



**Guilherme Amado Machado**

**Energia de ondas do mar em zonas costeiras urbanas:  
estudo de caso no Bairro do Leme, Rio de Janeiro**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção Profissional).

Orientador: Prof. Celso Romanel

Coorientador: Prof. Jean Marcel de Faria Novo

Rio de Janeiro  
Setembro de 2016



**Guilherme Amado Machado**

**Energia de ondas do mar em zonas costeiras urbanas:  
estudo de caso no Bairro do Leme, Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Celso Romanel**

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Jean Marcel de Faria Novo**

Co-orientador

Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. Eliab Ricarte Beserra**

COPPE/UFRJ

**Rodrigo Flora Calili**

PUC-Rio

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação  
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de setembro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Guilherme Amado Machado**

Graduado em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1999. Trabalho Recifes artificiais de praia como dissipador da energia de ondas. Universidade Federal do Ceará, tese. Ceará, Brasil - 1999. Atuou na pesquisa e desenvolvimento de projetos de empresas dos setores de óleo e gás, engenharia portuária e ambiental costeira. Principais áreas de interesse: Erosão costeira, Avanço do Mar, Planejamento Energético e Engenharia Urbano-costeira.

#### Ficha Catalográfica

Machado, Guilherme Amado

Energia de ondas do mar em zonas costeiras urbanas: estudo de caso no Bairro do Leme, Rio de Janeiro / Guilherme Amado Machado; orientador: Celso Romanel; coorientador: Jean Marcel de Faria Novo. – Rio de Janeiro, 2016.

101 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Engenharia urbana e ambiental. 3. Energia oceânica. 4. Praia do Leme. 5. Rio de Janeiro. 6. Planejamento urbano sustentável. 7. Planejamento energético. I. Romanel, Celso. II. Novo, Jean Marcel de Faria. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Aos meus queridos familiares, pai e mãe, esposa, filho, irmão e família, como também aos amigos por estarem a minha volta preenchendo o meu mundo.

Aos professores, Jean, Eliab e Celso por interpretarem meu texto, e, com dedicação, me direcionarem ao aprimoramento desta dissertação.

A todos da competente equipe do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH por fornecerem toda informação e apoio necessário para execução dos experimentos de modelagem matemática e física, os quais enriqueceram significativamente este trabalho.

Meu sincero, muito obrigado!

## Resumo

Machado, Guilherme Amado; Romanel, Celso (orientador); Novo, Jean Marcel de Faria (coorientador). **Energia de ondas do mar em zonas costeiras urbanas: estudo de caso no Bairro do Leme, Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2016. 101p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescimento da população urbana e o incremento na demanda por energia elétrica para residências brasileiras, especialmente em zonas costeiras, indicam a relevância do aproveitamento da energia oceânica para o Brasil. Neste cenário, o trabalho investiga o potencial de energia de ondas na orla da cidade do Rio de Janeiro e suas possíveis relações com o planejamento sustentável da engenharia urbana costeira. O estudo sobre a microbacia do Bairro do Leme, localizado na orla oceânica da zona sul da cidade do Rio de Janeiro, estima um potencial de energia oceânica por aproveitamento energético das ondas do mar capaz de suprir a demanda de energia elétrica para toda a população do Bairro em torno de 14.000 pessoas. O potencial energético das ondas foi estimado a partir da análise estatística de um prognóstico anual do clima de ondas para essa orla, elaborado através da modelagem computacional de propagação de ondas. Sendo utilizados onze anos dados de onda extraídos do modelo global ERA/INTERIM. Em um modelo físico-reduzido (escala 1:40) do perfil tipo da orla do Leme, construído em canal de ondas irregulares, foi avaliada a vulnerabilidade da orla ao risco de galgamento de ondas durante extremos de marés de ressaca. Nos ensaios de modelagem física também foram testadas soluções de engenharia com vistas ao aproveitamento e controle do potencial energético de ondas. Com os resultados obtidos das modelagens, discute-se um plano conceitual para resiliência urbano-costeira da orla oceânica baseado na reengenharia do perfil de praia elaborado no projeto de obra estabelecido em 1970.

## Palavras-chave

Energia oceânica; Praia do Leme; Rio de Janeiro; Planejamento urbano sustentável; Planejamento energético.

## Extend Abstract

Machado, Guilherme Amado; Romanel, Celso (advisor); Novo, Jean Marcel de Faria (co-advisor). **Ocean wave energy in urban coastal areas: a case study in the Leme district, Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2016. 101p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

### 1. Introduction

The growth of urban population and the increasing demand for electricity to Brazilian consumers, especially in coastal areas, indicate the importance of the use of ocean energy for Brazil. In this scenario, this thesis investigates the wave energy potential on the south area of the city of Rio de Janeiro and its possible relation to sustainable planning of the coastal urban engineering.

About 3.9 billion people (54% of world population) live in urban areas. It is estimated that the growth of cities should result in an urban population of over 6.4 billion people by 2050, especially in the less developed areas, with poor urban planning and vulnerable to environmental risks (UN-Habitat, 2016). The urbanization of coastal areas in developing countries demands greater attention due to infrastructure needs and the necessary management to mitigate pressures of increasing human activities on the environment (Cicin-Sain and Knecht, 1998).

This framework is particularly important for Brazil that has a high degree of urbanization with marked concentration of population in its coastline (IBGE, 2015) with urban interventions on ocean beaches through works poorly integrated into the city, neglecting nature's ability to claim the balance taken away from her. According to the report Act Now or Pay Later, made by the organization Christian Aid, the rapid growth of urban populations along the coastlines of the world and the growing threat of climate change display evidences that more than one billion people will be vulnerable to coastal flooding in 2060 (Doig and Ware, 2016), in cities exposed to rising sea level, which should increase for the next century in global average between 0.18 and 0.70 meters above the current level (IPCC, 2014).

The urban population growth is accompanied by growing demand for electricity, which must be provided in critical levels due to the depletion of traditional electricity sources and the increasing complexity of distribution within the metropolis. The increase in energy demand, according to Hinrichs and Kleinbach (2003), is especially strong in developing countries.

The recent example of the water crisis that hit the state of Rio de Janeiro during the year 2015, when the water reserves for the metropolitan region of the city of Rio de Janeiro reached the level of 1.7% of the working volume (ANA, 2015), characterized an imminent risk of public shortage of electricity.

A systemic view puts into perspective the simultaneous abundance of energy in neighboring ocean waters to consumers and energy shortages in distant fresh water sources, conditions that may pose threats to sustainable development if there is no resistance and resilience in the ecosystem.

The infrastructure of cities is essential to sustainable development. However, the environmental variable is often neglected in urban planning and the prospect of intensifying weather extremes with its social and economic consequences in future scenarios.

The environmental condition "mean sea level" of coastal areas associated with "power shortage" in the area of urban concentration and the "lack of urban planning" appropriate sets up a scenario that may represent urban vulnerabilities that future generations would be penalized for. It represents an inverse logic to the condition of sustainable development pursued by contemporary society.

Faced with these problems, the central assumption of the research asks: how urban and environmental engineering may contribute to the planning of sustainable urban ocean shores? The overall objective of this thesis is to investigate the potential energy of ocean waves in the littoral zone of the city of Rio de Janeiro and its possible implications for sustainable planning of the coastal urban area. The estimated potential of wave energy generated in the watershed of Leme beach, south zone of Rio de Janeiro, is considered capable of meeting the electricity demand of the entire district whose population is around 14,000 people (figure 1).



Figure 1 - Aerial view of Leme and Copacabana beaches, Rio de Janeiro  
Source: Google Images.

Tables 1 and 2 present the general data and the estimated energy demands of the Leme district, respectively.

Table 1 - General data of Leme district

|                         |                         |                         |                      |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Territorial area (ha)** | Urban area (ha)         | Green area and APA (ha) | Beach Area (ha)      |
| 97,72                   | 36,83                   | 51,65                   | 9,24                 |
| district size           | resident population (*) | Description             | Registration Date    |
| small                   | 14.799                  | Residential district    | 1892                 |
| household (*)           | hotels                  | Administrative region   | Neighborhoods Limits |
| 7.399                   | 06                      | V - Copacabana          | Copacabana and Urca  |

Source: (\*)IBGE (2011); (\*\*) IPP (2003).  
protection

APA – area of environmental

Table 2 – Infrastructure demands in the Leme district

| Type           | Quantity           | Average demand (unit./ month) | Total monthly |
|----------------|--------------------|-------------------------------|---------------|
| Electricity    | 7.399 households   | 400 kWh*                      | 2.9 MWh       |
| Treated Water  | 15.000 inhabitants | 5.550 L/inh.**                | 83.250.000 L  |
| Sanitary sewer | 15.000 inhabitants | 5.550 L/inh.***               | 83.250.000 L  |
| Solid Waste    | 15.000 inhabitants | 30 Kg/inh.***                 | 450.000 Kg    |

Source: (\*) EPE -2015; (\*\*) ANA - 2010; (\*\*\*) SNIS - 2015.

The amount of energy available in the oceans is directly resulting from atmospheric forces (wind, atmospheric pressure and temperature differences) and astronomical (solar radiation, gravitational forces and rotational land) sources that interact and transfer energy to the water mass. In turn, the energy generated by ocean currents arises from the gradient differences (temperature and salinity)



contained in the ocean waters. Ocean energy, mainly manifested in the form of waves and tides, tends to be directed to the continental margins and acts significantly on the interface of coastal areas. So the oceans constantly shape the coastal margins and define their morphology. A great part of the problems in the environmental management of urban coastal areas comes from the fact that a natural coastal system tends to be dynamic phenomenon. But the man wants a stabilized system, hold the right of land ownership and simplify its management (Nordstrom, 2002).

Much of the population living in Brazilian coastal zones is directly or indirectly related to activities to the coastal environment, as the industry, tourism, oil, gas and fishing industries and maritime services. To sustain and develop all these economic activities, it is essential for the coastal environment that management pay particular attention to coastal zone continuity and the standardization of environmental measurements, particularly with respect to changes in the Mean Sea Level (MSL). The use of MSL as altimetry reference is accepted worldwide, and is also used for practical needs to the establishment of drainage networks and security quotas for the coastal region structures (Luz, 2008). By the end of the last century, the coastal cities were not threatened so strongly by the advance of the sea due to extreme events, as pointed out in the IPCC reports (2014).

In this context, a peculiar and significant feature is given in relation to security quota crest or the top-altimetry edge relative to sea level (N.R. 0.0m). According to Alencar (1990), in Brazil, until 1946, there was a reference surface with respect to which all altitudes in the country were calculated - the Brazilian Datum altimeter. With the implementation of the Precision Levelling Network, the use of MSL was adopted by the IBGE; since 1958 prevails as reference level of hydrographic zero (0.0m) of the tide gauge of Imbituba city, in the Santa Catarina state.

Coastal protection works are engineering structures whose main purpose is to protect coastal and port areas of action of the waves. Currently, coastal protection works can be prepared in three basic types of intervention:

- On shore, works built in parallel and on the coast line, the structure starts and ends on the coast. Example: seawall or hydraulic fill;

- In shore, works constructed transversely to the shore line, the leading edge of the structure is on the shore, and the final end is at sea. Example: jetties;
- Off shore, works built out of the coast, or both ends of the structure are in the water. Example: stone breakwaters.

Considering the point of view of environmental assets, there are five forms of exploitation of ocean energy through waves, tides, currents, temperature gradients and salinity gradients (Soerensen and Weinstein, 2008; Khan and Bhuyan, 2009).

Among these forms of exploitation of ocean energy, wave energy is the most important because of ocean wave power go hundreds of kilometers without significant loss of energy and it is available in coastal cities. The figure 2 shows the distribution of currents along the coastal region of Southern Africa; the white spots in circular shapes represent variations of the current intensities at different locations.

To evaluate the energy potential of coastal waves for conversion to electricity and public water supply for the Leme district, a computational model (ERA / INTERIM) was employed to characterize the sea waves in the area of study. The energy potential of the waves was estimated from statistical analysis based on an annual prognosis wave climate.

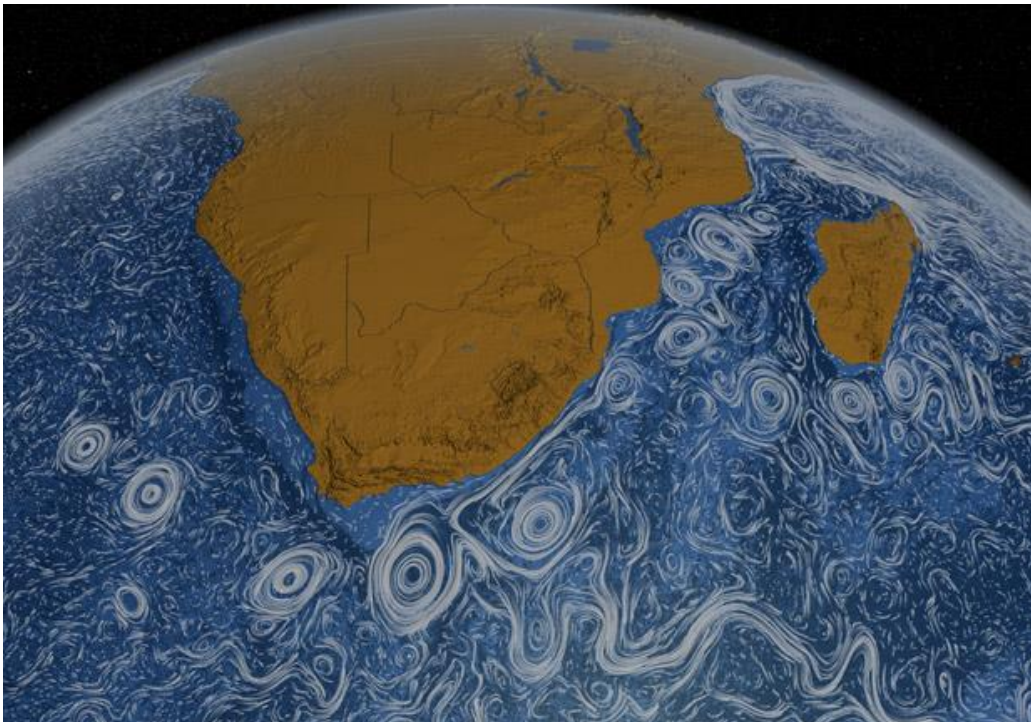


Figure 2 - NASA image shows sea currents in the austral region of Africa  
Source: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.

To calculate the potential for electricity generation, it was considered a technological equipment with four (04) meters of wavefront capture and an electric conversion with efficiency rate of 20% of the available energy in the incident waves. The electrical potential generated results in megawatts-hour (MWh) and ranked by annual occurrence of a given direction of the incident waves.

In irregular waves channel, a physical scale model (scale 1:40) of a cross-section of profile type from the edge of the Leme beach was built in. The model was assessed against vulnerability of the edge to the risk of wave overtopping during extreme storm tides.

The TR100 storm test (wave height  $H_s = 4.4\text{m}$ , peak period  $T_p = 11\text{s}$ , water level  $NA = + 2.4\text{m}$ ), which was the most adverse storm conditions tested considering the superheat of the water level, produced waves that exceeded the quota crest edge (+ 3.6m) with intense energy (figure 03).



Figure 3 - TR100 test with storm tide conditions  
Source: Own authorship.

In physical modeling tests there were also checked engineering solutions with the purpose to use and control the potential wave energy. From the diagnosis of vulnerability to the risk of sea advancement with overtopping of the Leme's

waterfront edge, it was developed a new urban engineering plan to withstand storms with a return period of 100 years. The main feature of this plan was the establishment of the security quota to the crest of edge at +6.4 meters above the zero sea level (0.0m).

According to the results obtained in physical modeling tests, with the current security quota to the crest of Leme's waterfront edge set at +3.60 meters above zero sea level, there is vulnerability to the risk of waves overtopping the boardwalk crest for storms with return period of 10 years.

During the tests representing the low tide times (0.0m water level) there was a reduction of up to 68% of the significant wave height ( $H_s$ ); during tests representing the high tide times (+ 1.40m water level) there was a reduction of up to 31% of the significant wave heights ( $H_s$ ).

Considering the possibility of wave energy generation in close proximity of the local edge of the Leme district, and that energy is available at a monthly average of 0.5 MWh per installed equipment with an average monthly consumption of 3.0 MWh, it was concluded that the installation of a technological plant with 10 equipment would be enough to build sustainability in the power supply of this urban area of the city of Rio de Janeiro.

It was estimated an annual production of 6.3 MW, considering the Leme's climate wave prognosis and a proposed equipment with 20% efficiency and 4 meter width for conversion of wave energy into electrical energy, as shown in Table 3. For some incident wave directions (eg. east-southeast), despite the high percentage of occurrence, they have low potential for electricity generation, mainly due to the lower height of the incident waves.

For the effective use of this type of energy in the district's public power supply, it is necessary the transfer the substation of the electric supply company currently located in the neighboring Copacabana district.

The preliminary results obtained in this work make possible to conclude that urban and environmental engineering may mitigate the vulnerability of the studied area against the forces of the sea. With the evaluation of the potential wave energy in the coastal zones of the city of Rio de Janeiro it can be realized the great benefits that can be drawn from the symbiotic relation between cities and the sea.

Table 3 - Annual electricity generation by direction of incident wave

| Direction ESE |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i> | <i>Pd</i>         | <i>Pa</i>  |
|---------------|------|-----------|-----------|----------|------------|-------------|-------------------|------------|
| days/year     | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/day)   | (kWh/year)        |            |
| 37            | 0.63 | 5         | 0.97      | 201.3    | 161        | 3864.7      | 142994.9          |            |
| 85            | 0.78 | 7         | 2.09      | 288      | 230.4      | 5529.2      | 469983.5          |            |
| 2             | 1.06 | 9         | 4.96      | 495.5    | 396.4      | 9513.7      | 14270.6           |            |
| 124           | days |           |           |          |            | kWh/ano =   | 627249            |            |
|               |      |           |           |          |            |             | <b>MWh/ano =</b>  | <b>0.6</b> |
| Direction SSE |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i> | <i>Pd</i>         | <i>Pa</i>  |
| days/year     | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/day)   | (kWh/year)        |            |
| 0.5           | 1.3  | 5         | 4.14      | 857.1    | 685.7      | 16456       | 8228              |            |
| 43.9          | 1.52 | 7         | 7.92      | 1093.6   | 874.9      | 20997.2     | 921777.6          |            |
| 60            | 1.88 | 9         | 15.59     | 1558.7   | 1246.9     | 29926.5     | 1795588.3         |            |
| 9.3           | 2.32 | 11        | 29.01     | 2436.9   | 1949.5     | 46789.2     | 435139.2          |            |
| 0.4           | 2.78 | 13        | 49.23     | 3052.25  | 2441.8     | 58603.3     | 23441.3           |            |
| 114           | days |           |           |          |            | kWh/year =  | 3184174           |            |
|               |      |           |           |          |            |             | <b>MWh/year =</b> | <b>3.2</b> |
| Direction SE  |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i> | <i>Pd</i>         | <i>Pa</i>  |
| days/year     | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/day)   | (kWh/year)        |            |
| 1.2           | 1.36 | 5         | 4.53      | 938      | 750.4      | 18010.1     | 21612.1           |            |
| 59.9          | 1.46 | 7         | 7.31      | 1009     | 807.2      | 19372.3     | 1160398           |            |
| 17.4          | 1.77 | 9         | 13.82     | 1381.6   | 1105.3     | 26526.9     | 461567.9          |            |
| 0.6           | 2.24 | 11        | 27.04     | 2271.8   | 1817.4     | 43618       | 26170.8           |            |
| 79            | days |           |           |          |            | kWh/year =  | 1669749           |            |
|               |      |           |           |          |            |             | <b>MWh/year =</b> | <b>1.7</b> |
| Direction S   |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i> | <i>Pd</i>         | <i>Pa</i>  |
| days/year     | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/day)   | (kWh/year)        |            |
| 0.3           | 0.8  | 5         | 1.57      | 324.6    | 259.7      | 6231.9      | 1869.6            |            |
| 11            | 1.23 | 7         | 5.19      | 716.1    | 572.9      | 13749.4     | 147118.9          |            |
| 20.3          | 1.44 | 9         | 9.14      | 914.5    | 731.6      | 17557.6     | 356419            |            |
| 9.1           | 1.75 | 11        | 16.51     | 1386.6   | 1109.3     | 26622.3     | 242262.8          |            |
| 0.9           | 2.12 | 13        | 28.63     | 1775     | 1420       | 34080.4     | 30672.3           |            |
| 41.6          | days |           |           |          |            | kWh/year =  | 776473            |            |
|               |      |           |           |          |            |             | <b>MWh/year =</b> | <b>0.8</b> |

Source: Own authorship.

**Note:** ESE- east-southeast; SSE- south-southeast; SE- southeast; S- south; Hs- high significant; Tp- time peak; P- potential energetic; Ptb- raw potential; Ptec- technical potential; Pd- daily potential; Pa- annual potential.

## Keywords

Ocean energy; Leme beach; Rio de Janeiro; Sustainable urban planning; Energy planning.

# Sumário

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1     | Introdução  | 22  |
| 2     | Energia oceânica  | 28  |
| 2.1   | Gestão ambiental urbano-costeira                            | 28  |
| 2.2   | Dinâmica costeira   | 31  |
| 2.3   | Fontes oceânicas de energia renovável                       | 32  |
| 3     | Diagnóstico ambiental-costeiro do bairro do Leme            | 39  |
| 4     | Modelagens  | 57  |
| 4.1   | Modelagem física  | 58  |
| 4.1.1 | Canal de ondas  | 59  |
| 4.1.2 | Onda centenária   | 61  |
| 4.1.3 | Cenários ensaiados  | 62  |
| 4.2   | Modelagem computacional                                     | 67  |
| 4.2.1 | Cálculo do potencial de aproveitamento da energia das ondas | 70  |
| 5     | Resultados  | 73  |
| 5.1   | Modelagem física  | 73  |
| 5.1.1 | Planejamento urbano costeiro                                | 86  |
| 5.1.2 | Onda centenária   | 86  |
| 5.2   | Modelagem computacional                                     | 87  |
| 5.2.1 | Potencial de aproveitamento de energia de ondas             | 91  |
| 6     | Conclusões e sugestões para futuros estudos                 | 94  |
| 6.1   | Conclusões  | 94  |
| 6.2   | Sugestões para futuros estudos                              | 96  |
|       | Referências bibliográficas                                  | 97  |
|       | Apêndice 01 Planilhas de resultados da modelagem física     | 100 |

## Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados gerais do bairro do Leme   | 40 |
| Tabela 2 - Estimativa do total mensal de demandas do bairro do Leme   | 40 |
| Tabela 3 - Características dos 14 ensaios de longa duração  | 67 |
| Tabela 4- Estimativa média da ocorrência do número de ondas por hora  | 71 |
| Tabela 5 - Medição da altura de onda $H(1/3)$ - comparação entre os Ensaios 2A e 2B   | 78 |
| Tabela 6 - Medição da altura de onda $H(1/3)$ - comparação entre os Ensaios 4 A e 4B  | 80 |
| Tabela 7 - Resultado da medição de $H_s$ nos ensaios 6A, 6B; e 8B   | 84 |
| Tabela 8 - Estatística da altura de ondas por período de retorno para a Praia do Leme. Profundidade de 20m                        | 87 |
| Tabela 9 - Percentual de ocorrência por direção da onda incidente para o prognóstico anual do clima de ondas para a praia do Leme | 91 |
| Tabela 10 - Resumo da estimativa do potencial anual de geração de energia elétrica  | 92 |
| Tabela 11 - Geração anual de eletricidade por direção de onda incidente   | 93 |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Avenida Litorânea na praia do Icaraí, Município de Caucaia – CE. O processo erosivo continua mesmo após a obra do bagwall.  | 24 |
| Figura 2 - Ciclovia Tim Maia, Rio de Janeiro-RJ após queda de um dos tabuleiros devido à força ascendente de ondas do mar.   | 25 |
| Figura 3 - Crescimento populacional na zona costeira (IBGE, 2011).   | 29 |
| Figura 4 - Obras de proteção costeira com enrocamento, Recife - PE. Na parte inferior da foto obras em caráter aderente, e na parte superior, obras em caráter destacado.  | 30 |
| Figura 5 - Croqui comparativo do Perfil de verão versus perfil de inverno.   | 31 |
| Figura 6 - Consequência real em uma praia em erosão, Florianópolis - SC.   | 32 |
| Figura 7 - Ilustração de uma onda senoidal, e suas definições básicas.   | 33 |
| Figura 8 - Geração e formação das ondas do mar, e a propagação da energia em orbitais circulares.  | 34 |
| Figura 9 - Ilustração do espectro de energia da onda em função da Altura x Período.  | 35 |
| Figura 10 - Distribuição dos tipos de maré nos litorais do mundo.  | 38 |
| Figura 11 - Batimetria da área de estudo. Região ampliada da carta náutica 1.511 DHN, e georreferenciamento em UTM.  | 41 |
| Figura 12 - Mapa do bairro do Leme, RJ.  | 42 |
| Figura 13 - Ilustração comparativa da praia de Leme-Copacabana em estado Sem Aterro (1960) e Atual (2010). Observar a zona de arrebenção de ondas, no perfil dissipativo (1960) uma zona larga, e, atualmente (2010) uma zona estreita, típico de um perfil refletivo. | 43 |
| Figura 14 - Croqui da seção tipo do projeto geométrico de defesa da praia do Leme- Copacabana (1960). No detalhe, destacado pelo círculo, a cota da crista sugerida para +3,8 a 4,0 m.   | 43 |
| Figura 15 - Registro fotografico do “as built” da seção tipo para o calçadão da orla, conforme croqui do projeto geométrico.   | 44 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 16 - Onda superando a cota da crista da orla, e alcançando as instalações públicas do calçadão da orla do Leme-Copacabana.   | 44 |
| Figura 17 - Composição de vistas do Perfil de Inverno. Vista do satélite, e em seguida, o gráfico, altimetria (metros) x distância (metros) do perfil lateral medido em 13/10/2014  | 45 |
| Figura 18 - Composição de vistas do Perfil de Verão. Vista do satélite, e em seguida, o gráfico, altimetria (metros) x distância (metros) do perfil lateral medido em 13/10/2014 Fonte: Autor / Adaptado de Google Earth. | 45 |
| Figura 19 - Ilustração da praia de Copacabana em estado original. O retângulo destaca a região do bairro do Leme.   | 46 |
| Figura 20 - Ocupação urbana da Praia de Copacabana (1966). O retângulo destaca a região do bairro do Leme.  | 46 |
| Figura 21 - Ilustração do bairro do Leme em 1890, com vista a partir da pedra do Inhangá. Ao fundo, as primeiras edificações.   | 47 |
| Figura 22 - Croqui do perfil da praia do Leme até 1890.   | 47 |
| Figura 23 - Registro fotográfico (1896) das primeiras edificações e urbanização do pós-praia.   | 48 |
| Figura 24 - Croqui do perfil de praia do Leme em 1896.  | 48 |
| Figura 25 - Registro fotográfico da primeira urbanização da orla do Leme, inaugurada em 1906.   | 49 |
| Figura 26 - Croqui do perfil da praia do Leme em 1906.  | 49 |
| Figura 27 - Registro fotográfico da ocupação urbana do bairro do Leme em 1910.  | 50 |
| Figura 28 - Registro fotográfico da primeira erosão da orla do Leme no ano de 1914.   | 50 |
| Figura 29- Registro fotográfico da orla em 1918   | 51 |
| Figura 30 - Croqui do perfil de praia do Leme em 1918.  | 51 |
| Figura 31 - Registro fotográfico da orla em 1919. Em detalhe, a orientação do mosaico de ondas do calçadão.   | 52 |
| Figura 32 - Registro fotográfico do colapso da orla por uma maré de ressaca no ano de 1921.   | 52 |
| Figura 33 - Registro fotográfico da orla em 1937.   | 53 |
| Figura 34 - Registro fotográfico da orla em 1952.   | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 35 - Registro fotográfico da orla em 1962.   | 55 |
| Figura 36 - Registro fotográfico da orla em 1967. Observa-se a ausência de faixa de areia.  | 55 |
| Figura 37 - Registro fotográfico da orla em 1970. Durante as obras de aterro hidráulico.  | 56 |
| Figura 38 - Croqui do atual perfil de praia do Leme (2016).   | 56 |
| Figura 39 - Mapa conceitual para interpretação da célula urbana.  | 57 |
| Figura 40 - Composição do croqui, em vista superior do canal de ondas com o posicionamento das Sondas (S1, S2 e S3). O retângulo tracejado destaca a área onde foi construído o modelo (1:40) do perfil tipo da orla do Leme, ilustrado pela foto em vista lateral. | 59 |
| Figura 41 - Vista do bater de ondas.  | 60 |
| Figura 42 - Imagem da tela do computador. O gráfico da senóide apresenta o controle entre o sinal de geração e o gerado.  | 60 |
| Figura 43 - Ilustração das curvas de excedência para ocorrência da altura significativa ( $H_s$ ) das ondas em referência os períodos de retorno de 1, 10 e 100 anos.   | 61 |
| Figura 44- Croqui do perfil tipo “Atual” reproduzido na escala 1:40.  | 63 |
| Figura 45 - Croqui do perfil tipo “Com Obra” reproduzido na escala 1:40. No detalhe, o “Quebra-mar submerso” e dos “Geradores de energia”.  | 63 |
| Figura 46 - Modelos (1:40) dos geradores de energia através das ondas.  | 64 |
| Figura 47 - Vista lateral do modelo (1:40) do quebra-mar submerso.  | 64 |
| Figura 48 - Croqui do perfil-tipo com “OBRA TR100”.   | 65 |
| Figura 49 - Vista lateral do modelo (1:40) com OBRA TR100.  | 65 |
| Figura 50 - Composição de vistas do modelo (1:40) com OBRA TR100. No detalhe, elevação da cota de crista da orla para +6,4m (N.R = 0,0m).   | 66 |
| Figura 51 - Localização do ponto de extração dos resultados do modelo meteorológico global e dos dados de medição na natureza.  | 68 |
| Figura 52 - Gráfico de $H_s$ x Data (1997), comparando Dados Medidos x Simulados.   | 69 |
| Figura 53 - Ponto de extração dos parâmetros das ondas costeiras.   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 54 - Registro fotográfico do Ensaio 1A (Hs=1,0m / Tp=11s / NA=0,0m). Situação semelhante ocorrida para os Ensaios 3A e 5A, caracterizados como ensaios de acomodação.  | 74 |
| Figura 55 - Registro do Ensaio 2A (Hs=2,8m / Tp=11s / NA=+1,4m)   | 74 |
| Figura 56 - Ensaio 4A (TR10). Perfil "ATUAL".   | 75 |
| Figura 57 - Ensaio 6A (TR100). SEM OBRA.  | 76 |
| Figura 58 - Ensaio 6A, com vista de outro ângulo. No detalhe, a grande quantidade de areia arrastada pela força das ondas, as quais atingem a área das edificações residenciais ainda com significativa força.                  | 76 |
| Figura 59 - Ensaio 3B. Vista de outro ângulo.   | 77 |
| Figura 60 - Ensaio 2B. Perfil "COM OBRA" e tempestade TR1.  | 78 |
| Figura 61 - Gráfico comparativo dos resultados TR1 entre perfil "ATUAL" e perfil "COM OBRA". Medições S1, S2 e S3 X Altura de Onda (m).   | 79 |
| Figura 62 - Ensaio 4B (TR10). Perfil "COM OBRA".  | 79 |
| Figura 63 - Gráfico comparativo dos resultados TR10 entre perfil "ATUAL" e perfil "COM OBRA". Medição S1, S2 e S3 X Altura Onda (m).  | 80 |
| Figura 64 - Vista lateral do perfil de praia ao final dos ensaios com TR10. No Quadro 1- Ensaio 4A, e no Quadro 2, Ensaio 4B, destaque para areia deslocada em cada ensaio.   | 81 |
| Figura 65 - Croqui dos levantamentos topo-altimétricos ao final dos ensaios 4A e 4B.  | 81 |
| Figura 66 - Vista frontal do modelo (1:40) da orla no Ensaio 6B, perfil de praia "COM OBRA" e tempestade TR100 (Hs=4,4m / Tp=11s / NA=+2,4m)  | 82 |
| Figura 67 - Vista do modelo durante o Ensaio 8B. Em primeiro plano, observar que, apesar dos respingos sobre a orla, as ondas não superam a cota da crista da orla, estabelecida em +6,4 metros acima do nível do mar (NR 0,0m) | 83 |
| Figura 68 - Gráfico comparativo dos resultados de medição das sondas (S1, S2 e S3) para os ensaios 6A (perfil "ATUAL"), 6B (perfil "COM OBRA") e 8B (perfil "OBRA TR100"), conforme apresentado na Tabela 6.                    | 84 |
| Figura 69 - Croqui dos levantamentos topo-altimétricos ao final dos ensaios 6A (perfil "ATUAL"), 6B (perfil "COM OBRA") e 8B (perfil "OBRA TR100").   | 85 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 70 - Composição de fotos realizadas após o final dos ensaios, Quadro 1- ensaio 6A (SEM OBRA), no Quadro 2 - ensaio 6B (Com OBRA), e, Quadro 3 - ensaio 8B (OBRA TR100).            | 85 |
| Figura 71 - Rosa de ondas para ocorrência da altura significativa ( $H_s$ ) em relação a direção de incidência. O percentual (%) de ocorrência destaca a direção de incidência das ondas. | 88 |
| Figura 72 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Este- sudeste (ESE), $H_s=1,5m$ e $T_p=11s$ .                 | 88 |
| Figura 73 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sul-sudeste (SSE), $H_s=1,5m$ e $T_p=11s$ .                   | 89 |
| Figura 74 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sudeste (SE), $H_s=1,5m$ e $T_p=11s$ .                        | 90 |
| Figura 75 - Resultado do campo simulado de ondas na região do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sul (S), $H_s=1,5m$ e $T_p=11s$ .                                      | 90 |
| Figura 76 - Gráfico da estimativa do potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano) em relação ao percentual da direção de ondas incidentes   | 92 |

## Abreviaturas

ANA – Agência Nacional de Águas

APA- Área de Proteção Ambiental

BM – Baixa Mar

CAO – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil

DHN / MB – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA/INTERIM – Projeto de reanálise de dados climáticos

EPE- Empresa de Pesquisa Energética

Hs – Altura significativa do trem de ondas do mar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

IPP – Instituto Pereira Passos

kWh – Quilowatt-hora

MWh – Megawatt-hora

NMM – Nível médio do mar

NA – Nível d'água

NR – Nível de Referência

ONU – Organização das Nações Unidas

PM – Prea Mar

PNGC – Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

RN – Referência de Nível

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

Tp – Período de pico do trem de ondas do mar

UN – United Nations

ZC – Zona Costeira

# 1 Introdução

Cerca de 3,9 bilhões de pessoas (54% da população mundial) residem em áreas urbanas. Estima-se que o crescimento das cidades deverá resultar em uma população urbana acima de 6,4 bilhões de habitantes até 2050, principalmente em áreas menos desenvolvidas, com planejamento urbano precário e elevada vulnerabilidade a riscos ambientais (UN-Habitat, 2016). A urbanização de zonas costeiras em países em desenvolvimento demanda maior atenção devido a carências de infraestrutura e gestão necessárias para mitigar pressões geradas pela crescente ação antrópica sobre o meio ambiente (Cicin-Sain e Knecht, 1998).

Esse quadro é particularmente importante para o Brasil que possui alto grau de urbanização com marcante concentração populacional em seu litoral (IBGE, 2015) com intervenções urbanísticas em praias oceânicas por meio de obras carentes de projetos integrados à cidade e que atendam à população como um todo, negligenciando a capacidade da natureza em reclamar o equilíbrio dela retirado.

Segundo o relatório *Act Now or Pay Later* da organização Christian Aid, o rápido crescimento das populações urbanas ao longo dos litorais do mundo e a crescente ameaça de mudança climática são indícios da exposição de mais de um bilhão de pessoas a inundações costeiras em 2060 (Doig e Ware, 2016) em cidades expostas à elevação do nível do mar, que deve aumentar em média global para o próximo Século entre 0,18 e 0,59 metros acima do nível atual (IPCC, 2014).

O crescimento da população urbana é acompanhado por aumento de demanda por energia elétrica, que precisa ser fornecida em níveis cada vez mais críticos devido ao esgotamento das matrizes instaladas para geração e da crescente complexidade de distribuição no interior da metrópole. Em tais regiões haverá maior demanda por energia que, conforme Hinrichs e Kleinbach (2003) tende a aumentar principalmente nos países em desenvolvimento.

O exemplo recente da crise hídrica que atingiu o estado do Rio de Janeiro ao longo do ano de 2015, quando as reservas de água para a região

metropolitana do município do Rio de Janeiro chegaram ao nível de 1,7% do volume útil (ANA, 2015), caracterizou o risco iminente de desabastecimento público de energia elétrica.

Uma visão sistêmica põe em perspectiva a simultânea abundância de energia em águas oceânicas vizinhas aos consumidores e a escassez energética em mananciais de água doce cada vez mais distante, condições que podem representar ameaças ao desenvolvimento sustentável caso não haja resistência e resiliência no ecossistema.

O sistema é considerado como sendo mais estável à medida que apresentar a menor flutuação e/ou recuperar-se mais rapidamente. Essa noção de estabilidade possibilita realçar dois aspectos. O primeiro refere-se à resistência, que é a capacidade do sistema em permanecer sem ser afetado pelos distúrbios externos, sendo também chamada de inércia. As flutuações ocasionadas nas forças controladoras não ocasionam consequências no sistema. O segundo refere-se à resiliência, refletindo a capacidade do sistema em retornar às suas condições originais após ser afetado pela ação de distúrbios externos [...] provocados por forças naturais ou pela ação humana.

(Christofoletti, 1999)

O Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil propõe que o planejamento urbano das cidades tenha para cada escala de território (cidade, bairro, quadra, rua e lote) planos e projetos específicos integrados e integradores. “Os projetos setoriais devem romper a lógica da compartimentação das políticas públicas, adotando uma visão integradora” (CAO, 2016).

[Importa] adotar o modelo de cidade ambiental e socialmente sustentável, incentivando a arborização urbana, estimulando a eficiência energética, o baixo consumo de carbono, a crescente substituição por fontes de energia renováveis e a reutilização dos resíduos. A cidade precisa ser mais resiliente a catástrofes. Áreas sujeitas a inundações, desmoronamentos e outras fragilidades urbanas e ambientais devem receber planos contingenciais que contenham ações imediatas para evitar riscos.

(CAO, 2016)

Uma governança pública voltada à preservação do meio ambiente urbano para uso de futuras gerações requer a aplicação de leis, normas técnicas e planos baseados em princípios de sustentabilidade. Para tanto, é preciso que haja vitalidade nos órgãos públicos incumbidos em manter a harmonia entre as ações do homem e a cidade. São necessários organização técnica e instrumentos de gestão para que haja capacidade operacional e excelência nos resultados. Sejam por motivações políticas ou econômicas, as instituições públicas legitimadas ao enfrentamento das duas questões centrais desta pesquisa (mitigação da vulnerabilidade da orla à força do mar e o aproveitamento desta energia para uso da cidade) ainda não avançaram em soluções sistêmicas de engenharia para áreas costeiras do Brasil.

O escopo deste trabalho procura compreender uma parcela dessa lacuna a partir do pressuposto de que o planejamento público urbano-costeiro ainda não está baseado em modelos capazes de suportar o dinamismo relacionado ao clima e à geodinâmica desse território. Percebem-se planos direcionados ao atendimento de interesses econômicos específicos, em lugar de soluções efetivas de problemas socioambientais, que tendem a agravar fenômenos críticos já existentes (a exemplo da erosão no litoral de Caucaia) ou latentes (como o recente desabamento de ciclovia no litoral do Rio de Janeiro).

Conforme Moura (2012), o município de Caucaia, Ceará, possui deficiência em seu setor administrativo responsável por organizar antigas formas de ocupação tidas como desvalorizadas e estabelecer uma gestão que ordene a ocupação na faixa de praia a fim de proteger seu valor ambiental. O litoral do município sofre processo de erosão há 20 anos com prejuízos ao turismo local e, conseqüentemente, ao seu desenvolvimento econômico.

Com a desvalorização imobiliária, bairros litorâneos se tornaram áreas abandonadas e destruídas que perderam sua beleza natural e cênica (Moura, 2012). O poder público e a iniciativa privada realizaram obras de contenção, como a instalação de *seawall* e *bagwall* que, no entanto, não foram capazes de reabilitar as praias, tornando-as inadequadas ao uso por falta de acessibilidade. Situação indicada na figura 1.



Figura 1 - Avenida Litorânea na praia do Icaraí, Município de Caucaia – CE. O processo erosivo continua mesmo após a obra do *bagwall*.

Fonte: Arquivo do autor, registro em 29/02/2015.

Na cidade do Rio de Janeiro, a ciclovia Tim Maia localizada na Avenida Niemeyer (ligando os bairros Leblon e São Conrado ao longo de 3,9km) integra o rol de iniciativas da prefeitura municipal denominado legado das



Olimpíadas de 2016. A obra implantada na ciclovia junto à atual geometria da Avenida Niemeyer foi projetada para atender a 70 mil pessoas diretamente, no entanto desabou no dia 21/04/16 devido ao impacto direto de ondas em direção ascendente em um de seus tabuleiros de concreto com consequências fatais sobre dois usuários (Cortés, 2016). Ainda se discute a cadeia de falhas que culminaram na tragédia e os respectivos responsáveis, sendo consensual que a força vertical ascendente não integrou os cálculos estruturais.

Análise do Instituto de Criminalística Carlos Éboli aponta que estrutura não tinha qualquer tipo de amarras de fixação. [...]

Segundo o laudo [preliminar], o estudo não previu o impacto das ondas na plataforma, apenas no pilar, calculado para suportar marés de até quatro metros e ondas com velocidade de até 65 km/h.

(Cortés, 2016)

O levantamento de dados oceanográficos não foi considerado tanto ao nível de projeto desencadeando a formulação de um plano de obra estrutural subdimensionado como, também, para um plano de uso do equipamento localizado em orla costeira sujeita a ventos e arrebentação de ondas que poderiam atingir fatalmente as pessoas. Figura 2.



Figura 2 - Ciclovia Tim Maia, Rio de Janeiro-RJ após queda de um dos tabuleiros devido à força ascendente de ondas do mar.

Fonte: Arquivo do Autor, registro em 23/05/2016.

A infraestrutura das cidades é essencial ao desenvolvimento sustentável. No entanto, a variável ambiental é frequentemente negligenciada no planejamento urbano e, em uma perspectiva de intensificação dos extremos climáticos, isso representa riscos sociais e econômicos em cenários futuros.

A condicionante ambiental “nível médio do mar” de zonas costeiras associada à “escassez de energia” em área de concentração urbana e à “falta de planejamento urbano” adequado configura um cenário que pode representar vulnerabilidades urbanas em que gerações futuras seriam penalizadas. Uma lógica inversa à condição de desenvolvimento sustentável almejado pela sociedade contemporânea.

Diante da problemática apresentada e dos pressupostos centrais da pesquisa, indaga-se: como a abordagem sistêmica pode contribuir para o planejamento urbano sustentável de orlas oceânicas?

Em tais bases, o objetivo geral da pesquisa é investigar o potencial energético de ondas do mar na orla da cidade do Rio de Janeiro e suas possíveis implicações no planejamento sustentável da engenharia urbana costeira. Para tanto, a microbacia hidrográfica da orla oceânica do bairro do Leme é analisada. Essa região apresentou-se como o melhor sítio de projeto pelo fato de ser uma região urbana já consolidada em alto adensamento residencial, e, principalmente, por ter o histórico desse processo de urbanização bem documentado, conforme apresentado no Capítulo 3, item 3.1.

Ao considerar a localização da orla do bairro do Leme, em uma margem de frente oceânica, e, ao relevar o cenário de elevação do nível médio dos mares em conjunto com a intensificação dos extremos climáticos, apontado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (2014), tais fatos caracterizaram a interpretação da alta vulnerabilidade ao risco de erosão costeira dessa orla, e definem, assim, um passivo urbano que deve ser avaliado.

Apesar do sucesso da obra de engenharia para proteção costeira da orla do Leme e Copacabana, o impacto das mudanças desencadeadas por essa obra de aterro hidráulico, realizada na década de 1960, continua a prejudicar a balneabilidade da praia. Durante os dias com ondas incidentes de altura acima de um metro, já é conferida à praia a classificação de “perigosa”, e, até como, “altamente perigosa”.

Frente aos possíveis cenários futuros dos extremos climático-oceanográficos que impõem o risco de avanço do mar sobre a orla, propõe-se a elaboração de um projeto de reengenharia costeira para melhorar a resiliência urbana dessa orla. E, com o fato da redução na extensão da área da praia do Leme, através das obras de urbanização durante a construção da Av. Atlântica, como também em função do impacto ambiental gerado com a obra de engorda da praia, esse projeto pode ser proposto como um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD.

A fim de atingir o objetivo geral apresentado, os objetivos específicos seguintes compõem etapas intermediárias na trajetória do estudo:

- Realizar um diagnóstico ambiental para a elaboração de planejamento urbano sustentável do bairro Leme, Rio de Janeiro – RJ;
- Mensurar a vulnerabilidade da orla do Leme ao risco de galgamento das ondas durante condições extremas de marés de ressaca;
- Avaliar soluções de engenharia para aproveitamento energético e controle de impactos de ondas do mar na praia do Leme;
- Discutir o aproveitamento energético de ondas do mar para a geração de energia elétrica para o bairro Leme;
- Estimar o potencial energético das ondas costeiras como fonte renovável para conversão em energia elétrica.

Os temas tratados na dissertação estão organizados em seis capítulos. Além dos objetivos, esta introdução apresenta as justificativas para o desenvolvimento do estudo ao abordar alguns conceitos e pressupostos que fundamentam a construção do problema de pesquisa. Apesar da relevância do assunto, os processos de transmissão da energia das ondas para a rede de abastecimento público, não fazem parte integrante desta pesquisa.

No segundo capítulo caracteriza-se o potencial da energia oceânica tanto como passivo ambiental, ao ser a principal força envolvida na erosão de orlas urbanizadas, e também, como ativo a ser explorado, ao apresentar considerável potencial de aproveitamento como fonte de energia renovável.

Um diagnóstico ambiental-costeiro do bairro do Leme é feito no capítulo três, e que aborda também o histórico de ocupação urbana desse bairro.

O quarto capítulo apresenta as modelagens matemáticas e de física reduzida e a metodologia de como foram realizadas estimativas de parâmetros da onda de projeto e onda centenária. Nesse capítulo são descritos os cenários ensaiados que, em função nas principais condições que potencializam o risco do avanço do mar sobre a orla do bairro do Leme – como das previsões ao médio-longo prazo de elevação do nível médio do mar e do processo de intensificação dos extremos climáticos (IPCC, 2014), foram utilizados no estudo de modelagem física como instrumento de análise da vulnerabilidade da orla ao avanço do mar, bem como, para avaliar o plano de reengenharia costeira sugerido para elevar a resiliência do litoral estudado. No capítulo quinto estão os resultados dos estudos de análise em modelagens física e matemática, bem como do cálculo realizado para estimar o potencial de energia elétrica convertida a partir das ondas do mar. Conclusões e sugestões encontram-se no capítulo seis.

## **2** **Energia oceânica**

A quantidade de energia contida nos oceanos resulta de forças atmosféricas (ventos, pressão atmosférica e diferenças de temperatura) e astronômicas (radiação solar, forças gravitacionais e rotacionais da terra) que interagem e transferem energia para a massa d'água dos oceanos. Por sua vez, a energia gerada pelas correntes marítimas é decorrente da diferença de gradientes (temperatura e salinidade) contidos na própria massa d'água dos oceanos.

A energia oceânica, principalmente aquela manifestada em forma de ondas e marés, tende a se direcionar para as margens continentais e, de forma mais expressiva, agir sobre a interface das zonas costeiras moldando constantemente as margens costeiras e definindo o seu perfil.

Dinâmico por natureza, o sistema costeiro apresenta desafios à gestão ambiental de áreas litorâneas urbanizadas, onde o homem deseja sistemas estabilizados e seguros a fim de manter o direito de propriedade sobre os mesmos e simplificar o seu gerenciamento (Nordstrom, 2002).

No planejamento de orlas oceânicas, a dinâmica local deve ser considerada com a observância de particularidades relacionadas à energia absorvida por estruturas naturais ou artificiais em contato com o mar, dependendo da vocação natural do ecossistema (estuários e manguezais para reprodução de espécies, por exemplo) ou do uso econômico definido pela sociedade (movimentação mercantil, turismo etc.). Portanto, estabilizar artificialmente a energia oceânica em áreas costeiras exige atenção a peculiares implicações relacionadas à geografia local.

### **2.1** **Gestão ambiental urbano-costeira**

A Zona Costeira (ZC) do Brasil é uma unidade territorial estabelecida como patrimônio nacional no parágrafo 4º do art. 225 da Constituição Federal e se estende ao longo de 8.500 km de um recortado litoral com diversas baías. Nessa extensa, dinâmica e biodiversificada área, vivem cerca de 50,7 milhões de pessoas em 17 estados, 463 municípios e 16 metrópoles (IBGE, 2011).

A porção terrestre da ZC é definida pelo espaço compreendido pelos limites dos municípios que sofrem influência direta dos fenômenos ocorrentes na zona costeira como a influência das marés, possuindo largura variável. A porção marítima, ou Mar Territorial, é definido a partir da linha de costa até 12 milhas (22,2 Km) náuticas a partir da linha base (indicada em cartas náuticas).

No Brasil, o planejamento das cidades é prerrogativa constitucional da gestão municipal, que responde pela delimitação oficial da zona urbana, rural e demais territórios, bem como da zona costeira terrestre para onde são elaboradas diretrizes de planejamento como o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC). No período 1980-2000 houve um incremento de 23,54% no número de municípios na zona costeira brasileira, sendo que no período intercensitário de 1991-2000, a população residente na zona costeira apresentou uma taxa média de crescimento demográfico anual de 1,67%, que é superior à taxa de 1,63% referente à média nacional (IBGE, 2011), conforme figura 3.

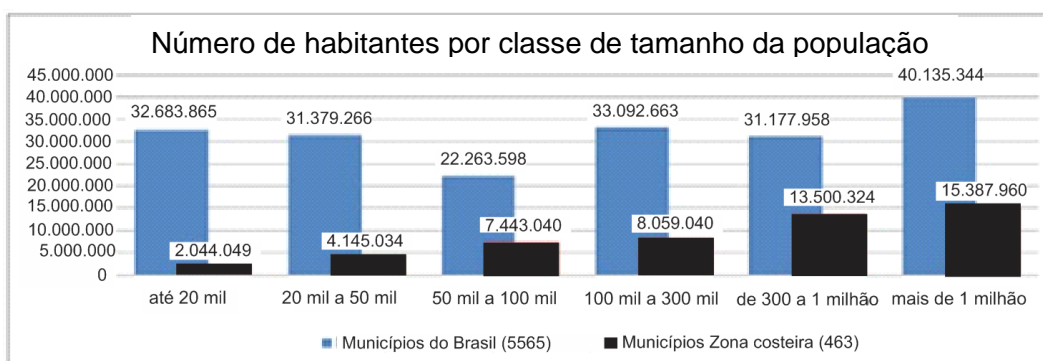


Figura 3 - Crescimento populacional na zona costeira (IBGE, 2011).

Fonte: Disponível em: <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br>>. Acesso em: 4/08/2016.

Grande parte da população que vive em Zonas Costeiras brasileiras está, direta ou indiretamente, relacionada a atividades ligadas ao ambiente litorâneo, como os da indústria, turismo, óleo e gás, bem como dos setores de pesca e serviços náuticos. Para que o ambiente costeiro possa sustentar e desenvolver todas essas atividades econômicas, é fundamental que a gestão ambiental da zona costeira tenha especial atenção na continuidade, e, padronização das medições ambientais, principalmente quanto a variações no Nível Médio do Mar (NMM). A utilização do NMM como referência altimétrica é aceita mundialmente, sendo também utilizado em necessidades práticas como no estabelecimento de redes de drenagem e cotas de segurança para estruturas da região litorânea (Luz, 2008). Até o final do século passado, as cidades costeiras não eram ameaçadas de forma tão recorrente pelo mar devido eventos extremos de elevação do nível do mar, como apontado nos relatórios do IPCC (2014). Nesse

contexto, uma peculiar e significativa característica se dá em relação a cota de segurança da crista de cada orla, ou seja, a topo-altimetria da orla em relação ao nível do mar (NR 0,0m).

Segundo Alencar (1990), no Brasil, até 1946, não existia uma superfície de referência, em relação a qual fossem calculadas todas as altitudes do País, ou seja, não havia sido elegido o Datum Altimétrico Brasileiro. Com a implantação da Rede de Nivelamento de Precisão, foi adotado o Nível Médio do Mar (NMM) pelo IBGE, que desde 1958, ainda prevalece como nível de referência (NR) o zero hidrográfico (0,0m) do Marégrafo de Imbituba – SC. Contudo, obras de proteção costeira são estruturas de engenharia que tem por finalidade principal proteger regiões costeiras ou portuárias da ação das ondas do mar. Atualmente, em função da metodologia de construção, obras de proteção costeira (figura 4) podem ser classificadas em três tipos básicos de intervenção:

- Sobre a costa (*on shore*): obras construídas de forma paralela e sobre a linha de costa, ou seja, as extremidades, inicial e final, da estrutura estão sobre a costa. Ex: muro defletor, diques ou aterro hidráulico;
- Aderente à costa (*in shore*): obras construídas de forma transversal a linha de costa, ou seja, a extremidade inicial da estrutura está na costa, e a extremidade final está no mar. Ex: espigões e molhes;
- Destacada da costa (*off shore*): obras construídas ao largo da costa, ou seja, ambas as extremidades da estrutura estão dentro d'água. Ex: quebra-mar de pedra ou de caixões flutuantes.

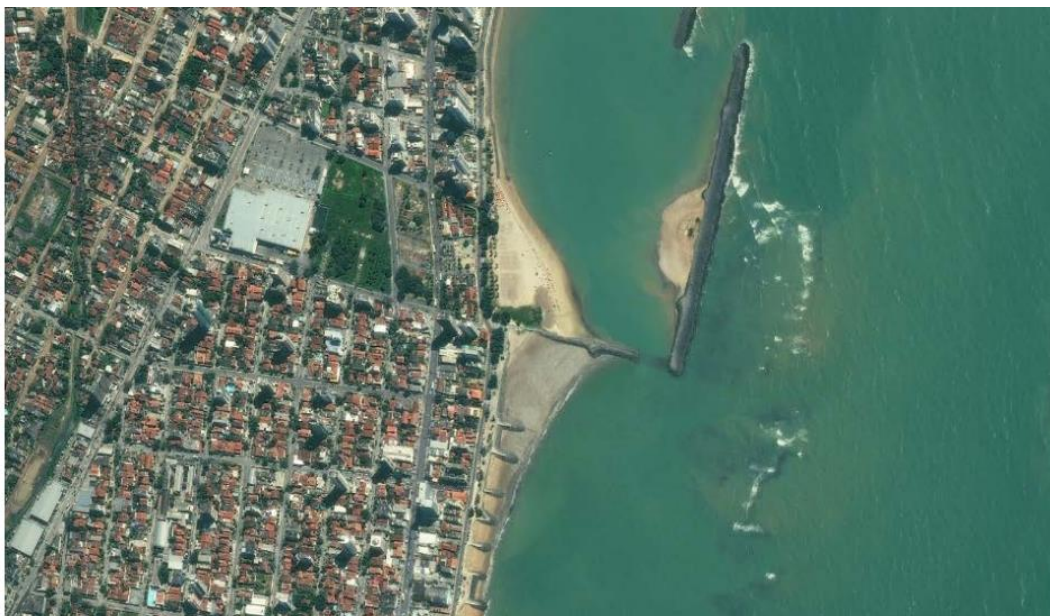


Figura 4 - Obras de proteção costeira com enrocamento, Recife - PE. Na parte inferior da foto obras em caráter aderente, e na parte superior, obras em caráter destacado.

Fonte: software “ArcGIS data imagery”.

## 2.2 Dinâmica costeira

A dinâmica costeira é o fenômeno resultante da interação entre forças atmosféricas (pressão atmosférica, ventos e chuvas) e oceanográficas (marés, ondas e correntes) e que agem na interface da zona de transição entre o ambiente marinho e o terrestre, ou seja, moldam as margens costeiras e definem sua morfologia.

Nas praias oceânicas, que são mais expostas à ação da energia oceânica, a intensidade da dinâmica costeira influi diretamente no transporte de sedimentos, e determina a deriva litorânea de sedimentos. Durante o processo de modelagem do contorno da linha de praia em ciclos de retirada e deposição de sedimentos, a energia oceânica define o balanço sedimentar para cada seção de praia ou região costeira específica. Ao longo do tempo, os ciclos de retirada se igualam aos ciclos de deposição, determinando-se que o compartimento praias está em estado de equilíbrio sedimentar. Porém, quando há uma descontinuidade nos ciclos de depósitos de sedimento, ou seja, há uma constante retirada de sedimentos ao longo do tempo, determina-se o processo de erosão costeira, que pode ser localizado ou generalizado (figura 5).

Durante a incidência de eventos climático-oceanográficos extremos, denominados de marés de tempestade, ou marés de ressaca, em que há a conjunção de alta energia de ondas e marés, quando ocorrem as movimentações mais significativas no aporte de sedimentos do sistema praias.

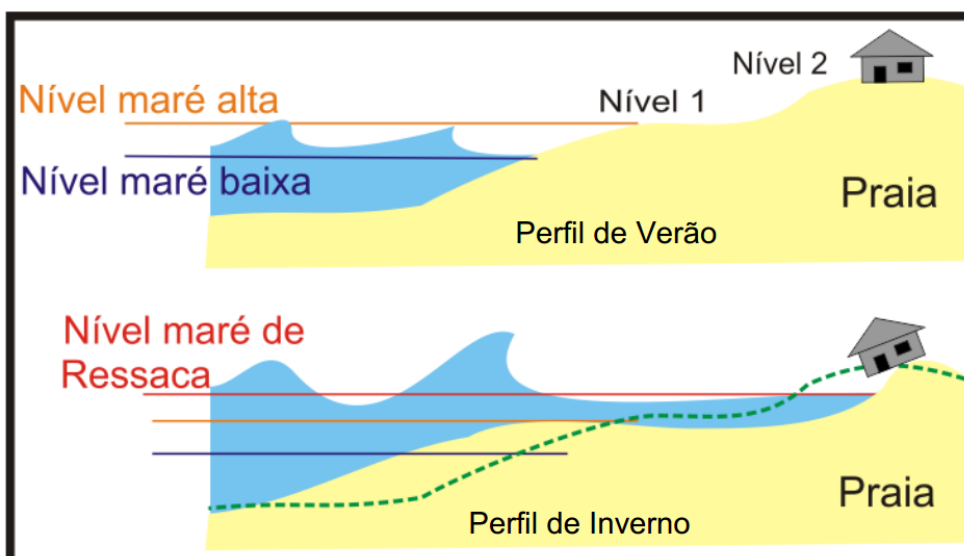


Figura 5 - Croqui comparativo do Perfil de verão versus perfil de inverno.

Fonte: Ilustração do autor.

Para a região Sudeste do Brasil, essa maior energia de ondas ocorre durante os meses do período de inverno, e, por isso, assume-se que a praia possui um perfil de inverno (com ressaca), e um perfil de verão (Figura 5).

O processo de erosão costeira (figura 6), caracterizado pelo avanço do mar sobre as margens litorâneas, pode ser considerado um dos principais passivos ambientais a ser administrado pela gestão costeira nacional. Esse processo é determinado, principalmente, durante a ocorrência de elevações extremas do nível do mar, que, quando acontecem, desencadeiam a maior penetração da energia das ondas sobre os litorais.



Figura 6 - Consequência real em uma praia em erosão, Florianópolis - SC.  
Fonte: Google imagens.

No fenômeno da dinâmica costeira, a energia das ondas corresponde ao fator natural dominante, tanto na construção, como na desconstrução da linha de praia (Morais, 1980 *apud* Machado, 1999).

### **2.3 Fontes oceânicas de energia renovável**

Considerando o ponto de vista do ativo ambiental, as fontes de energia disponível na região oceânica podem ser aproveitadas de diversas maneiras, como através dos ventos, sol e biomassa. Porém, a energia disponível massa água dos oceanos se destaca em cinco fontes renováveis: das ondas, das variações das marés, das correntes marinhas, e dos gradientes de temperatura e salinidade (Soerensen e Weinstein, 2008; Khan e Bhuyan, 2009). Dentre essas fontes, a energia das ondas se destaca tanto pelo fato da onda oceânica poder



percorrer centenas de quilômetros sem perdas significativas de energia como por se apresentar na forma mais concentrada e disponível em abundância nos litorais das cidades costeiras. Enquanto que a energia das marés, correntes, do gradiente de temperatura e do gradiente de salinidade apresentam-se disponíveis de forma limitada a determinadas regiões. A seguir são descritas considerações acerca das características físico-oceanográficas das ondas e marés;

#### a) Energia de ondas

Por definição clássica, a onda é a propagação de energia em um meio, ou seja, um movimento gerado a partir de uma perturbação no meio. Em física, define-se onda como uma perturbação oscilante de alguma grandeza física e periódica no tempo. As principais características de uma onda são definidas por sua altura, período e direção (Figura 7).

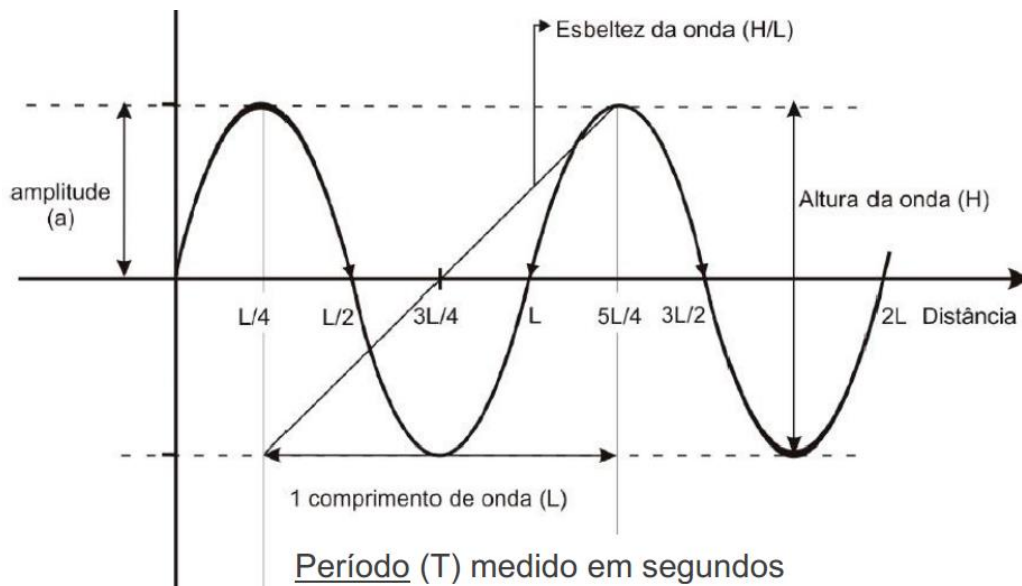


Figura 7 - Ilustração de uma onda senoidal, e suas definições básicas.  
Fonte: Adaptado de Violante (2007) *apud* Fleming (2012).

As ondas do mar são primariamente geradas por três causas naturais: ventos, marés e abalo sísmico. Sendo a maré também uma onda de longa duração. Uma vez gerada, é a força da gravidade que desloca o movimento ondulatorio, atendendo ao princípio físico do meio líquido de restaurar a superfície plana. Durante sua trajetória através do oceano, denominada pista ou "fetch zone", a energia é organizada e propagada em colunas de orbitais circulares. E, devido à organização dessa energia em determinado comprimento de onda, ou período, a velocidade das ondas aumenta gradativamente ao se afastar da sua zona de geração (figura 8).

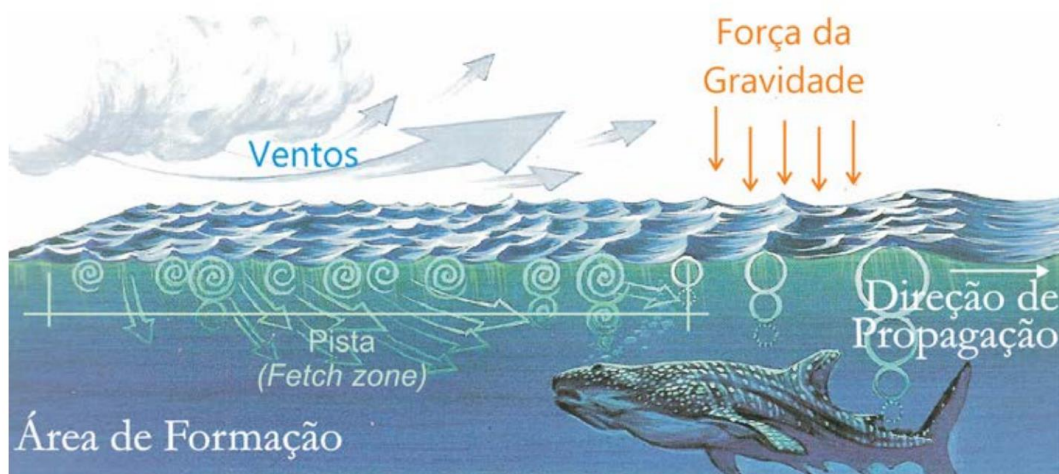


Figura 8 - Geração e formação das ondas do mar, e a propagação da energia em orbitais circulares.

Fonte: adaptado de Kampion (1997).

Durante a fase oceânica, a onda se propaga sem que ocorra o transporte significativo de matéria. Nessa fase de propagação, a energia transportada é organizada em orbitais circulares. Assim, durante a passagem de uma onda oceânica, as partículas sofrem uma força de deslocamento e uma de restauração, contendo energia cinética e energia potencial, dependendo do estágio do movimento. Como praticamente não existe transferência de matéria, apenas de energia, uma partícula tende a retomar sua origem após a passagem da onda, se deslocando em um movimento quase circular quando em águas profundas (figura 8), ou seja, quando não interagem com o fundo do mar (Trujillo e Thurman, 2011).

Assim, quanto maior a altura e o período da onda, mais energética é a onda. O período é a medida em tempo, comumente determinado em segundos, enquanto que o comprimento é a medida em metros, e ambas determinam a distância de pico a pico entre as cristas de duas ondas consecutivas. Pode-se dizer que as ondas de gravidade são consequência da energia solar, pois a energia recebida do Sol e a diferença térmica entre os polos e o equador, são convertidas em energia eólica, e, parte dessa energia do vento, é transferida para o oceano de forma cinética, através do atrito sobre a superfície do mar. E de acordo com a intensidade, duração e área (pista) de atuação dos ventos incidentes, sobre a superfície do mar, que é definida a quantidade de energia transferida. Sendo assim, a altura ( $H$ ) e o período ( $T$ ) de um trem de onda são diretamente proporcionais à velocidade, ao tempo, e à pista de atuação do

vento. Portanto, quanto maior a atuação desses fatores, maior será quantidade de energia concentrada em uma onda (figura 9).

No entanto, para cada situação existem dimensões máximas que a onda oceânica pode atingir, ou seja, as ondas não crescem indefinidamente (Trujillo e Thurman, 2011).

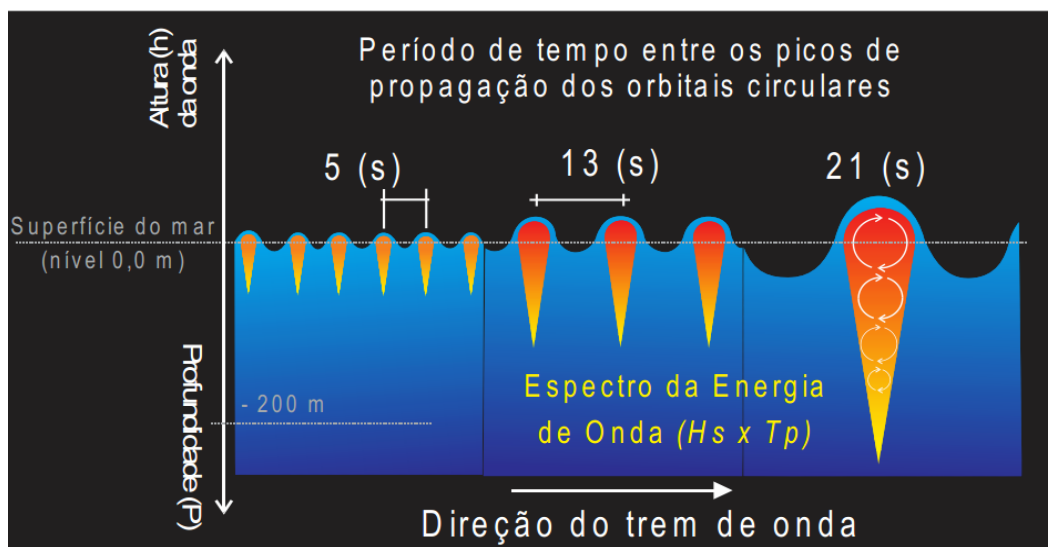


Figura 9 - Ilustração do espectro de energia da onda em função da Altura x Período.  
Fonte: Ilustração do autor.

Uma série de ondas oceânicas, ou trem de ondas de águas profundas, as quais não interagem com o fundo do mar, possui a tendência de se propagar de forma senoidal, ou seja, caso as ondas oceânicas se propagassem infinitamente no espaço, se organizariam de tal forma que se tornariam lineares, isto é, ondas regulares, com altura e comprimento constante. O que, de fato, não ocorre na natureza. Portanto, ondas reais são inerentemente não lineares, de natureza irregular, de forma que a altura de onda em um mesmo trem de ondas varia aleatoriamente no tempo e no espaço.

Assim, propriedades estatísticas da altura e período, ou seja, o espectro de energia da onda varia constantemente. Essa irregularidade faz com que a onda do mar seja um dos fenômenos naturais mais complexos de se compreender, especialmente em condições de águas rasas. Com a aproximação da zona costeira, a profundidade vai diminuindo gradativamente e uma série de fenômenos físicos influencia no comportamento das ondas. Um destes fenômenos, apresentado pelas ondas costeiras, é a tendência física de direcionar a energia às partes rasas, para, assim, dissipar sua energia. Contudo, a onda oceânica pode percorrer centenas de quilômetros sem perdas significativas de energia. Mas, no momento em que a profundidade do mar torna-

se igual ou menor que a metade do comprimento de onda, a onda deixa de ser oceânica e passa a ser uma onda costeira, pois, a partir dessa condição de águas intermediárias ou costeiras, a propagação da energia disposta em um trem de ondas deixa de ser governada pela força da gravidade e passa a ser diretamente influenciada pela profundidade, ou topografia do fundo do mar.

Segundo Carvalho (2010), a energia total contida em uma onda marítima consiste de dois tipos: a energia potencial e a energia cinética. A forma potencial é resultante da diferença da superfície livre e a altura da onda, ou seja, quando a água está em repouso, a energia potencial é mínima, entretanto, quando ocorre o deslocamento das partículas em equilíbrio, há realização de trabalho, aumentando a energia potencial. Enquanto que, a forma cinética é resultante do movimento das partículas da água através do fluido, ou seja, quando há transporte de massa d'água, ocorrendo quando se propagam em regiões rasas.

De acordo com Holthuijsen (2007) *apud* Carvalho (2010), as ondas transportam energia pelo oceano, e, a taxa temporal de energia transferida de um local para outro é chamada de fluxo de energia. Este fluxo é a soma do transporte de energia potencial e cinética, mais a transferência horizontal por trabalho ( $W$ ) realizado pela pressão na direção da propagação da onda ( $P$ ). Assim, através do fluxo de energia total, pode-se compreender como ocorre a transmissão e as mudanças nos parâmetros de onda à medida que esta percorre a plataforma continental até atingir a zona costeira. Esta é a energia disponível que poderá ser utilizada para a conversão em energia elétrica ou trabalho. E para análise do fluxo de energia em uma onda individual, considera-se a energia total (cinemática e potencial) por unidade de área.

Assim, como Holthuijsen (2007) *apud* Carvalho (2010), de forma simplificada, é usual representar o fluxo de energia ( $F$ ) através da equação:

$$F = 0,5 (H_s)^2 \times T_p \quad (Eq.01)$$

Nessa equação, apresentada acima, o resultado alcançado é expresso em quilowatt por metro (kW/m). Sendo a quantidade de energia (kW) referente a um metro linear da frente de uma onda, a qual apresenta determinadas características de altura ( $H_s$ ) e período ( $T_p$ ). O valor de  $H_s$  é referente a altura significativa de onda, e corresponde a média aritmética de 1/3 das ondas mais altas mensuradas, dentre todas as ondas computadas durante o intervalo de medição. Enquanto que o  $T_p$  é referente ao período de pico, e corresponde a média de 1/3 dos maiores períodos de onda mensurados, dentre toda a série de ondas computadas durante o intervalo de medição.

## b) Energia das marés

Podem ser extraídas tanto de sua componente cinética, através de turbinas, como da componente potencial, através de barragens. Esse tipo de energia é explorado para aproveitamento apenas em locais que apresentam elevadas variações diárias de nível. Contudo, variações extremas de características não periódicas, podem desencadear consequências danosas em litorais urbanizados.

Na compreensão clássica do fenômeno das marés, entende-se, como a oscilação vertical do nível do mar.

Essa variação é de natureza periódica, por influência de forças astronômicas, e gerada basicamente pelo campo gravitacional da posição da Lua e do Sol em relação a Terra.

O fenômeno das marés é diretamente relacionado à posição da Lua no céu, que, por sua proximidade com a Terra, apresenta maior influência que o Sol, apesar de apresentar um campo gravitacional diversas vezes menor. Esse tipo de variação no nível do mar é denominado maré astronômica. Nesses processos de subida e descida das marés, que variam para cada região costeira, são definidos os níveis máximos e os mínimos, respectivamente denominados de preamares (PM) e baixa-mares (BM).

Segundo Franco (2009), como regra geral, ao observarmos um maregrama, ou curva de maré, ele apresenta um máximo aproximadamente a cada 12 horas e 25 minutos, intervalo de tempo que corresponde à metade de um dia médio lunar, enquanto que os mínimos sucedem os máximos a intervalos de cerca de 6 horas e 12 minutos. Assim, em localidades em que, a cada 24 horas, ocorrem dois máximos e dois mínimos, determina-se uma maré semidiurna. As denominadas marés diurnas ocorrem nas localidades em que se apresentam apenas uma PM e uma BM por dia. A denominada maré mista ocorre em localidades que, dependendo do período lunar, apresentam ambas as características das marés descritas anteriormente. As marés semidiurnas que ocorrem em uma semilunação, que corresponde a aproximadamente 15 dias, ou seja, metade de um ciclo lunar com cerca de 27 dias, são as marés de maior amplitude, chamadas de marés de águas vivas ou de sizígia. E, aquelas de menor amplitude denominam-se marés de águas mortas ou de quadratura. A seguir, a figura 10 apresenta uma ilustração de como se distribuem as marés ao longo das zonas costeiras do mundo.

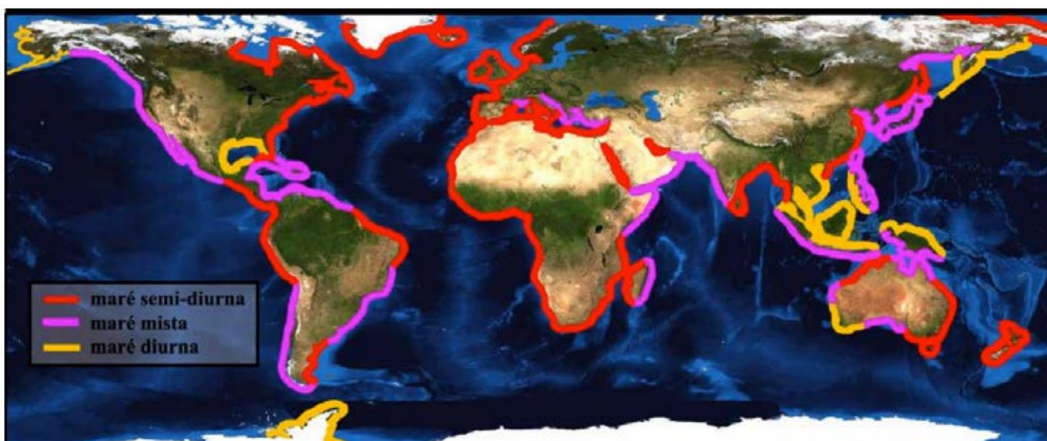


Figura 10 - Distribuição dos tipos de maré nos litorais do mundo.

Fonte: Google imagens.

Porém, o nível do mar também é acentuadamente afetado pelas condições meteorológicas, principalmente em função dos ventos e diferenças de pressão atmosférica. Esse tipo de influência na variação do nível do mar é denominado de maré meteorológica ou maré de tempestade (“storm surge”), e, durante esses eventos, são observadas as mais significativas modificações nos litorais, sobretudo nas praias oceânicas compostas de sedimentos arenosos.

No entanto, as configurações morfológicas atuais da região costeira são resultantes dos processos ocorridos nos últimos 21.500 anos, após o último máximo glacial, quando o mar subiu mais de 120 metros e inundou a maior parte das plataformas continentais do planeta. Mas foi durante a última grande regressão marítima, por volta de 5.000 anos, que ocorreu a gênese de grande parte das praias brasileiras, quando os terrenos costeiros emergiram, como o caso do litoral abordado nesse estudo.

Esses eventos naturais, de transgressões e regreções do nível médio do mar, provocaram mudanças significativas na zona costeira, porém, desde este último grande evento, o nível médio do mar tem permanecido com variações de menos de 10 metros. E, desde que foram iniciadas as constantes medições de monitoramento em 1840, até ao final do século 20, o nível médio do mar elevou em torno de 40 cm (IPCC, 2007).

### 3 Diagnóstico ambiental-costeiro do bairro do Leme

Este capítulo visa destacar a inserção do diagnóstico ambiental no processo de planejamento urbano em áreas costeiras. Esse componente do estudo fundamenta o plano de resiliência de orlas oceânicas a partir do entendimento da dinâmica costeira local. Pois se entende que não basta apenas apresentar uma visão de futuro para a cidade que se deseja construir, é necessário estabelecer um modelo de gestão ambiental que, de forma realista, esteja baseado na antecipação de cenários.

Somente aperfeiçoando a capacidade de identificar e dimensionar problemas, através de um padrão para a coleta e análise de dados, que se pode ter um diagnóstico acurado para intervir, com precisão, no intuito de limitar danos.

Nessa abordagem, a investigação de forma multidimensional dos riscos, possibilita confeccionar um plano que integre, não somente o controle de passivos ambientais, como também, desenvolva o aproveitamento de ativos ambientais. Pois é fundamental que o planejamento urbano desencadeie ações preventivas que permitam controlar os impactos territoriais negativos, como também melhorar o aproveitamento dos espaços já estruturados. Tal conceito exige construir um modelo de planejamento flexível ao aprimoramento contínuo, fundamentado no permanente monitoramento ambiental, sobretudo em função das necessárias adequações às condicionantes de extremos climáticos, que tendem a se intensificar (IPCC, 2007).

Inicialmente, o esforço foi direcionado para a coleta de dados referentes à caracterização dos riscos ambientais do sítio de projeto escolhido para este estudo de planejamento urbano, no caso, determinado pelo bairro do Leme, localizado na zona oceânica do município do Rio de Janeiro. Bem como do levantamento de dados referentes à macroregião de entorno e dos dados pertinentes à área urbana do bairro, como número de habitantes, unidades residenciais e respectivas demandas de consumo.

A seguir, as tabelas 1 e 2 apresentam respectivamente, os dados gerais e a estimativa para as demandas desse bairro.

Tabela 1 - Dados gerais do bairro do Leme

|                         |                  |                       |                    |
|-------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| Área Territorial (ha)** | Área Urbana (ha) | Área Verde e APA (ha) | Área de Praia (ha) |
| 97,72                   | 36,83            | 51,65                 | 9,24               |
| Porte do Bairro         | Nº residents (*) | Caracterização        | Data de registro   |
| Pequeno                 | 14.799           | Bairro residencial    | 1892               |
| Domicílios (*)          | Hotéis           | Região Administrativa | Bairros Limites    |
| 7.399                   | 06               | V - Copacabana        | Copacabana e Urca  |

Fonte: (\*) Censo IBGE (2011); (\*\*) IPP (2003).

Destaca-se que foram incluídas as demandas de resíduos urbanos, pois essa é uma das principais fontes de risco à qualidade ambiental de áreas urbanizadas.

Tabela 2 - Estimativa do total mensal de demandas do bairro do Leme

| Tipo             | Unidade           | Demanda<br>(média unit./ mês) | Total mensal |
|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------|
| Energia elétrica | 7.399 domicílios  | 400 kWh*                      | 2.9 MWh      |
| Água Tratada     | 15.000 habitantes | 5.550 L/hab**                 | 83.250.000 L |
| Esgoto sanitário | 15.000 habitantes | 5.550 L/hab***                | 83.250.000 L |
| Resíduos sólidos | 15.000 habitantes | 30 Kg/hab***                  | 450.000 Kg   |

Fonte: (\*) EPE -2015; (\*\*) ANA - 2010; (\*\*\*) SNIS – 2015.

Os dados da topografia geral da área, incluindo as cotas altimétricas utilizadas, foram extraídos do levantamento aerofotogramétrico realizado, em 2010, pelo Instituto Pereira Passos – IPP. E, para um melhor refinamento dos dados topográficos referentes às seções transversais do perfil de praia, foi realizado, no horário de 9:00h às 16:00h do dia 01 de setembro de 2013, o levantamento de campo, de acordo com o método de nivelamento topográfico. Nesta etapa do estudo, foram utilizados seguintes equipamentos: Nível de Precisão Nikon AZ-2S (01 operador + 01 ajudante); GPS *Garmin*; Equipamento de mergulho livre (01 mergulhador); Trena e caderneta.

As estações de leitura foram distribuídas ao longo de cinco perfis perpendiculares à linha de costa, e equidistantes em 25 metros. Os pontos irradiados para leitura das cotas foram tomados em distâncias fixas de dez metros, e cobriram os batentes de preamar, 0,0m e -1,0m. Para o processamento dos dados do levantamento do perfil de praia foi utilizado o software *AutoCAD 2015*.

Os dados utilizados da batimetria costeira foram extraídos da carta náutica N°1501 Barra do Rio de Janeiro, escala 1:20.000 (DHN/MB) conforme apresentado abaixo pela figura 11.



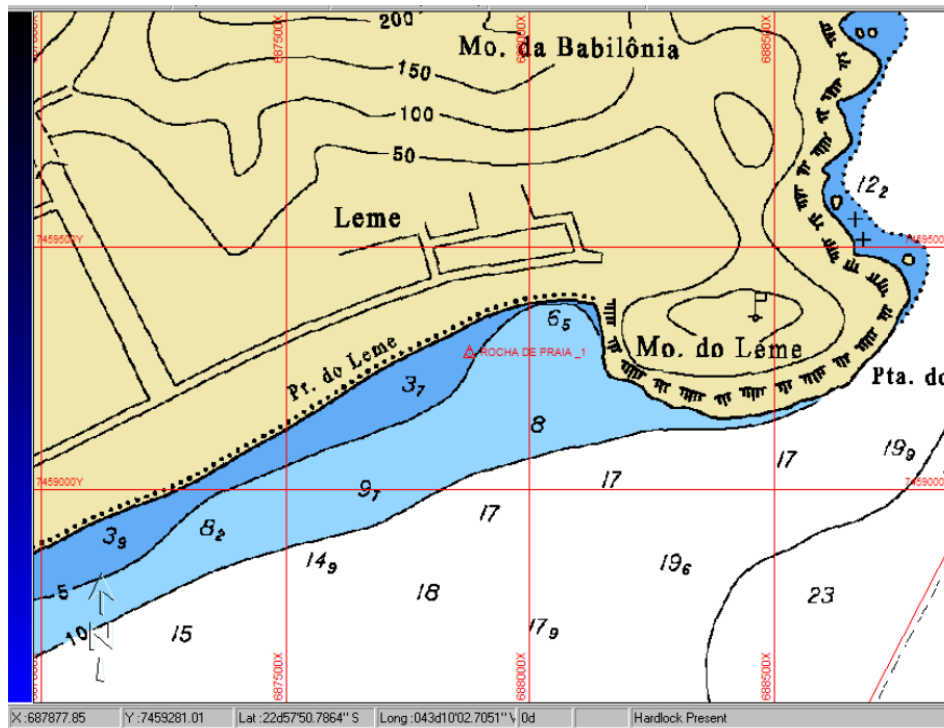


Figura 11 - Batimetria da área de estudo. Região ampliada da carta náutica 1.511 DHN, e georreferenciamento em UTM.

Fonte: Autoria própria por meio do software “HYPACK”.

Para a interpolação dos dados das isolinhas da topobatimetria, e confecção do mapa georreferenciado do bairro do Leme foi utilizado o software ArcGIS 10. Esse mapa, apresentado através da figura 12, localiza a microbacia do bairro do Leme, que possui aproximadamente 95 hectares, sendo 36 hectares consolidados de uma adensada área urbana onde residem cerca de 14.000 habitantes. A presença de comunidades nos morros da Babilônia e Chapéu Mangueira confere à região estudada, representatividade importante para cenários análogos aos de muitas pequenas cidades litorâneas do país. No Rio de Janeiro, estes locais contam com a presença ostensiva da polícia militar desde o ano de 2008 quando foi implantada a política de segurança pública que pretendeu pacificar as diversas aglomerações subnormais (favelas) do Estado do rio de Janeiro com Unidades de Polícia Pacificadoras – UPP.

A área de estudo, que se encontra delimitada ao Norte e ao Leste pelo arco rochoso da Pedra do Leme e do Morro da Babilônia, e tem ao Sul, o Oceano Atlântico como limite.

A praia do Leme, cuja configuração da linha de praia apresenta-se numa suave sinuosidade com aproximadamente 1 km de extensão. No canto dessa praia, a faixa de areia apresenta a largura de 60 metros, e alarga-se em até 120 metros na altura da Avenida Princesa Isabel, onde é determinado o atual limite

Oeste, e que delimita os bairros do Leme e de Copacabana. A figura 12 apresenta a vista aérea dessa praia.

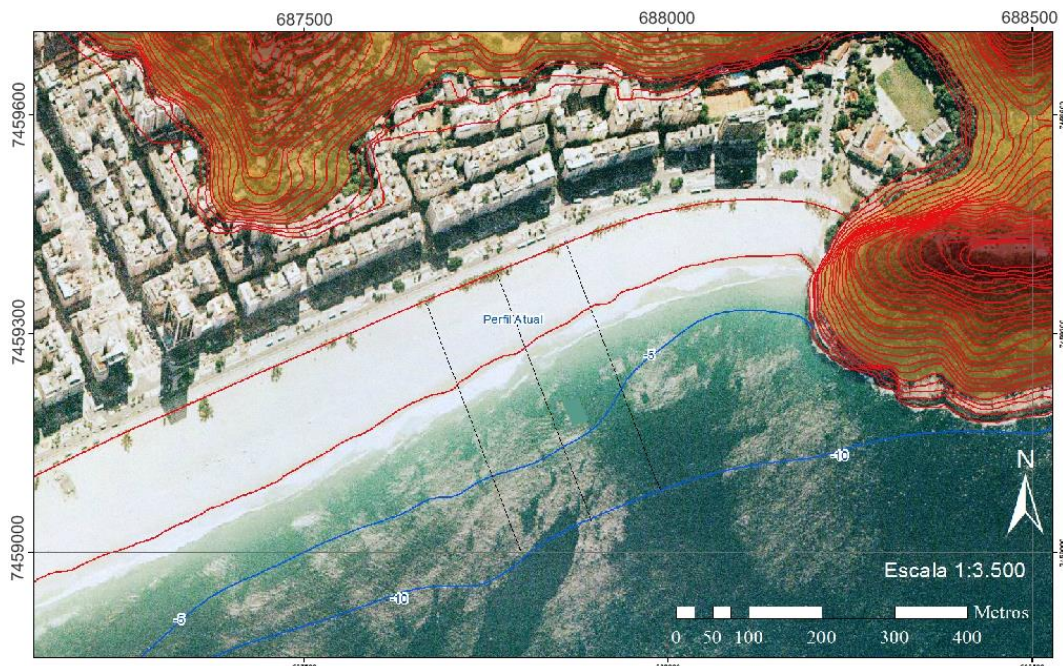


Figura 12 - Mapa do bairro do Leme, RJ.  
Fonte: Autor por meio do software ArcGIS 10.

A atual característica dessa praia, típica de um perfil refletivo, foi adquirida após a obra de engenharia de aterro hidráulico, realizada ao final da década de 1960. As modificações desencadeadas pela obra alterou o perfil de praia original, caracterizado como dissipativo. Atualmente, ainda como resultado dessa obra, a topografia do perfil de praia apresenta declividade moderada a alta caracterizando um perfil do tipo refletivo. Tal característica permanece como principal impacto negativo da engorda artificial da praia de Copacabana, pois elevou o risco à segurança do banho de mar. Para fins comparativos, a figura 13 apresenta o registro da praia Leme-Copacabana em dois momentos, antes da obra de aterro hidráulico (1960) e após a obra (2010).



Figura 13 - Ilustração comparativa da praia de Leme-Copacabana em estado Sem Aterro (1960) e Atual (2010). Observar a zona de arrebatção de ondas, no perfil dissipativo (1960) uma zona larga, e, atualmente (2010) uma zona estreita, típico de um perfil refletivo.

Fonte: adaptado de Google imagens.

No plano original dessa obra foi sugerido que a cota altimétrica para a crista da orla deveria estar entre 3,8 a 4,0 metros acima do zero hidrográfico (N.R = 0,0m DHN), como apresentado no croqui do perfil tipo para a obra de reforço da orla da praia do Leme-Copacabana (figura 14).

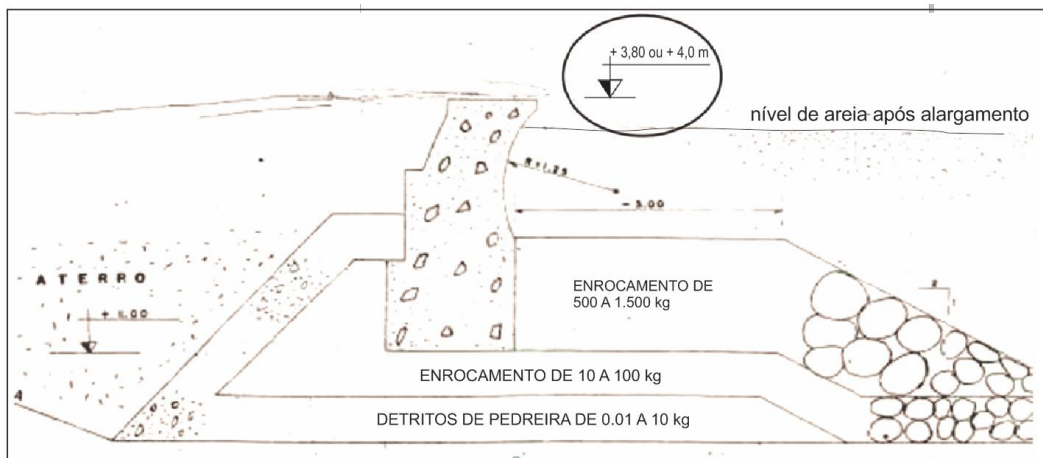


Figura 14 - Croqui da seção tipo do projeto geométrico de defesa da praia do Leme-Copacabana (1960). No detalhe, destacado pelo círculo, a cota da crista sugerida para +3,8 a 4,0 m.

Fonte: Arquivo INPH.

De acordo com o registro fotográfico atual (2015), apresentado na figura 15, observa-se que o projeto geométrico foi executado como planejado. Porém, através do levantamento aerofotogramétrico realizado pelo IPP (2010), verificou-se que a cota altimétrica para a crista da orla está atualmente em +3,60m acima do nível zero do mar (N.R = 0,0m), ou seja, uma diferença altimétrica de até 40 cm a menos do que sugerido no plano de obra original.

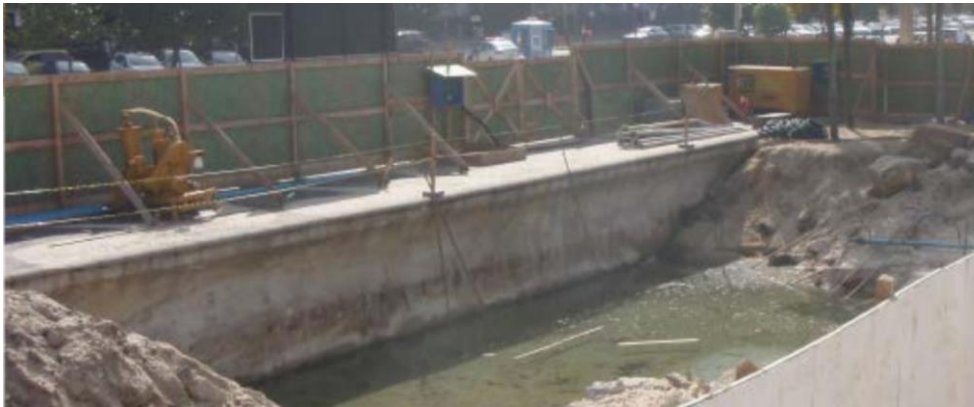


Figura 15 - Registro fotográfico do “as built” da seção tipo para o calçadão da orla, conforme croqui do projeto geométrico.

Fonte: Autoria própria.

E, mesmo com o sucesso da obra de aterro hidráulico da praia de Copacabana, atualmente, durante eventos extremos de marés de ressaca, o espriamento das ondas do mar já supera a cota da crista da face de berma, transpassa a zona de pós-praia e, eventualmente, alcança as instalações públicas no calçadão dessa orla, conforme apresentado na figura 16.



Figura 16 - Onda superando a cota da crista da orla, e alcançando as instalações públicas do calçadão da orla do Leme-Copacabana.

Fonte: Google imagens.

Então, caso a cota altimétrica de 4,0m, referente ao plano do projeto original, tivesse sido estabelecida, atualmente essa orla seria significativamente mais resistente ao avanço do mar. Segundo Campos *et al* (2008), a amplitude do ciclo anual do nível do mar é pouco significativa quando comparada à influência da maré meteorológica, e determinou que a maior energia geradora de grandes empilhamentos de água sobre esse litoral está associada a atuação dos sistemas atmosféricos que perduram por períodos entre 5 e 10 dias.

Em relação à estabilidade da praia do Leme está em estado de equilíbrio tridimensional. Pois, segundo Paula *et al* (2008) a praia apresenta características sedimentares deposicionais, verificadas ao longo dos últimos trinta anos. Isto é, as fases de erosão dessa praia (perfil de inverno) são compensadas ao longo do tempo por fases de acúmulo de sedimentos (perfil de verão). Ver figuras 17 e 18.

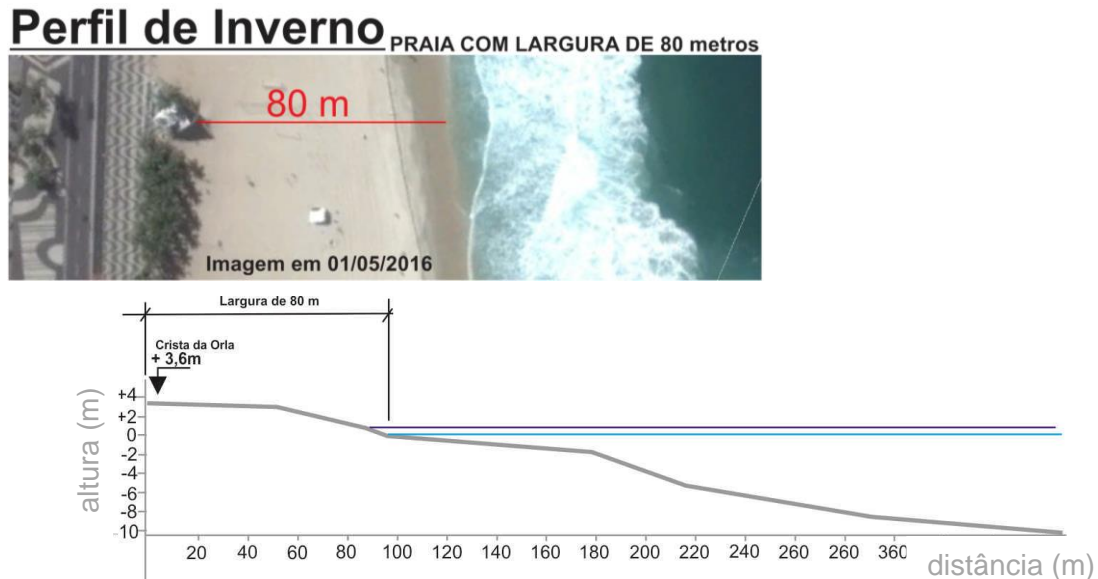


Figura 17 - Composição de vistas do Perfil de Inverno. Vista do satélite, e em seguida, o gráfico, altimetria (metros) x distância (metros) do perfil lateral medido em 13/10/2014  
Fonte: Autor / Adaptado de Google Earth.

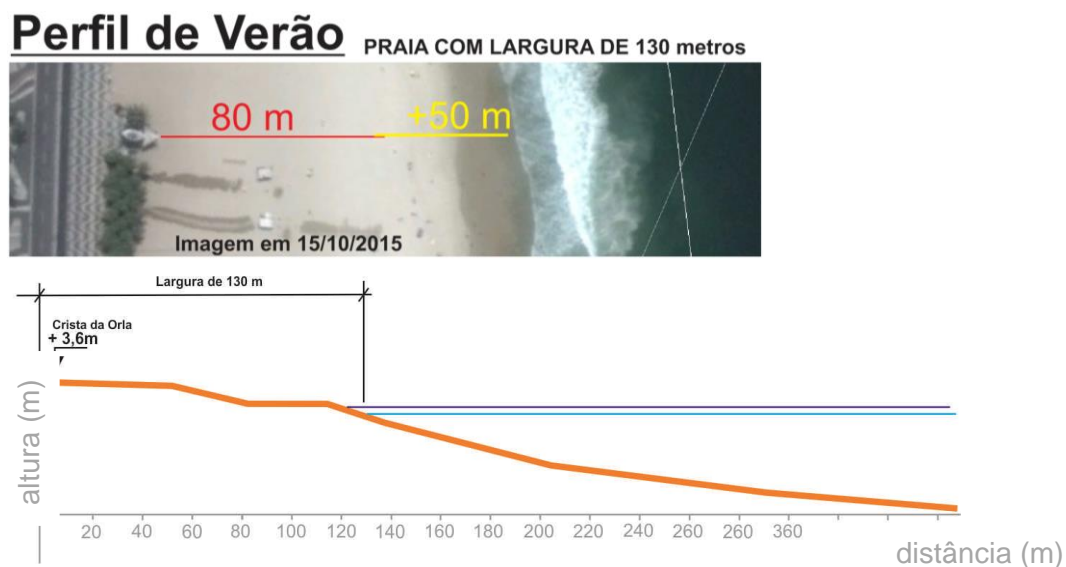


Figura 18 - Composição de vistas do Perfil de Verão. Vista do satélite, e em seguida, o gráfico, altimetria (metros) x distância (metros) do perfil lateral medido em 13/10/2014  
Fonte: Autor / Adaptado de Google Earth.

### 3.1 Histórico da ocupação urbana

Até ao final da década de 80 do século 19, a área de estudo, determinada pelo bairro do Leme, ainda não apresentava qualquer tipo de ocupação urbana, e encontrava-se em condição de natureza original (figura 19).



Figura 19 - Ilustração da praia de Copacabana em estado original. O retângulo destaca a região do bairro do Leme.

Fonte: Google imagens.

Porém, em menos de cem anos, a ocupação urbana ocorreu de forma acelerada e em alto grau de adensamento, como visto através da figura 20, que apresenta o registro fotográfico da região do bairro de Copacabana em meados da década de 60 do século 20.



Figura 20 - Ocupação urbana da Praia de Copacabana (1966). O retângulo destaca a região do bairro do Leme.

Fonte: Google imagens.

As primeiras edificações residenciais começaram a surgir já no ano de 1890, conforme visto através da figura 21. Sendo o registro do primeiro loteamento residencial datado no ano de 1892. A área total desse loteamento era em torno de 46 hectares e se estendia da pedra do Leme até a pedra do Inhangá, que eram respectivamente, os limites Leste e Oeste desse loteamento.



Figura 21 - Ilustração do bairro do Leme em 1890, com vista a partir da pedra do Inhangá. Ao fundo, as primeiras edificações.

Fonte: Camões (1994).

Nessa época, o perfil de praia original ainda se encontrava de forma íntegra e as poucas ocupações não influenciavam na dinâmica dessa praia, a qual possuía uma porção emersa em torno de 187 metros de largura e, uma estimada cota altimétrica, para a crista de berma, em torno de + 3,20 metros acima do nível do mar (NR 0,0m). A figura 22 ilustra essa composição original do perfil de praia.

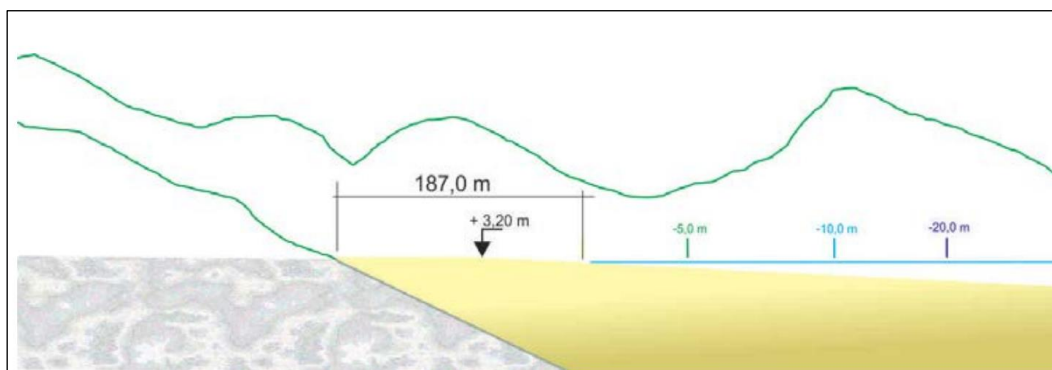


Figura 22 - Croqui do perfil da praia do Leme até 1890.

Fonte: Autoria própria por meio do software AutoCad.

Já no ano de 1896 a ocupação da praia do Leme decorreu de forma mais intensa, e as edificações começaram a ser estabelecidas sobre a zona do pós-praia, como apresentado a seguir na figura 23.



Figura 23 - Registro fotográfico (1896) das primeiras edificações e urbanização do pós-praia.

Fonte: Google imagens.

A partir do ano de 1896, a praia do Leme sofria as primeiras modificações mais significativas, sendo a principal, a redução de sua largura para algo em torno de 117 metros. A figura 24 ilustra a composição desse perfil de praia.

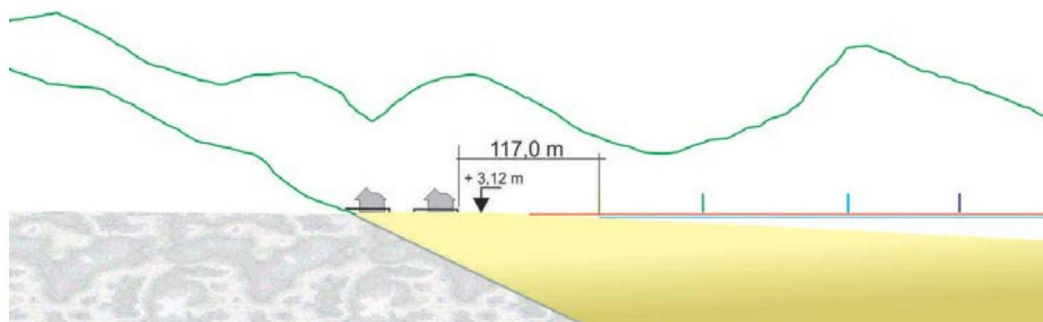


Figura 24 - Croqui do perfil de praia do Leme em 1896.

Fonte: Autoria própria por meio do software AutoCad.

No ano de 1906 foi inaugurada a primeira urbanização da orla da praia do Leme. Uma construção de uma via simples com largura aproximada de 8 metros, constituída de uma base de calçamento de pedras e recoberta de manta asfáltica. A figura 25 apresenta o registro fotográfico dessa obra.



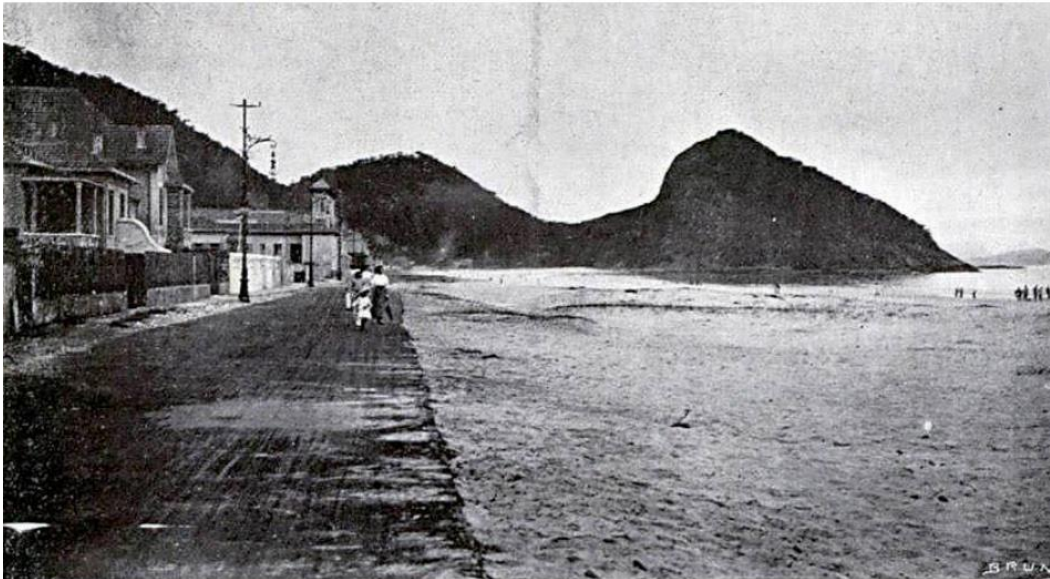


Figura 25 - Registro fotográfico da primeira urbanização da orla do Leme, inaugurada em 1906.

Fonte: Google imagens.

Assim, o processo de urbanização da orla, foi avançando gradativamente sobre a porção de praia, e inicialmente, reduziu a largura da praia para algo em torno de 109 metros. A figura 26 ilustra esse perfil, e caracteriza o processo de urbanização em direção ao mar.

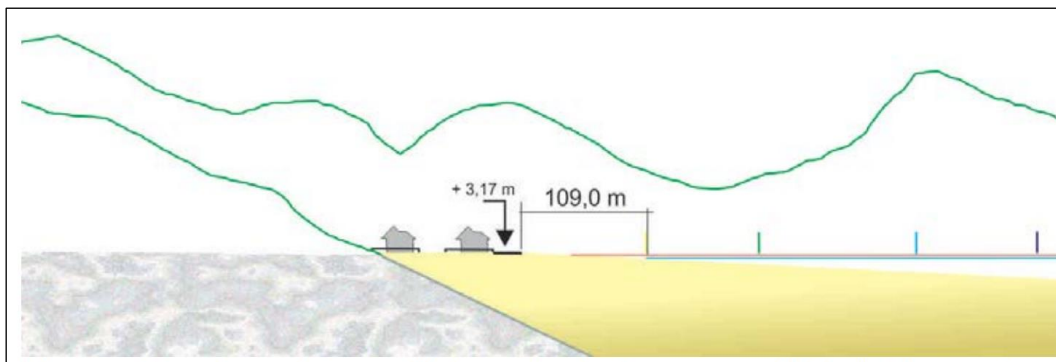


Figura 26 - Croqui do perfil da praia do Leme em 1906.

Fonte: Autoria própria por meio do software AutoCad.

Nesse mesmo ano de 1906 foi inaugurado o Túnel Novo que ligou diretamente o bairro do Leme ao bairro de Botafogo e que já em 1910 consolidava a região como atrativo bairro residencial, ver figura 27 a seguir.



Figura 27 - Registro fotográfico da ocupação urbana do bairro do Leme em 1910.  
Fonte: Google imagens.

Em 1914, após a passagem de um evento de maré de ressaca, a orla do Leme sofreu a primeira destruição parcial, bem visto através da figura 28 abaixo.



Figura 28 - Registro fotográfico da primeira erosão da orla do Leme no ano de 1914.  
Fonte: Google imagens.

Após algumas sucessivas destruições parciais e reformas, a orla do Leme passa por uma grande obra de reforço no ano de 1918, e é ampliada com a duplicação da via e instalação do primeiro calçadão, como visto a seguir através da figura 29.



Figura 29- Registro fotográfico da orla em 1918  
Fonte: Google imagens.

Essa obra de ampliação avançou em torno de 16 metros sobre a praia, reduzindo assim a largura da praia para aproximadamente 94 metros, conforme visto através da figura 30. Com a aproximação da urbanização em direção ao mar, esta obra elevou significativamente o risco de avanço do mar sobre a orla.

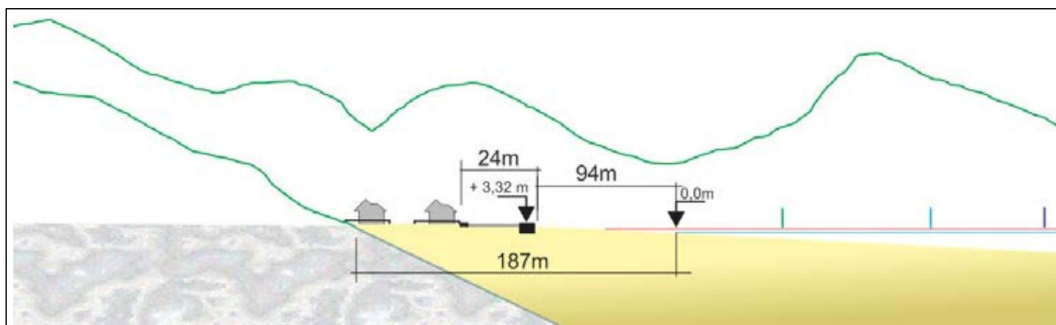


Figura 30 - Croqui do perfil de praia do Leme em 1918.  
Fonte: Autoria própria por meio do software AutoCad.

A figura 31 apresenta o registro fotográfico no ano de 1919, quando foi inaugurado o primeiro calçadão dessa orla. É possível observar a proximidade

do mar com a obra, evidenciando uma estreita faixa de praia, provavelmente, durante o período de maré alta e baixa energia de ondas.



Figura 31 - Registro fotográfico da orla em 1919. Em detalhe, a orientação do mosaico de ondas do calçadão.

Fonte: Google imagens.

Assim, já no ano seguinte, em 1920, um evento de maré de ressaca destruiu parcialmente a obra recém-inaugurada. E em seguida, no ano de 1921, um evento extremo de maré de ressaca desencadeou o colapso da obra.



Figura 32 - Registro fotográfico do colapso da orla por uma maré de ressaca no ano de 1921.

Fonte: Arquivo fotográfico de Augusto Malta.

Contudo, após a destruição da orla durante a grande ressaca de 1921 (figura 32), estudos topo-hidrográficos começaram a ser realizados para o planejamento da obra de proteção costeira para essa orla. Destaca-se que, na época, devido à falta de políticas públicas de gestão ambiental quanto à extração de areia, como pela falta de ordenamento na ocupação urbana através da edificação de estruturas no pós-praia (Hoefel, 1998 *apud* Paula *et al*, 2008), tais fatores contribuíram determinadamente para a vulnerabilidade da orla à erosão por ressacas.

Já no ano de 1937, após sucessivas passagens de eventos de ressacas ao longo dos anos, com destruições parciais e localizadas em toda extensão dessa orla, uma nova obra de reforço e reconstrução do calçadão foi concluída. Conforme apresentado pela figura 33, onde pode ser evidenciado, além da nova orientação do mosaico de ondas do calçadão (paralelo ao mar), como também, o início do processo de adensamento das de edificações multifamiliares com até oito pavimentos.



Figura 33 - Registro fotográfico da orla em 1937.

Fonte: Google imagens.

Em meados da década de 40, após a segunda grande guerra, foi iniciada a ampliação do Copacabana Palace Hotel, e que para realização de tal obra, ocorreu o desmonte da Pedra do Inhangá, que era um marco natural que delimitava os bairros de Copacabana e Leme. Com a perda dessa referência, o bairro do Leme teve como definição do novo limite Oeste a Av. Princesa Isabel, e reduziu assim, a inicial extensão da orla de 1.600 metros, para a atual extensão de 900 metros de comprimento.

No início da década de 50, a intensa especulação imobiliária já havia substituído as edificações de baixo gabarito por construções de até onze pavimentos, de forma que, quase não havia mais terrenos disponíveis à beira-mar. Conforme visto na figura 34.

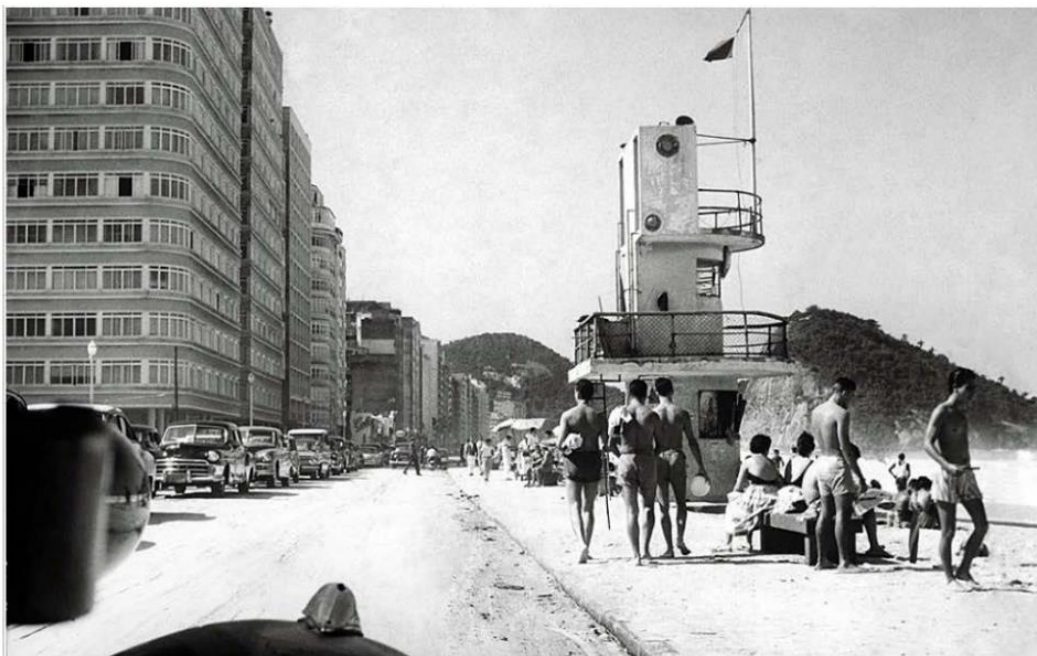


Figura 34 - Registro fotográfico da orla em 1952.

Fonte: Google imagens.

Nesse ritmo de desenvolvimento urbano, no início da década de 60, a região dos bairros do Leme e Copacabana já alcançava o alto grau de adensamento urbano, ver figura 35 a seguir. É possível observar a proximidade da orla junto ao mar, fato esse que continuou, à época, a desencadear sucessivos processos erosivos em determinadas localidades dessa orla.



Figura 35 - Registro fotográfico da orla em 1962.  
Fonte: Google imagens.

Em função dessas sucessivas destruições parciais da orla, em meados da década de 60, são executadas obras de reforço estrutural da orla. Porém, mesmo resistindo ao impacto das ondas essa obra causou transtornos, como a falta de sedimentos (faixa de areia) em uma das praias mais famosas do mundo, como visto na figura 36.



Figura 36 - Registro fotográfico da orla em 1967. Observa-se a ausência de faixa de areia.

Fonte: adaptado de Google imagens.

Em função das condições em que se apresentava a praia do Leme-Copacabana foi elaborado, ao final da década de 60, o projeto de proteção e ampliação da praia de Copacabana. Nesse projeto foi previsto além do aterro hidráulico com a utilização de 6.000 metros cúbicos de areia, como também da duplicação da Av. Atlântica, como visto abaixo através da figura 37.



Figura 37 - Registro fotográfico da orla em 1970. Durante as obras de aterro hidráulico.

Fonte: adaptado de Google imagens.

Essa obra de aterro hidráulico ampliou a orla para uma largura de 75 metros, e a praia para mais de 100 metros em alguns trechos. A cota altimétrica estabelecida para a crista da orla foi de 3,60 metros acima do nível do mar (0,0m N.R - DHN), e permanece de forma semelhante até aos dias atuais. Conforme ilustrado na figura 38.

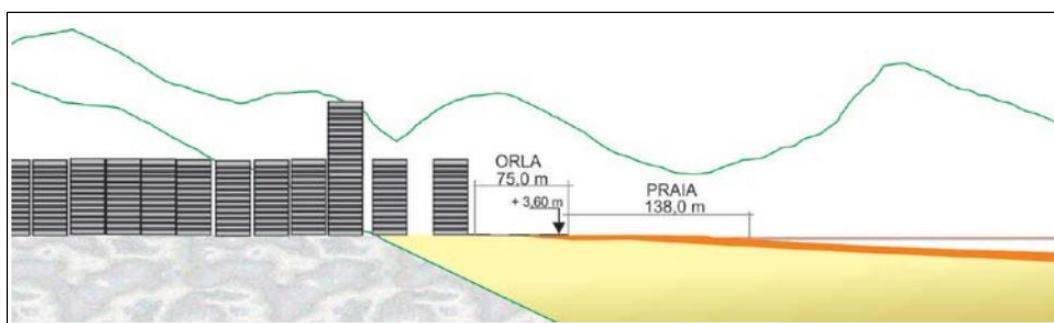


Figura 38 - Croqui do atual perfil de praia do Leme (2016).

Fonte: Autoria própria através do software AutoCad.



## 4 Modelagens

Por meio das modelagens, passa-se da pura discussão teórica – seja a respeito da importância da resiliência urbano-costeira ou das possibilidades de geração de energia limpa em sistemas ambientais equilibrados – para a prospecção de cenários futuros com base em dados reais.

Tendo em vista o quadro teórico desenvolvido no capítulo 2 e o diagnóstico ambiental sobre o bairro do leme apresentado no capítulo 3, foram elaborados modelos físico e computacional como instrumentos de análise para dimensões complementares da problemática da pesquisa.

A compreensão dos processos naturais que envolvem a dinâmica da energia oceânica e suas interações com a geomorfologia e com a geografia da costa possibilitaram fundamentar as escolhas dos cenários modelados. Para contextualizar a pesquisa, na fase de investigação foi utilizada uma abordagem baseada no conceito de célula urbana, que interpretou o ente organizacional como um “organismo vivo”.

A partir dessa abordagem foi elaborado um mapa conceitual, como apresentado na figura 39, a fim de destacar os principais elementos e dinâmicas que devem ser caracterizados, e compreendidos, no intuito de se direcionar o planejamento da resiliência da célula.

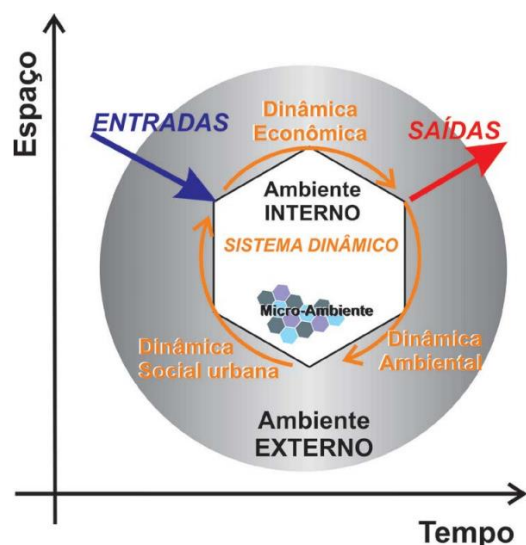


Figura 39 - Mapa conceitual para interpretação da célula urbana.  
Fonte: Autoria própria através do software CorelDRAW.

Foi observado que os limites do espaço territorial do bairro do Leme sofreram algumas variações ao longo do tempo, tanto em função dos processos de ocupação urbana, como pelas condições ambientais específicas da dinâmica costeira local.

Para avaliar a condição atual de vulnerabilidade ao risco do avanço do mar, sobre essa margem territorial, foi adotada a ferramenta de modelagem física reduzida através da utilização do canal de ondas, disponível no laboratório do INPH. Na programação das condições de tempestade ensaiadas, foi utilizado valores de altura significativa das ondas do mar para um tempo de recorrência de 1 ano, 10 anos e 100 anos. Esses valores foram estimados a partir da análise estatística de uma série histórica de dados de ondas referente a 11 anos de dados simulados a partir dos campos de vento.

Essa base de dados (11 anos) também foi utilizada como fonte de dados de entrada para modelagem computacional. Essa ferramenta, que é mais bem detalhada mais adiante, foi utilizada para gerar um prognóstico anual do clima de ondas para a praia do Leme, e, a partir daí foi realizada a estimativa do potencial de energia das ondas do mar como fonte renovável de conversão para o abastecimento público de eletricidade.

#### 4.1 Modelagem física

Inicialmente, após a construção e instrumentação do modelo, executaram-se os ensaios de calibração, de forma que sejam reproduzidos em escala, e de forma fidedigna, os fenômenos ocorridos na natureza. Os aspectos físicos envolvidos nos ensaios caracterizam-se pela predominância das forças inerciais e gravitacionais, razão pela qual são aplicadas as leis de semelhança de Froude.

A escala linear adotada no modelo ( $\lambda$ ) foi de 1:40, e deu origem às seguintes escalas complementares, para o modelo sem distorção:

- Força:  $1: \lambda^3 \rightarrow 1:64\ 000$
- Tempo:  $1: \lambda^{0,5} \rightarrow 1:6,324$

Em função da escala de tempo, cada ensaio teve 18 minutos de duração, que equivalem em torno de três horas na natureza.

Fixados os parâmetros de ajuste, executa-se a sequência de ensaios estabelecida na programação. Cada ensaio é repetido no mínimo duas vezes, a fim de se verificar a consistência dos valores registrados pelos equipamentos de medição. Havendo necessidade, os ensaios são repetidos até os resultados obtidos serem considerados íntegros e confiáveis. E, para calibrar a altura de

onda desejada, foram realizados três ensaios com alturas diferenciadas de onda, sendo os ensaios repetidos para cada período de onda ( $T$ ) e nível d'água estabelecida na programação dos ensaios. Através dos resultados das medições de onda obtidos nos ensaios de calibração, obtidas as curva de calibração, e que fornecem, com exatidão, o alcance dos valores de altura significativa de onda ( $H_s$ ) programada.

Em linhas gerais, esse estudo de modelagem física compreendeu:

- Gerar ondas de tempestade com as características determinadas pelo estudo do clima de ondas na referida área de estudo;
- Avaliar, sob as condições programadas de níveis de maré e altura de ondas, a vulnerabilidade da orla ao risco de galgamento;
- Avaliar o desempenho técnico de dois modelos de engenharia aproveitamento e controle da energia das ondas costeiras.

#### 4.1.1 Canal de ondas

Nessa avaliação, da vulnerabilidade ao risco de avanço do mar sobre a orla, foi utilizado um canal de ondas irregulares do INPH, onde foi representada uma seção transversal do perfil-tipo da orla do Leme, ver figura 40 abaixo.

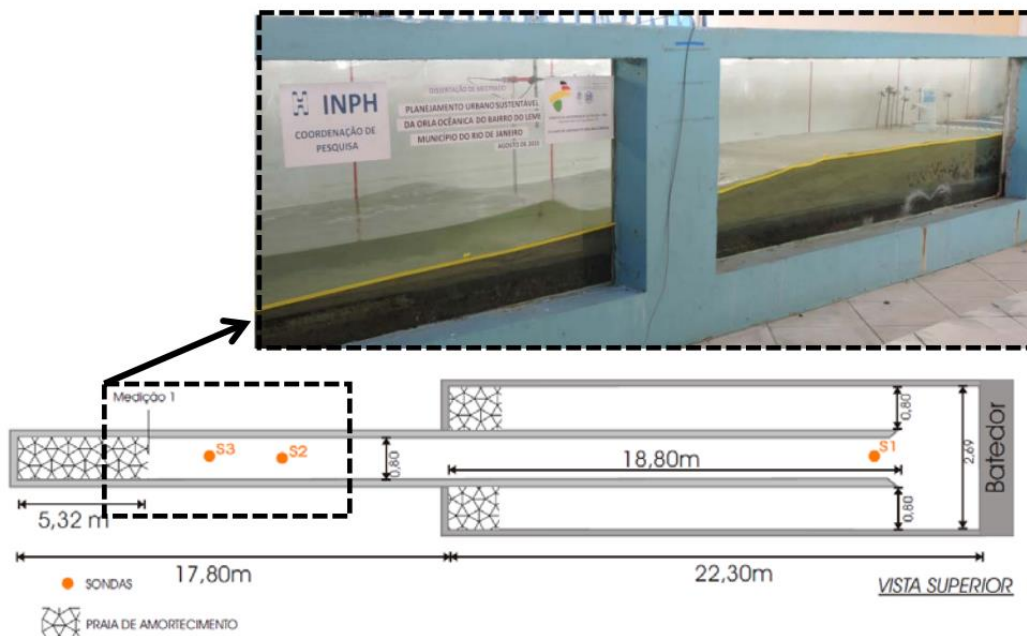


Figura 40 - Composição do croqui, em vista superior do canal de ondas com o posicionamento das Sondas (S1, S2 e S3). O retângulo tracejado destaca a área onde foi construído o modelo (1:40) do perfil tipo da orla do Leme, ilustrado pela foto em vista lateral.

Fonte: Autoria própria.

O canal de ondas é equipado com uma plataforma eletromecânica de geração de ondas irregulares, denominada batedor de ondas, ver figura 41 em seguida. Essa plataforma consiste de um sistema informatizado de geração de ondas que garante fidelidade e controle na reprodução mecânica, em escala reduzida, das ondas ocorridas na natureza.



Figura 41 - Vista do batedor de ondas.  
Fonte: Autoria própria.

A reprodução das ondas ocorre a partir de um arquivo digital de geração, o qual é produzido a partir da altura e período da onda na natureza. O arquivo digital gera um sinal eletrônico e, através de uma placa controladora de posição, emite um sinal elétrico, que aciona um servo-motor que movimenta mecanicamente as placas dos batedores de onda. Esse movimento provoca o deslocamento da massa d'água, e de forma acurada, reproduz as ondas, com a altura e o período correspondente aos da natureza (figura 42).

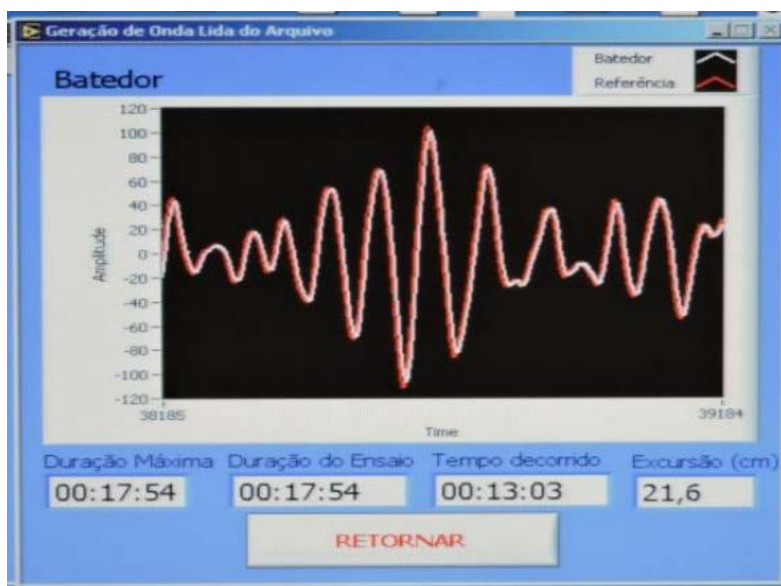


Figura 42 - Imagem da tela do computador. O gráfico da senóide apresenta o controle entre o sinal de geração e o gerado.

Fonte: Autoria própria por meio do software LabView

O sistema de geração efetua o controle de posição do batedor, monitorando em tempo real, os sinais a serem reproduzidos e os que são efetivamente gerados.

Todos os sensores de medições de onda são conectados a um sistema de aquisição e análise de dados, e, de cada ensaio, é emitido um relatório de análise espectral e estatística das ondas gerados no modelo.

#### 4.1.2 Onda centenária

Os dados de ondas utilizados para compor a programação de ondas extremas a serem representadas nos ensaios de modelagem física foram calculados através da análise estatística dos dados de ondas simuladas para a definição do clima de ondas na praia do Leme. Em seguida, calculou-se a probabilidade das máximas alturas significativas ( $H_s$ ) de onda para as direções incidentes, de onde foram obtidas as probabilidades de excedência para o período de retorno (TR) de 1, 10 e 100 anos. A figura 43, abaixo, ilustra a representação das curvas de excedência.

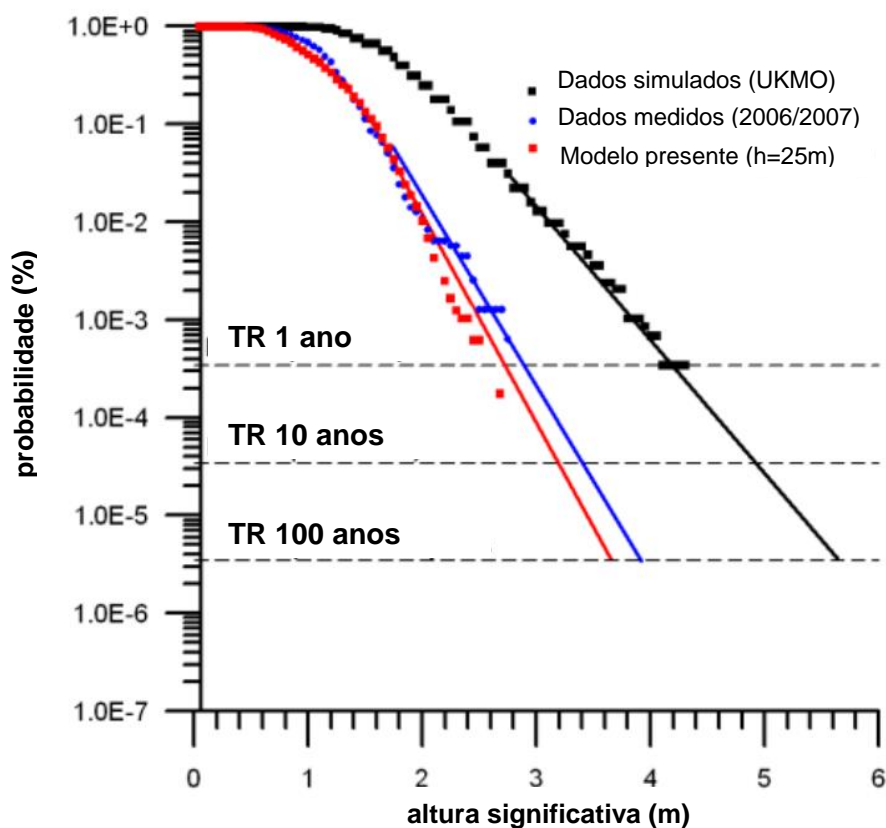


Figura 43 - Ilustração das curvas de excedência para ocorrência da altura significativa ( $H_s$ ) das ondas em referência os períodos de retorno de 1, 10 e 100 anos.

Fonte: Relatório INPH 035/1999

A partir do cálculo das probabilidades de excedência, foi possível determinar as alturas de ondas extremas (tomadas como as mais altas das ondas medidas e calculadas) para períodos de retorno de 10, 30, 50 e 100 anos.

### 4.1.3 Cenários ensaiados

Após a construção e calibração do modelo físico representando a seção transversal do perfil tipo atual da orla do Leme na escala 1:40, foram realizados os ensaios que representaram os cenários das marés de tempestade. Para simular a aleatoriedade das condições do mar, os ensaios de longa duração envolveram uma sequência variada de diferentes alturas de onda ( $H_s$ ) e níveis d'água (NA).

Como condições de ondas de tempestade, foram consideradas ondas de altura significativa de:

- $H_s = 2,80\text{m}$ , representando tempestades de TR 1 ano;
- $H_s = 3,80\text{m}$ , representando tempestades de TR 10 anos;
- $H_s = 4,40\text{m}$ , representando tempestades de TR 100 anos.

E como condições de variação do nível do mar, foram estabelecidas as seguintes condições nível d'água (NA):

- $N.A = 0,0\text{ m}$ , representando nível zero de baixa-mar (NR 0,0m);
- $N.A = + 1,4\text{ m}$ , representando nível máximo de preamar (NR 0,0m);
- Nível de preamar meteorológica:  $+ 1,70\text{ m}$  (NR 0,0m);
- Nível extremo de elevação do nível do mar:  $+ 2,40\text{ m}$  (NR 0,0m).

A representação do nível extremo do mar, considerando a elevação de  $+1,0\text{m}$  sobre a preamar atual, considerando a estimativa prevista pelo IPCC (2014) para o pior cenário (RCP8.5) estimado para o ano de 2100.

Definidas essas condições para as condições de maré de tempestade, determinadas como TR1, TR10 e TR100, são caracterizados os cenários configurados para avaliar a vulnerabilidade do perfil tipo da orla do Leme:

#### A) **Cenário do perfil tipo “ATUAL”**

Este cenário foi construído para representar, de forma fidedigna, a composição do perfil geométrico atual da orla da praia do Leme, tal qual se encontra na natureza. Para a representação do fundo móvel, foi utilizada areia

fina peneirada disposta conforme as cotas altimétricas e batimétricas coletadas. A figura 44 apresenta o croqui desse perfil reproduzido, no canal de ondas.

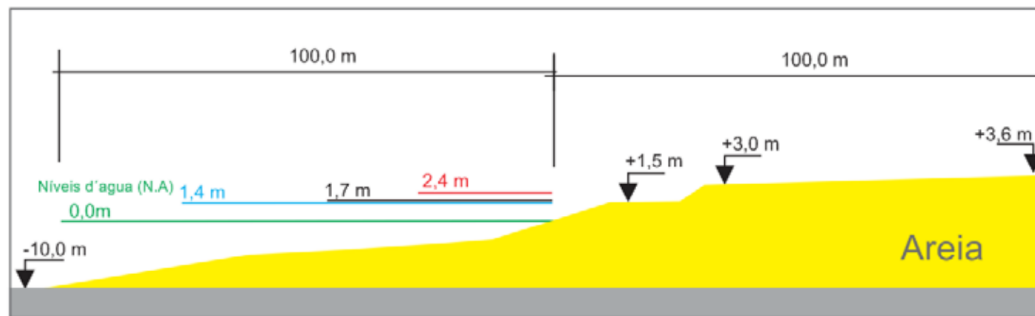


Figura 44- Croqui do perfil tipo “Atual” reproduzido na escala 1:40.

Fonte: Autoria própria.

No croqui (figura 43), os valores de cotas e distâncias estão apresentados de acordo com as medidas dispostas na natureza. Por exemplo, a medida de 100m na natureza (1:1), a distância real no modelo construído (1:40) é de 2,5m.

## B) Cenário do perfil tipo “Com Obra”

Esse cenário foi composto sobre o perfil tipo “Atual”, com as engenharias para aproveitamento e controle das ondas do mar, determinando assim, o perfil tipo “Com Obra”. A figura 45 abaixo, apresenta o croqui do perfil reproduzido no canal de ondas, os valores representam as medições em escala real.

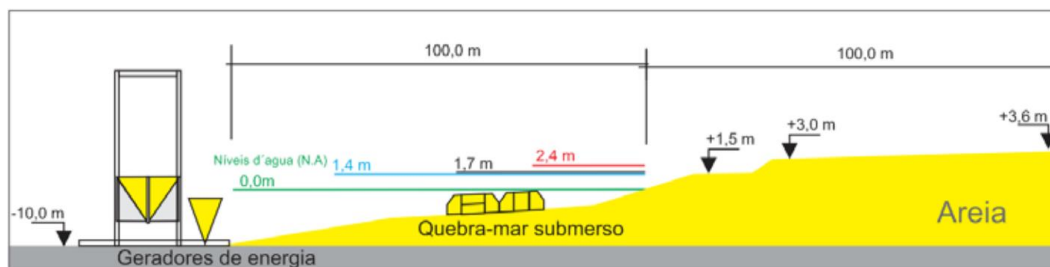


Figura 45 - Croqui do perfil tipo “Com Obra” reproduzido na escala 1:40. No detalhe, o “Quebra-mar submerso” e dos “Geradores de energia”.

Fonte: Autoria própria.

Para avaliar a tecnologia de aproveitamento da energia das ondas do mar na conversão para energia elétrica, foram testados dois modelos (figura 46) que trabalham de forma independente e diferenciada, ambos construídos em acrílico. Um dos modelos de gerador é um flutuador, e aproveita a energia potencial e cinética das ondas do mar através da movimentação vertical (sobe/desce). O outro modelo utilizado é a placa osciladora, e aproveita a energia cinética das ondas através da movimentação horizontal (avante/ré) gerada.



Figura 46 - Modelos (1:40) dos geradores de energia através das ondas.  
Fonte: Autoria própria.

Para representar a engenharia de controle das ondas do mar, foi utilizado um modelo de quebra-mar submerso composto de blocos (2,5m x 5,0m x 3,5m) pré-moldados em argamassa para concreto. A figura 47 apresenta uma vista.



Figura 47 - Vista lateral do modelo (1:40) do quebra-mar submerso.  
Fonte: Autor



### C) Cenário do perfil-tipo “OBRA TR100”

Para compor esse cenário, foi montada sobre o cenário do perfil tipo “Com Obra”, uma obra projetada para suportar tempestades extremas, previstas para ocorrerem em cenário de elevação do nível médio do mar, como previsto pelo IPCC (2007), para daqui a 100 anos. Assim, esse perfil tipo, projetado para a orla da praia do Leme foi denominado de perfil com “OBRA TR100”. A figura 48 abaixo apresenta o croqui desse projeto.

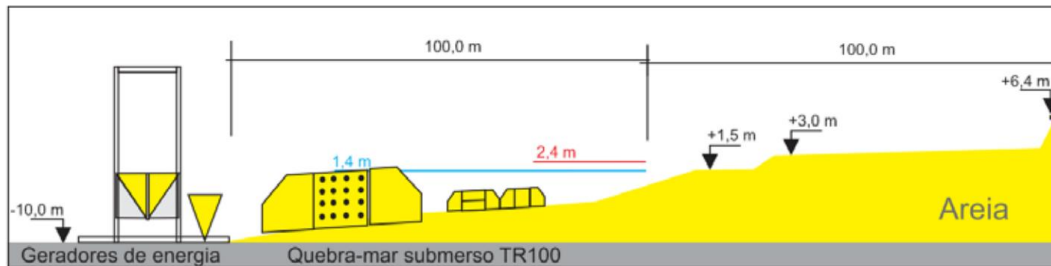


Figura 48 - Croqui do perfil-tipo com “OBRA TR100”.

Fonte: Autoria própria.

As principais modificações realizadas para compor esse perfil foram a elevação da cota da crista da orla, atualmente com +3,6m acima do nível do mar 0,0m (DHN/MB) para +6,4m (NR = 0,0m), o que correspondeu a uma elevação de +2,8m sobre a cota atual da crista da orla do Leme. Assim como a introdução de um novo quebra-mar submerso com dimensões ampliadas. Esse modelo (1:40) foi composto de oito blocos de concreto com as dimensões de 17 cm de largura, por 35 cm de comprimento e, 25 cm de altura. Em escala natural (1:1) essas dimensões seriam respectivamente correspondentes a 6,8m x 14m x 10m. A figura 49 abaixo apresenta uma vista lateral desse perfil construído no modelo.



Figura 49 - Vista lateral do modelo (1:40) com OBRA TR100.

Fonte: Autoria própria.



Figura 50 - Composição de vistas do modelo (1:40) com OBRA TR100. No detalhe, elevação da cota de crista da orla para +6,4m (N.R = 0,0m).

Fonte: Autoria própria.

A figura 50 acima apresenta uma composição de fotos do perfil com “OBRA TR100” construído no canal de ondas na escala 1:40. De cima para baixo, respectivamente, uma vista geral do perfil da praia, e em seguida o detalhe da elevação da cota da crista da orla.

Considerando todos os cenários ensaiados, sendo três características de marés de tempestades para TR1, TR10 e TR100, três cenários de orla com perfis caracterizados como “ATUAL”, “COM OBRA” e “OBRA TR100”, e um

ensaio de acomodação intercalado a cada ensaio de tempestade realizado, a sequência de ensaios ficou disposta conforme apresentado em seguida na Tabela 3. Destaca-se que para o perfil denominado como OBRA TR100 foi submetido apenas o ensaio com características de tempestade TR100.

Tabela 3 - Características dos 14 ensaios de longa duração

| Nº do Ensaio | Hs (m) | Tp (seg.) | N. A. (m) | Tipo ensaio | Situação     |
|--------------|--------|-----------|-----------|-------------|--------------|
| 1A           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Perfil Atual |
| 2A (*)       | 2,8    | 11        | + 1,4     | T.R 1       | Perfil Atual |
| 3A           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Perfil Atual |
| 4A (*)       | 3,8    | 11        | + 1,7     | T.R 10      | Perfil Atual |
| 5A           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Perfil Atual |
| 6A (*)       | 4,4    | 11        | + 2,4     | T.R 100     | Perfil Atual |
| 1B           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Com Obra     |
| 2B (*)       | 3,8    | 11        | + 1,4     | T.R 1       | Com Obra     |
| 3B           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Com Obra     |
| 4B (*)       | 4,0    | 11        | + 1,7     | T.R 10      | Com Obra     |
| 5B           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | Com Obra     |
| 6B (*)       | 4,4    | 11        | + 2,4     | T.R 100     | Com Obra     |
| 7B           | 1,0    | 11        | 0,0       | Acomodação  | OBRA TR100   |
| 8B (*)       | 4,4    | 11        | + 2,4     | T.R 100     | OBRA TR100   |

Fonte: (\*) Foto, levantamento topo-altimétrico, e recomposição do perfil

## 4.2 Modelagem computacional

Para avaliar o potencial energético das ondas costeiras para conversão em energia elétrica e abastecimento público do bairro do Leme foi realizado um estudo de modelagem computacional para caracterizar a agitação marítima na área de estudo. Em função da ausência de dados primários provenientes de medições de ondas na praia do Leme, e do alto custo envolvido no levantamento desses dados, inicialmente, foram adquiridos 11 anos de dados de onda simulados através do modelo numérico de climatologia global do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF*, os quais são disponibilizados através do endereço eletrônico do sítio do projeto ERA. Os parâmetros de onda coletados foram referentes a altura significativa de onda (*Hs*), período de pico (*Tp*) e direção de incidência, os quais são calculados a partir dos dados de reanálise dos campos de vento e pressão atmosférica.

Esse modelo utiliza uma malha global regular com resolução horizontal de precisão espacial com  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  em latitude e longitude. Esses parâmetros foram fornecidos em intervalos de seis horas, para o período entre 01/01/2002 a 01/12/2012, que totalizaram 16.073 linhas de dados. O ponto de extração

utilizado no modelo é apresentado na figura 51, e está localizado nas coordenadas geográficas 194772.8E / 7342521.29S UTM 23S (WGS 84).

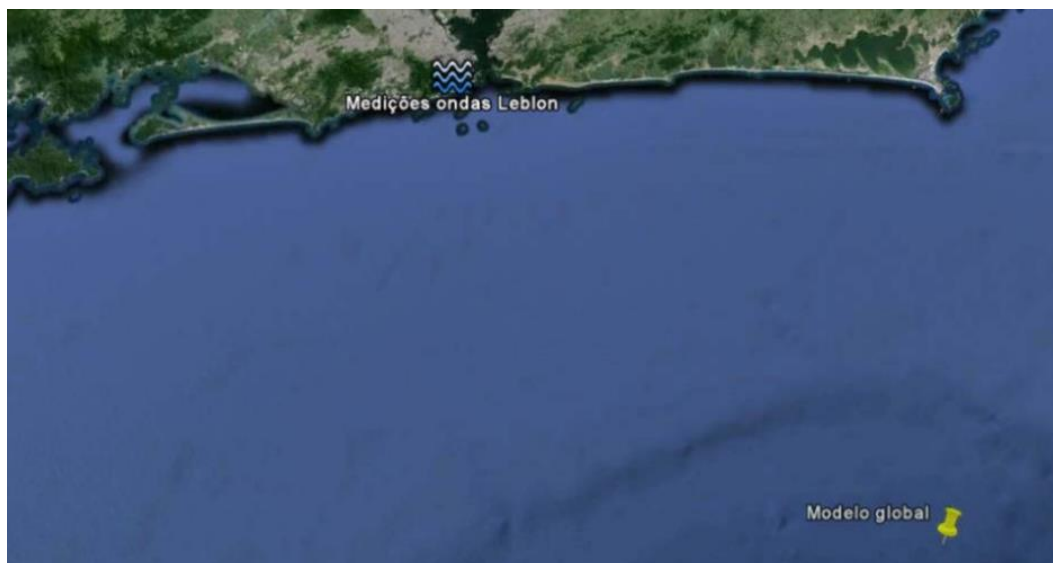


Figura 51 - Localização do ponto de extração dos resultados do modelo meteorológico global e dos dados de medição na natureza.

Fonte: Google Earth

Esse ponto de extração é referente a uma região de águas profundas, onde o relevo marinho ainda não gera grande influência nos efeitos de transformação das ondas, e, por isso, esses modelos não são usualmente aplicados diretamente à zona costeira.

Para fins de verificação e confiabilidade dos dados extraídos do modelo global, foi realizada uma comparação entre esses dados simulados e dados medidos na natureza, ambos para um mesmo período de datas. Os dados de ondas medidos na natureza foram obtidos através do acesso ao relatório INPH 035/1999, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Esses dados foram medidos por um ondógrafo do tipo *Waverider*, posicionado nas coordenadas: 22° 59' 58,8" S e 43° 13' 15,0" W, a cerca de 1 km da linha de praia do Leblon, localizada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro - RJ (Figura 51). Nessa campanha de medição, o equipamento foi configurado para obter registros de 20 minutos de duração em intervalos de 03 horas, durante o período de julho a outubro de 1997. A Figura 52 apresenta a comparação entre os dados de onda ( $H_s$ ) simulados e medidos, para um mesmo período de referência de quatro meses do ano de 1997. Através desse gráfico comparativo, pode ser observada a boa aderência do modelo numérico aos dados de medição, validando, assim, tanto a eficiência da modelagem, como também a confiabilidade na utilização dos dados de reanálise (*ECMWF*).

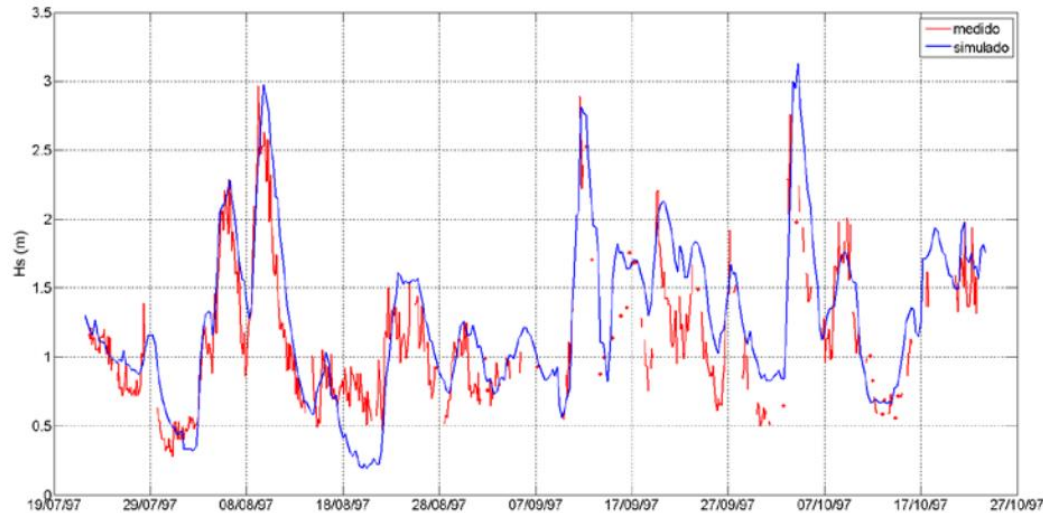


Figura 52 - Gráfico de Hs x Data (1997), comparando Dados Medidos x Simulados.  
Fonte: Relatório INPH 035/1999

Nessa modelagem, foi utilizada a série histórica de 11 anos de dados de onda fornecidos pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF*. Portanto, a partir de situações pretéritas (*hindcast*), foi elaborado um prognóstico (*forecast*) anual do estado de agitação marítima para a área de interesse. Esse estudo de modelagem computacional foi realizado em duas etapas, a saber:

#### Primeira etapa

Inicialmente, a fim de correlacionar, sem grandes distorções, os dados de ondas simulados na região oceânica para as condições de onda junto à costa, foi realizada a *modelagem* de propagação de ondas para região costeira próxima à área de interesse, precisamente na profundidade de 20 metros. O ponto de extração dos dados está localizado nas coordenadas geográficas  $22^{\circ}59'39.30''\text{S}$  e  $43^{\circ}8'52.31''\text{O}$ , conforme indicado na figura 53, a seguir.



Figura 53 - Ponto de extração dos parâmetros das ondas costeiras.  
Fonte: Google Earth.

Nessa etapa, de modelagem de transformação dos dados de onda oceânica para a profundidade de 20m, foram gerados 16073 registros de ondas. Com base nesses registros de onda, foi elaborada a rosa anual de ondas, apresentadas, juntamente com o resultado da análise estatística dos dados, no Capítulo 5- Resultados.

### **Segunda etapa**

Nesta etapa, com a finalidade de obter uma estimativa mais realista dos parâmetros de onda (*Hs*, *Tp* e *Dir*) na praia do Leme, precisamente a cinco (5) metros de profundidade, foi utilizado o *software* de modelagem de ondas para águas rasas *MIKE 21 PMS*, do *Danish Hydraulic Institute - DHI*.

Esse modelo espectral, de terceira geração, inclui todos os principais efeitos de transformação em águas rasas, como refração, difração e perdas de energia pelo atrito com a topografia de fundo e arrebentação da onda.

Para diminuir o esforço computacional, as 16073 linhas de dados de ondas gerados na profundidade de 20m foram agrupadas por intervalos de direção média de ondas x intervalo de altura significativa (*Hs*) e intervalo de período de pico (*Tp*). Para a altura significativa de onda (*Hs*), foi escolhido o intervalo de 0,2m, e, para o período de pico (*Tp*), o intervalo de 2s. A direção média obedeceu ao intervalo padrão de 22°5´.

Nessa modelagem, foi estabelecida uma malha batimétrica de 8m x 8m, e, como condição de contorno, o campo de domínio foi limitado à profundidade máxima de 20m, referente aos dados de onda obtidos na etapa de modelagem anterior. O ponto de extração dos dados foi posicionado na profundidade de cinco (5) metros, referente ao ponto de avaliação do potencial de aproveitamento da energia das ondas.

Os dados foram organizados, através *software Excel*, em 184 condições de ondas, com os respectivos percentuais de ocorrência de cada uma delas. Os resultados dessa modelagem e a análise estatística desses dados são apresentados no próximo capítulo.

#### **4.2.1**

#### **Cálculo do potencial de aproveitamento da energia das ondas**

Para estimar o potencial energético (*P*) da onda, disponível para conversão em energia elétrica, foi utilizada a equação simplificada de Holthuijsen (2007) *apud* Carvalho (2010):

$$P = 0,5 (Hs)^2 \times Tp \quad (Eq.01)$$

Nessa equação, o valor de  $H_s$  é referente a altura significativa de onda, que corresponde à média de 1/3 das ondas mais altas, entre todas as ondas medidas. Enquanto que o  $T_p$  é referente ao período de pico, e corresponde a média de 1/3 dos maiores períodos medidos dentre toda a série de ondas medidas. Essa equação (Eq.01) calcula a energia transmitida por metro linear da frente de uma onda, e o resultado é apresentado em quilowatt por metro (kW/m).

Os dados de onda ( $H_s$  e  $T_p$ ) utilizados são referentes ao prognóstico anual extraído na isolinha de 5m de profundidade. E os valores utilizados foram tomados a partir da média ponderada para a altura significativa ( $H_s$ ) de onda em relação ao seu percentual total de ocorrência, sendo classificados de acordo com o intervalo de período de pico ( $T_p$ ) referente, para assim, serem aplicados à equação de Holthuijsen (2007) *apud* Carvalho (2010). Portanto, o valor calculado para o potencial energético ( $P$ ) da onda corresponde à disponibilidade com 100% de aproveitamento da energia contida por metro linear de frente de onda.

A partir desse valor para o Potencial ( $P$ ) de energia de uma (01) onda, foi calculado o potencial para uma (01) hora de ocorrência dessa classe de onda. A Tabela 4 abaixo apresenta a estimativa média de ocorrência da classe de ondas, determinadas por intervalo de Período de Pico ( $T_p$ ), e estão baseados nos resultados das ondas medidas nos ensaios de modelagem em laboratório.

Tabela 4- Estimativa média da ocorrência do número de ondas por hora

| Período de Pico ( $T_p$ )<br>em segundos | Estimativa Média do n°<br>total de Ondas / hora | 1/3 do número de<br>Ondas / hora |
|--|---|----------------------------------|
| 5  | 620   | 207                              |
| 7  | 414   | 138                              |
| 9  | 300   | 100                              |
| 11                                       | 250   | 84                               |
| 13                                       | 186   | 62                               |

Fonte: Autoria própria.

A partir desses valores foi calculado o Potencial Teórico Bruto ( $P_{tb}$ ), que é referente ao potencial energético ( $P$ ), com 100% de aproveitamento da energia contida por metro linear de frente de onda, multiplicado por um terço (1/3) do número médio de ondas que ocorre durante 01 hora. O valor é expresso em quilowatt-hora por metro (kWh/m). A equação utilizada é apresentada como:

$$P_{tb} = P \times (1/3 \text{ do } n^\circ \text{ total de ondas}) \quad (\text{Eq.02})$$

Como não é possível aproveitar 100% da energia disponível em uma onda, é calculado o Potencial Técnico ( $P_{tec}$ ), que é referente à capacidade do

equipamento em converter a energia potencial da onda em energia elétrica. No caso, foi adotado um equipamento com a capacidade de aproveitamento de 20% do Potencial Teórico Bruto ( $P_{tb}$ ), e com captação de quatro metros de frente de onda. Esse valor obtido é expresso em quilowatt-hora (kWh). Assim, a equação utilizada é apresentada como:

$$P_{tec} = (P_{tb} \times 0.2) \times 4 \quad (Eq.03)$$

Continuando os cálculos, o Potencial diário ( $P_d$ ) de geração de energia elétrica se obtém através da multiplicação do Potencial Técnico ( $P_{tec}$ ) por 24 horas de operação diária. O valor obtido é expresso em quilowatt-hora por dia (kWh/dia). A equação utilizada é apresentada como:

$$P_d = P_{tec} \times 24 \quad (Eq.04)$$

Assim, considerando as determinadas classificações para a direção média de onda incidente, o valor obtido com o Potencial Técnico diário (kWh/dia) foi multiplicado pelo número de dias de ocorrência dessa característica de onda. Portanto, a estimativa do Potencial diário ( $P_d$ ) é descrita conforme a equação apresentada abaixo, e seu valor expresso em quilowatt-hora por ano (kWh/ano), ou, Megawatt-hora por ano (MWh/ano).

$$P_a = P_d \times (n^\circ \text{ de ocorrência de dias/ano}) \quad (Eq.05)$$

Então, somando-se o potencial anual ( $P_a$ ) de geração de energia elétrica de todas as direções de onda incidente, de acordo com o determinado prognóstico do clima de ondas na localidade, foi estimado o total do potencial anual da geração de energia elétrica através das ondas. O resultado dos cálculos é apresentado do item 5.2.1 do Capítulo 5.



## 5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na avaliação da vulnerabilidade ao risco de avanço do mar sobre a orla do Leme através do estudo de modelagem física reduzida, apresentado no subitem 5.1. Em seguida, no subitem 5.2, são apresentados os resultados do estudo de modelagem computacional para caracterização do clima de ondas da área de estudo, a estimativa do potencial de aproveitamento de energia das ondas e os parâmetros estimados.

### 5.1 Modelagem física

A partir da realização dos ensaios de modelagem física (1:40) com o perfil tipo da orla do Leme, com o objetivo de mensurar a vulnerabilidade ao risco de galgamento das ondas durante condições extremas de marés de ressaca foram descritos os resultados obtidos conforme o constatado através dos registros fotográficos apresentados neste capítulo. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o perfil tipo “ATUAL”, e, em seguida, são apresentados, para fins comparativos, os resultados obtidos com o perfil tipo “COM OBRA” e “OBRA TR100”.

- **Perfil “ATUAL”:**

Ao término dos ensaios de acomodação, ensaios 1A, 3A e 5A, a zona de arrebentação das ondas é bem próxima da linha de praia (0,0m DHN). Devido à baixa energia da onda incidente ( $H_s=1,0\text{m}$  e  $T_p=11\text{s}$ ), a praia do modelo, de fato, apenas acomoda-se. Essa condição de onda não apresenta risco de avanço do mar sobre a orla, nem mesmo de galgamento da crista de berma, estabelecida na cota +3,0 metros (NR 0,0 m). A figura 54 a seguir ilustra esse comentário.



Figura 54 - Registro fotográfico do Ensaio 1A ( $H_s=1,0\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=0,0\text{m}$ ). Situação semelhante ocorrida para os Ensaios 3A e 5A, caracterizados como ensaios de acomodação.

Fonte: Autoria própria.

Sequencialmente, após os ensaios de acomodação, foram realizados os ensaios de tempestade, definidos pelos Ensaios 2A (TR1), 4A (TR10) e 6A (TR100). A Figura 55 a seguir apresenta o resultado para o Ensaio 2A ( $H_s=2,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=+1,4\text{m}$ ).



Figura 55 - Registro do Ensaio 2A ( $H_s=2,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=+1,4\text{m}$ )

Fonte: Autoria própria.

Nesse registro fotográfico do Ensaio 2A (figura 55) é possível observar que as ondas superam a cota da crista da berma +3,0 metros (NR 0,0 m), porém não ultrapassam a cota da crista da orla, estabelecida em +3,6 metros (NR 0,0m). Portanto, essa condição de Tempestade TR1 ( $H_s=2,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=+1,4\text{m}$ ) não apresenta risco de avanço do mar sobre a orla.

Já na condição do Ensaio 4A com tempestade TR10 ( $H_s=3,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=+1,7\text{m}$ ), como visto abaixo através da figura 56, as ondas ultrapassam a cota da crista da orla, estabelecida em +3,6 metros (NR 0,0m) e alcançam as instalações da orla.



Figura 56 - Ensaio 4A (TR10). Perfil "ATUAL".  
Fonte: Autoria própria.

O Ensaio 6A com tempestade TR100 ( $H_s=4,4\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA=+2,4\text{m}$ ), que foi a condição de tempestade mais adversa ensaiada, principalmente pela condição de sobreelevação do N.A, as ondas ultrapassaram a cota da crista da orla (+3,6m) com intensa energia. É válido ressaltar que, quando comparado ao observado no Ensaio 4A, as ondas nessa condição do Ensaio 6A atingem os prédios residenciais de forma bem violenta, e provavelmente, causariam prejuízos mais acentuados. A seguir as figuras 57 e 58 ilustram essa condição.



Figura 57 - Ensaio 6A (TR100). SEM OBRA.  
Fonte: Autoria própria.

Na figura 58 abaixo é possível observar a areia que foi arrastada sobre a representação da Av. Atlântica, que fica além da faixa do calçadão.



Figura 58 - Ensaio 6A, com vista de outro ângulo. No detalhe, a grande quantidade de areia arrastada pela força das ondas, as quais atingem a área das edificações residenciais ainda com significativa força.  
Fonte: Autoria própria.

- Perfil “COM OBRA”

A seguir são apresentados os resultados, para fins comparativos, dos ensaios com obra. Durante os ensaios 1B, 3B e 5B, caracterizados por ensaios de “acomodação” ( $H_s=1,0\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= 0,0\text{m}$ ), e devido à baixa altura das ondas e do nível d’água, foram observados que as alterações ocorreram apenas na acomodação do perfil submerso da praia (figura 59). Portanto, para essas condições de ensaio de acomodação o perfil de berma manteve-se íntegro, e não apresentou risco de erosão ou galgamento da crista de berma.



Figura 59 - Ensaio 3B. Vista de outro ângulo.  
Fonte: Autoria própria.

Durante o Ensaio 2B, cujas características de tempestade (TR1) ensaiada foram de  $H_s=2,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +1,4\text{m}$ , a cota da crista da berma estabelecida em  $+3,0\text{m}$  acima da linha d’água (NR  $0,0\text{m}$ ) foi galgada pelas ondas. Contudo as ondas não apresentaram risco de galgamento para a cota da crista da orla ( $+3,6\text{m}$ ). A figura 60 a seguir apresenta o registro dessa condição observada durante o Ensaio 2B.

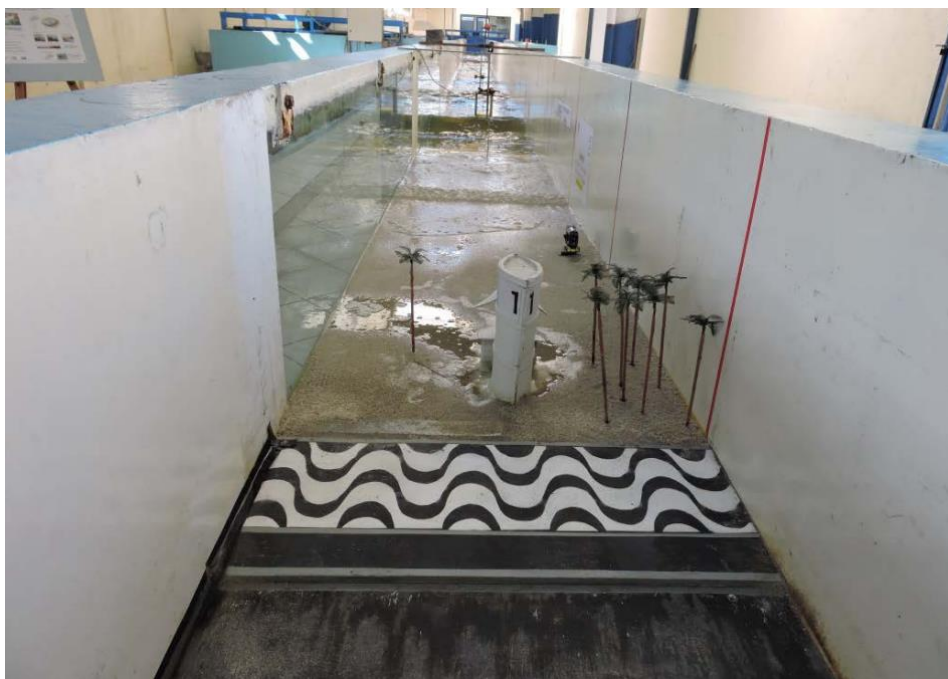


Figura 60 - Ensaio 2B. Perfil "COM OBRA" e tempestade TR1.  
Fonte: Autoria própria.

Apesar da semelhança da figura 60 (Ensaio 2B - tempestade TR1 e perfil "COM OBRA") em comparação com a figura 55 (Ensaio 2A - tempestade TR1 e perfil "ATUAL"), é possível observar que na figura 60 a quantidade de água, sobre a praia é menor. Fato este que, provavelmente é referente à redução da energia da onda desencadeada pela introdução do quebra-mar submerso, dito como obra para esse perfil de praia. A tabela 5 abaixo apresenta a comparação dos resultados de medição da altura da onda ( $H_{1/3}$ ) pelas sondas S1, S2 e S3 nos Ensaio 2A e 2B. Lembrando que a sonda S3 mede a altura da onda após a passagem pela obra, conforme croqui já apresentado anteriormente na figura 36.

Tabela 5 - Medição da altura de onda  $H(1/3)$  - comparação entre os Ensaio 2A e 2B

| <b>Ensaio 2A (<math>H_s = 2,8 \text{ m} / T_p = 11 \text{ s} / NA = +1,40 \text{ m}</math>)</b> |           |        |        |       | <b>Perfil ATUAL</b> |           |
|---|-----------|--------|--------|-------|---------------------|-----------|
| Sondas  | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)           | $T_p$ (s) |
| 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 (-3m)  | 721       | 4.24   | 1.97   | 8.93  | 3.2                 | 11.2      |

| <b>Ensaio 2B (<math>H_s = 2,8 \text{ m} / T_p = 11 \text{ s} / NA = +1,40 \text{ m}</math>)</b> |           |        |        |       | <b>Perfil COM OBRA</b> |           |
|---|-----------|--------|--------|-------|------------------------|-----------|
| Sondas  | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)              | $T_p$ (s) |
| S1 (-20m)   | 742       | 4.99   | 2.12   | 8.68  | 3.18                   | 10.81     |
| S2 (-10m)   | 758       | 4.84   | 1.6    | 8.5   | 2.68                   | 11.6      |
| S3 (-3m)  | 696       | 2.76   | 1.24   | 9.27  | 1.87                   | 12.59     |

Fonte: Autoria própria.

A figura 61, abaixo, ilustra em gráfico os resultados apresentados na Tabela 5, com destaque para os ensaios 2A e 2B, respectivamente perfil “ATUAL” e “COM OBRA”. O eixo das ordenadas apresenta a altura de onda medida em metros, e o eixo das abscissas apresenta a sonda referente à leitura da medição.

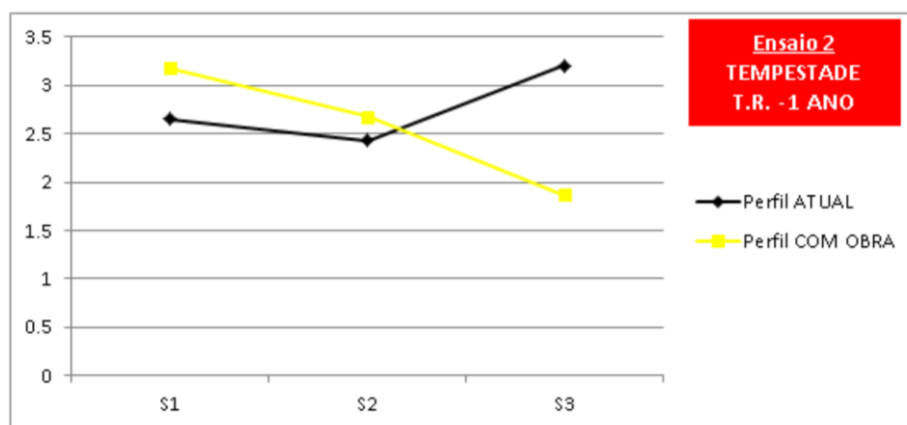


Figura 61 - Gráfico comparativo dos resultados TR1 entre perfil “ATUAL” e perfil “COM OBRA”. Medições S1, S2 e S3 X Altura de Onda (m).

Fonte: Autoria própria.

Durante o Ensaio 4B, de características de tempestade TR10 ( $H_s=3,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +1,7\text{m}$ ), a cota da crista da orla (+3,6m) foi galgada pelas ondas. A figura 62 a seguir apresenta o registro dessa condição do Ensaio 4B.



Figura 62 - Ensaio 4B (TR10). Perfil “COM OBRA”.

Fonte: Autoria própria.

Através da visualização comparativa entre a figura 56 (ensaio 4A – TR10 com perfil “ATUAL”) e a figura 62 (ensaio 4B – TR10 com perfil “COM OBRA”), observa-se uma similaridade de resultados. Assim como, ao comparar, os resultados das medições da altura da onda ( $H_{1/3}$ ) feitos através das sondas S1, S2 e S3, para cada um dos Ensaio 4A e 4B, apresentados abaixo através da Tabela 6. Em seguida, a figura 63 apresenta o gráfico comparando os resultados da Tabela 6, ilustrando a similaridade dos resultados. Tal similaridade constatada é, provavelmente, pelo fato de que a obra ensaiada não foi projetada para conter uma tempestade de TR10, que tem condições extremas de onda e nível do mar ( $H_s=3,8\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +1,7\text{m}$ ).

Tabela 6 - Medição da altura de onda  $H(1/3)$  - comparação entre os Ensaio 4A e 4B

| <b>Ensaio 4A (<math>H_s = 3,8\text{ m}</math> / <math>T_p = 11\text{ s}</math> / <math>NA = +1,70\text{ m}</math>)</b> |           |        |        |       | <b>Perfil ATUAL</b> |           |
|--|-----------|--------|--------|-------|---------------------|-----------|
| Sondas   | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)           | $T_p$ (s) |
| 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 (-3m)   | 702       | 3.94   | 1.9    | 9.17  | 2.96                | 12.01     |

| <b>Ensaio 2B (<math>H_s = 3,8\text{ m}</math> / <math>T_p = 11\text{ s}</math> / <math>NA = +1,70\text{ m}</math>)</b> |           |        |        |       | <b>Perfil COM OBRA</b> |           |
|--|-----------|--------|--------|-------|------------------------|-----------|
| Sondas   | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)              | $T_p$ (s) |
| S1 (-20m)  | 717       | 6.28   | 2.85   | 8.98  | 4.22                   | 10.57     |
| S2 (-10m)  | 767       | 5.63   | 1.95   | 8.4   | 3.57                   | 12.69     |
| S3 (-3m)   | 686       | 3.92   | 1.67   | 9.4   | 2.64                   | 14.2      |

Fonte: Autoria própria.

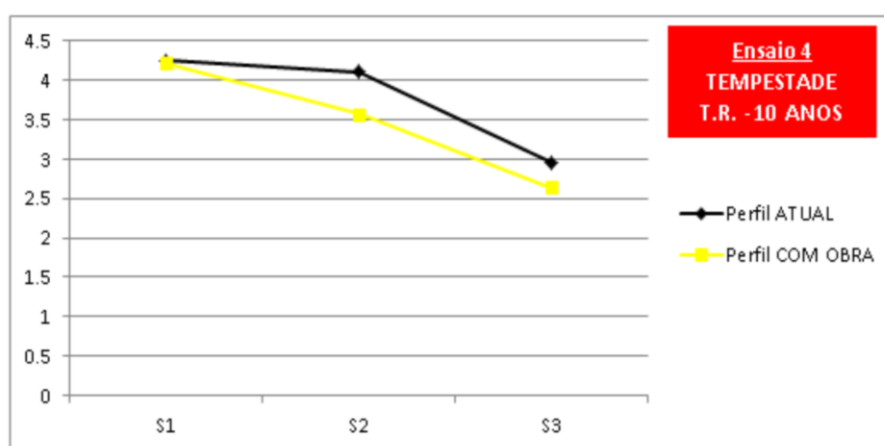


Figura 63 - Gráfico comparativo dos resultados TR10 entre perfil “ATUAL” e perfil “COM OBRA”. Medição S1, S2 e S3 X Altura Onda (m).

Fonte: Autoria própria.

Assim, nos ensaios 4A e 4B, de fato, foi constatado resultados similares quanto ao galgamento das ondas sobre a orla. Porém, quanto aos resultados observados em relação ao processo de erosão da praia, desencadeado pela



maré de ressaca TR10, foi constatado que houve relevante diferença entre os resultados topoaltimétricos medidos ao final dos ensaios com perfil “ATUAL” (4A) e perfil “COM OBRA” (4B). Na Figura 64 a seguir, os traçados 4A e 4B destacam essa diferença, onde o traço 4A evidencia que o perfil sofreu maior erosão que o ensaio similar realizado com obra (4B).

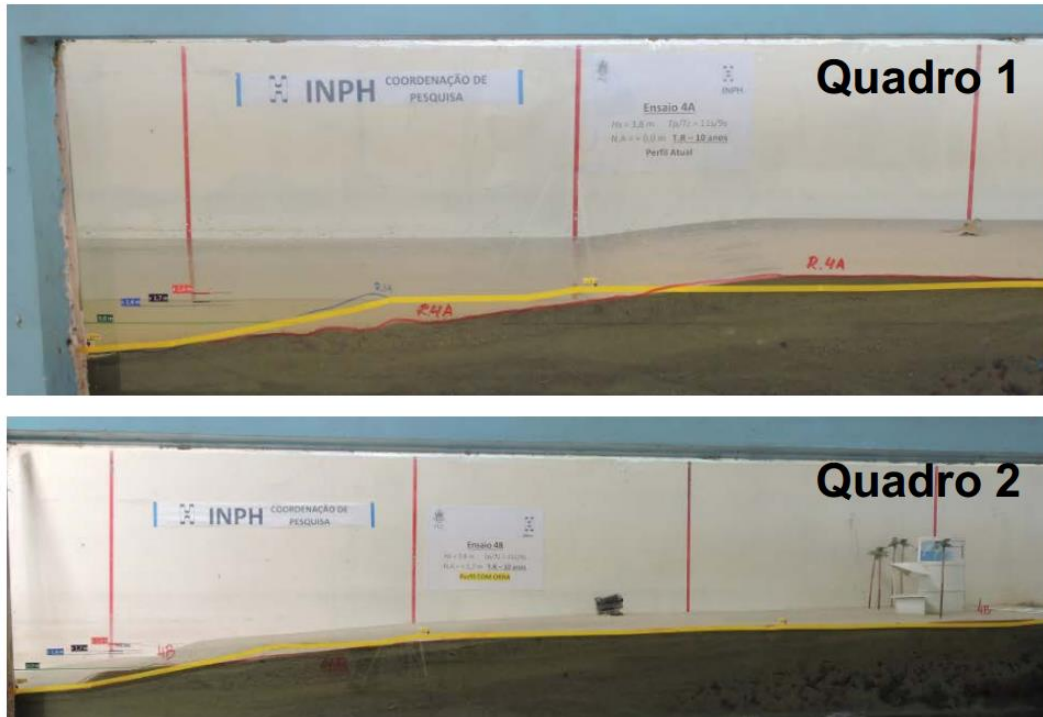


Figura 64 - Vista lateral do perfil de praia ao final dos ensaios com TR10. No Quadro 1- Ensaio 4A, e no Quadro 2, Ensaio 4B, destaque para areia deslocada em cada ensaio. Fonte: Autoria própria.

A figura 65 abaixo apresenta o croqui comparativo do levantamento de medição topoaltimétrico realizado após o final de cada um dos ensaios 4A e 4B.

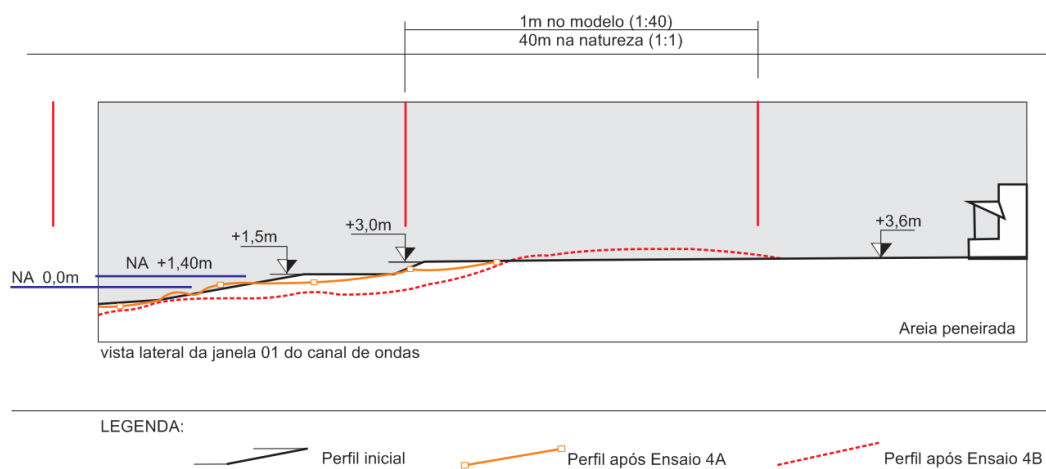


Figura 65 - Croqui dos levantamentos topo-altimétricos ao final dos ensaios 4A e 4B. Fonte: Autoria própria.

Durante o Ensaio 6B, que teve características de tempestade TR100 ( $H_s=4,4\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +2,4\text{m}$ ), a cota da crista da orla (+3,6m) foi ultrapassada pelas ondas. A figura 66 abaixo apresenta o registro do Ensaio 6B.



Figura 66 - Vista frontal do modelo (1:40) da orla no Ensaio 6B, perfil de praia “COM OBRA” e tempestade TR100 ( $H_s=4,4\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +2,4\text{m}$ )

Fonte: Autoria própria.

Nessa figura 66 acima é possível observar que há significativa similaridade quanto ao galgamento da crista do calçadão pelas ondas, tanto para os ensaios com perfil de praia “ATUAL” como para o perfil tipo “COM OBRA”, realizado nos ensaios com tempestades de TR10 e TR100.

Portanto, no sentido de avaliar um efetivo plano de mitigação dos impactos das marés de tempestade TR 100 sobre essa orla, foram realizados os ensaios do perfil de praia com “OBRA TR100”. Os ensaios para essa situação, com projeto de reengenharia da orla da praia do Leme, que foi planejada com obras para minimizar os impactos da maré de tempestade TR100, foram denominados de 7B (acomodação) e 8B (Tempestade TR100), e tiveram resultados satisfatórios quanto à mitigação dos impactos provenientes da maré de tempestade TR100.

A seguir, a figura 67 ilustra o resultado satisfatório obtido no Ensaio 8B, onde se observa que a cota da crista da orla estabelecida em +6,4m acima do nível do mar (NR 0,0m), não possibilita o galgamento pelas ondas do mar.

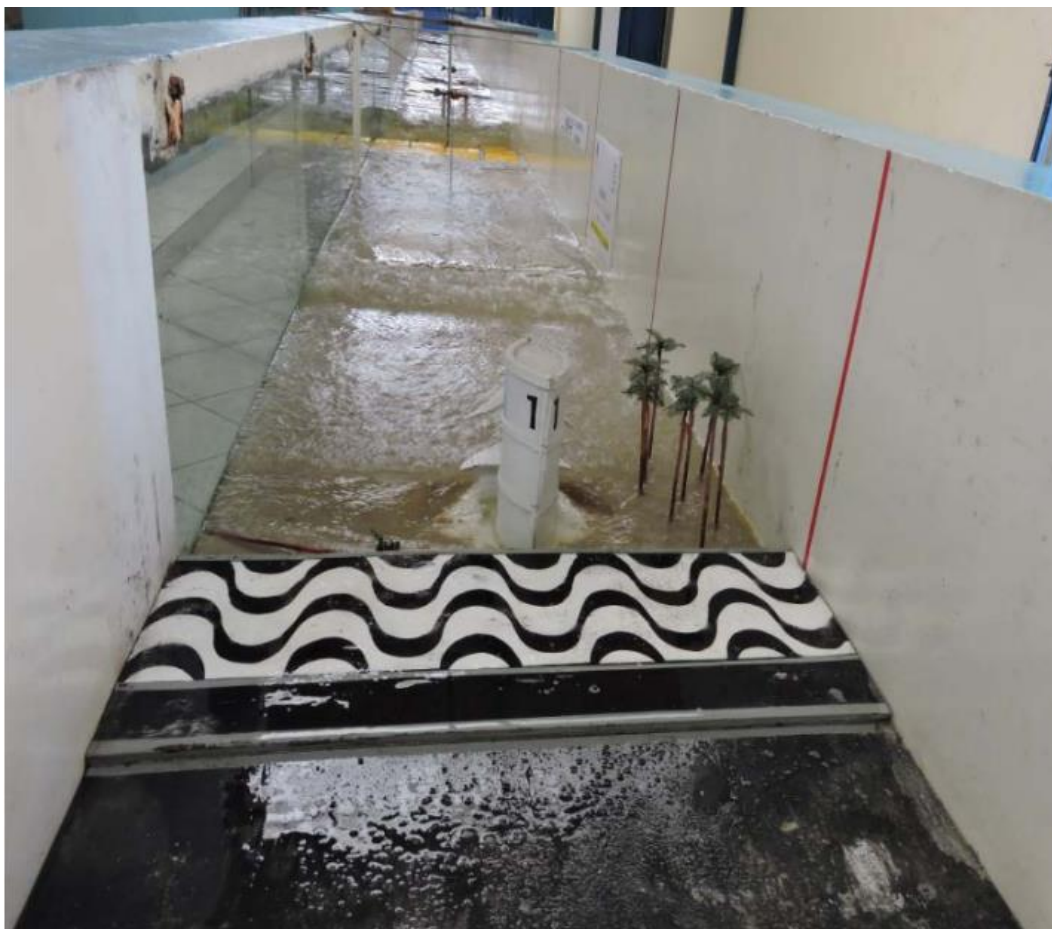


Figura 67 - Vista do modelo durante o Ensaio 8B. Em primeiro plano, observar que, apesar dos respingos sobre a orla, as ondas não superam a cota da crista da orla, estabelecida em +6,4 metros acima do nível do mar (NR 0,0m)

Fonte: Autoria própria.

A fim de comparar os resultados dos três ensaios realizados com maré de tempestade TR100 ( $H_s=4,4\text{m}$  /  $T_p=11\text{s}$  /  $NA= +2,4\text{m}$ ) estes foram agrupados conforme apresentado na Tabela 7 a seguir, e ilustrado através do gráfico apresentado na Figura 68. Destacando que o Ensaio 6A foi realizado com perfil “ATUAL”, o Ensaio 6B com perfil “COM OBRA”, e, o Ensaio 8B com perfil “OBRA TR100”.

Tabela 7 - Resultado da medição de  $H_s$  nos ensaios 6A, 6B; e 8B

| Ensaio 6A ( $H_s = 4,4 \text{ m} / T_p = 11 \text{ s} / NA = +2,40 \text{ m}$ ) |           |        |        |       | Perfil ATUAL (6A) |           |
|---|-----------|--------|--------|-------|-------------------|-----------|
| Sondas  | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)         | $T_p$ (s) |
| S1 (-20m)   | 698       | 6.84   | 3.15   | 9.23  | 4.76              | 10.59     |
| S2 (-10m)   | 702       | 6.09   | 2.77   | 9.18  | 4.7               | 12.12     |
| S3 (-3m)  | 681       | 4.13   | 2.09   | 9.45  | 3.17              | 12.02     |

| Ensaio 6B e 8B ( $H_s = 4,4 \text{ m} / T_p = 11 \text{ s} / NA = +2,40 \text{ m}$ ) |           |        |        |       | Perfil COM OBRA (6B) |           | OBRA TR100 (8B) |
|--|-----------|--------|--------|-------|----------------------|-----------|-----------------|
| Sondas   | No. Ondas | H max. | H med. | Tmed. | $H_s$ (m)            | $T_p$ (s) | $H_s$ (m)       |
| S1 (-20m)  | 739       | 6.71   | 3.15   | 8.71  | 4.81                 | 9.9       | 4.9             |
| S2 (-10m)  | 713       | 6.13   | 2.32   | 9.04  | 3.95                 | 11.31     | 4.44            |
| S3 (-3m)   | 623       | 4.58   | 2.02   | 10.35 | 3.18                 | 14.59     | 1,76            |

Fonte: Autoria própria.

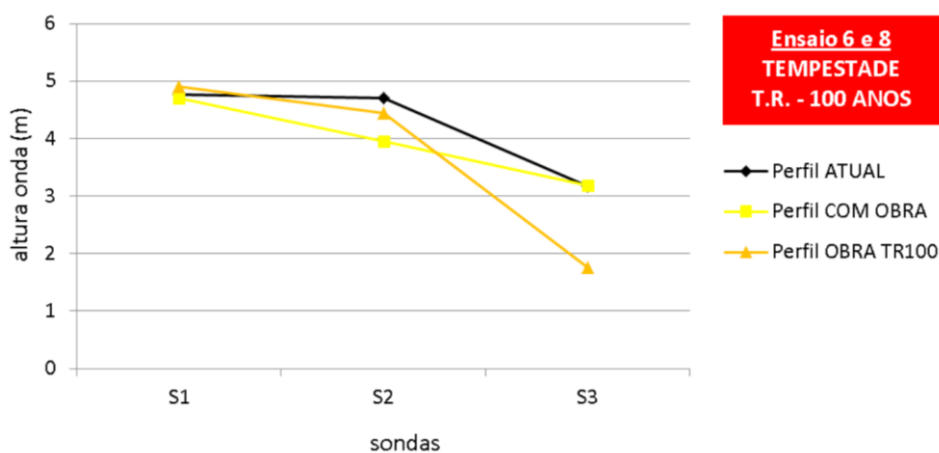


Figura 68 - Gráfico comparativo dos resultados de medição das sondas (S1, S2 e S3) para os ensaios 6A (perfil "ATUAL"), 6B (perfil "COM OBRA") e 8B (perfil "OBRA TR100"), conforme apresentado na Tabela 6.

Fonte: Autoria própria.

A figura 68 acima ilustra bem a redução na altura da onda medida pela sonda S3 no ensaio 8B, a qual foi posicionada após a passagem da onda sobre a obra projetada para suportar uma tempestade TR100. Assim, comparando os resultados obtidos pela sonda S3 nos ensaios 6A, 6B e 8B, os quais foram executados com as mesmas condições de tempestade TR100, se observa que temos uma redução em torno de 55% da altura de onda medida no ensaio 8B.

Ao relacionar os resultados das medições topoaltimétricas realizadas ao final de cada um dos ensaios 6A, 6B e 8B, é possível constatar que houve relevante diferença quanto ao processo de erosão da praia em função da ação da maré de tempestade TR100 sobre cada perfil tipo ensaiado. A figura 69 a seguir apresenta o croqui das medições topoaltimétrica realizadas ao final de cada um dos ensaios com cada perfil tipo ensaiado.

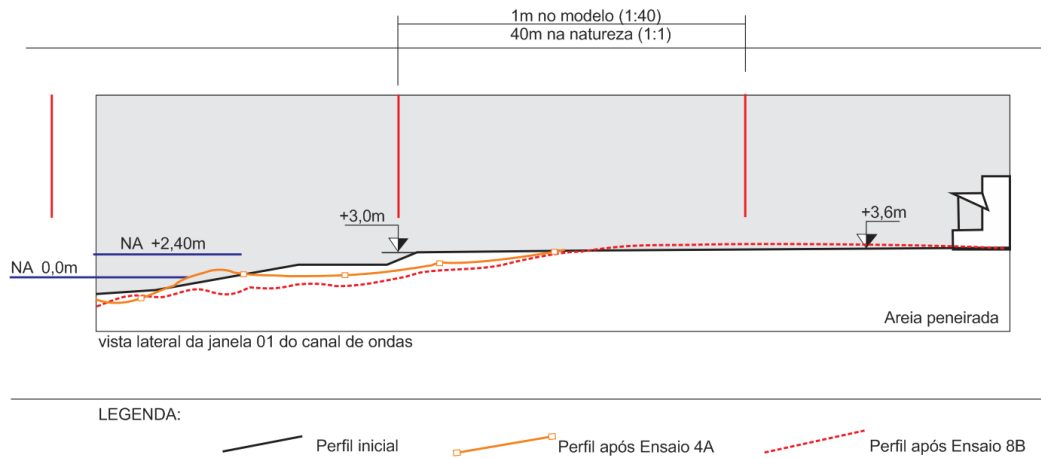


Figura 69 - Croqui dos levantamentos topo-altimétricos ao final dos ensaios 6A (perfil "ATUAL"), 6B (perfil "COM OBRA") e 8B (perfil "OBRA TR100").

Fonte: Autoria própria.

A seguir, a figura 70 apresenta a composição de fotos que ilustram a acomodação do perfil da praia do modelo (1:40) após o término dos ensaios com maré de tempestade TR100. O traçado mais grosso e retilíneo representa o perfil inicial, em quanto que o traçado mais fino e ondulado destaca a acomodação do perfil de praia ao final de cada ensaio, e referenciado como 6A, 6B e 8B.

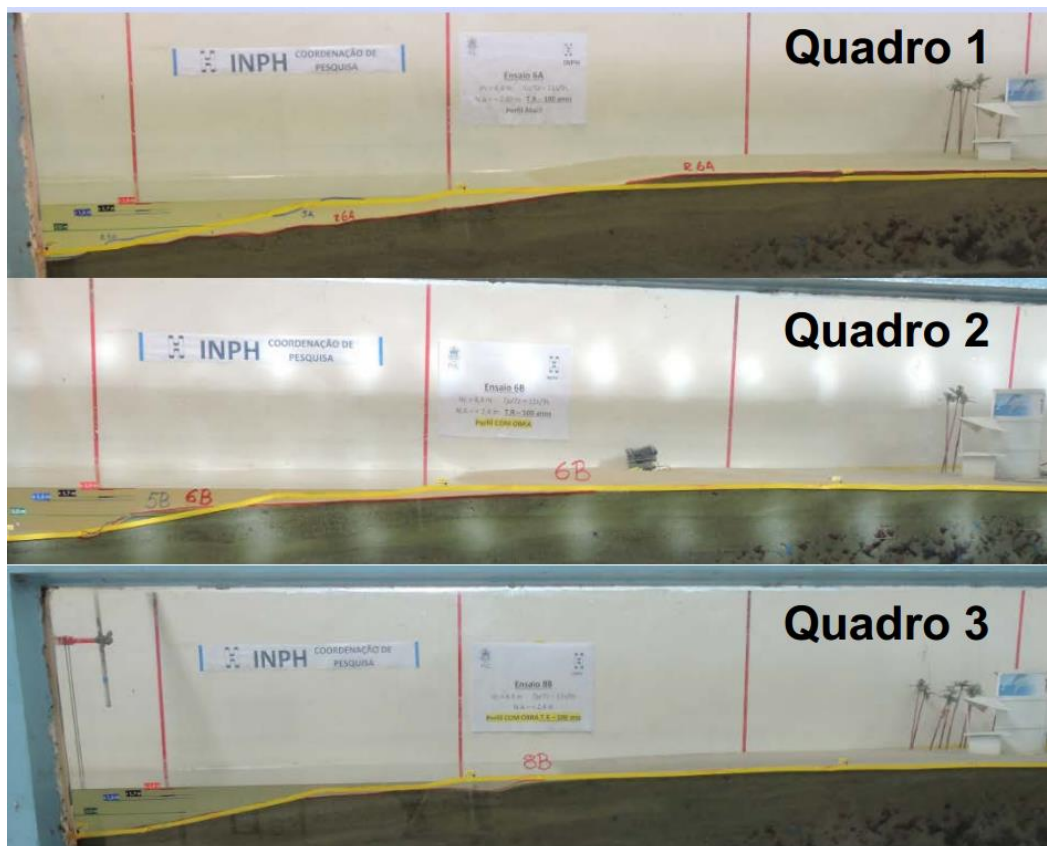


Figura 70 - Composição de fotos realizadas após o final dos ensaios, Quadro 1- ensaio 6A (SEM OBRA), no Quadro 2 - ensaio 6B (Com OBRA), e, Quadro 3 - ensaio 8B (OBRA TR100).

Fonte: Autoria própria.

Nessa composição de fotos (figura 70) é possível observar que a quantidade de areia deslocada ao final de cada ensaio, em referência ao perfil inicial, foi maior no ensaio 6A (Quadro 1). Sequencialmente, o volume de areia deslocada foi reduzido de forma gradativa ao final dos ensaios 6B e 8B, respectivamente, visto através do Quadro 2 e Quadro 3. Essa diferenciação é, provavelmente, induzida pela influência das obras do quebra-mar submerso, que reduzem a influência da onda no deslocamento de areia, e conseqüentemente minimizam o processo de erosão da praia.

As planilhas de resultados emitidas pelo sistema de aquisição de dados após cada ensaio são apresentadas na íntegra, e sem qualquer tipo de edição, estão anexadas no Apêndice 01.

### **5.1.1 Planejamento urbano costeiro**

Com o emprego das etapas de investigação e avaliação ambiental foi elaborado o planejamento urbano-costeiro da orla do bairro do Leme, que considerou o cenário de condições extremas de tempestade (TR100) e a possível elevação do nível médio do mar (NMM) em mais um metro, que seria referente a uma estimativa considerada nos estudos do IPCC (2014) para o pior cenário (RCP8.5) estimado para o ano de 2100.

Na concepção desse plano, a consideração da elevação NMM em + 1,0 metro sobre a preamar astronômica (+1,40m) foi determinante para o estabelecimento da cota de segurança para a crista da orla em 6,4 metros acima do nível do mar (NR 0,0m), ou seja, um acréscimo de +2,8 metros sobre a cota atual estabelecida em 3,6 metros acima do nível do mar (NR 0,0m).

### **5.1.2 Onda centenária**

Com base nos dados do clima de ondas disponíveis para Copacabana, na profundidade de 20m, a série de dados foi ajustada segundo a distribuição de Weibull, com  $k = 1.9$  (melhor ajuste). Através de um software elaborado em *MATLAB*, foram obtidos os resultados do valor da onda de projeto para os períodos de retorno de 10, 30, 50 e 100 anos, conforme apresentado a seguir, na Tabela 8.

Tabela 8 - Estatística da altura de ondas por período de retorno para a Praia do Leme.  
Profundidade de 20m

| INTERVALO DE MEDICAO: 6.0 HORAS |                 |  |  |  |
|---------------------------------|-----------------|--|--|--|
| ALTURA DA ONDA (m)              | PROB. ACUMULADA |  |  |  |
| .20                             | .00280          |  |  |  |
| .40                             | .04685          |  |  |  |
| .60                             | .12144          |  |  |  |
| .80                             | .18950          |  |  |  |
| 1.00                            | .27317          |  |  |  |
| 1.20                            | .40525          |  |  |  |
| 1.40                            | .55568          |  |  |  |
| 1.60                            | .70070          |  |  |  |
| 1.80                            | .81853          |  |  |  |
| 2.00                            | .89841          |  |  |  |
| 2.20                            | .94774          |  |  |  |
| 2.40                            | .97499          |  |  |  |
| 2.60                            | .98762          |  |  |  |
| 2.80                            | .99347          |  |  |  |
| 3.00                            | .99695          |  |  |  |
| 3.20                            | .99857          |  |  |  |
| 3.40                            | .99925          |  |  |  |
| 3.60                            | .99956          |  |  |  |
| 3.80                            | .99975          |  |  |  |
| 4.00                            | .99994          |  |  |  |

| ALTURA SIGNIFICATIVA (m) |         |         |         |          |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|
| PERIODO DE RETORNO       | 10 ANOS | 30 ANOS | 50 ANOS | 100 ANOS |
| WEIBULL (K=1.90)         | 3.94    | 4.16    | 4.26    | 4.39     |

Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Modelagem computacional

Com o objetivo de avaliar adequadamente o clima de ondas na região costeira da praia do Leme e em função da ausência de dados primários de ondas nessa região, são apresentados os resultados do estudo de modelagem computacional para propagação numérica dos dados simulados de ondas em águas profundas até águas intermediárias (-20 m) e rasas (-5 m), referente à região costeira da praia do Leme.

Na primeira etapa, os dados simulados na região oceânica, a propagação numérica gerou 16072 arquivos de ondas na profundidade de 20 metros. A seguir a figura 71 apresenta, em forma de rosa de ondas, o resultado para a distribuição direcional da ocorrência da altura significativa ( $H_s$ ) para a série histórica os 11 anos de dados simulados de ondas.

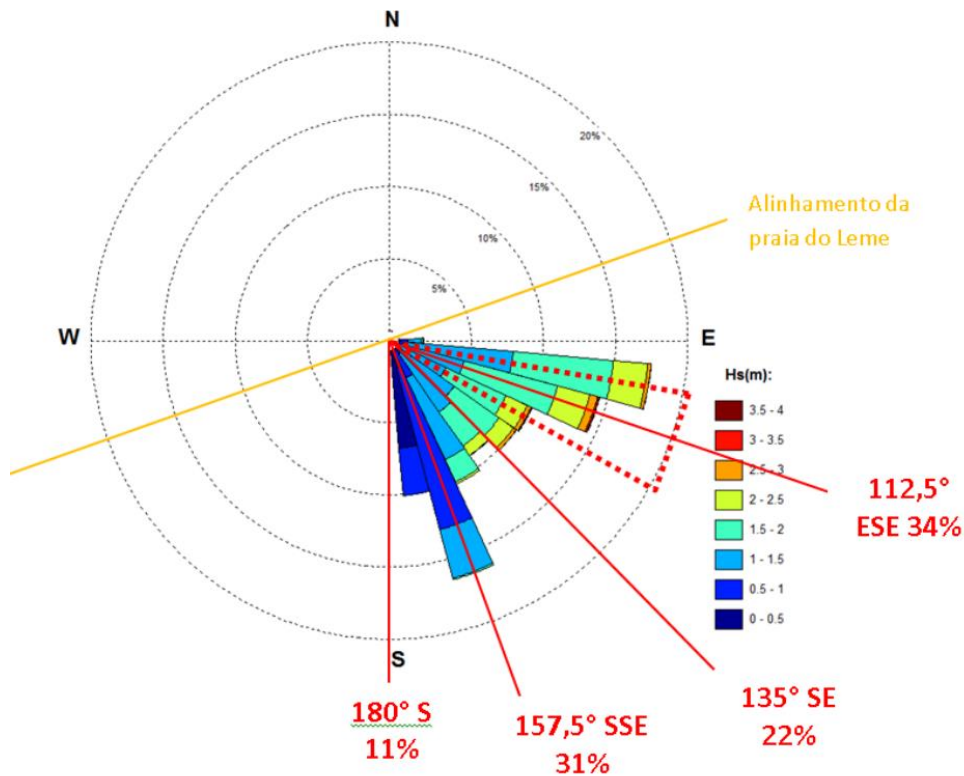


Figura 71 - Rosa de ondas para ocorrência da altura significativa ( $H_s$ ) em relação a direção de incidência. O percentual (%) de ocorrência destaca a direção de incidência das ondas.

Fonte: Autoria própria.

A seguir as Figuras 72 a 75 ilustram, para a região da praia do Leme e adjacência, os campos simulados da distribuição da energia das ondas geradas na modelagem de propagação da profundidade de 20m até o litoral.

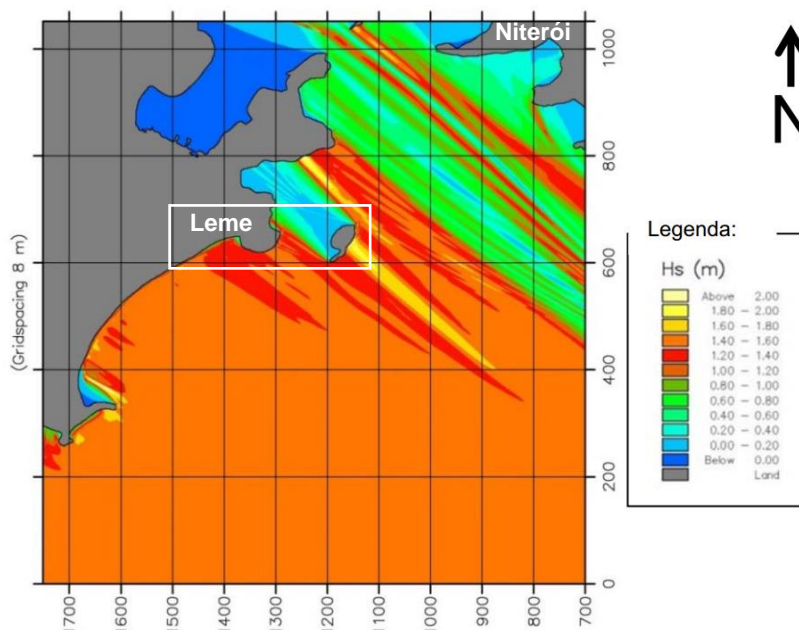


Figura 72 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Este-sudeste (ESE),  $H_s=1,5\text{m}$  e  $T_p=11\text{s}$ .

Fonte: Autoria própria através do software Mike21-DHI.



Essa simulação é apresentada de acordo com a direção média incidente de ondas com  $H_s=1,5\text{m}$  e  $T_p=11\text{s}$ .

Através dessas ilustrações (figuras 72 a 75) é possível perceber como as características desse litoral, em função do ângulo de incidência da onda, podem influenciar na distribuição da energia das ondas ao longo da costa.

A configuração topomorfológica do fundo do mar, com a presença de obstáculos, como bancadas (areia ou pedra), ilhas e pontões rochosos, focalizam ou dissipam a energia das ondas.

As manchas, em diferentes tonalidades, representam o comportamento da propagação da onda em função da altura significativa ( $H_s$ ). O quadro legenda ao lado de cada mapa apresenta a relação da coloração com a altura de onda. Observar que a tonalidade mais clara, no topo da escala da legenda, representa ondas com altura acima de 2,0 metros. Portanto, como visto através da figura 73 a seguir, observa-se que em determinadas áreas a altura da onda pode se elevar acima da altura de entrada no modelo, no caso programado em  $H_s=1,5\text{m}$ .

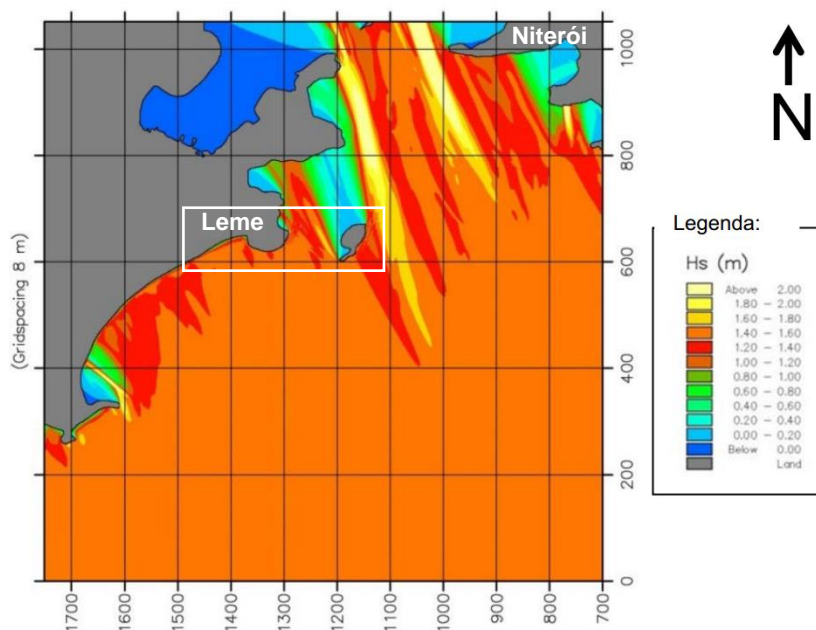


Figura 73 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sul-sudeste (SSE),  $H_s=1,5\text{m}$  e  $T_p=11\text{s}$ .

Fonte: Autoria própria através do software Mike21-DHI.

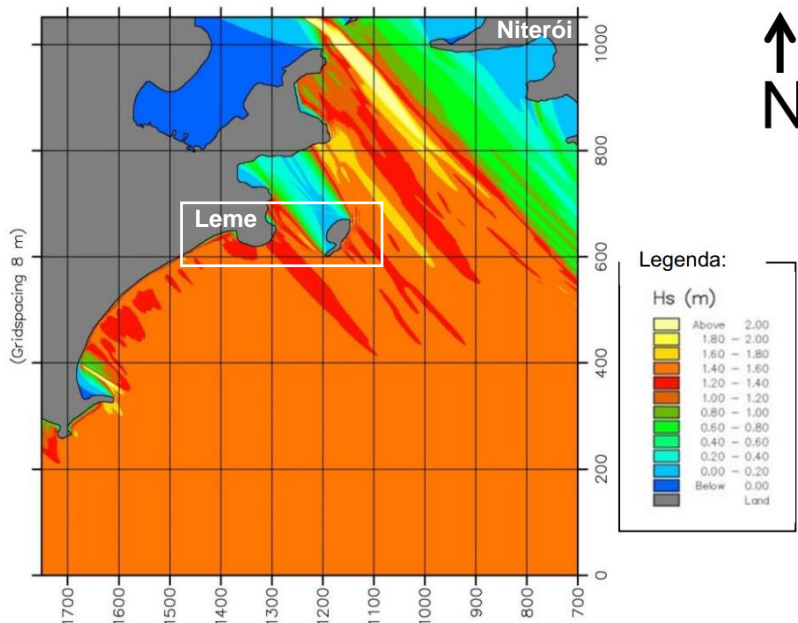


Figura 74 - Resultado do campo simulado de ondas na região costeira do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sudeste (SE),  $H_s=1,5m$  e  $T_p=11s$ .  
Fonte: Autoria própria.

Destaca-se a importância da modelagem de propagação de ondas para, por exemplo, avaliar o melhor sítio de extração da energia das ondas, ou, como para avaliar o risco de erosão em determinadas áreas durante a ocorrência de determinadas direções de ondas. Na comparação visual, entre a figura 74 acima e a figura 75 a seguir, observa-se que o litoral de Niterói pode ficar abrigado com direção de ondas de sudeste, e exposto para ondas de sul. E, o litoral do Leme permanece exposto para todas situações de direções ensaiadas.

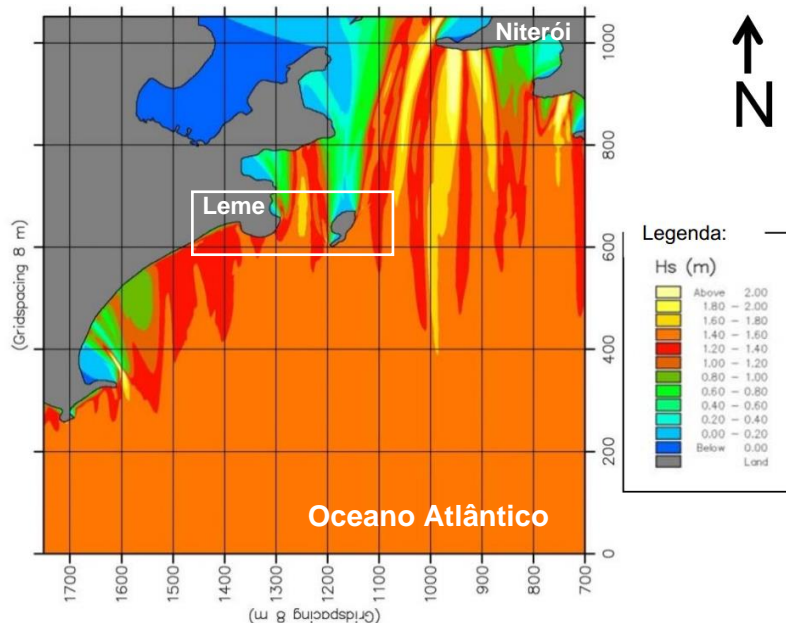


Figura 75 - Resultado do campo simulado de ondas na região do Leme. O retângulo destaca o bairro. Direção média de Sul (S),  $H_s=1,5m$  e  $T_p=11s$ .  
Fonte: Autoria própria.

Em continuidade na segunda etapa da modelagem, para diminuir o esforço computacional, os 16072 arquivos de dados gerados na profundidade de -20 metros foram agrupados estatisticamente por intervalos de direção média de ondas por intervalo de altura significativa ( $H_s$ ) e intervalo de período de pico ( $T_p$ ). Assim, foram geradas 184 condições de ondas usadas na propagação numérica para simulação do clima de ondas na profundidade de -5 metros. Abaixo a Tabela 9 apresenta os respectivos percentuais de ocorrência para cada intervalo selecionado para a direção média de incidência.

Tabela 9 - Percentual de ocorrência por direção da onda incidente para o prognóstico anual do clima de ondas para a praia do Leme

| Direção média             | % de Ocorrência | Dias/ano   |
|---------------------------|-----------------|------------|
| Este-sudeste (112,5° ESE) | 34              | 124        |
| Sul-sudeste (157,5° SSE)  | 31              | 113        |
| Sudeste (135° SE)         | 22              | 80         |
| Sul (180° S)              | 11              | 40         |
| Este (90° E)              | 2               | 7          |
| <b>Total</b>              | <b>100</b>      | <b>365</b> |

Fonte: Autoria própria.

### 5.2.1

#### Potencial de aproveitamento de energia de ondas

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica, foi considerado 01 equipamento tecnológico com quatro (04) metros de captação de frente de onda, e uma taxa de eficiência de conversão elétrica de 20% de aproveitamento da energia disponível nas ondas incidentes na área de estudo. As estimativas do potencial de conversão da energia das ondas em energia elétrica são apresentadas abaixo na Tabela 10. Os resultados de potencial elétrico gerado são apresentados em MegaWatts-hora (MWh) e classificados por ocorrência anual (a) da direção de onda incidente. O potencial total de geração de energia elétrica, estimado em 6.3 MWh por ano, é referente ao somatório do potencial gerado por cada direção de onda incidente que podem ocorrer durante o decorrer de um ano na região da praia do Leme.

Tabela 10 - Resumo da estimativa do potencial anual de geração de energia elétrica

|   |                      |
|---|----------------------|
| <b>Direção ESE</b> (Este-Sudeste) 35% de ocorrência<br>Total dias/ano = 124 | <b>0.6 MWh/a ESE</b> |
| <b>Direção SSE</b> (Sul-sudeste) 32% de ocorrência<br>Total dias/ano = 114  | <b>3.2 MWh/a SSE</b> |
| <b>Direção SE</b> (Sudeste) 22% de ocorrência<br>Total dias/ano = 79        | <b>1.7 MWh/a SE</b>  |
| <b>Direção S</b> (Sul) 11% de ocorrência<br>Total dias/ano = 41             | <b>0.8 MWh/a S</b>   |
| <b>Total =</b>  | <b>6.3 MWh/a</b>     |

Fonte: Autoria própria.

Para o efetivo aproveitamento dessa energia na rede pública de abastecimento elétrico do bairro, seria necessário que houvesse a transferência dessa energia para a subestação da companhia de abastecimento elétrico, localizada na região central do bairro de Copacabana, cito à Rua Figueredo Magalhães. Questões de comercialização desse potencial são ainda assuntos que devem ser pauta de debates futuros. A seguir a figura 76 apresenta os resultados da tabela 10 em forma de gráfico.

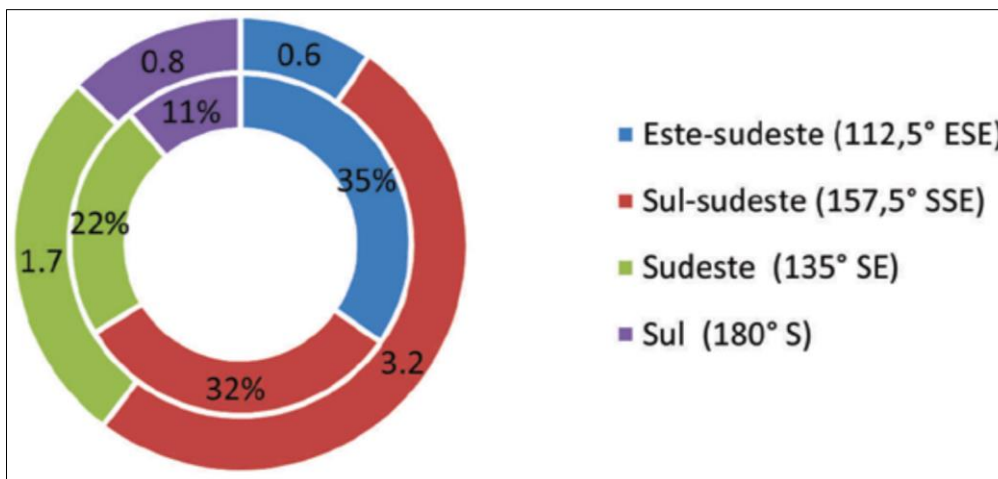


Figura 76 - Gráfico da estimativa do potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano) em relação ao percentual da direção de ondas incidentes

Fonte: Autoria própria.

Esse gráfico (figura 76) ilustra que, para algumas direções incidentes de onda (Ex: Este-sudeste), apesar de apresentarem alto percentual de ocorrência possuem baixo potencial de geração elétrica. Isto se dá principalmente devido a menor altura das ondas incidentes para essa ocorrência de direção.

A Tabela 11 seguinte apresenta a sequência final de cálculos realizados para chegar à estimativa do potencial anual gerado.

Tabela 11 - Geração anual de eletricidade por direção de onda incidente

| <b>Direção ESE</b> |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i>         | <i>Pd</i>  | <i>Pa</i> |
|--------------------|------|-----------|-----------|----------|------------|---------------------|------------|-----------|
| dias/ano           | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/dia)           | (kWh/ano)  |           |
| 37                 | 0.63 | 5         | 0.97      | 201.3    | 161        | 3864.7              | 142994.9   |           |
| 85                 | 0.78 | 7         | 2.09      | 288      | 230.4      | 5529.2              | 469983.5   |           |
| 2                  | 1.06 | 9         | 4.96      | 495.5    | 396.4      | 9513.7              | 14270.6    |           |
| 124 dias           |      |           |           |          |            | kWh/ano =           | 627249     |           |
|                    |      |           |           |          |            | <b>MWh/ano =</b>    | <b>0.6</b> |           |
| <b>Direção SSE</b> |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i>         | <i>Pd</i>  | <i>Pa</i> |
| dias/ano           | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/dia)           | (kWh/ano)  |           |
| 0.5                | 1.3  | 5         | 4.14      | 857.1    | 685.7      | 16456               | 8228       |           |
| 43.9               | 1.52 | 7         | 7.92      | 1093.6   | 874.9      | 20997.2             | 921777.6   |           |
| 60                 | 1.88 | 9         | 15.59     | 1558.7   | 1246.9     | 29926.5             | 1795588.3  |           |
| 9.3                | 2.32 | 11        | 29.01     | 2436.9   | 1949.5     | 46789.2             | 435139.2   |           |
| 0.4                | 2.78 | 13        | 49.23     | 3052.25  | 2441.8     | 58603.3             | 23441.3    |           |
| 114 dias           |      |           |           |          |            | kWh/ano =           | 3184174    |           |
|                    |      |           |           |          |            | <b>MWh/ano =</b>    | <b>3.2</b> |           |
| <b>Direção SE</b>  |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i>         | <i>Pd</i>  | <i>Pa</i> |
| dias/ano           | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | <i>Pd</i> (kWh/dia) | (kWh/ano)  |           |
| 1.2                | 1.36 | 5         | 4.53      | 938      | 750.4      | 18010.1             | 21612.1    |           |
| 59.9               | 1.46 | 7         | 7.31      | 1009     | 807.2      | 19372.3             | 1160398    |           |
| 17.4               | 1.77 | 9         | 13.82     | 1381.6   | 1105.3     | 26526.9             | 461567.9   |           |
| 0.6                | 2.24 | 11        | 27.04     | 2271.8   | 1817.4     | 43618               | 26170.8    |           |
| 79 dias            |      |           |           |          |            | kWh/ano =           | 1669749    |           |
|                    |      |           |           |          |            | <b>MWh/ano =</b>    | <b>1.7</b> |           |
| <b>Direção S</b>   |      | <i>Hs</i> | <i>Tp</i> | <i>P</i> | <i>Ptb</i> | <i>Ptec</i>         | <i>Pd</i>  | <i>Pa</i> |
| dias/ano           | (m)  | (s)       | (kW/h)    | (kWh/m)  | (kWh)      | (kWh/dia)           | (kWh/ano)  |           |
| 0.3                | 0.8  | 5         | 1.57      | 324.6    | 259.7      | 6231.9              | 1869.6     |           |
| 11                 | 1.23 | 7         | 5.19      | 716.1    | 572.9      | 13749.4             | 147118.9   |           |
| 20.3               | 1.44 | 9         | 9.14      | 914.5    | 731.6      | 17557.6             | 356419     |           |
| 9.1                | 1.75 | 11        | 16.51     | 1386.6   | 1109.3     | 26622.3             | 242262.8   |           |
| 0.9                | 2.12 | 13        | 28.63     | 1775     | 1420       | 34080.4             | 30672.3    |           |
| 41.6 dias          |      |           |           |          |            | kWh/ano =           | 776473     |           |
|                    |      |           |           |          |            | <b>MWh/ano =</b>    | <b>0.8</b> |           |

Fonte: Autoria própria.

Legenda:

P- potencial energético; Ptb- Potencial bruto; Ptec- Potencial técnico; Pd- Potencial diário; Pa- Potencial anual.

## 6 Conclusões e sugestões para futuros estudos

### 6.1 Conclusões

Os resultados obtidos com o desenvolvimento desse trabalho possibilitaram concluir que é possível para a engenharia urbana e ambiental mitigar a vulnerabilidade da orla estudada à força do mar. Os objetivos definidos originalmente foram plenamente alcançados a partir do estudo para o aproveitamento da energia oceânica para uso da cidade em uma solução sistêmica para a área costeira sob análise.

Com a avaliação do potencial energético das ondas no litoral da cidade do Rio de Janeiro concluiu-se que essa variável ambiental apresenta implicações significativas no planejamento sustentável de cidades costeiras. A primeira implicação observada está relacionada ao planejamento da proteção costeira das cidades quanto ao avanço do mar, pois a partir da avaliação desse potencial determina-se a cota de segurança da orla em relação ao nível zero do mar (NR 0,0m). A investigação sobre o Bairro do Leme indicou um potencial avanço do mar sobre a orla em até 180m, para tempestades extremas que possam ocorrer nos próximos 100 anos.

A segunda implicação observada está relacionada ao aproveitamento desse potencial como fonte renovável no planejamento energético de cidades costeiras. No caso estudado, o valor encontrado a partir das modelagens física e computacional foi que através da instalação de um equipamento é possível gerar cerca de 6,3MWh anualmente.

A partir do diagnóstico de vulnerabilidade dessa orla ao risco de avanço do mar, constatado através dos ensaios de modelagem física, foi elaborado o planejamento urbano da orla para suportar tempestades com período de retorno de até cem anos (TR100). A principal característica desse plano foi o estabelecimento da cota de segurança da orla em + 6,4 metros de altura acima do nível do mar (N.R 0,0m). E, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de modelagem física, com a atual cota de segurança da orla da praia do Leme estabelecida em +3,60 metros acima do nível do mar (N.R = 0,0m), concluiu-se que a vulnerabilidade ao risco das ondas ultrapassarem a crista do calçadão ocorre a partir de tempestades com TR10 anos (N.A= 1,7m /Hs= 3,8m /Tp= 11s).

As características ensaiadas para as ondas foram de altura significativa (Hs) com 3,80 metros e período de pico (Tp) com 11 segundos, e, nível do mar com +1,70 metros. Para as condições de tempestade com TR1 ano (N.A= 1,4m / Hs = 2,8m / Tp = 11s), as ondas superam a cota da crista da berma de praia, mas não alcançam o calçadão. Porém, para as condições de tempestade TR100 (N.A= 2,4m / Hs = 4,4m / Tp = 11s), os sucessivos galgamentos das ondas sobre a orla podem desencadear danos significativos aos equipamentos públicos.

Fundamentado nos resultados, obtidos através das sondas de medição da altura da onda, conclui-se que a proposta do quebra-mar submerso de fato controla a livre propagação das ondas do mar, e assim reduz os impactos erosivos sobre a praia do Leme. Durante os ensaios representando os horários de baixa-mar (N.A = 0,0m) houve a redução de até 68% da altura significativa (Hs) das ondas. Durante os ensaios representando os horários de preamar (N.A = +1,40m) houve a redução de até 31% da altura significativa (Hs) das ondas.

Nos ensaios realizados, para avaliar o aproveitamento das ondas costeiras como fonte de conversão em energia elétrica, com ambos os modelos de tecnologias testadas foram obtidos resultados satisfatórios. Através de observações visuais, o modelo da “Placa Oscilante”, apresentou movimento contínuo para frente e atrás com a passagem das ondas. Enquanto que o movimento ascendente e decrescente do “Flutuador”, medido com um potenciômetro, apresentou resultado compatível com o da altura da onda medida. Fundamentado nesses resultados, concluiu-se que investir em pesquisa para o desenvolvimento de uma tecnologia de aproveitamento da energia das ondas é ainda necessário para consolidar um modelo comercialmente viável.

Considerando a possibilidade de extração da energia das ondas em locais bem próximos da orla do bairro do Leme, e, que esta energia está disponível em uma média mensal de 0,5 MWh por equipamento instalado, e, o consumo médio mensal de eletricidade do bairro é 3,0 MWh. Conclui-se que a instalação de uma planta tecnológica com 10 equipamentos seria suficiente para gerar a sustentabilidade no abastecimento de energia elétrica dessa célula urbana.

A partir do prognóstico estatístico elaborado para o clima de ondas local, e, considerando uma tecnologia de conversão da energia das ondas do mar que tem 4 metros de largura para captação da frente de onda, e 20% de eficiência de aproveitamento da energia das ondas na conversão em energia elétrica foi estimada a produção de 6,3 MWh/ano. Conclui-se assim que esse potencial é significativo como fonte alternativa na geração de energia elétrica para o abastecimento urbano.

## 6.2 Sugestões para futuros estudos

Os modelos construídos ao longo da pesquisa e os cálculos apresentados nesta dissertação possibilitaram a demonstração da viabilidade de obras civis multifuncionais destinadas à proteção costeira e à conversão da energia de ondas do mar em energia elétrica para o abastecimento de populações litorâneas.

As propostas de solução para aumentar a resiliência da costa frente à energia de ondas foram experimentadas em modelo físico dentro de um canal de ondas. A simulação da acomodação do perfil da praia do Leme foi avaliada em três situações (sem obra, com obra e com obra TR100), e os respectivos resultados registrados a partir de observações e medições diretas. A fim de validar os dados apresentados neste trabalho, como os deslocamentos de areia de praia ao final de cada ensaio, pesquisas futuras poderão compará-los com resultados obtidos em simulações computacionais, e validar assim a proposta de engenharia submersa como solução para proteção costeira.

Investigações sobre o potencial energético de ondas do mar em outras regiões costeiras são exemplos de estudos futuros capazes de contribuir com os objetivos desta pesquisa, pois critérios de viabilidade para exploração, transmissão e venda de energia elétrica gerada a partir dessa fonte de energia carecem de dados e informações. Um mapeamento de possibilidades de extração de energia de ondas do mar referente à microrregião do Rio de Janeiro, ou mesmo de todo o litoral fluminense, seria ferramenta útil para avaliações sobre o melhor sítio de exploração energética.



## Referências bibliográficas

ALENCAR, J. C. M. Datum altimétrico brasileiro – Separata de **Cadernos de Geociências nº 5**. Departamento de Geodésia – DEGED - DRG/CE – IBGE. Rio de Janeiro, 1990.

Agência Nacional de Águas – ANA. **Atlas Brasil: Abastecimento urbano de água – Panorama Nacional**. Engecorps / Cobrape. Brasília, 2010.

CAMÕES, E. C. **Rio Antigo por Camões**. Art Collections Studio Editora. Rio de Janeiro, 1994

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, Fortaleza, Ceará, 2008.

CARVALHO, J. T. **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, tese. São José dos Campos, 2010.

CAO – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil. **Carta aberta aos candidatos a prefeitos e vereadores: Qual a cidade que precisamos? Um pacto pela qualidade das cidades**. Brasília, 5 Set. 2016. Disponível em: <[http://www.caubr.gov.br/wp-content/uploads/2016/08/carta\\_prefeitos.png](http://www.caubr.gov.br/wp-content/uploads/2016/08/carta_prefeitos.png)> Acesso em: 8 set. 2016.

CICIN-SAIN, B.; KNECHT, R.W. 1998. **Integrated coastal and ocean management: Concepts and practices**. Washington: Island Press, 1998. 517 p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagens de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Blücher, 1999. 236 p.

CORTÉS, Luísa. Laudo preliminar confirma que projeto da Ciclovia Tim Maia, no Rio de Janeiro, não previu impacto das ondas no tabuleiro. **Revista Infraestrutura Urbana: projetos, custos e construção**. Portal PINIweb, São Paulo, mai. 2016. Transporte. Disponível em: <<http://www.brazilnet.com.br/contexts/brasilrevistas.htm>> Acesso: 8 set. 2016.

DOIG, Alison; WARE, Joe. Christian Aid. **Act Now or Pay Later: Protecting a billion people in climate-threatened coastal cities**. May, 2016. <<http://www.christianaid.org.uk/Images/act-now-pay-later-climate-report-may-2016.pdf>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética; **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Ministério de Minas e Energia – MME. Rio de Janeiro, 2013.

FLEMING, F. P. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2012.

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN. BHMN, 2ed. Niterói, 2009.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M., **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. IBGE/Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 2011, 176p.

\_\_\_\_\_. **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil**. Coleção Ibgiana. Rio de Janeiro: IBGE, 2015, 167p.

INPH. **Estudos de modelagem computacional para avaliação da instalação do terminal marítimo da Escola Naval**, Rio de Janeiro. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH, Relatório 031/2014. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **Campanha de medição de ondas na praia de Ipanema**, Rio de Janeiro. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH, Relatório 035/1999. 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** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer]. Geneva, Switzerland, 151pp.

KAMPION, D. **The Book of Waves: form and beauty on the ocean**. Roberts Rinehart Publisher, 1997.

KHAN, J. e BHUYAN, G. **Ocean Energy: Global Technology Development Status**. In: Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES, 2009 p.83.

LUZ, R. T. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. Universidade Federal do Pará, tese. Curitiba, 2008. (207 f.: il.; 30 cm).

MACHADO, G. A. **Recifes artificiais de praia como dissipador da energia de ondas**. Universidade Federal do Ceará, tese. Ceará, Brasil -1999.

MESQUITA, A. R. **Nível Relativo do Mar (O Enigma) e os Terrenos de Marinha**. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo – IOUSP. Seminário dos usuários das previsões numéricas de mudanças climáticas e seus impactos regionais. São José dos Campos, 2004.

MORAES, Antonio Carlos Robert. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do litoral brasileiro**. São Paulo: Annablume, 2007.

NORDSTROM, K. F. **Recuperação de praias e dunas**. São Paulo: Oficina de Textos. 2010.

PAULA, R.L.M.; TAKANOHASHI, R.; GOMES, L.; **Monitoramento comparativo da morfodinâmica da praia de Copacabana - Leme nos anos de 1976, 1999, 2000, 2004 e 2007**. III Congresso Brasileiro Oceanografia, Fortaleza-CE 2008.

SANTOS, D.H.C; PASSAVANTE, J. Z .O. **Recifes artificiais marinhos, modelos e utilizações no Brasil e no mundo**. Artigo de revisão. Boletim técnico- científico do CEPENE, Tamandaré, v.15, n.1, p. 113 - 124, 2007.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016, 452p.

TRUJILLO, A. P. e THURMAN, H. V., 2011. **Essentials of Oceanography**. 10. USA: Prentice Hall. 551 pp.

UN-Habitat. (2016). **Planning Sustainable Cities: Global Report on Human Settlements 2016 (World Cities Report 2016)**. Research Report. Extraído de: <<http://wcr.unhabitat.org/>>. Acesso em 30 ago 2016.

UNITED NATIONS. **Climate Change 2014**: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. IPCC WGII AR5 - Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC / United Nations Environment Program - UNEP/OMM/ONU. Yokohama, 2014.

## Apêndice 01

### Planilhas de resultados da modelagem física

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1313573/CA

| ENSAIO 2A          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| NATUREZA(m, T e s) |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
| Canal              | Ondas | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 20     | 30     | H med | Tz    | RMS   | H(1/3) | T(1/3) |
| Desl.c. Real       | 547   | 68,00  | 67,86  | 67,77  | 67,75  | 67,74  | 67,74  | 67,73  | 67,72  | 67,70  | 67,69  | 67,66  | 67,62  | 31,69 | 11,77 | 11,08 | 48,98  | 12,05  |
| Referência         | 548   | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,67  | 70,66  | 70,65  | 70,63  | 33,06 | 11,76 | 11,50 | 50,81  | 12,04  |
| s1 bat             | 761   | 3,89   | 3,83   | 3,82   | 3,81   | 3,81   | 3,80   | 3,80   | 3,79   | 3,79   | 3,79   | 3,75   | 3,71   | 1,72  | 8,46  | 0,60  | 2,65   | 10,47  |
| s2 aobra           | 686   | 4,12   | 4,02   | 4,00   | 3,96   | 3,96   | 3,95   | 3,95   | 3,94   | 3,93   | 3,93   | 3,90   | 3,80   | 1,46  | 9,39  | 0,48  | 2,43   | 12,08  |
| s3 pobra           | 721   | 4,24   | 4,22   | 4,19   | 4,17   | 4,14   | 4,11   | 4,10   | 4,10   | 4,08   | 4,04   | 3,76   | 3,65   | 1,97  | 8,93  | 0,64  | 3,20   | 11,20  |
| ENSAIO 4A          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
| NATUREZA(m, T e s) |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
| Canal              | Ondas | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 20     | 30     | H med | Tz    | RMS   | H(1/3) | T(1/3) |
| Desl.c. Real       | 547   | 93,59  | 93,20  | 92,98  | 92,97  | 92,88  | 92,63  | 92,56  | 92,50  | 92,49  | 92,29  | 91,90  | 91,85  | 43,05 | 11,77 | 15,04 | 66,54  | 12,05  |
| Referência         | 548   | 95,98  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,97  | 95,95  | 95,92  | 44,90 | 11,76 | 15,62 | 69,00  | 12,04  |
| s1 bat             | 714   | 6,26   | 6,16   | 6,07   | 6,07   | 6,06   | 6,01   | 6,00   | 6,00   | 5,99   | 5,99   | 5,93   | 5,87   | 2,82  | 9,02  | 0,99  | 4,25   | 10,84  |
| s2 aobra           | 750   | 5,84   | 5,80   | 5,79   | 5,78   | 5,76   | 5,76   | 5,75   | 5,74   | 5,74   | 5,72   | 5,68   | 5,66   | 2,37  | 8,59  | 0,83  | 4,11   | 12,27  |
| s3 pobra           | 702   | 3,94   | 3,91   | 3,89   | 3,86   | 3,82   | 3,75   | 3,75   | 3,74   | 3,73   | 3,73   | 3,63   | 3,49   | 1,90  | 9,17  | 0,63  | 2,96   | 12,01  |
| ENSAIO 6A          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
| NATUREZA(m, T e s) |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |        |        |
| Canal              | Ondas | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 20     | 30     | H med | Tz    | RMS   | H(1/3) | T(1/3) |
| Desl.c. Real       | 547   | 105,11 | 105,05 | 105,01 | 104,98 | 104,81 | 104,75 | 104,63 | 104,46 | 104,34 | 104,14 | 103,41 | 103,36 | 48,49 | 11,77 | 16,95 | 75,00  | 12,06  |
| Referência         | 548   | 108,00 | 108,00 | 108,00 | 108,00 | 108,00 | 108,00 | 108,00 | 107,99 | 107,99 | 107,99 | 107,97 | 107,94 | 50,53 | 11,76 | 17,58 | 77,65  | 12,04  |
| s1 bat             | 698   | 6,84   | 6,83   | 6,83   | 6,81   | 6,72   | 6,69   | 6,68   | 6,67   | 6,67   | 6,66   | 6,59   | 6,51   | 3,15  | 9,23  | 1,11  | 4,76   | 10,59  |
| s2 aobra           | 702   | 6,09   | 6,07   | 6,06   | 6,06   | 6,05   | 6,04   | 6,04   | 6,02   | 6,02   | 6,02   | 5,96   | 5,92   | 2,77  | 9,18  | 0,95  | 4,70   | 12,12  |
| s3 pobra           | 681   | 4,13   | 4,06   | 4,02   | 3,95   | 3,94   | 3,93   | 3,92   | 3,90   | 3,88   | 3,87   | 3,73   | 3,64   | 2,09  | 9,45  | 0,70  | 3,17   | 12,02  |

