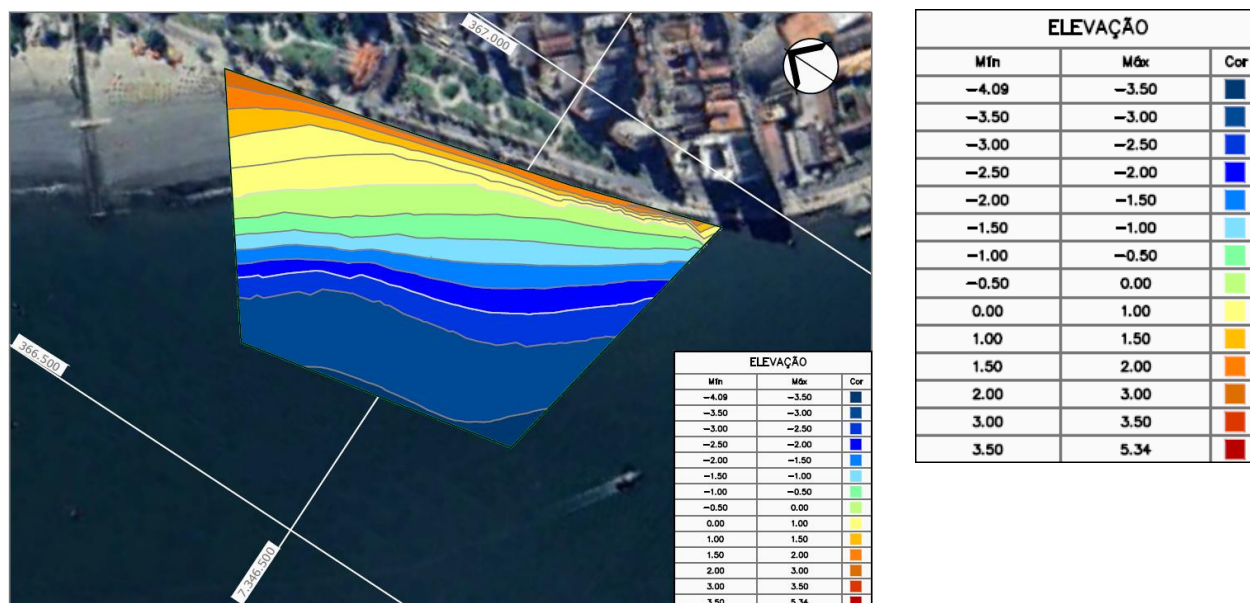
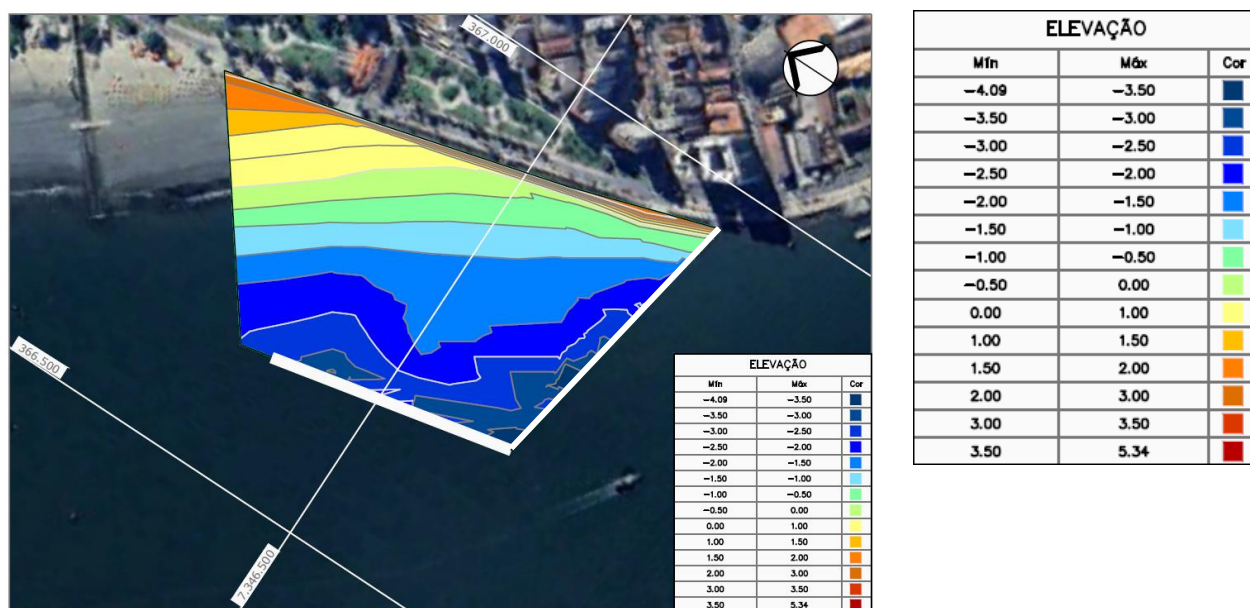
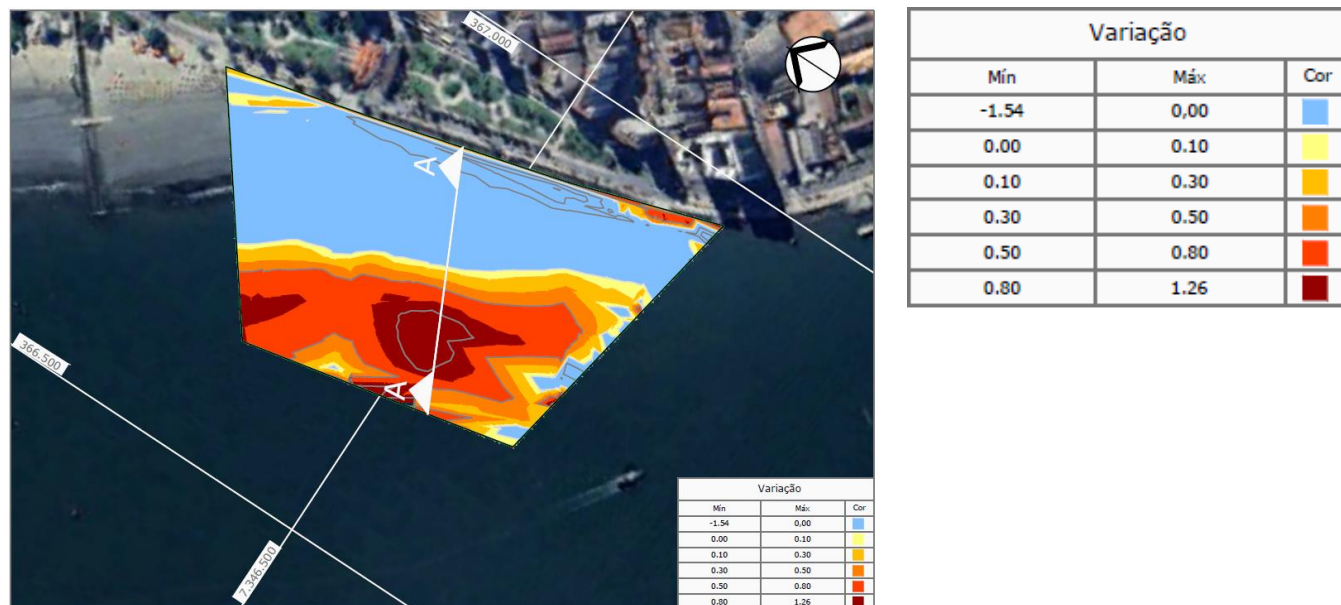


Figura 5 – Superfície de elevação após 5 anos da presença do quebra-mar em Santos.



A subtração entre as superfícies de elevação da Figura 4 e Figura 5 resultou na superfície de comparação entre os levantamentos do ano de 2016 e de 2023 do protótipo de Santos, em que está apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Comparação de superfícies antes e de pois do quebra-mar em Santos.

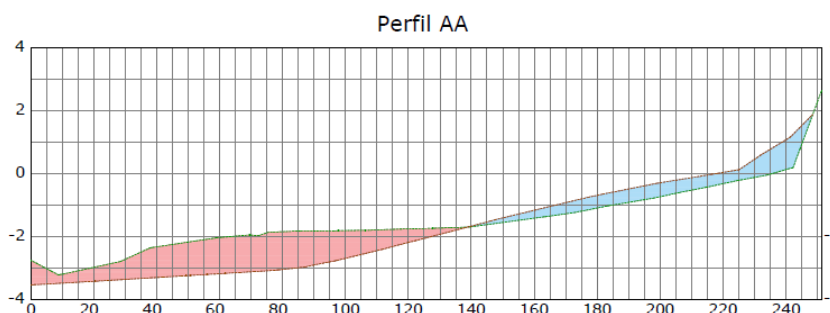


O volume de erosão/ assoreamento no tardoz obtida com a superfície de comparação entre os anos de 2016 e 2023 resultou no geral em um assoreamento de 10.825,69 m³. Isso se deu devido um acúmulo de sedimento a partir da cota -2,0m DHN até a cota -3,5m DHN representado pelas cores quentes na Figura 6. Nesta região houve um acumulado de 24.324,32 m³, entretanto, na região entre a cota 0,0m DHN até a cota -2,0m DHN houve uma perda de sedimentos de 13.498,63 m³.

Assim após a obra, a declividade do perfil praiar diminuiu e houve um acúmulo de areia entre a cota -2 e -3,5m DHN. Isso se deve, provavelmente pelo fato desta região não apresentar nenhuma faixa de praia, de forma que a onda incidente é refletida pelo muro de contenção existente. Essa reflexão acentua a erosão.

O local da seção do perfil AA na região santista está apresentada na Figura 6 e os perfis AA tanto de antes da presença do quebra-mar quanto após 5 anos com a estrutura está apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Perfil AA - Comparação de superfícies antes e de pois do quebra-mar.



No protótipo de Santos não houve alteração da linha da costa intocada da região (*shoreline undisturbed*), porém observou-se a formação de uma saliência submersa na cota -2,00 DHN como mencionando anteriormente e evidenciado na Figura 7.

CONCLUSÃO

O estudo investigou as dimensões das saliências formadas pela deposição de sedimentos no tardoz de quebra-mares submersos, sendo analisado dois protótipos: o de Santos e o de Yeongjin-ri, e comparou os resultados obtidos em campo com o calculado pelas fórmulas da literatura. Os resultados obtidos no protótipo e pela teoria apresentaram valores discrepantes, assim as fórmulas da literatura para previsão das dimensões da saliência não se mostraram eficientes para quebra-mares submersos em ambas as regiões analisadas.

As dimensões das saliências obtidas nos protótipos apresentaram resultados menores que o previsto pela literatura, sendo que no protótipo de Santos o valor do Y_{off} foi 43% menor que o valor calculado pela teoria, e o valor do D_{tot} foi 77% menor que o calculado pela teoria, e para o protótipo de Yeongjin-ri o valor do Y_{off} foi 67% menor que o valor calculado pela teoria, e o valor do D_{tot} foi 26% menor que o calculado pela teoria.

A formação da saliência não depende só das características do quebra-mar, mas também sobre a disponibilidade de sedimento que chega na região ou que é levado para o tardoz da obra, seja este levado pela hidrodinâmica local ou por alimentação artificial. Além disso, é há a relação da sedimentação com as interações de ondas em águas rasas, sendo estas empolamento, arrebentação, refração, difração e reflexão.

Os valores do protótipo de Yeongjin-ri ficaram mais próximos do calculado pela teoria do que o do protótipo de Santos, pois em Yeongjin-ri houve alimentação artificial assim teve sedimento disponível para a formação de saliência, já em Santos não teve alimentação artificial substancial, além

da região não possuir faixa de areia emersa próxima ao quebra-mar. A falta de faixa de areia emersa leva a ocorrência de reflexão que dificulta o acúmulo de areia naturalmente no protótipo de Santos, e isso explica a questão de não ter tido alteração na linha da costa considerada intocada (*shoreline undisturbed*) e saliência ter somente se formado na parte submersa na cota -2,0 DHN.

Neste contexto, destaca-se a necessidade de monitoramento e análise da resposta da linha da costa frente a estas construções de obras de proteção costeira para subsidiar a gestão costeira e a proteção das praias. O estudo apresenta limitações por terem sido analisadas somente duas obras de quebra-mares submersos. Sendo assim, estudos futuros poderiam abordar a análise de uma quantidade maior do comportamento da linha de costa ao construir quebra-mares submersos e esbeltos, além de propor equacionamentos que correlacionam as interações de ondas em água rasas e a evolução da linha costa ao construir estas estruturas a fim de projetar a conformação da saliência, subsidiar a gestão costeira e projetos de engenharia.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, J. P. e COX, J. (1990). "Design and performance of reef breakwater". Journal of Coastal Research, N ° 7, p. 61-75. Fort Lauderdale (Florida). ISSN 0749-0208.
- ANDREWS, C.J., (1997). "Sandy shoreline response to submerged and emerged breakwaters, reefs or islands". Unpublished Thesis, University of Waikato, New Zealand (see: www.asrltd.co.nz).
- BLACK, K. P.; ANDREWS, C. J. (2001). "Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles Part 1: Salient and Tombolo Geometry and Shape". Journal of Coastal Research, West Palm Beach, p. 82-93.
- CHIEN A., WU S., TSENG F., TANG A, (2014). Geotextile Tubes Application on Beach Nourishment in UAE. International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 5, No. 5.
- GARCIA P. D.; GIRELI, T. Z. (2023). "Análise do projeto piloto da ponta da praia – Santos (SP)" in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos, 2023.
- HARRIS, M.M. AND J.B. HERBICH, (1986). "Effects of breakwater spacing on sand entrapment". Journal of Hydraulic Research, 24 (5).
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (2022). "Censo-2022". Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39525-censo-2022-informacoes-de-populacao-e-domicilios-por-setores-censitarios-auxiliam-gestao-publica#:~:text=Os%20agregados%20por%20setores%20censit%C3%A1rios%20preliminares%20do%20Censo%202022%20mostram,de%20150%20quil%C3%B4metros%20do%20litoral>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). "Climate Change 2021: the physical science basis". New York: Cambridge University Press.
- JACKSON, L. A.; CORBETT, B. B; MCGRATH, J. E.; STUART, G.; TOMLINSON, R. B. (2007). "Narrowneck Reef: Review of Seven Years of Monitoring", Shore and Beach, Vol. 75, n.4, 2007, pp.67-79.
- LUIJENDIJK, A., HAGERNAARS, G., RANASINGHE, R., BAART, F., DONCHYTS, G., AARNINKHOF, S., (2018). "The State of the World's Beaches". Sci. Rep-UK. 8(6641), p.1-11. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>

MMA (Ministério do Meio Ambiente) (2018). Panorama da Erosão Costeira no Brasil [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial; Organização Dieter Muehe. Brasília: MMA (2018a).

OH, Y. I.; SHIN, E. C. (2006). "Using submerged geotextile tubes in the protection of the E. Korean shore". *Coastal Engineering*, Vol. 53, n. 11, nov. 2006, p.879-895. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.06.005>.

PILARCZYK, KRYSTIAN. (2003). "Design of low-crested (submerged) structures - An overview". In *Anais: 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

POPE, J. AND DEAN, J.L., (1986). "Development of design criteria for segmented breakwaters". In *Anais: 20th International Conference on Coastal Engineering*, (ASCE), 2144-2158

SUNAMARA, T. AND MIZUNO, O., (1987). "A study on depositional shorelines behind an island". *Annual Report, Institute of Geosciences, University of Tsukuba*, 13, p. 71-73.

VAN RIJN, L.C., (1998). "Principles of Coastal Morphology". Aqua Publications, The Netherlands Disponível em: www.aquapublications.nl