Ensaaios em modelos de quebra-mar submersos para proteção da orla do Leme

Tests in small-scale submerged breakwaters to protect the Leme waterfront

• **Data de entrada:**
02/10/2018

• **Data de aprovação:**
18/11/2019

Guilherme Amado Machado¹ | Jean Marcel Faria Novo² | Celso Romanel^{3*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.005>

ORCID ID

Amado GA <https://orcid.org/0000-0002-5718-1119>

Novo JMF <https://orcid.org/0000-0002-3188-2822>

Romanel C <https://orcid.org/0000-0002-8812-3456>

Resumo

O propósito deste trabalho é investigar a vulnerabilidade da praia do Leme, na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, em relação ao risco de erosão costeira provocada pela elevação do nível do mar devido a mudanças climáticas. Foram realizados diversos ensaios em modelo reduzido em canal de ondas, admitindo várias cotas do nível do mar e alturas significativas de onda produzidas em tempestades com períodos de recorrência de um, dez e cem anos. Considerando o perfil atual da praia do Leme, foram estudados os efeitos da elevação do nível do mar em termos da erosão do fundo marinho e da possibilidade de ondas ultrapassarem a crista da orla, com invasão d'água em prédios residenciais e formação de depósitos de areia em calçadas e vias públicas. Como medida de engenharia para mitigação desses efeitos, foi verificada a influência da construção de quebra-mares submersos na proteção da orla do Leme por meio de uma série de ensaios em modelos reduzidos.

Palavras-chave: Quebra-mar. Nível do mar. Ondas do mar. Mudanças climáticas. Orla do Leme

Abstract

The purpose of this work is to investigate the vulnerability of the Leme beach, in the South zone of the city of Rio de Janeiro, to the risk of coastal erosion caused by sea level rise due to climate change. Several tests were carried out in a small-scale model in a wave channel, considering different sea levels and significant wave heights generated by storms at recurrence periods of one, ten and one hundred years. Considering the current profile of the Leme beach, the effects of sea level rise were studied in terms of erosion of the sea floor and the possibility of waves surpassing the elevation of the borderline, with water invasion of residential buildings and formation of sand deposits on sidewalks and public roads. As an engineering measure to mitigate these effects, it was verified the influence of the construction of submerged breakwaters in the protection of the Leme waterfront through a series of tests in small-scale models.

Keywords: Breakwater. Sea level. Sea waves. Climate change. Leme waterfront

¹ Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

² Universidade Federal Fluminense - Niterói - Rio de Janeiro - Brasil.

³ PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil.

* **Autor correspondente:** romanel@puc-rio.br.

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento das populações urbanas ao longo das regiões litorâneas e a crescente ameaça de mudanças climáticas são indícios da exposição mundial de mais de um bilhão de pessoas a inundações costeiras em 2060 (Doig e Ware, 2016), com a possibilidade de elevação do mar entre 53 a 98 cm acima do nível atual até o próximo século (IPCC, 2014). Esse cenário é particularmente preocupante para o Brasil, que possui alto grau de urbanização com concentração populacional no litoral (IBGE, 2015), incluindo grandes capitais como Rio de Janeiro, Fortaleza, Recife, Salvador e Florianópolis. A elevação do nível do mar é influenciada por vários fatores, como o descongelamento de geleiras, incluindo das calotas polares, a expansão térmica das águas dos oceanos e o movimento de correntes oceânicas.

Independentemente do número de pessoas deslocadas, os governos serão forçados a investir enormes somas de recursos para relocar comunidades ou investir em infraestrutura para protegê-las. No caso específico da cidade do Rio de Janeiro, seriam afetadas suas famosas praias, que constituem uma importante fonte de renda para o município, com influência sobre o turismo, os eventos culturais e esportivos e sobre o próprio estilo de vida da cidade.

Este trabalho tem como objetivo investigar a vulnerabilidade da praia do Leme, Rio de Janeiro, em relação ao risco de erosão costeira provocado pela elevação do nível do mar. O bairro do Leme, com população atual aproximada de quatorze mil pessoas em uma adensada área urbana de trinta e seis hectares, possui histórico de ocupação da orla bem documentado desde o final do século XIX. Apesar disso, o principal obstáculo para a realização desta pesquisa foi a falta de informações sistematicamente coletadas sobre as características das ondas da praia (direção de incidência, alturas e períodos), o que exigiu, para suas estimativas, a realização de simulações numéricas.

O presente estudo é baseado na modelagem física reduzida da orla e praia do Leme em canal de ondas considerando três possibilidades de perfis (atual e com dois tipos de quebra-mar submersos) sob ação de ondas com alturas para vários períodos de recorrência (um ano, dez anos, cem anos) e diferentes níveis do mar (+1,4m, +1,7m, +2,4m).

2 HISTÓRICO DA OCUPAÇÃO DA ORLA

Até o final da década de 1880, a área do atual bairro do Leme não apresentava qualquer tipo de ocupação urbana (Fig. 1a), a qual foi iniciada no final do século XIX com a redução da largura estimada da praia original de 187m para aproximadamente 117m (Fig. 1b). Em 1906, a região foi consolidada como área residencial, com a abertura do túnel Novo ligando os bairros do Leme e de Botafogo, e a inauguração de uma via simples ao longo da orla com largura aproximada de 8m (Fig. 2a). Essa via foi duplicada em 1919, com a construção de um calçadão (Fig. 2b), e a largura da praia recuou sucessivamente para 109m (em 1906) e 94m (em 1918).

Em cinquenta anos, a ocupação do bairro ocorreu de forma acelerada e com alto grau de adensamento (Fig. 3a), podendo ser observada na Fig. 3b a proximidade da orla junto ao mar no início da década de 1960, fato que motivou a elaboração de um projeto de proteção e ampliação das praias de Copacabana / Leme por meio de um aterro hidráulico, com lançamento de areia. A orla foi então ampliada para a largura atual de 75m, com a duplicação da avenida Atlântica, e a praia alargada para mais de 100m, em alguns trechos. A cota altimétrica da crista da orla se situa em +3,6m acima do zero hidrográfico (marégrafo de Imbituba - SC), embora o projeto original do aterro, ilustrado na Fig. 4, recomendasse uma cota altimétrica superior para a crista da orla entre +3,8m e +4m.

Segundo Campos et al. (2008), a amplitude do ciclo anual do nível do mar é pouco significativa quando comparada à influência da maré meteorológica, associada com eventos atmosféricos que perduram entre 5 a 10 dias. De acordo com Paula et al. (2008), a praia do Leme apresenta características sedimentares deposicionais, com a fase de erosão (perfil de inverno) compensada ao longo do ano por fase de acúmulo de sedimento (perfil de verão), conforme ilustra a Fig. 5.

3 MODELAGEM FÍSICA

Ao longo do tempo, os limites da praia do Leme sofreram variações, em função dos processos de

ocupação urbana e das condições ambientais da dinâmica costeira local. Atualmente, há uma preocupação mundial crescente com a vulnerabilidade costeira, principalmente em regiões de alta densidade demográfica, devido aos impactos decorrentes do aumento da temperatura média da atmosfera, com previsão da elevação do nível do mar causada pelo derretimento das calotas polares e expansão térmica das águas dos oceanos. Adicionalmente, as alterações climáticas também afetariam a vulnerabilidade costeira provocando alterações nos regimes de ventos, ondas e chuvas, trazendo consequências graves cujas avaliações demandam o emprego de modelos físicos ou computacionais.

Figura 1 - (a) Praia de Copacabana / Leme em 1880 com localização do bairro do Leme em destaque; (b) registro fotográfico das primeiras edificações em 1896.

Fonte: Google Imagens

Figura 2 - (a) Construção de via ao longo da orla em 1906, destruída parcialmente em 1914, por maré de ressaca; (b) Duplicação da via e construção de calçadão em 1919, com destruição parcial da obra recém-inaugurada por maré de ressaca em 1921.

Fonte: Google Imagens

Figura 3 - (a) Ocupação urbana da praia de Copacabana / Leme em 1966 - o retângulo novamente destaca o bairro do Leme; (b) registro fotográfico da orla em 1962.

Fonte: Google Imagens

Figura 4 - Croquis da seção tipo do projeto de defesa da praia de Copacabana / Leme; no detalhe, destacado pelo círculo, a cota da crista da orla sugerida para +3,8m a +4m.

Fonte: arquivo INPH.

Figura 5 - Praia do Leme no perfil de inverno (acima) e no perfil de verão (abaixo).

Fonte: adaptado de Google Earth

Neste trabalho investigou-se a vulnerabilidade da praia do Leme em relação ao risco de erosão costeira provocado pela elevação do nível do mar, mediante modelagem física reduzida utilizando o canal de ondas do INPH - Instituto Nacional de

Pesquisas Hidroviárias. O canal de ondas é equipado com uma plataforma eletromecânica que gera ondas irregulares com determinadas alturas e períodos, dispondo de sensores de medições de onda conectados a um sistema de aquisição e análise de

dados que emite relatórios de análise espectral e de estatísticas das ondas geradas no modelo.

Para simular a aleatoriedade das condições do mar, foram realizados diferentes ensaios de longa duração considerando uma sequência de tempestades, cada uma delas representando determinada condição de tempo de retorno (TR), por meio de combinações de níveis d'água (N.A) e parâmetros de altura de onda e período. A geração de ondas no modelo físico foi feita a partir de espectros JONSWAP - *Joint North Sea Wave Project* (Hasselmann et al., 1973) com parâmetro de pico $\gamma = 2,5$, período de pico $T_p = 11$ s e alturas

significativas $H_s = 2,8$ m (TR = 1 ano), $H_s = 3,8$ m (TR = 10 anos) e $H_s = 4,4$ m (TR = 100 anos).

A Fig. 6 mostra a representação do perfil atual da praia do Leme construído na escala geométrica λ (1:40). Os aspectos físicos envolvidos nos ensaios são predominantemente relacionados a forças inerciais e gravitacionais, razão pela qual foram aplicadas as leis de semelhança de Froude, considerando escala de força $1:\lambda^3$ (1:64.000) e escala de tempo $1:\lambda^{0,5}$ (1:6,324). Assim, um ensaio de quinze minutos corresponde a um evento com duração aproximada de duas horas na natureza.

Figura 6 - Canal de ondas com o posicionamento das sondas S1, S2 e S3.

O retângulo tracejado destaca a área onde foi construído o modelo da orla e praia do Leme na escala 1:40.

Fonte: Machado (2016)

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Devido à ausência de medições de ondas na praia do Leme, foram adquiridos 11 anos de resultados provenientes de simulações pelo modelo numérico de climatologia global do ECMWF - *European Center for Medium-Range Weather Forecasts*. Os parâmetros de onda assim obtidos se referem à altura significativa de onda (H_s), ao período de pico (T_p) e à direção de incidência. O modelo utilizou uma malha global regular com resolução espacial de $1,5^\circ$ em latitude e longitude, com cálculo dos parâmetros a cada seis horas, no pe-

ríodo entre 01/01/2002 e 01/12/2012. Com base nos resultados para o ponto de monitoramento, com coordenadas geográficas $22^\circ 59' 39,30''$ S e $43^\circ 8' 52,31''$ O (Fig. 7), foram determinadas as alturas significativas, considerando que a variável H_s segue uma distribuição de Weibull, o que permitiu seu cálculo para um nível de probabilidade de excedência de $1/TR$, onde TR é o tempo de retorno (TR = 1, 10, 100 anos). Uma rosa de alturas significativas em função da direção de incidência de ondas para a profundidade de 20m é apresentada na Fig. 8.

Figura 7 - Ponto de monitoramento de ondas costeiras na modelagem numérica em frente à praia de Copacabana / Leme.
Fonte: Google Earth

Figura 8 - Rosa de ondas no ponto de monitoramento (profundidade de 20m) com distribuição estatística das alturas significativas de onda (Hs) por direção de incidência. Resultados obtidos por modelagem de ondas com o software Mike 21.
Fonte: Machado (2016)

A confiabilidade dos dados estimados pelo modelo numérico global foi anteriormente estabelecida comparando as alturas significativas de onda determinadas numericamente e medidas por um ondógrafo posicionado nas coordenadas 22°59'58,8"S e 43°13'15,0"W, distante aproximadamente 1 km da linha da praia de Ipanema. Nessa campanha de medição, o equipamento foi

configurado para obter registros de 20 minutos de duração a cada intervalo de três horas, durante o período de julho a outubro de 1997. A Fig. 9 mostra uma boa concordância entre ambos os valores, justificando a execução da presente pesquisa com base na análise de dados pretéritos (*hindcast*) para elaboração de um prognóstico (*forecast*) anual do estado de agitação marinha da área de interesse.

Figura 9 - Comparação da altura significativa de onda H_s medida (linha vermelha descontínua) e estimada (linha azul contínua) durante os meses de julho a outubro de 1997.

Fonte: INPH (1999)

5 CENÁRIOS INVESTIGADOS

Para simular a aleatoriedade das marés de tempestade foram realizados diversos ensaios no canal de ondas envolvendo diferentes cenários de alturas significativas de onda e da cota do nível do mar: a) ondas de alturas significativas $H_s = 2,8\text{m}$ (TR = 1 ano), $H_s = 3,8\text{m}$ (TR = 10 anos), $H_s = 4,4\text{m}$ (TR = 100 anos); b) nível do mar $NA = +1,4\text{m}$ (nível máximo de preamar), $NA = +1,7\text{m}$ (preamar meteorológica) e $NA = +2,4\text{m}$ (elevação máxima prevista). A elevação máxima do nível do mar, um metro acima do nível máximo de preamar, foi considerada tendo em vista a estimativa do IPCC (2014) para o pior cenário projetado para o ano 2100, com elevação do nível atual do mar em até aproximadamente 1m.

Cada ensaio foi executado no mínimo duas vezes, a fim de verificar a consistência dos valores registrados pelas sondas de medição. Ha-

vido necessidade, os ensaios foram repetidos até que os resultados obtidos fossem considerados confiáveis.

Foram ensaiados três perfis da praia do Leme, o primeiro dos quais reproduzindo as condições atuais (Fig. 10a), utilizando areia fina peneirada disposta conforme as cotas altimétricas e batimétricas coletadas. Para controle das ondas do mar em cenários de marés de tempestade, foram incluídos um quebra-mar com blocos ($2,5\text{m} \times 5,0\text{m} \times 3,5\text{m}$), em dimensões reais, pré-moldados de concreto (Fig. 10b) e um quebra-mar submerso composto por blocos de concreto, com dimensões reais de $6,8\text{m}$ (largura) $\times$ 14m (comprimento) $\times$ 10m (altura), para verificar os efeitos em condições de tempestade extrema ($H_s = 4,4\text{m}$, TR = 100 anos, $NA = +2,4\text{m}$). A cota da crista da orla foi também elevada do nível atual $+3,6\text{m}$ para o nível $+6,4\text{m}$ (Fig. 10.c).

Figura 10 - Perfis da praia do Leme: a) nas condições atuais; b) com quebra-mar submerso de blocos de concreto pré-moldado. c) com novo quebra-mar submerso e elevação da crista da orla para +6,4m.

Fonte: Machado (2016)

6 RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Perfil atual sem quebra-mar

São apresentados resultados para os ensaios em modelos reduzidos em canal de ondas com altura significativa de 2,8m ($TR = 1$ ano, $T_p = 11s$, $NA = +1,4m$), altura significativa de 3,6m ($TR = 10$ anos, $T_p = 11s$, $NA = +1,7m$) e altura significativa de 4,4m ($TR = 100$ anos, $T_p = 11s$, $NA = +2,4m$). A primeira configuração de ensaio não apresentou riscos de avanço do

mar sobre a orla, com as ondas ultrapassando a cota da crista da berma (+3m), porém não superando a cota da crista da orla (+3,6m). Já para as condições do segundo ensaio, as ondas venceram a cota da crista da orla, enquanto para a situação de ondas centenárias (terceiro ensaio) as ondas ultrapassaram a cota da crista da orla com intensa energia, atingindo os prédios residenciais de forma violenta, depositando quantidade de areia na via pública (Fig. 11).

Figura 11 - Para as condições atuais da praia do Leme, ondas centenárias (altura significativa de 4,4m e NA = +2,4m) ultrapassam a cota da crista da orla (+3,6m), invadem prédios residenciais e depositam grande quantidade de areia na avenida Atlântica.

Fonte: Machado (2016)

6.2 Perfil atual com quebra-mar submerso

Para este perfil, durante a repetição do primeiro ensaio ($H_s = 2,8\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,4\text{m}$) observou-se que as ondas novamente galgaram a cota da crista da berma (+3m), mas não superaram a cota atual da crista da orla (+3,6m). Comparado com o ensaio semelhante executado sem o quebra-mar, foi constatada uma quantidade menor de água sobre a praia, devido à redução da energia das ondas provo-

cada pela introdução do quebra-mar (Fig. 10.b). Dos valores listados na Tabela 1, percebe-se que a altura significativa de onda medida pela sonda S3 (Fig. 6), localizada após a passagem das ondas pelo quebra-mar, é menor do que a anteriormente registrada. Nessa tabela, a altura significativa de onda medida pela sonda (H_s) corresponde à altura média de 1/3 das ondas mais altas ($H_{1/3}$), e o período de pico (T_p) se refere à média dos períodos considerados para cálculo de $H_{1/3}$, considerando todas as ondas geradas no ensaio.

Tabela 1 - Comparação das alturas de ondas medidas pelas sondas S1, S2, S3

Ensaio 1 - Perfil Atual – ($H_s = 2,8\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,4\text{m}$)						
Sonda	Número de ondas	$H_{\max}$ (m)	$H_{\text{médio}}$ (m)	$T_{\text{médio}}$	H_s	T_p
S1 (-20m)	761	3,89	1,72	8,46	2,65	10,47
S2 (-10m)	686	4,12	1,46	9,39	2,43	12,08
S3 (-03m)	721	4,24	1,97	8,93	3,2	11,20
Ensaio 1 - Perfil Atual com Quebra-Mar – ($H_s = 2,8\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,4\text{m}$)						
Sonda	Número de ondas	$H_{\max}$ (m)	$H_{\text{médio}}$ (m)	$T_{\text{médio}}$	H_s	T_p
S1 (-20m)	742	4,99	2,12	8,68	3,18	10,81
S2 (-10m)	758	4,84	1,60	8,50	2,68	11,60
S3 (-03m)	696	2,76	1,24	9,27	1,87	12,59

No segundo dos ensaios ($H_s = 3,8\text{m}$, $TR = 10$ anos, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,7\text{m}$), a cota da crista da orla (+3,6m) foi novamente ultrapassada. Nesse caso, os efeitos da construção do quebra-mar são menos significativos, considerando a comparação

entre as alturas significativas de onda medidas pela sonda S3, conforme Tab. 2. No entanto, observando os resultados de erosão da praia causados pela maré de ressaca (Fig. 12) verifica-se que houve diferenças nos valores topoaltimétricos

medidos para as duas configurações ensaiadas (com e sem quebra-mar), com o registro de maior erosão na configuração sem quebra-mar.

A variação no número de ondas medidas pelas sondas S1 (20m de profundidade), S2 (10m de profundidade) e S3 (3m de profundidade), posicionadas conforme Fig. 6, podem ser explicadas por reflexões no quebra-mar submerso e no confinamento lateral do canal de ondas, bem como pelas diferenças de rugosidade no fundo do ca-

nal, de concreto em seu início, e em areia para compor a praia no final do percurso.

Para o terceiro ensaio, a situação mais adversa testada, com ondas centenárias e nível do mar elevado para a cota máxima ($H_s = 4,4\text{m}$, $T_R = 100$ anos, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +2,4\text{m}$), a cota da crista da orla (+3,6m) foi ultrapassada com lançamento de areia na avenida Atlântica e invasão d'água nos prédios residenciais, situação semelhante à verificada no ensaio com o perfil atual, apresentada na Fig. 11.

Tabela 2 - Comparação das alturas de ondas medidas pelas sondas S1, S2, S3

Ensaio 2 - Perfil Atual - ($H_s = 3,8\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,7\text{m}$)						
Sonda	Número de ondas	$H_{\max}$ (m)	$H_{\text{médio}}$ (m)	$T_{\text{médio}}$	H_s	T_p
S1 (-20m)	714	6,26	2,82	9,02	4,25	10,84
S2 (-10m)	750	5,84	2,37	8,59	4,11	12,27
S3 (-03m)	702	3,94	1,90	9,17	2,96	12,01
Ensaio 2 - Perfil Atual com Quebra-Mar - ($H_s = 3,8\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +1,7\text{m}$)						
Sonda	Número de ondas	$H_{\max}$ (m)	$H_{\text{médio}}$ (m)	$T_{\text{médio}}$	H_s	T_p
S1 (-20m)	717	6,28	2,85	8,98	4,22	10,57
S2 (-10m)	767	5,63	1,95	8,40	3,57	12,69
S3 (-03m)	686	3,92	1,67	9,40	2,64	14,20

Figura 12 - Levantamento topográfico ao final dos ensaios considerando o perfil atual, com e sem a construção de quebra-mar.

Fonte: Machado (2016)

6.3 Perfil modificado com novo quebra-mar submerso

Com o objetivo de apresentar um plano de mitigação dos impactos da maré de tempestade

extrema com nível máximo do mar projetado para o ano 2100 (+2,4m), foi considerada a construção de um novo quebra-mar com a cota da crista da orla elevada de +3,6m para +6,4m

(Fig. 10c). Como resultado dos ensaios, as ondas centenárias não ultrapassaram a nova crista da orla, ocorrendo apenas respingos nos modelos do calçadão e da avenida Atlântica mas sem invasão d’água (Fig. 13). A Tab. 3 compara as alturas significativas de onda medidas pelas sondas nos ensaios com perfil atual (Fig. 10a), perfil atual com quebra-mar de blocos pré-mol-

dados de concreto (Fig. 10b) e novo perfil com quebra-mar e crista da orla elevada (Fig. 10c), na qual pode ser notada a grande redução da altura de ondas medidas pela sonda S3 nesses últimos ensaios. Foi também possível constatar que a menor quantidade de areia erodida ao final de cada ensaio ocorreu com o novo quebra-mar submerso.

Tabela 3 - Comparação das alturas significativas H_s (m) de onda medidas pelas sondas S1, S2, S3 nos três perfis ensaiados considerando ondas de tempestade centenária ($H_s = 4,4\text{m}$, $TR = 100$ anos, $T_p = 11\text{s}$, $NA = +2,4\text{m}$)

Sonda	Perfil Atual	Perfil Atual Quebra-Mar	Perfil Modificado Novo Quebra-Mar
S1 (-20m)	4,76	4,81	4,90
S2 (-10m)	4,70	3,95	4,44
S3 (-03m)	3,17	3,18	1,76

Figura 13 - Apesar dos respingos na orla, as ondas na condição extrema ($TR = 100$ anos, $H_s = 4,4\text{m}$, $NA = +2,4\text{m}$) não superaram a nova cota da crista da orla ($+6,4\text{m}$).
Fonte: Machado (2016)

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, os efeitos da elevação do nível do mar sobre a praia do Leme foram estudados em modelo reduzido em canal de ondas considerando o nível máximo de preamar (+1,4m), preamar meteorológica (+1,7m) e elevação adicional de 1m em relação ao nível máximo de preamar (+2,4m), com base em prognóstico para o ano 2100 (IPCC, 2014) em decorrência de mudan-

ças climáticas. Sobre estes níveis, foram ainda consideradas ondas com alturas significativas de 2,8m, 3,8m e 4,4m geradas por tempestades com períodos de recorrência de um, dez e cem anos, respectivamente.

Os resultados mostraram que, para o perfil atual da praia do Leme, a cota da crista da orla (+3,6m) é ultrapassada para nível da preamar meteorológica +1,7m e ondas com altura signi-

ficativa de 3,8m (TR = 10 anos). Nas condições de nível máximo do mar previsto para 2100, com ondas de 4,4m provocadas por tempestade de centenária, a água invadiu violentamente os prédios residenciais, depositando grande quantidade de areia em vias pública e causando forte erosão do leito marinho.

Dentre opções de obras de engenharia para prevenir e minimizar esses efeitos, foram testados os desempenhos de quebra-mares submersos para redução da energia das ondas. Um quebra-mar composto de blocos pré-moldados de concreto apresentou bons resultados na redução da erosão, mas foi pouco efetivo em conter os avanços da água do mar sobre a orla nos casos de preamar meteorológica +1,7m com ondas de altura 3,8m (TR = 10 anos) e nível máximo previsto (+2,4m) com ondas de altura 4,4m (TR = 100 anos).

Neste último caso, o mais crítico e adverso considerado neste trabalho, o avanço do mar sobre os prédios residenciais da avenida Atlântica somente foi contido com a construção de um quebra-mar submerso de 10m de altura e elevação da crista da orla dos atuais 3,6m para +6,4m.

Conclui-se que a praia do Leme é extremamente vulnerável a elevações do nível do mar, causadas por mudanças climáticas, combinadas com ocorrência de tempestades que gerem ondas superiores a 3m. Apesar dos avanços científicos no tema e dos recursos computacionais para simulação de cenários futuros, as incertezas associadas com modelos climáticos regionais ainda são grandes, mas o risco de uma falta de prevenção não pode ser ignorado. Neste sentido, a principal contribuição do presente trabalho é alertar para as possíveis consequências dessa atitude.

8 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

9 REFERÊNCIAS

- CAMPOS, R. M.; PARENTE, C. E.; CAMARGO, R. - Análise de eventos extremos de elevação do nível médio do mar no litoral do Rio de Janeiro. III Congresso Brasileiro de Oceanografia / Congresso Íbero-Americano de Oceanografia, Fortaleza, Ceará. 2008. **Anais...**
- DOIG, A.; WARE, J. - Act Now or Pay Later: Protecting a billion people in climate-threatened coastal cities, **Christian Aid**, p.16. 2016. Disponível em <https://www.christianaid.org.uk/resources/about-us/act-now-or-pay-later-protecting-people-coastal-cities>. Acesso em 02 de abril de 2018.
- HASSELMANN, K., BARNETT T.P., BOUWS E., CARLSON D.E., CARTWRIGHT D.E., ENKE K., EWING J.A., GIENAPP H., HASSELMANN D.E., KRUSEMAN P., MEERBURG A., MULLER P., OLBERS D.J., RICHTER K., SELL W., AND WALDEN H. Measurements of Wind Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project. (JONSWAP) **Deutsches Hydrographische Zeitschrift**, v.8, n.12, p.1-95. 1973.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil**, 167p., 2015. ISBN 978-85-240-4406-9. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv99700.pdf>. Acesso em 02 de abril de 2018
- INPH - Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias - Campanha de medição de ondas na praia de Ipanema, Rio de Janeiro, **Relatório Interno 35**, Rio de Janeiro. 1999.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - Climate Change 2014, **Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 151p, 2014, ISBN: 978-92-9169-143-2. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf. Acesso em: 02 de abril de 2018
- MACHADO, G.A. **Energia de ondas do mar em zonas costeiras urbanas: estudo de caso no bairro do Leme, Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 101p, 2016
- PAULA, R.L.M.; TAKANOHASHI, R. A.; GOMES, L.; MELO, A.; SPERLE, M. Monitoramento comparativo da morfodinâmica da praia de Copacabana - Leme nos anos de 1976, 1999, 2000, 2004 e 2007. III Congresso Brasileiro Oceanografia / Congresso Íbero-Americano de Oceanografia, Fortaleza, Ceará. 2008. **Anais...**