

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO NA BAÍA DE SANTOS - SP

Tiago Zenker Gireli¹; Adriano Henrique Tognato²; Elisa Cabral Terra³; Patrícia Strasser

Scheltinga⁴ & Patrícia Dalsoglio Garcia⁵

Abstract: It is essential to understand the wave regime for planning and managing regions vulnerable to erosion, especially in densely populated and economically active coastal locations, such as the coast of Santos, in São Paulo. There are approximately eight years of data available on significant wave height and peak wave period measured by an ADCP anchored in the region. Despite it constitute a relevant database, its duration is insufficient for directly determining the design wave characteristics of coastal structures. Therefore, the objective of this study is to determine the significant wave heights to be used in the design of coastal and port works in Santos, SP, for different return periods, using the logarithmic extrapolation of the available data. To this end, the data were consisted and the independent events identified, ordered and plotted in relation to the corresponding return periods. This analysis showed that the highest significant wave height recorded in the period was 4.25 m. and that the peak periods of the most energetic waves are generally between 9 and 11 seconds. Using a logarithmic graph, the data were extrapolated, resulting in significant wave heights of 5.11 m and 5.73 m for 25 and 100 years of return period, respectively, considering the position of the ADCP anchored in Santos Bay.

Resumo: Conhecer o regime de ondas é essencial para o planejamento e a gestão de áreas vulneráveis a processos erosivos, especialmente em regiões costeiras densamente ocupadas e economicamente ativas, como é o caso do litoral de Santos, em São Paulo. Existem disponíveis cerca de oito anos de dados de altura significativa e período de pico de ondas medidos por um ADCP fundeado na região, que, apesar de se constituir em uma base de dados relevante, é insuficiente para a determinação direta das características da onda de projeto de estruturas costeiras. Diante disto, o objetivo deste trabalho é determinar as alturas significativas de ondas através de a serem empregadas no dimensionamento de obras costeiras e portuárias em Santos – SP para diferentes períodos de retorno por meio da extração logarítmica dos dados disponíveis. Para tanto, os dados foram consistidos e os eventos independentes identificados, ordenados e grafados em relação aos correspondentes períodos de retorno. Desta análise verificou-se que a maior altura significativa de onda registrada no período foi de 4,25m e que os períodos de pico das ondas mais energéticas ficam geralmente entre 9 e 11 segundos. Empregando um gráfico logarítmico, os dados foram extrapolados, resultando em alturas significativas de onda de 5,11m e de 5,73m para 25 e 100 anos de período de retorno, respectivamente, considerando a posição do ADCP fundeado na Baía de Santos.

Palavras-Chave – altura significativa de onda; estatística de ondas; período de retorno

1) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: zenker@unicamp.br

2) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: a208330@dac.unicamp.br

3) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: e196352@g.unicamp.br

4) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: p226104@dac.unicamp.br

5) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: pdgarcia@unicamp.br

INTRODUÇÃO

A medição de ondas em regiões costeiras desempenha um papel estratégico no apoio a diversas atividades humanas. Conhecer o regime de ondas é essencial para a operação do transporte marítimo, a navegação recreativa, os esportes aquáticos e o uso ordenado da faixa praial. Sob a perspectiva ambiental, essas informações subsidiam ações de preservação e restauração de ecossistemas costeiros, bem como o planejamento e a gestão de áreas vulneráveis a processos erosivos, inundações e marés meteorológicas intensas (SHIH, 2012).

Além disso, os dados de ondas constituem sistemas de monitoramento, alerta e resposta a emergências, contribuindo para a mitigação de riscos associados a eventos extremos. No âmbito da engenharia costeira e marítima (off shore), fundamentam uma base essencial para o projeto e dimensionamento de estruturas costeiras de proteção, assim como de plataformas de extração de petróleo e gás, garantindo maior eficiência operacional e segurança estrutural frente a variadas condições oceanográficas (RAO et al., 2017). Portanto, a medição, o tratamento e a parametrização da climatologia local de ondas tornam-se especialmente relevantes em regiões costeiras densamente ocupadas e economicamente ativas, como é o caso do litoral de Santos, em São Paulo.

Santos é uma das cidades mais importantes da região Sudeste do Brasil e possui uma população de cerca de 430.000 habitantes, sendo a décima maior cidade do Estado de São Paulo. Além disso, Santos possui o maior porto da América Latina, com 13 km de extensão. Além disso, a cidade ocupa o primeiro lugar na lista das melhores cidades brasileiras. Santos é importante não apenas por seu impacto econômico, mas também por sua costa de 7 km de extensão (VENANCIO ET AL., 2020).

Entretanto, na Baía de Santos, existem apenas dois dispositivos do tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) realizando medições de ondas a cada 20 minutos. Além disso, apenas os dados da Boia 1, vide Figura 1, foram disponibilizados. Os dados de registro dessa boia disponíveis se iniciaram em fevereiro de 2015 e permanece ativo até o presente momento.

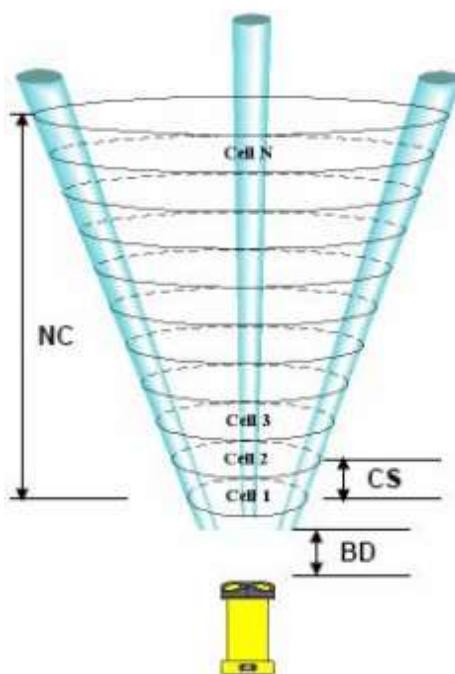
Figura 1 – Localização do ponto de medição de ondas (ADCP) na Baía de Santos



O ADCP é amplamente utilizado para medir o perfil de corrente na coluna d'água e a altura das ondas. O equipamento utiliza o princípio físico do efeito Doppler para medir a velocidade das partículas de água por meio de feixes acústicos, dirigidos em ângulos determinados em relação à vertical. Os feixes acústicos são transmitidos e a reflexão do som nas partículas suspensas é captada pelo equipamento, que calcula direção e intensidade da corrente ao longo dos eixos X, Y, Z. O perfil de velocidade é separado em células de profundidade, onde as velocidades medidas pelos feixes são combinadas para calcular a velocidade 3D de cada célula (SHIH, 2012).

O ADCP (Figura 2) também possui sensores de pressão e direção, que permitem o levantamento de dados de ondas. Os espectros de altura de ondas significativas (H_s) e período de ondas significativo (T_s) são obtidos através do espectro de velocidade medido, ou pela técnica de variação de eco, já a direção de onda predominante é determinada pelo método PUV, que requer uma pressão (P) e velocidades horizontais (UV) em taxas de dados altas o suficiente para resolver a energia das ondas (tipicamente 2 Hz ou mais). Os dados medidos através do ADCP são transformados em espectros via software e são importados em formato ASCII, facilitando o manuseio dos dados (SONTEK / YSI, 2005).

Figura 2 – Funcionamento ADCP (NC = Number of cells, CS = Cell Size, BD = Blanking distance).



Fonte: SONTEK / YSI, 2005.

O período de monitoramento atualmente disponível é de aproximadamente oito anos. No entanto, interrupções ocasionadas por manutenções no equipamento e outras indisponibilidades de dados reduzem o conjunto de dados válidos para cerca de sete anos. Apesar dessa restrição, esse histórico representa uma base inicial relevante para o monitoramento hidrodinâmico da região. Contudo, para projetos de estruturas costeiras e marítimas, é fundamental adotar valores de altura significativa de ondas (H_s), parâmetro fundamental para o dimensionamento, pois representa a energia transportada pelas ondas, associados a períodos de retorno mínimos de 25 anos. Essa abordagem tem como objetivo garantir maior estabilidade estrutural e menor necessidade de intervenções corretivas ao longo do tempo. Além disso, os efeitos das mudanças climáticas, como o aumento do nível médio do mar e a intensificação de eventos extremos, impõem a necessidade de estruturas mais robustas e resilientes.

Portanto, torna-se imprescindível considerar cenários cada vez mais severos já na fase de projeto, de forma a assegurar a durabilidade e a segurança das infraestruturas costeiras frente às novas condições climáticas. Diante disto, o objetivo deste trabalho é determinar as alturas significativas de ondas (H_s) através de a serem empregadas no dimensionamento de obras costeiras e portuárias em Santos – SP para diferentes períodos de retorno por meio da extração logarítmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados medidos no ADCP fundeado em frente à Ilha das Palmas (Figura 1) consistem em valores de altura significativa (H_s) de onda e período de pico (T_p) calculados em intervalos de 20 minutos desde 25/03/2015 às 15hs até 01/03/2024 às 0hs. Entretanto ao longo dos registros existem falhas tanto por falta da informação do registro quanto pelo fato do registrador estar inoperante. Essas falhas estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Falhas no registro dos dados medidos no ADCP em frente à Ilha das Palmas em Santos – SP

Início	Fim	Nº de dias da Falha	Início	Fim	Nº de dias da Falha
14/04/2015	à 14/04/2015	1	17/09/2018	à 27/09/2018	11
07/06/2015	à 14/07/2015	38	18/11/2018	à 21/11/2018	4
15/11/2015	à 15/11/2015	1	12/07/2019	à 31/12/2019	173
21/02/2016	à 01/03/2016	10	01/01/2020	à 31/12/2020	366
15/03/2016	à 16/03/2016	2	03/04/2021	à 25/04/2021	23
19/11/2016	à 20/11/2016	2	08/10/2021	à 11/10/2021	4
05/12/2016	à 06/12/2016	2	20/02/2023	à 23/02/2023	4
13/06/2017	à 15/06/2017	3	29/09/2023	à 17/10/2023	19
21/12/2017	à 21/12/2017	1			

Desconsiderando as falhas, o registro possui um total de 2601 dias, que equivale à 7,126 anos, distribuídos entre os anos calendário conforme Tabela 2.

Tabela 2: Número de dias com dados em cada ano do registro

ano	Nº de dias com dados		Nº de dias com dados
	ano	ano	
2015	325	2020	0
2016	349	2021	338
2017	361	2022	365
2018	350	2023	342
2019	188	2024	60

Como cada evento extremo costuma durar alguns poucos dias, os dados foram tratados de forma a separar a altura máxima de cada evento selecionando-se, para cada dia, o maior registro de H_s e posteriormente extraindo apenas as datas em que a altura significativa selecionada é simultaneamente maior do que a dos dias anterior e posterior à data de análise.

Desta análise restaram 571 eventos que, de maneira análoga ao que é feito para extração de variáveis hidrológicas foram hierarquizados do maior para o menor H_s , sendo o período de retorno correspondente a cada altura dado por:

$$TR = \frac{\text{Nº total de anos de amostra}}{\text{Nº de ordem da onda}} \quad (1)$$

Feito isto, em uma primeira análise, os períodos de retorno de todas as ondas restantes foram grafados em escala logarítmica em relação às suas alturas significativas e, na sequência verificou-se a aderência dos pontos à uma reta a partir do erro médio quadrático (R^2).

Em uma segunda abordagem, o mesmo procedimento foi aplicado apenas às ondas medidas em eventos extremos, aqui consideradas como sendo aquelas cuja altura significativa iguala ou supera os três metros.

Por fim, foi feita uma análise crítica em relação aos resultados obtidos e, a partir da equação determinada, foram calculadas as alturas significativas de onda de projeto para os períodos de retorno mais usuais de obras costeiras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão apresentados os números de ordem e o respectivo período de retorno em anos dos eventos com maiores e menores H_s do registro.

Tabela 3 – Número de ordem e período de retorno das maiores e menores alturas significativas de ondas consideradas na análise

Data	H _s (m)	T _p (s)	Nº de ordem	TR (anos)
21/08/2016	4,25	9,1	1	7,126
21/08/2017	4,20	10,7	2	3,563
28/09/2023	4,17	10,3	3	2,375
27/04/2016	4,01	10,7	4	1,782
18/07/2017	3,78	9,1	5	1,425
22/09/2021	3,77	10,6	6	1,188
19/08/2022	3,77	9,8	7	1,018
02/04/2023	3,71	14,8	8	0,891
18/02/2023	3,68	8,9	9	0,792
11/08/2022	3,59	8,9	10	0,713
29/08/2022	3,55	10	11	0,648
28/10/2018	3,52	11,2	12	0,594
05/11/2023	3,44	14,9	13	0,548
04/08/2017	3,4	9,7	14	0,509
01/11/2022	3,38	10,2	15	0,475
20/05/2018	3,36	13,8	16	0,445
11/06/2016	3,268	14,1	17	0,419
01/04/2021	3,25	9,9	18	0,396
07/05/2021	3,24	8,5	19	0,375
28/10/2016	3,19	9,9	20	0,356
14/07/2023	3,17	9,5	21	0,339
04/12/2016	3,09	11,2	22	0,324
19/05/2022	3,06	10,9	23	0,310
28/04/2017	3,03	12,9	24	0,297
09/08/2023	3,02	17,8	25	0,285
11/07/2018	3	11,7	26	0,274
11/08/2022	3,59	8,9	10	0,713
...
31/01/2021	0,32	9,7	567	1,26E-02
18/05/2015	0,30	7,7	568	1,25E-02
01/01/2019	0,30	10,8	569	1,25E-02
28/01/2021	0,30	8,2	570	1,25E-02
22/05/2015	0,23	6,5	571	1,25E-02

Observando-se os dados, nota-se que as maiores alturas significativas de onda medidas no período se aproximam dos 4,20 metros de altura, já os correspondentes períodos de pico, variam desde 8,5 a 17,8 segundos, com mediana em 10,3s.

Na Figura 3 e na

Figura 4 são apresentados os gráficos logarítmicos da altura significativa de onda em função do período de retorno, a equação logarítmica de melhor ajuste, bem como o respectivo R^2 considerando todos os eventos do registro e apenas os registros considerados extremos, respectivamente.

Figura 3 – Extrapolação estatística das Alturas Significativas de Onda para o conjunto completo de dados a exceção dos de calmaria

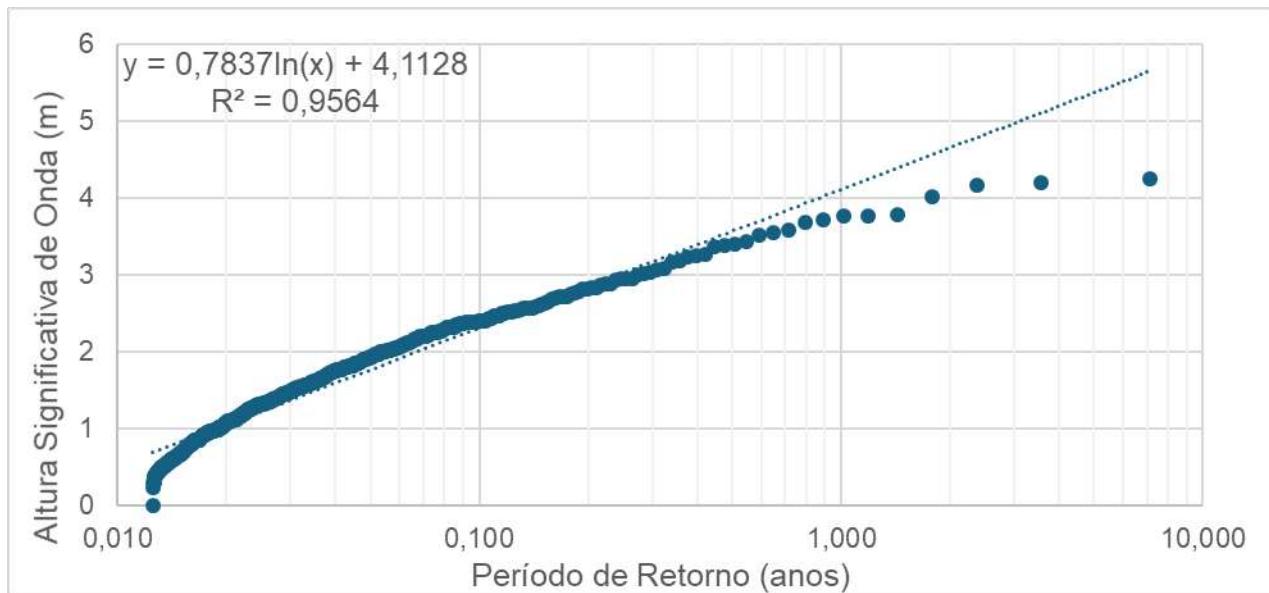
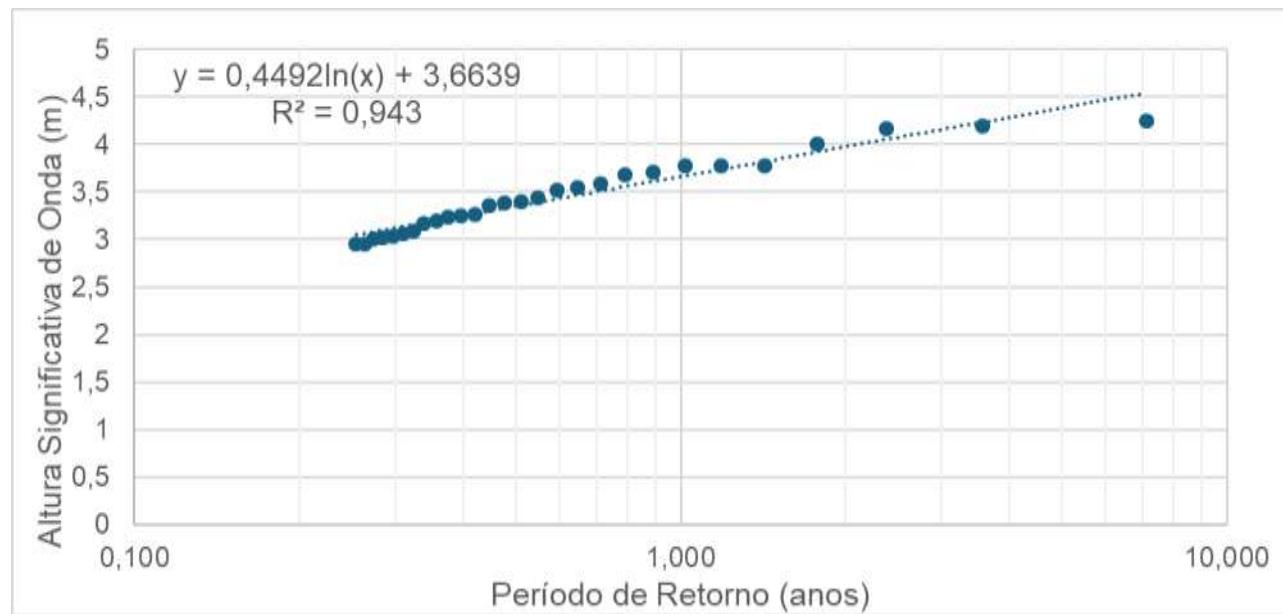


Figura 4 – Extrapolação estatística das Alturas Significativas de Onda considerando apenas os dados de eventos extremos



Da análise da Figura 3 nota-se que, apesar do valor elevado de R^2 , a equação logarítmica claramente tende a superestimar as alturas de ondas para os maiores períodos de retorno do registro. Já da análise da

Figura 4, que considera apenas os eventos com H_s iguais ou superiores a 3,0m, mesmo tendo um R^2 ligeiramente inferior, a reta parece estar mais aderente aos dados do registro, de forma que

está foi a equação empregada para extrapolar as alturas e obter as relações entre a altura significativa de onda e correspondente período de retorno detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Altura Significativa de Onda a ser considerada para os diferentes Períodos de Retorno de Obras Costeiras na Baía de Santos

TR	Hs (m)
10	4,70
15	4,88
20	5,01
25	5,11
30	5,19
50	5,42
100	5,73

Da análise da Tabela 4 nota-se que para cem anos de período de retorno, bastante empregado no dimensionamento de estruturas costeiras rígidas, a altura significativa de onda na posição do ADCP a ser considerada seria de 5,73 metros, da mesma forma, para obras costeiras flexíveis, para as quais o período de retorno de vinte e cinco anos pode ser empregado, o Hs a ser considerado seria de 5,11 metros.

CONCLUSÃO

Neste artigo foi possível analisar uma série de dados de altura significativa e período de pico de ondas medidas na Baía de Santos que abrange um período de aproximadamente oito anos. Desconsiderando as falhas e inconsistência dos dados restaram pouco mais de sete anos de dados dos quais foi possível extrair 571 eventos independentes que foram ordenados pela altura de onda e tiveram os respectivos períodos de retorno calculados. Desta análise verificou-se que a maior altura significativa de onda registrada no período foi de 4,25m e que os períodos de pico das ondas mais energéticas ficam geralmente entre 9 e 11 segundos. Empregando um gráfico logarítmico, as tendências foram analisadas e a curva que melhor se ajustou foi a calculada empregando apenas os eventos extremos, com Hs igual ou superior a 3,0m, resultando em alturas significativas de onda de 5,11m e de 5,73m para 25 e 100 anos de período de retorno, respectivamente, considerando a posição do ADCP fundeado na Baía de Santos.

Estes resultados cobrem uma lacuna de informação meteoceanográfica na região e podem vir a compor tanto a base de dados para o dimensionamento de obras de proteção costeira e portuárias projetadas para a região, quanto dar suporte a elaboração de cenários extremos em estudos que visem avaliar os impactos das mudanças climáticas na Baía de Santos.

REFERÊNCIAS

- RAO, L. *et al.* Surface wave measurement with ADCP: A review of publications from 1979 to 2017. In: OCEANS 2017 - ANCHORAGE. **OCEANS 2017 - Anchorage**. set. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8232101>>. Acesso em: 23 jun. 2025
- SHIH, H. H. Real-time current and wave measurements in ports and harbors using ADCP. In: 2012 OCEANS - YEOSU. **2012 Oceans - Yeosu**. maio 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6263642>>. Acesso em: 23 jun. 2025
- SONTEK / YSI. **ADCP Manual v7**. 2005.
- VENANCIO, K. K *et al.* Hydrodynamic modeling with scenario approach in the evaluation of dredging impacts on coastal erosion in Santos (Brazil). **Ocean & Coastal Management**, v. 195, p. 105227, 1 set. 2020.

AGRADECIMENTOS

À Praticagem de Santos, à Prefeitura Municipal de Santos e à Autoridade Portuária de Santos, pelo fornecimento dos dados que tornaram possível este artigo.