

SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA: RAMPA PARA MITIGAÇÃO DE
EROSÃO COSTEIRA NA ENSEADA DO FUNDÃO

Cintya Kazue Sakamoto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Marcos Nicolas Gallo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA: RAMPA PARA MITIGAÇÃO DE
EROSÃO COSTEIRA NA ENSEADA DO FUNDÃO

Cintya Kazue Sakamoto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Prof. Marcos Nicolas Gallo

Aprovada por: Prof. Marcos Nicolás Gallo
Prof.^a Susana Beatriz Vinzón
Prof.^a Josefa Varela Guerra

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2024

Sakamoto, Cintya Kazue

Solução Baseada na Natureza: Rampa para Mitigação de Erosão Costeira na Enseada do Fundão / Cintya Kazue Sakamoto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcos Nicolás Gallo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 74-79.

1. Erosão costeira. 2. Perfil de praia. 3. Linha de costa. 4. Soluções Baseadas na Natureza. I. Gallo, Marcos Nicolás. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Marcos Gallo, por todos os ensinamentos, atenção e dedicação, além das inúmeras revisões e orientações. À professora Suzana, pela ideia inicial do tema, e por todo o apoio e contribuições ao longo da pesquisa. Aos professores do Programa de Engenharia Oceânica (PEnO) por todos os ensinamentos, disponibilidade e contribuições. À Marinha do Brasil pela oportunidade de cursar o mestrado. Aos amigos do Laboratório de Dinâmica dos Sedimentos Coesivos (LDSC), por terem me acolhido nessa “família”, pela companhia do dia a dia, pelo apoio nos campos, nos processamentos, nos experimentos e com os programas e equipamentos complicados, que jamais saberei mexer o suficiente. Em especial, Rodrigo e Rapha, companheiros de campos e perrengues sem os quais essa pesquisa não teria sido viável, com quem eu sempre pude contar para “segurar a ponta da trena”. Aos amigos da turma do mestrado, pelo companheirismo, apoio, ajudas diversas e infinitas, por me lembrarem como é ser “calouro novamente”. Agradeço ainda aos amigos e familiares que, mesmo distantes, acompanharam e apoiaram a jornada ao longo dessa pesquisa. Ao meu orientador acadêmico, por ter me ensinado, quando eu ainda escolhia as disciplinas, que “o mestrado é muito mais do que só a pesquisa da dissertação”. Obrigada a todos os envolvidos, por terem contribuído para que eu realmente vivesse isso.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA: RAMPA PARA MITIGAÇÃO DE EROSÃO COSTEIRA NA ENSEADA DO FUNDÃO

Cintya Kazue Sakamoto

Dezembro/2024

Orientador: Prof. Marcos Nicolas Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Esta pesquisa aborda uma proposta de mitigação do processo erosivo existente na Enseada do Fundão, na Ilha da Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil. O processo em questão representa perda de terreno e degradação da área de praia, comum a outros ambientes costeiros. A solução busca apresentar uma alternativa sustentável de baixo custo, rápida implementação e reduzido impacto ambiental, alinhada à abordagem de soluções baseadas na natureza (ou *Building with nature*). Foram realizados levantamentos topobatimétricos e análise de sedimentos ao longo do perfil de praia, pelo período de um ano. Procedeu-se também a caracterização das condições ambientais por meio de coletas de dados de ondas e correntes e o processamento de dados de vento e nível do mar. Os resultados demonstram uma boa estabilidade do talude criado na rampa experimental, em contraste com os trechos subjacentes que continuam sofrendo processos erosivos, apontando para a efetiva atuação da solução proposta. Ademais, os dados coletados forneceram informações relevantes sobre a dinâmica costeira, a erosão e a sedimentação na região, contribuindo para o entendimento das causas do processo erosivo e do comportamento esperado na solução proposta.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BUILDING WITH NATURE: RAMP FOR MITIGATION OF COASTAL EROSION
IN ENSEADA DO FUNDÃO

Cintya Kazue Sakamoto

December/2024

Advisor: Prof. Marcos Nicolas Gallo

Department: Ocean Engineering

This research addresses a proposal to mitigate the erosion process at Fundão Bay, on the island of Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brazil. The process in question represents loss of land and degradation of the beach area, common to other coastal environments. The solution seeks to present a sustainable alternative that is low cost, quick to implement and has a reduced environmental impact, in line with the Building With Nature approach. Topobathymetric surveys and sediment analysis were carried out along the beach profile over a period of one year. Environmental conditions were also characterized by collecting wave and current data and processing wind and sea level data. The results show good stability of the slope created on the experimental ramp, in contrast to the underlying stretches which continue to suffer from erosion, pointing to the effective performance of the proposed solution. In addition, the data collected provided relevant information on coastal dynamics, erosion and sedimentation in the region, contributing to an understanding of the causes of the erosion process and the expected behavior of the proposed solution.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Processo erosivo e sua mitigação	1
1.2	Motivação	5
1.3	Objetivos.....	7
2	Caracterização da região do estudo	8
2.1	A Baía de Guanabara.....	8
2.2	A Ilha da Cidade Universitária	8
3	Metodologia.....	13
3.1	Execução da intervenção	14
3.2	Caracterização física do ambiente de estudo	15
3.2.1	Regime de ventos	15
3.2.2	Regime de maré	17
3.2.3	Regime de ondas.....	19
3.2.4	Regime de correntes	21
3.3	Comportamento morfológico	22
3.3.1	Verificação da tendência de erosão por meio de fotogrametria	22
3.3.2	Monitoramento topobatimétrico do perfil de praia.....	24
3.3.3	Análise granulométrica dos sedimentos	26
4	Resultados e discussões	29
4.1	Caracterização física da Enseada do Fundão.....	29
4.1.1	Regime de ventos	29
4.1.2	Regime de maré	34
4.1.3	Regime de ondas de vento	39
4.1.4	Regime de correntes	46
4.2	Monitoramento morfodinâmico.....	48
4.2.1	Identificação dos trechos com tendência erosiva	48
4.2.2	Evolução morfológica do perfil de praia	51
4.2.3	Análise granulométrica dos sedimentos	60
4.3	Análise interdisciplinar dos resultados	65
5	Conclusões.....	70
6	Referências	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Enseada do Fundão, situação antes da intervenção (Fonte: acervo pessoal; março/2023).....	3
Figura 2 – Localização da área de estudo (Fonte: adaptado de CONSUNI, 2023 e Google Earth, abril/2023).....	6
Figura 3 – Extrato da Carta Náutica 1501, com (Fonte: DHN, 2024) - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.....	8
Figura 4 – Sobreposição e identificação das ilhas originárias sobre imagem da Ilha da Cidade Universitária (Gamboa, 2007) – acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.....	9
Figura 5 – Vista lateral de trecho da Enseada do Fundão, em período de maré baixa (Fonte: acervo pessoal; março/2023).....	11
Figura 6 – Mapa de distribuição da mediana das amostras de fundo de todos os pontos da grade amostral do entorno da Ilha do Fundão (Fonte: Mendonça e Ribeiro, 2014) - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.	12
Figura 7 – Transporte líquido de sedimentos no entorno da Ilha do Fundão, considerando apenas o caso CB-, em uma grade regular, com espaçamento de 200 metros entre as estações (Fonte: Mendonça e Ribeiro, 2014); as setas representam os vetores de transporte para o caso analisado - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.	12
Figura 8 – Situação da região de estudo, trechos sem (esq.) e com (dir.) a intervenção (Fonte: acervo pessoal, Março/2023).	14
Figura 9 – Mapa de posicionamento das rampas Experimental e de Controle; Estações Maregráfica da Ilha Fiscal e Meteorológica do Galeão; e Boia Oceanográfica RJ-4 (Fonte: adaptado de Google Earth, Dezembro/2020).	15
Figura 10 – Interface da plataforma Meteostat, exibindo gráficos de temperatura e ponto de orvalho (Fonte: Meteostat, 2024).....	16
Figura 11 – Exemplo de tensão de cisalhamento no leito, induzida por onda, para pista de 20 km (Fonte: Gröen e Dorrestein (1976, apud Mathew e Winterwerp, 2020).....	17
Figura 12 – Série temporal de nível do mar, obtidos da Estação Maregráfica da Ilha Fiscal, tomados a cada 5 min, em relação ao referencial do IBGE; no período de 01/02/2023 a 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).	18

Figura 13 – Ajuste de metodologia para medição de onda (Fonte: acervo pessoal, agosto/2023).	20
Figura 14 – Uso de derivadores para medição de correntes: o derivador; a colocação e a operação em campo (Fonte: acervo pessoal, 2023).	22
Figura 15 – Perfis do terreno inicial (06/03/2023) e da rampa recém executada (30/03/2023); a média dos levantamentos realizados ao longo da pesquisa (Perfil médio); e cotas de interesse: Média das Preamares de Sízigia ou <i>mean high water spring</i> (MHWS); Média das Preamares de Quadratura ou <i>mean high water neap</i> (MHWN); Nível Médio do Mar ou <i>mean sea level</i> (MSL); Média das Baixamares de Quadratura ou <i>mean low water neap</i> (MLWN); e Média das Baixamares de Sízigia ou <i>mean low water spring</i> (MLWS).	24
Figura 16 – Indicação de perfis para monitoramentos (Fonte: adaptado de Google Earth, abril/2023).	25
Figura 17 – Indicação da posição dos pontos de coleta de sedimentos, ao longo da rampa experimental (Fonte: acervo pessoal, Agosto/2023) - acrescentado destaque nos pontos de coleta e alinhamento.	27
Figura 18 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período do monitoramento: de 01/02/2023 a 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	29
Figura 19 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período de Bom tempo: primavera e verão; a linha preta tracejada indica o valor médio e a linha vermelha a média móvel a cada 48h (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	30
Figura 20 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período de Mau tempo: outono e inverno ; a linha preta tracejada indica o valor médio e a linha vermelha a média móvel a cada 48h (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	30
Figura 21 – Comparação entre dados de intensidade de vento obtidos nas Estações Meteorológicas do Galeão e do CENPES, no mês de Fevereiro/2023, representando o período de Bom tempo (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat e pelo LAMCE).	31
Figura 22 – Comparação entre dados de intensidade de vento obtidos nas Estações Meteorológicas do Galeão e do CENPES, no mês de Julho/2023, representando o período de Mau tempo (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat e pelo LAMCE).	31

Figura 23 – Rosas de ventos elaboradas a partir das séries de dados obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024, médias horárias. À direita estão separados os períodos considerados de “Bom tempo” (acima) e “Mau tempo” (abaixo) (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	32
Figura 24 – Identificação das possíveis pistas de vento para a formação de ondas locais, com indicação dos azimutes aproximados; SRC: WGS 84, sem escala (Fonte: Adaptado de Google Earth Pro, dezembro/2020).	33
Figura 25 – Alturas de onda na quebra, estimadas a partir dos dados diários de vento obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	34
Figura 26 – Série de dados de nível do mar, obtidos da Estação Maregráfica da Ilha Fiscal, tomados a cada 5min, em relação ao referencial do IBGE; no período de 01/02/2023 a 31/01/2024; e cotas de interesse: Média das Preamares de Sízigia ou <i>mean high water spring</i> (MHWS); Média das Preamares de Quadratura ou <i>mean high water neap</i> (MHWN); Nível Médio do Mar ou <i>mean sea level</i> (MSL); Média das Baixamares de Quadratura ou <i>mean low water neap</i> (MLWN); e Média das Baixamares de Sízigia ou <i>mean low water spring</i> (MLWS). (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).	36
Figura 27 – Curvas de permanência submersa e acumulada, segundo série de dados do Marégrafo da Ilha Fiscal, no período de 01/02/2023 a 31/01/2024; cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).	37
Figura 28 – Curvas de permanência submersa e acumulada, segundo previsão de maré astronômica para o período de 01/02/2023 a 31/01/2024; cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).	38
Figura 29 – Curvas de permanência submersa, segundo série de dados do Marégrafo da Ilha Fiscal (Maré total), no período de 01/02/2023 a 31/01/2024 e segundo previsão de maré astronômica para o mesmo período (Astronômica); cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).	39
Figura 30 – Medição dos parâmetros de onda com ADV: Altura significativa (H_s , em metros), período médio (T_m , em segundos) e direção principal (Dir, em graus); à esquerda, fundeio preliminar em 06/02/2023; à direita: fundeio em 17/05/2023.	40
Figura 31 – Excerto dos dados de velocidade e direção do vento, nos intervalos dos fundeios; à esquerda, fundeio preliminar em 06/02/2023; à direita: fundeio em 17/05/2023	

(Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).	41
Figura 32 – Série temporal da altura média de onda na praia, aferida no alinhamento do eixo da rampa, com uso de régua e gravação de vídeo.....	41
Figura 33 – Comparação dos dados horários de intensidade do vento com a altura de onda na praia, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).....	42
Figura 34 – Comparação dos dados horários de direção do vento com a altura de onda na quebra, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).....	43
Figura 35 – Comparação dos dados de altura significativa da onda em mar aberto com a altura de onda na rampa, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma PNBoia).....	43
Figura 36 – Comparação dos dados de direção da onda em mar aberto com a altura de onda, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma PNBoia).	44
Figura 37 – Alturas de onda na praia, medidas <i>in loco</i> e estimadas a partir dos dados diários de vento obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).....	45
Figura 38 – Rosa de correntes, com velocidade em m/s, dados obtidos na campanha preliminar de fundeio do ADV (06/02/2023).	46
Figura 39 – Rosas de correntes, com velocidade em m/s, dados consolidados das diversas campanhas de derivadores; à direita estão separados os períodos correspondentes às marés Vazante (acima) e Enchente (abaixo).	47
Figura 40 – Linhas de costa traçadas a partir das ortofotocartas e aerofotografias, sobrepostas à ortofotocarta de 2019 (sistema de representação SIRGAS 2000; UTM 23S; sem escala); quadro contendo destaque para a região da rampa experimental, com valores de recuo linear da linha de 2019 em relação a cada uma das anteriores (Fonte: elaboração própria a partir de imagens disponibilizadas pelo IPP).	49
Figura 41 – Ilustração esquemática da separação dos trechos para a aplicação do Método do Polígono de Mudança, sobrepostas à ortofotocarta de 2019 (sistema de representação SIRGAS 2000; UTM 23S; sem escala).	50
Figura 42 – Resumo das variações lineares observadas em cada um dos trechos, acumulando os períodos entre imagens disponíveis; variações positivas indicam	

progradação e valores negativos, erosão; o ponto vermelho marca a variação total observada desde 1975 até 2019, congregando todas as alterações, tanto positivas quanto negativas.	51
Figura 43 – Fotografias da área de monitoramento, antes (06/03/2023 - esquerda) e imediatamente após a intervenção (24/03/2023) – (Fonte: acervo pessoal, março/2023).	52
Figura 44 – Fotografia da rampa experimental, após o período de monitoramento – (Fonte: acervo pessoal, janeiro/2024).	52
Figura 45 – Perfis de praia no início e fim do monitoramento topobatimétrico; no eixo da rampa experimental, e nos perfis de controle NW e SE.	53
Figura 46 – Fotografia da encosta imediatamente a noroeste da rampa experimental, em diferentes datas, com destaque para o bloco de solo desagregado – (Fonte: acervo pessoal, outubro/2023 - esquerda e janeiro/2024 - direita).	53
Figura 47 – Fotografias da encosta imediatamente a sudeste da rampa experimental, com destaque para o bloco de solo desagregado, visto por baixo (esquerda) e por cima (direita) – (Fonte: acervo pessoal, janeiro/2024).	54
Figura 48 – Compilado dos levantamentos topobatimétricos realizados no eixo da rampa experimental ao longo do monitoramento.	54
Figura 49 – Compilado dos levantamentos topobatimétricos realizados no eixo da rampa experimental ao longo do monitoramento.	55
Figura 50 – Compilado de variações topográficas registradas ao longo do monitoramento, com distinção entre as parcelas referentes aos períodos de Bom e Mau tempo; a escala do eixo à esquerda foi ampliada para melhor visualização.	55
Figura 51 – Compilado de variações topográficas registradas ao longo de um ano de monitoramento, com distinção entre as parcelas referentes aos períodos de Bom e Mau tempo; a escala do eixo à esquerda foi ampliada para melhor visualização.	56
Figura 52 – Resumo das diferenças observadas entre os perfis D e B, laterais direita e esquerda, respectivamente.	58
Figura 53 – Variação topográfica registrada na rampa de controle, comparada com a rampa experimental.	59
Figura 54 – Fotografias da rampa de controle recém executada (esquerda) e ao fim do monitoramento (direita)– (Fonte: acervo pessoal, outubro/2023 - esquerda e janeiro/2024 - direita).	59

Figura 55 – Variação das frações dos sedimentos em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.	60
Figura 56 – Variação da composição granulométrica dos sedimentos em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.	61
Figura 57 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da preamar de sizígia.	62
Figura 58 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da preamar de quadratura.	62
Figura 59 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota do nível médio do mar.	63
Figura 60 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da baixamar de quadratura.	63
Figura 61 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da baixamar de sizígia.	63
Figura 62 – Aspecto visual dos sedimentos na cota da baixamar de sizígia, com a presença de “bolsões” de finos - (Fonte: acervo pessoal, março/2024).	64
Figura 63 – Evolução temporal do diâmetro mediano dos sedimentos, em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.	65
Figura 64 – Comparação do Perfil de Equilíbrio teórico com o medido, escala ampla.	66
Figura 65 – Comparação do Perfil de Equilíbrio teórico com o medido, com ênfase no trecho crítico, de maior movimentação de sedimentos.	67
Figura 66 – Indicativo dos diâmetros mobilizados pelos ventos máximo e médio.	68
Figura 67 – Vista frontal da praia experimental e regiões adjacentes - (Fonte: acervo pessoal, agosto/2023).	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira.	4
Tabela 2 - Fluxograma de atividades realizadas.....	13
Tabela 3 – Dados das imagens adotadas no estudo.....	23
Tabela 4 – Extrato da tabela de Classificação de Sedimentos proposta por Larsonneur (1977) modificada por Dias (1996), grupo Litoclástico; Legenda: Md = Mediana; L = Lama; c = Coquina; s = Seixos; g = Grânulos; R = Rodolitos (Fonte: DIAS, 2004).....	28
Tabela 5 – Frequência, amplitude e fase das principais constantes harmônicas da maré na região de estudo	35
Tabela 6 – Cotas de interesse, referenciadas ao Nível de Redução (NR) e ao IBGE....	36
Tabela 7 – Taxas de recuo observadas entre linhas de costa de cada ano, no alinhamento da rampa experimental (Fonte: elaboração própria, a partir de imagens fornecidas pelo IPP).....	49
Tabela 8 – Consolidação das variações topográficas de cada trecho do perfil, no eixo da rampa experimental, separados por período de Bom e Mau tempo.	57

1 Introdução

1.1 Processo erosivo e sua mitigação

A região costeira apresenta uma complexidade intrínseca devido à sua localização geográfica. Bosboom e Stive (2023) destacam que o ambiente costeiro é altamente dinâmico e energético, cujas fontes são forças: marinhas (ondas, marés, correntes e outros fenômenos oceanográficos); terrestres (descarga fluvial); e atmosféricas (ventos costeiros e clima local). Marchand et al. (2010) ressaltam a necessidade de conhecer o comportamento natural da costa, como requisito para formular uma estratégia de gestão costeira sustentável, economicamente racional e socialmente aceitável. Denota-se que a compreensão dos processos e parâmetros envolvidos na erosão costeira é fundamental para identificar e mitigar seus efeitos.

Para Bosboom e Stive (2023) a morfologia costeira de um trecho arenoso da costa, compreende tanto a topografia das dunas arenosas e da praia quanto a topografia subaquática do fundo do mar. Segundo Cowell e Thom (1994) a variação na topografia afeta as condições de contorno hidrodinâmicas, alterando o transporte sedimentar e seus produtos deposicionais e erosivos. Da mesma forma, Calliari et al. (2003) concluem que a morfologia e hidrodinâmica evoluem conjuntamente. Wright e Thom (1977) introduziram o termo “morfodinâmica costeira” para sua abordagem, onde morfodinâmica é definida como “o ajuste mútuo da topografia e do escoamento envolvendo transporte de sedimentos”.

Rosati (2005) define o balanço de sedimentos como a diferença entre o volume de sedimentos que entra e sai de um sistema (célula costeira) em um determinado tempo. Para Bose (2019) os possíveis processos responsáveis pela entrada e saída de sedimentos do setor são: “transportes longitudinal e perpendicular de sedimentos, e descarga fluvial e eólica”.

Segundo Lima et al. (2021), o déficit de sedimentos no sistema costeiro resulta, não apenas no recuo da linha de costa, mas também na redução da largura da praia e perda de território, tornando mais frequentes as ocorrências de galgamento e inundação. Os autores ressaltam que as consequências negativas da erosão costeira poderiam chegar à “degradação completa dos sistemas naturais (praias e dunas) com número crescente de novas zonas costeiras expostas à ação direta das ondas” (Lima et al., 2021).

O documento temático elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA,

2018) conceitua como Equilíbrio Dinâmico aquele estabelecido sob a presença de transporte longitudinal de sedimento, porém sem gradientes de transporte, o que leva à manutenção do volume global de sedimento dentro de cada célula fisiográfica. Desta forma, a praia atinge uma forma de equilíbrio em planta, que não varia sob a ação de uma ondulação incidente constante no tempo. O documento destaca ainda que a existência de gradientes de transporte longitudinal geraria zonas de erosão e de acúmulo que alteram a forma da linha de costa em praias em desequilíbrio (MMA, 2018).

O relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas destaca como alguns dos principais impactos da erosão costeira:

“redução na largura da praia e ou recuo da linha de costa; perda do valor paisagístico da praia e/ou da região costeira; comprometimento do potencial turístico da região; prejuízos nas atividades socioeconômicas ligadas ao turismo e ao lazer na praia; artificialização da linha de costa (por obras de “proteção” costeira); gastos elevados com a recuperação de praias e a reconstrução da orla marítima” (PBMC, 2016).

A Enseada do Fundão, na face leste da Ilha da Cidade Universitária, apresenta indícios deste processo erosivo. A atual conformação desta praia é composta por uma face praias de baixa declividade, seguida por um talude quase vertical até o terreno existente. No pé do talude há deposição de blocos de solo, inclusive com vestígios de vegetação rasteira, indicando o desprendimento recente. A face do talude exibe formação semelhante à de pequenas escarpas, conforme observado na Figura 1.

Especificamente no caso de erosão de escarpas, o processo resulta em uma plataforma suavemente inclinada, nivelada junto à superfície da água, segundo Komar (1976). Para o autor, o mecanismo do processo envolve a erosão da base da escarpa que, sem suporte, colapsa e desliza para a praia; “os detritos do deslizamento são então desgastados pela ação das ondas e retidos como uma praia ou carregados para o mar”. Segundo Muehe (2004) em falésias baixas de sedimentos pouco consolidados o fenômeno de retrogradação tende a ser maior e com resposta mais rápida do que naquelas em rochas sedimentares. Melo (2014) descreve ainda a formação das escarpas como resultado da interação da pressão hidráulica das ondas e da ação abrasiva repetitiva da água com fragmentos de rochas na base do afloramento, que fornecem sedimentos à dinâmica praias.

Muehe (2004) identifica que a deposição de sedimentos à frente de uma encosta de terras altas, como os costões cristalinos ou as escarpas de depósitos sedimentares consolidados, resultam em praias aderentes, por progradação frontal em planícies

costeiras que se estabelecem à frente de planícies flúvio-marinhas mais ou menos compartimentadas, formando praias de enseada. Para Barreto et al. (2016) estas praias de enseada tendem a ter sua forma em planta em equilíbrio estático, cujas ondas incidentes são controladas pelo processo de difração em torno dos promontórios que as limitam.



Figura 1 - Enseada do Fundão, situação antes da intervenção (Fonte: acervo pessoal; março/2023).

Para Bosboom e Stive (2023) a engenharia costeira envolve planejamento, projeto, construção e manutenção de obras na zona costeira, podendo ser divididos em dois grandes grupos: o transporte e estabilização de areia e outros sedimentos costeiros; e a construção de estruturas. A resposta tradicional da engenharia à erosão costeira tem sido mitigar e prevenir o processo buscando neutralizar os processos naturais, o que Hamm et al. (2002) identificam como “engenharia pesada”. No entanto, Chen et al. (2022) ressaltam que esse tipo de proteção pode exacerbar a erosão costeira em outros pontos e causar efeitos adversos no meio ambiente. Van Rijn (2011) observa que, muito embora projetos de engenharia visem resolver os problemas de erosão, há muito se sabe que tais intervenções também podem contribuir para criar problemas em outros locais próximos, na forma de efeitos colaterais. Sendo assim, destaca-se a importância do adequado planejamento e devidas prospecções, prévios à sua execução.

A Tabela 1 resume de forma esquemática as diversas alternativas de intervenção

para mitigação do processo erosivo, consolidadas por Lima et al. (2021). No contexto de redução do déficit sedimentar, os autores recomendam medidas que visam equilibrar o fluxo de sedimentos no sistema costeiro, tais como: a mobilização de sedimentos dentro do próprio sistema costeiro, com transposição para as zonas de maior erosão, ou a sua movimentação no perfil de praia; e a preservação das dunas, visando manter os sedimentos assentados.

Tabela 1 - Medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira.

A. AÇÃO AO NÍVEL DAS CAUSAS DE EROSÃO COSTEIRA:		
Redução do déficit sedimentar: recondicionamento do uso do solo na bacia hidrográfica e redução de obras transversais e longitudinais nos afluentes, de forma a permitir que os sedimentos efetivamente cheguem à costa; bem como as medidas que evitam a retirada destes sedimentos, tais como dragagens e extração de areia.	Regularização do fluxo de sedimentos: mobilização de sedimentos dentro do próprio sistema costeiro, com transposição para as zonas de maior erosão, ou a sua movimentação no perfil de praia; e a preservação das dunas, visando manter os sedimentos assentados.	Alimentação artificial de sedimentos: pode ser realizada no âmbito da deriva litorânea ou diretamente na praia e dunas, como também agindo nas causas da erosão.
B. AÇÃO AO NÍVEL DAS CONSEQUÊNCIAS DA EROSÃO		
Proteção com estruturas costeiras: visam proteger infraestruturas e bens da erosão costeira, assim como dos danos causados pelo avanço do mar, por meio de estruturas tais como esporões, obras longitudinais, muros de contenção e quebra-mares destacados.	Acomodação: medidas que buscam a adaptação do litoral às consequências da erosão, como adequação dos imóveis; sistemas de alerta; ações de educação e monitoramento; e medidas de compensação financeira por perdas e danos.	Relocalização e/ou retirada: prevê a realocação dos imóveis afetados ou ainda apenas sua demolição.

Adaptado de Lima et al. (2021).

Abordagens alternativas, têm sido denominadas como “Soluções Baseadas na Natureza” ou “*Building with Nature*”; as quais adotam materiais naturais aproveitando as forças construtivas do próprio ambiente (ventos, correntes e ondas) para estabelecer e manter defesas naturais contra erosões e inundações. Pesquisas recentes indicam o uso de recobrimento arenoso, alterando as características dos sedimentos superficiais, como uma opção alinhada a essa abordagem (Chen *et al.*, 2022; Montgomery *et al.*, 2019; Stronkhorst *et al.*, 2018). Van Rijn (2011) ressalta que, nessa linha, é recomendado restaurar o equilíbrio geral de sedimentos na escala de células costeiras, que são definidas como compartimentos costeiros contendo o ciclo completo de erosão, deposição, fontes e sumidouros de sedimentos e os caminhos de transporte envolvidos (EUROSION, 2004). Sendo assim, entende-se que o efetivo gerenciamento costeiro deve prevalecer-se de

materiais e condições naturais para estabelecimento de uma solução consistente e sustentável para a mitigação de processos erosivos. Para tanto, é fundamental que haja o conhecimento do ambiente e seus processos, de forma a melhor subsidiar a implementação de qualquer intervenção.

1.2 Motivação

A grande concentração populacional nas regiões litorâneas intensifica a preocupação com processos erosivos, tornando cada vez mais imperativo o estudo e adequado manejo da zona costeira. Dentre os efeitos das mudanças climáticas mais relevantes que afetam as áreas costeiras, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas PBMC (2016) destaca a elevação do nível do mar, indicando como uma de suas principais consequências o aumento da erosão costeira (tanto da linha de costa oceânica, quanto estuarina). O relatório ressalta ainda que mais de 60% da população brasileira habita cidades costeiras, constatando a importância de medidas de gerenciamento costeiro. Bird (2008) estima que o processo erosivo ocorre em 70% das praias arenosas do planeta; e Luijendijk et al. (2018) avaliam que este tipo de praia ocupa um terço da costa global; o que torna esse processo uma preocupação mundial.

Os ambientes costeiros representam espaços de intenso processo de uso e ocupação, com consequentes transformações expressivas em seu meio físico-natural. Por tratar-se de um ambiente de transição, sujeito simultaneamente a processos marinhos, terrestres e atmosféricos, qualquer intervenção apresenta enorme complexidade em seus processos de formação e transformação. Stive et al. (2002) ressaltam que o desconhecimento ou a interpretação falha dos dados de flutuações da linha de costa em diferentes escalas temporais e espaciais pode conduzir a uma gestão costeira equivocada.

Neste contexto de preocupação com o gerenciamento costeiro, o Plano Diretor 2030 da Universidade Federal do Rio de Janeiro (CONSUNI, 2023) contempla a ordenação dos espaços livres visando seu uso sustentável e a preservação dos espaços verdes, como o Parque da Orla (Figura 2), com a requalificação desses espaços para usos recreativos. Considerando que a faixa litorânea existente possui largura insuficiente para uso recreativo em diversos trechos da praia da Enseada do Fundão (Figura 1), o documento estabelece, como uma de suas diretrizes de uso e ocupação do solo no contexto Ambiental e de Infraestrutura, o desenvolvimento e execução de “projeto de engordamento da praia da Enseada do Fundão visando seu pleno aproveitamento” (CONSUNI, 2023).

Como a Ilha do Fundão possui características bastante específicas, devido à natureza de sua construção, não seria suficiente adotar somente as atuais técnicas e ferramentas analíticas para o estudo e dimensionamento de uma futura intervenção costeira. Para tanto, a fim de melhor compreender a dinâmica dos processos litorâneos na Ilha do Fundão, foi planejado o monitoramento de um pequeno trecho de praia após intervenção do tipo “rampeamento”. Tal solução busca apresentar uma alternativa sustentável de baixo custo, rápida implementação e reduzido impacto ambiental, alinhada à abordagem de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) ou “*Building with nature*”, e seu resultado pode vir a subsidiar futuras intervenções para a implantação do Parque da Orla. A rampa experimental em questão, figura como uma combinação de diferentes medidas de equilíbrio dentro do próprio sistema costeiro, tais como as propostas por Lima et al. (2021), tendo em vista que há uma alteração no perfil de praia, com a intenção de reduzir a erosão do talude, bem como de manter os sedimentos ao longo da praia.

A Figura 2 indica a localização da rampa experimental, dentro do contexto do Parque da Orla, na Enseada do Fundão.



Figura 2 – Localização da área de estudo (Fonte: adaptado de CONSUNI, 2023 e Google Earth, abril/2023).

A escolha do local a ser monitorado considerou a maior diferença entre o nível do terreno natural do futuro Parque da Orla e o nível da praia, inserido no Setor 1 (etapa

inicial da implantação). Além disso, foi priorizada uma área de baixo tráfego de pessoas, evitando tanto uma possível influência do trânsito no monitoramento, quanto impacto nas atividades da comunidade local.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral verificar a efetividade de uma solução sustentável para a mitigação do processo erosivo na região da Enseada do Fundão, Ilha da Cidade Universitária. Como objetivos específicos, apresentam-se ainda:

- Caracterizar fisicamente a região de estudo quanto à hidrodinâmica e sedimentologia da enseada;
- Quantificar as respostas morfodinâmicas às diferentes condições climáticas;
- Identificar as principais causas do processo erosivo; e
- Verificar a efetividade da intervenção como forma de mitigação da erosão local.

2 Caracterização da região do estudo

2.1 A Baía de Guanabara

A área de estudo localiza-se no interior da Baía de Guanabara, cuja batimetria está contemplada na Carta Náutica 1501, elaborada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação DHN (2024). A Figura 3 apresenta um trecho da Carta, com destaque para a área de estudo.

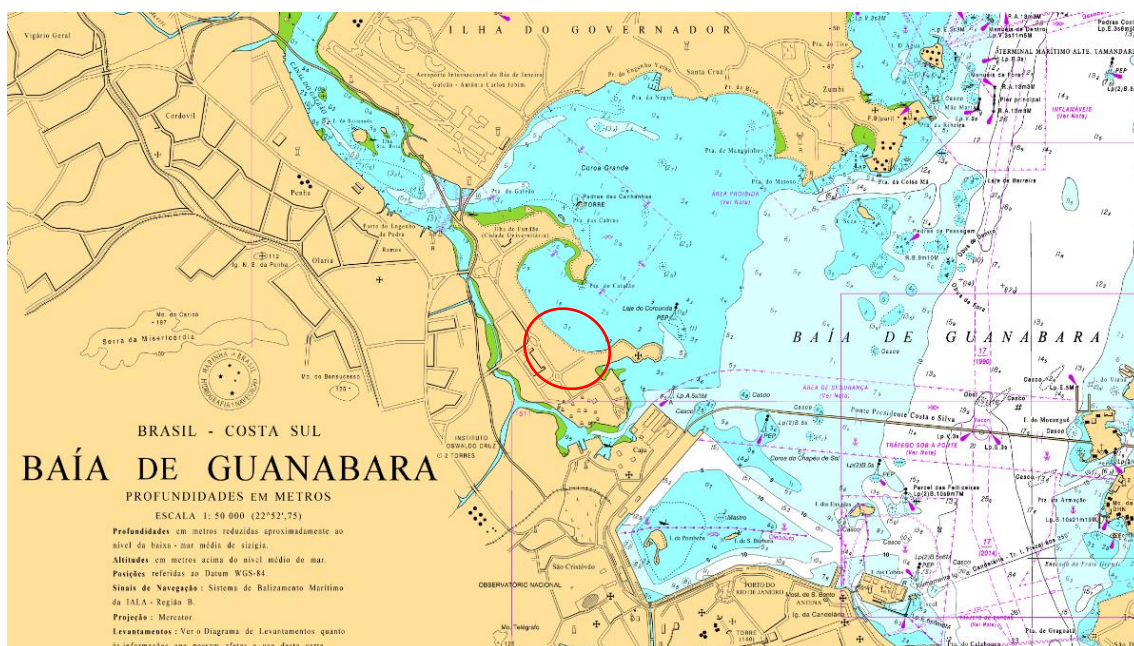


Figura 3 – Extrato da Carta Náutica 1501, com (Fonte: DHN, 2024) - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.

2.2 A Ilha da Cidade Universitária

A Ilha da Cidade Universitária (também conhecida como “Ilha do Fundão”) é fruto do aterramento de oito ilhas preexistentes: a do Fundão; a da Sapucaia; a do Bom Jesus; a Pindaí do Ferreira; a Pindaí do França; a do Catalão; a do Baiacu; e a das Cabras; conforme apurado por Gamboa (2007). Segundo a autora, o processo de aterramento teve início em 1948 e foi concluído em 1953, transformando o antigo arquipélago em uma ilha única, após o acréscimo de mais de três milhões de metros quadrados de área efetiva (Figura 4).



Figura 4 – Sobreposição e identificação das ilhas originárias sobre imagem da Ilha da Cidade Universitária (Gamboa, 2007) – acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.

Considerando a morfologia do litoral e as áreas de influência costeira das principais bacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro, Muehe e Valentini (1998) classificam a região no compartimento Baía de Guanabara, dentro do macro-compartimento dos Cordões Litorâneos, correspondentes ao litoral sul. Segundo divisão do Comitê de Bacia Hidrográficas do Rio de Janeiro, a ilha está inserida na Região Hidrográfica V (Rio de Janeiro, 2005).

Inferese dos mapas constantes no Atlas elaborado por Coimbra et al. (2021) que a Ilha da Cidade Universitária apresenta solos coluvionares e residuais sobre rochas cristalinas com coberturas flúvio marinhas argilosas orgânicas; possui vegetação potencial do tipo floresta ombrófila de terras baixas; e conta com uso urbano do solo, com ocupação antrópica não-agropastoril. Quanto à geomorfologia, faz parte dos cordões e planícies, com altitudes abaixo de 20 metros. Ainda segundo os mapas do Atlas, a região figura entre as isoietas de 1100 e 1200 mm/ano, quanto à pluviometria.

As classificações quanto ao fator geológico, não se aplicam à praia desta pesquisa por tratar-se de ilha artificialmente construída. Ainda assim, identifica-se a natureza dos materiais presentes na praia experimental como desagregados (areia, cascalho e finos), sem recobrimento vegetal na área exposta ao mar.

A Enseada do Fundão está localizada na porção leste da Ilha da Cidade

Universitária, no interior da Baía de Guanabara. Trata-se de um trecho de praia de enseada, que possui características distintas das praias abertas. Ferreira (2012) ressalta que a restrição pelo domínio morfológico determina o comportamento de variáveis como a geometria e extensão da praia, distância entre promontórios, razão de indentação, características granulométricas do sedimento, declividade da praia submersa, presença de correntes de retorno e localização de barras submersas. O autor destaca como principais efeitos da enseada, o estabelecimento de correntes de retorno controladas topograficamente e o desenvolvimento de processos de rotação de praia.

Segundo a classificação de Shepard (1963), a praia em estudo classifica-se como uma “costa secundária” (formada principalmente por agentes marinhos, neste caso não foi uma costa primária antes ter sido moldada pelo mar); do tipo “costa com erosão” das ondas; sub-tipo “Falésias endireitadas pelas ondas” (margeadas por um fundo marinho suavemente inclinado); caso de “Corte em materiais homogêneos”. Sendo assim, é possível que o processo de erosão de escarpas descrito por Komar (1976) seja observado neste trecho de falésias baixas.

Calliari et al. (2003) sintetizaram os diversos trabalhos desenvolvidos pela chamada Escola Australiana de Geomorfologia Costeira (Wright, Short e colaboradores), reconhecendo seis tipos distintos de estágios morfológicos, associados aos diferentes regimes de ondas e marés, caracterizados por dois estados extremos (um dissipativo e outro refletivo) e quatro estados intermediários. A atual conformação de terreno encontrada na Enseada do Fundão (Figura 5), é caracterizada por antepraia de baixa declividade e face praial íngreme (limite entre o terreno aterrado e a praia), o que corresponde ao estado refletivo. O principal efeito da intervenção proposta é a alteração da morfologia refletiva no sentido de um estado dissipativo, ao propiciar uma área de espraiamento ao longo da “rampa” executada, compatível com o domínio dissipativo esperado para o clima de ondas e variação de maré locais.

A hidrodinâmica da Enseada do Fundão foi abordada por Buraschi (2024), tendo sido identificado que a circulação é dominada pela maré, e que eventos com efeito meteorológico contribuem para a intensificação das correntes. A autora aferiu ainda que “as principais intensidades de correntes na sizígia são: 0.19 – 0.20 m/s no Catalão, e 0.22 m/s no Bom Jesus”. Infere-se ainda dos resultados gráficos deste trabalho que a magnitude das correntes observadas na proximidade da praia em monitoramento é ainda inferior a estas supracitadas.



Figura 5 – Vista lateral de trecho da Enseada do Fundão, em período de maré baixa (Fonte: acervo pessoal; março/2023).

Mendonça e Ribeiro (2014) desenvolveram pesquisa sedimentológica especificamente no entorno da Ilha da Cidade Universitária e observaram, na região da Enseada do Fundão, a predominância de sedimentos classificados como areia com pontos isolados de acúmulo de silte muito fino. Nesta região, as autoras notaram predominância de sedimentos com assimetria de 0,1 a 0,3, sendo classificadas como amostras de assimetria positiva. A Figura 5 ilustra a distribuição espacial da mediana do diâmetro dos sedimentos de fundo, resultante das diversas amostras analisadas por Mendonça e Ribeiro (2014). As autoras abordaram ainda diferentes cenários de transporte de sedimentos, por meio de modelos de tendência, com destaque para o cenário “CB-” (Figura 6), o qual apresentou resultados mais consistentes, segundo o trabalho. Este cenário consiste em um transporte que resulta em aumento no diâmetro médio, melhoria na seleção (redução no desvio padrão) e redução na assimetria.

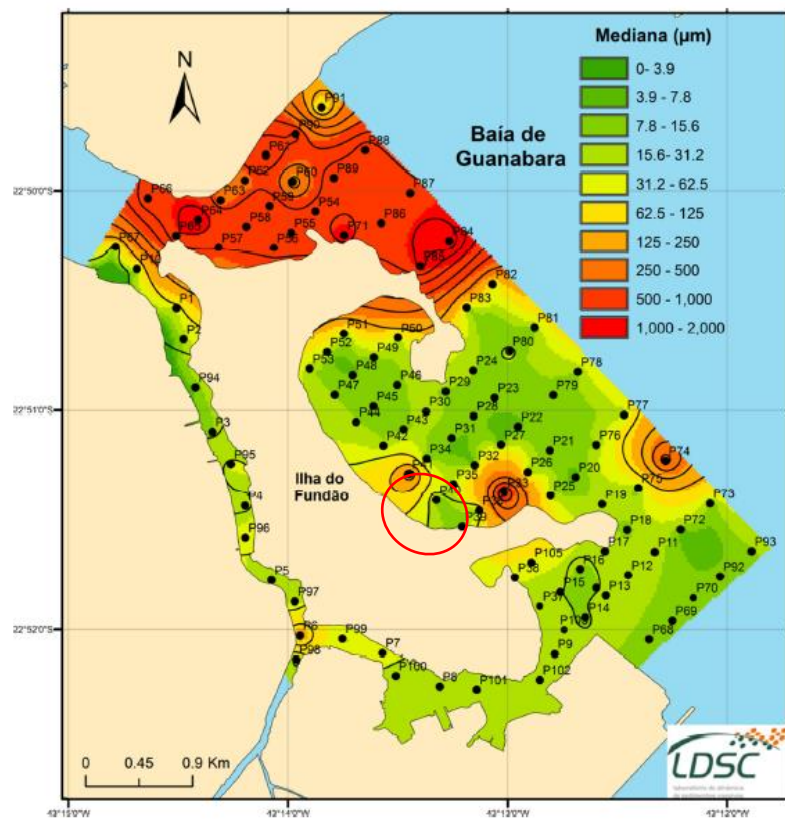


Figura 6 – Mapa de distribuição da mediana das amostras de fundo de todos os pontos da grade amostral do entorno da Ilha do Fundão (Fonte: Mendonça e Ribeiro, 2014) - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.

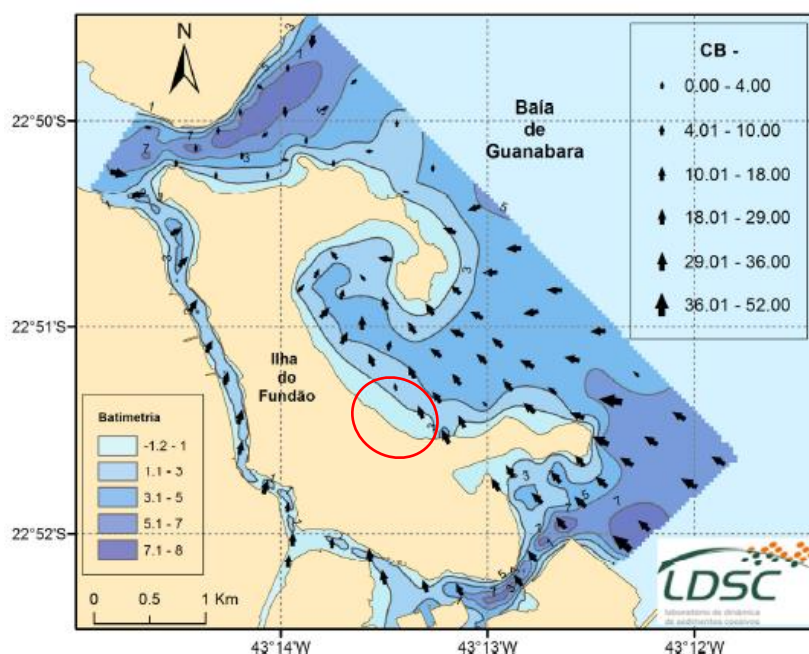


Figura 7 – Transporte líquido de sedimentos no entorno da Ilha do Fundão, considerando apenas o caso CB-, em uma grade regular, com espaçamento de 200 metros entre as estações (Fonte: Mendonça e Ribeiro, 2014); as setas representam os vetores de transporte para o caso analisado - acrescentado destaque em vermelho na área de monitoramento desta pesquisa.

3 Metodologia

A adequada caracterização do ambiente é essencial para a compreensão dos fenômenos estudados. As diferentes classificações de costas e estuários permitem melhorar a abordagem do monitoramento, bem como auxiliam na interpretação mais acurada dos dados observados. Desta forma, para atingir os objetivos propostos para esse trabalho, foram adotadas pesquisas tanto de caráter teórico quanto de campo, cujas metodologias são apresentadas nesta seção e estão esquematizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Fluxograma de atividades realizadas.

Objetivo geral	Objetivos específicos	Metodologia			Resultados esperados
		Abordagem	Materiais e métodos		
Avaliar efetividade de solução por meio de monitoramento de campo	Verificar se a intervenção mitigou o processo erosivo	Execução da intervenção	Monitoramento periódico	Análise conjunta de resultados	Conclusão quanto à efetividade da solução proposta
	Descrever as características físicas e principais forçantes na região de estudo	Regime de maré	Coleta e tratamento de dados dos marégrafos disponíveis	Comparação dos resultados medidos e de literatura; classificação do ambiente de estudo	Caracterização física da área de interesse
		Velocímetro Acústico Pontual (ADV)	Rosa de correntes		
				Derivadores	
	Regime de ventos	Rosa de vento			
Quantificar as respostas morfológicas às forçantes	Fotogrametria	Verificação qualitativa de tendência erosiva ou progratativa o longo da orla			
	Monitoramento topobatimétrico	Evolução do perfil de praia	Estimativa de volumes		
	Análise granulométrica	Evolução de descritores estatísticos	Avaliar tendência de transporte de sedimentos		
Identificar componentes do processo erosivo	Análise conjunta de forçantes e perfis			Identificação das principais forçantes no processo erosivo	

3.1 Execução da intervenção

O perfil experimental consiste em um corte em terreno “natural” (aterro original), com 10 metros de largura ao longo da praia e 30 metros adentrando no terreno, com taludes laterais de concordância. A declividade resultante (aproximadamente 1:10) acompanha a conformação do perfil de praia preexistente no sopé da escarpa, como mostrado na Figura 15 da seção 3.3.2. O rampeamento foi executado pela Prefeitura Universitária, por meio de corte em terreno natural, com máquina retroescavadeira, sem revestimento. O posicionamento da rampa foi definido buscando evitar a necessidade de retirada de vegetação e sua orientação dispôs-se perpendicular à linha de costa. A Figura 8 apresenta o local de estudo, antes e logo após a intervenção.



Figura 8 – Situação da região de estudo, trechos sem (esq.) e com (dir.) a intervenção (Fonte: acervo pessoal, Março/2023).

A fim de obter outro trecho de monitoramento que pudesse servir como controle, foi realizada uma intervenção similar, em outra área, na mesma enseada. A Figura 9 ilustra a posição das duas áreas monitoradas ao longo desta pesquisa, bem como a posição das estações meteorológica e maregráficas cujos dados foram utilizados, além da boia oceanográfica RJ-4.



Figura 9 – Mapa de posicionamento das rampas Experimental e de Controle; Estações Maregráfica da Ilha Fiscal e Meteorológica do Galeão; e Boia Oceanográfica RJ-4 (Fonte: adaptado de Google Earth, Dezembro/2020).

3.2 Caracterização física do ambiente de estudo

3.2.1 Regime de ventos

Os dados de direção e velocidade do vento foram obtidos por meio dos relatórios da estação meteorológica do aeroporto do Galeão, disponibilizados eletronicamente pela plataforma Meteostat (Figura 9). Para sua validação local, tais dados foram comparados com dados disponibilizados pelo Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE), obtidos na Estação Meteorológica do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), localizada na própria Enseada do Fundão.

Destaca-se que, dadas as características geográficas, o vento local influencia diretamente no regime de ondas, reforçando a importância de sua caracterização. Foi realizada a comparação entre a caracterização dos ventos e ondas a fim de compreender o tipo de predominância das ondas. Bosboom e Stive (2023) pontuam que ambientes dominados por maré podem ocorrer devido ao comprimento de pista limitado, ou onde a energia da onda incidente é absorvida ou refletida.

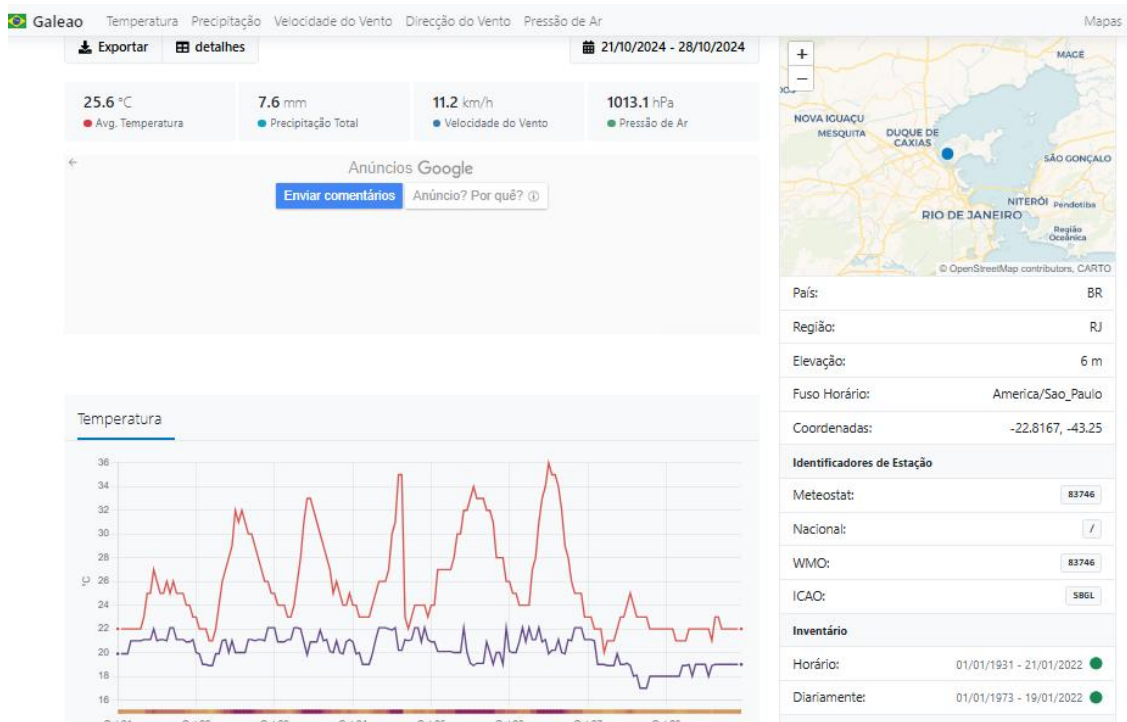


Figura 10 – Interface da plataforma Meteostat, exibindo gráficos de temperatura e ponto de orvalho (Fonte: Meteostat, 2024).

A série temporal de dados de vento foi também adotada para estimar a altura de onda gerada localmente, pelo método JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) (Hasselmann *et al.*, 1973), utilizando as simplificações propostas por Carter (1982), onde X é o comprimento da pista, em quilômetros, e U é a velocidade média diária do vento a 10m de altura, em m/s:

$$H_s = 0,02013 * X^{0,55} * U^{0,9} \quad \text{Equação 1 (Altura significativa)}$$

$$T_m = 0,605 * X^{0,33} * U^{0,34} \quad \text{Equação 2 (Período médio)}$$

Foi ainda adotado o critério de limitação da altura de onda, considerando que as ondas não se desenvolvem plenamente quando o comprimento de pista é menor do que 2,32 vezes o quadrado da velocidade do vento incidente (Carter, 1982). Nestes casos, a altura de onda foi limitada ao valor de uma onda gerada por vento com velocidade equivalente a:

$$U_{eq} = \sqrt[2]{X/2,32} \quad \text{Equação 3 (Velocidade de vento equivalente)}$$

Além disso, o regime de ventos permitiu inferir a tensão de cisalhamento no leito da praia, a fim de verificar a possibilidade de transporte de sedimentos por arraste, utilizando o ábaco elaborado por Grøen e Dorrestein (1976 apud Mathew e Winterwerp, 2020), disposto na Figura 11.

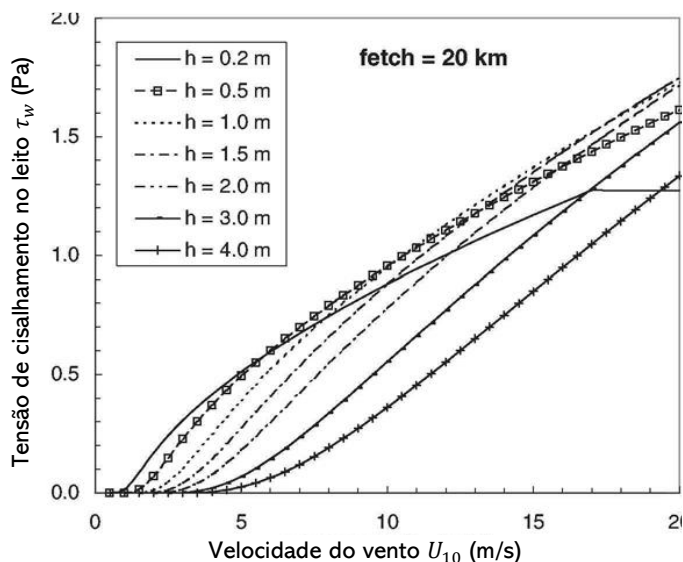


Figura 11 – Exemplo de tensão de cisalhamento no leito, induzida por onda, para pista de 20 km (Fonte: Grøen e Dorrestein (1976, apud Mathew e Winterwerp, 2020).

3.2.2 Regime de maré

Considerando a disponibilidade dos dados, a Estação Maregráfica da Ilha Fiscal foi estabelecida como fonte de dados de nível d'água para esta pesquisa. O período de aquisição de dados foi de 01/02/2023 a 31/01/2024, totalizando um ano, coincidente com o período de monitoramento topobatimétrico e demais levantamentos de campo. A estação é operada pelo Centro de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (CHM), e conta com marégrafo do tipo “Hidrologia Diário Esc. 1:20”, calibrado por análise estatística e harmônica de 731 dias de observação da maré, conforme consta em sua ficha catalográfica. Está localizada na Ilha Fiscal, dentro da Baía de Guanabara, nas coordenadas 22°53.8' S e 043°10.0' W, a cerca de 7,3 km de distância da área de monitoramento desta pesquisa. A **Figura 9** indica a localização da Estação Maregráfica em relação à área de estudo.

O tratamento dos dados recebidos consistiu em verificação visual prévia de dados espúrios (excepcionalmente inconsistentes com a série histórica) e substituição dos trechos sem medição. Para tal substituição, foram considerados três casos distintos, com as seguintes tratativas: para falhas de até 10 min, média simples das leituras

imediatamente anterior e posterior; para falhas de até 50 min, interpolação linear das leituras imediatamente anterior e posterior; e para falhas com mais de 1h, análise caso a caso, com adoção de valores previstos com base na tábua de marés disponibilizada para esta mesma estação, sendo considerada a média dos sinais de maré meteorológica observados nos horários imediatamente antes e após a falha. A Figura 12 apresenta a série completa de dados de nível do mar adotada para esta pesquisa, com a referência de nível estabelecida pelo IBGE para a região (nível médio dos mares em Imbituba/SC).

De posse desta série histórica, procedeu-se sua análise harmônica, com uso da ferramenta T-Tide, no software Matlab, a qual forneceu as constantes harmônicas para a região.

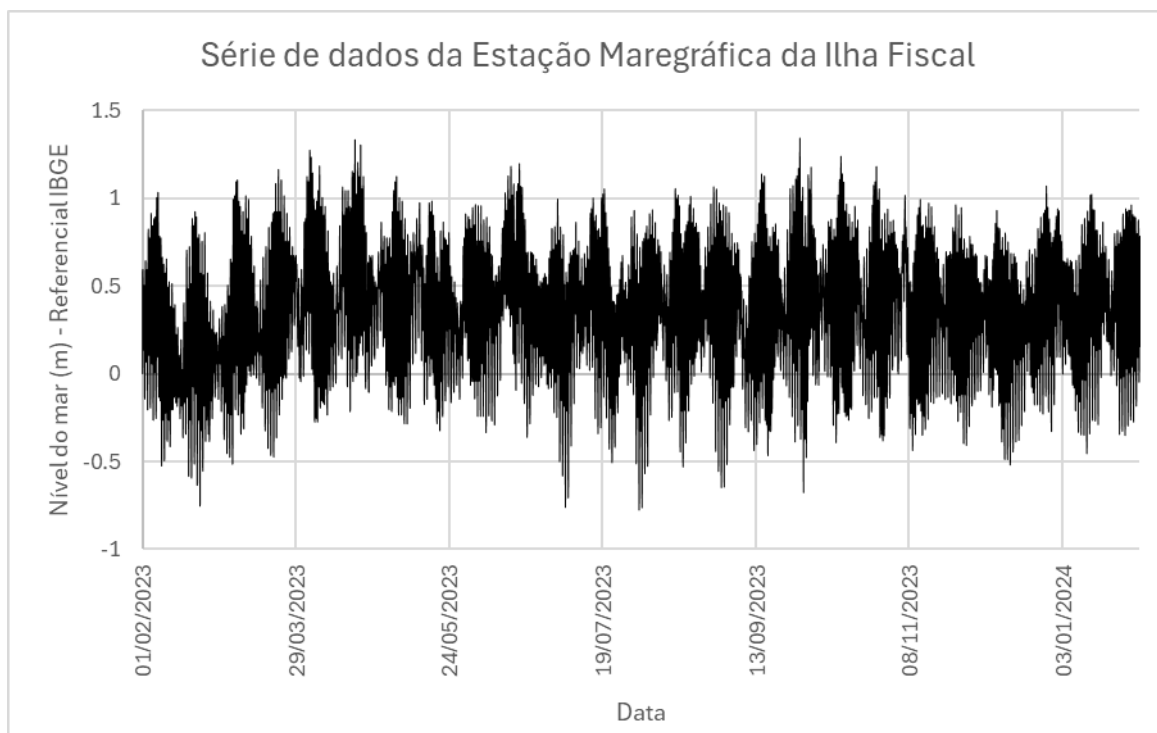


Figura 12 – Série temporal de nível do mar, obtidos da Estação Maregráfica da Ilha Fiscal, tomados a cada 5 min, em relação ao referencial do IBGE; no período de 01/02/2023 a 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).

Conforme metodologia proposta por Pugh (1987), o nível médio do mar ou *mean sea level* (MSL) foi obtido por meio da média simples da referida série de dados, bem como foram utilizadas as constantes S2, M2, K1 e O1 a fim de obter as cotas dos níveis médios das preamares e baixa-mares de sizígia e quadratura para a região: Média das Preamares de Sízigia ou *mean high water spring* (MHWS); Média das Preamares de Quadratura ou *mean high water neap* (MHWN); Nível Médio do Mar ou *mean sea level*

(MSL); Média das Baixamare de Quadratura ou *mean low water neap* (MLWN); e Média das Baixamare de Sizígia ou *mean low water spring* (MLWS). A variação média da maré de sizígia foi obtida pela diferença entre as cotas MHWS e MLWS.

As amplitudes das constantes S2, M2, K1 e O1 foram também adotadas para a obtenção do Fator de Forma, por meio da metodologia proposta por Defant (1958 apud Pugh, 1987), permitindo ponderar a importância das componentes semidiurnas e diurnas. O fator é definido como a razão entre a soma das amplitudes das principais constituintes diurnas e semidiurnas. Se $0 < F < 0,25$ a maré é definida como semidiurna. Se $0,25 < F < 1,5$, ela é do tipo semidiurna com desigualdade diurna. Se $1,5 < F < 3,0$ é do tipo mista. Se $F > 3,0$ é definida como diurna (Pugh, 1987).

O resultado de variação média da maré de sizígia, obtido na análise harmônica subsidia também a determinação do Parâmetro de Variação Relativa da Maré ou *Relative Tide Range Parameter* (RTR), proposto por Masselink e Short (1993). Tal parâmetro é calculado pela expressão: $RTR=TR/H_b$ (onde: TR = variação média da maré de sizígia em metros e; H_b = altura significativa, em metros, das ondas na arrebentação) e permite classificar a região em função da forçante predominante.

A amplitude média da maré de sizígia igualmente permite a classificação quanto à magnitude da variação do nível do mar, proposta por Davies (1964), variando entre: micromaré (TR menor do que 2 metros); mesomaré (valores entre 2 e 4 metros); macromaré (entre 4 e 6 metros); e hipermaré (casos em que a TR é maior do que 6 metros).

3.2.3 Regime de ondas

Preliminarmente foi realizada uma aferição das condições de ondas e correntes com uso do equipamento Vector 3D (ADV, *Acoustic Doppler Velocimeter* - Nortek AS). O aparelho possui um feixe transmissor, que emite os trens de pulso, e três receptores, que detectam o retroespalhamento do sinal devido às partículas em suspensão. O desvio na frequência original (*doppler*) é função da velocidade destas partículas e pode ser referenciada ao aparelho por meio de bússula e sensor de inclinação interno. Foram considerados como valores fixos a salinidade de 35ppt e a velocidade do som de 1525m/s e estabeleceu-se uma taxa de aquisição de 4Hz, intervalada a cada 1200s. O ponto de fundeio dista cerca de 160m do sopé da rampa e o período de aquisição de dados foi das 9h até às 17h do dia 06/02/2023, nesta mesma posição. Nesta ocasião os registros de velocidade do vento variaram entre 5 a 25 km/h, sem precipitação, com sol entre nuvens.

A ondulação observada visualmente ao longo do dia foi de baixa altura e períodos curtos, com características bastante homogêneas ao longo do período aquisitivo. A maré astronômica foi de sizígia, com baixamar às 9:50 e preamar às 15:20, registradas pelo marégrafo da Ilha Fiscal.

Para o processamento dos dados referente à velocidade das correntes, foi utilizado o *software* Matlab, com rotina já adotada pelo LDSC para tal fim. Na análise estatística dos valores de corrente, adotaram-se os valores absolutos de velocidade, independente da direção. Em sua representação gráfica, foi priorizada a resultante do movimento horizontal, em detrimento da velocidade vertical, em atendimento ao objetivo do estudo. Já para os dados de ondas, empregou-se o *software Extract Wave*, da própria fabricante do equipamento.

A prospecção inicial mostrou condições de ondas e correntes com magnitudes máximas de 5 cm e 0,5 m/s, respectivamente, consideradas muito baixas para a faixa de operação do equipamento, ensejando um ajuste na metodologia. Em função dos resultados obtidos neste fundeio preliminar, a metodologia de aquisição de dados de ondas e corrente foi adaptada para a faixa de valores esperados.

Uma vez que a altura de ondas observada se encontrava muito próximo ao limite mínimo de sensibilidade do equipamento, passou-se a medir semanalmente a onda na altura da arrebentação, por meio de gravação de vídeo, com uso de régua (Figura 13).



Figura 13 – Ajuste de metodologia para medição de onda (Fonte: acervo pessoal, agosto/2023).

A altura de onda antes do espraiamento (H_s) foi considerada como o valor médio

entre as maiores leituras realizadas no período de cada medição, as quais foram tomadas a partir da gravação. O posicionamento da régua era definido *in loco* a cada dia, após curto período de observação visual da posição de quebra das ondas, sendo sempre no alinhamento do eixo da rampa.

Os resultados de medição local foram ainda comparados com os obtidos por meio de estimativa a partir da série temporal do vento, conforme será apresentado na seção 3.2.1. Como o desenvolvimento das ondas pode ser limitado por diversos fatores, Young (1999) destaca a duração do vento e o comprimento da pista (*fetch*) por fornecerem informações relevantes sobre os processos físicos responsáveis pela evolução das ondas locais.

A fim de viabilizar a comparação, a transformação da altura significativa da onda em altura na quebra adota a formulação proposta por Komar e Gaughan (1972), onde γ_b é a razão entre a altura de onda na quebra e a profundidade local, e foi adotado valor constante de 1,23, correspondente à média dos valores obtidos em campo:

$$H_b = \left(\frac{\sqrt{g \cdot \gamma_b}}{4\pi} * T * H_s^2 \right)^{2/5} \quad (\text{Equação 4 – Altura de onda na quebra})$$

3.2.4 Regime de correntes

Para a aferição das correntes locais, foi adotado o uso de derivadores com GPS de mão, como ilustrado na Figura 14. Considerando as características da região, conforme exposto na seção 2.2, é esperada uma estreita correlação entre o regime de correntes e o das marés. Nesse aspecto, os campos foram planejados de forma a cobrir as diferentes situações de maré previstas, sendo fracionados de forma a iniciar e terminar em situações de baixa velocidade (estofas). Foram estabelecidas duas zonas distintas: uma na região bem próxima à linha de costa, limitada pela profundidade mínima de operação do instrumento; e outra um pouco mais afastada, cerca de 200 metros da praia. Os dados obtidos nestes campos foram tratados com o uso dos *softwares* TrackMaker, Excel e QGis, de forma a obter as direções e velocidades dos deslocamentos, permitindo inferir as características da corrente superficial correlata.

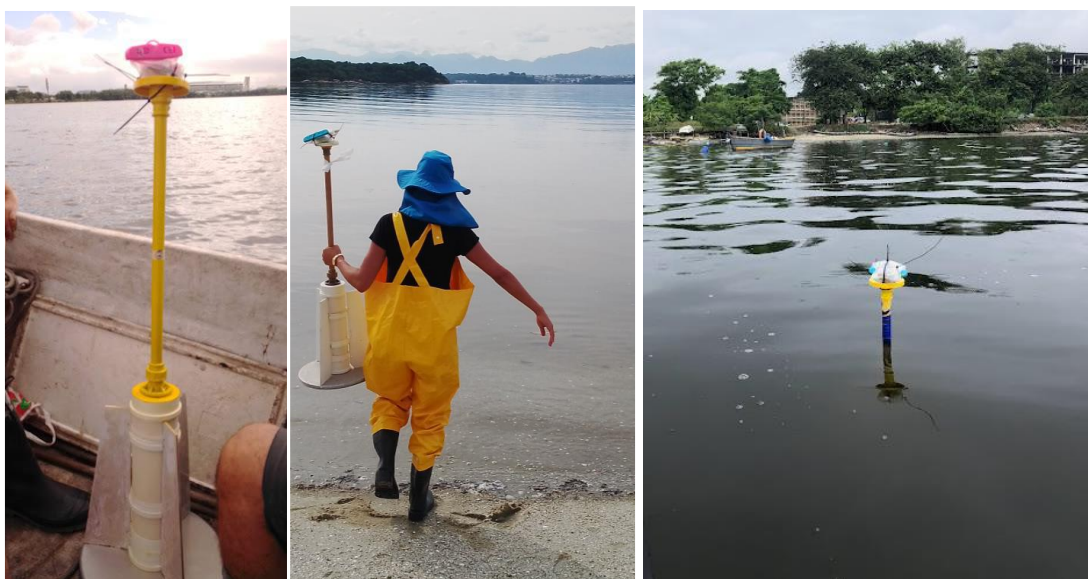


Figura 14 – Uso de derivadores para medição de correntes: o derivador; a colocação e a operação em campo (Fonte: acervo pessoal, 2023).

3.3 Comportamento morfológico

A avaliação da evolução morfológica da praia experimental incluiu a verificação do histórico da linha de costa nesta enseada, por meio de fotografias aéreas; contínuo monitoramento topobatimétrico na rampa experimental; e acompanhamento das alterações na composição granulométrica ao longo do perfil nesta rampa, no decorrer do período de monitoramento.

Para a análise da evolução morfológica a definição do período “mau tempo” considerou-o como aquele cujo conjunto de condições climáticas correspondeu ao maior efeito morfológico na praia estudada, após diferentes simulações. Observou-se também o estudo feito por Oliveira (2015), constatando que nas estações de inverno e outono predominam no litoral fluminense fatores que originam ventos e ondulações provenientes de SE, S e SSO e são responsáveis pelas condições características deste período. Desta forma, o período de “bom tempo” ficou compreendido entre as estações de verão e primavera, especificamente entre os dias 24/09 e 20/03, e o de “mau tempo” entre os dias 21/03 e 23/09.

3.3.1 Verificação da tendência de erosão por meio de fotogrametria

Uma análise preliminar de imagens de satélite disponíveis na plataforma Google Earth, adotando as imagens mais antiga (1975) e mais recente (à época, 2021), indicou um recuo da linha de costa de cerca de 30 metros, ordem de grandeza muito próxima à

resolução espacial das imagens. Como a resolução das imagens de satélite mostrou-se incompatível com a magnitude da variável a ser aferida, foi solicitado ao Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP) o acesso a dados imagéticos de melhor resolução. Dentre os dados disponibilizados, foram adotadas para a análise deste estudo as ortofotocartas e aerofotografias listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados das imagens adotadas no estudo.

ANO	Tipo de imagens	Data do Processamento	Arquivos utilizados	Resolução/escala
2019	Ortofotocarta	Dezembro/2019	262E3	2,5 m
2009	Ortofotocarta	Não indicado	262E	2,5 m
1999	Ortofotocarta	Julho/1999	262E	5 m
1975	Fotografia aérea	Fevereiro/2024	1333 e 1410	1:8000

O tratamento das ortofotocartas fornecidas foi previamente realizado pela equipe de pesquisadores do IGEO, colaboradores do Projeto Orla Sem Lixo, onde essa pesquisa está inserida. O georreferenciamento das fotografias aéreas foi feito com o uso do software QGis, adotando transformação polinomial e reamostragem pelo método “vizinho mais próximo”. Visando a finalidade de medição de distâncias, o sistema de projeção cartográfica adotado foi o SIRGAS 2000. A definição de linhas de costa nas diferentes datas considerou a linha divisória entre o platô e a praia, por melhor representar a erosão do talude. Essa escolha permite também excluir o efeito de variação do nível do mar na alteração da linha d’água. Além disso, a distinção entre o platô e a praia adjacente fica mais evidente pela diferenciação entre as cores escuras (da vegetação baixa do platô) e claras (da areia da praia), mesmo nas imagens mais antigas, em preto e branco.

A comparação entre as linhas de costa nas diferentes datas adotou o método do Polígono de Mudança, proposto por Smith e Cromley (2012), em que é definida uma linha de base na retroárea da praia, comum a ambas as imagens, estabelecendo um polígono delimitado por esta linha de base e as linhas de costa. A diferença de área entre dois polígonos diferentes é então distribuída pelo comprimento médio entre as duas linhas de costa, fornecendo uma taxa de variação linear da costa. Para este estudo foram estabelecidos três diferentes setores ao longo da enseada, conforme a predominância dos fenômenos de erosão ou progradação: norte, central e sul.

A comparação entre as linhas de costa indicou trechos com tendências erosivas e progradacionais, bem como uma ordem de grandeza da taxa de variação. Os pontos com maiores índices foram inspecionados e fotografados, a fim de corroborar o fenômeno por

meio de outros indícios visuais.

3.3.2 Monitoramento topobatimétrico do perfil de praia

O terreno original consiste em platô plano, com cotas próximas à 2,5 m e declive abrupto na zona da linha de costa, na forma de escarpa. O desnível entre a cota do aterro e a da praia adjacente varia de 1,5 a 2 metros, neste trecho monitorado. Os perfis do terreno original e da rampa experimental estão dispostos no gráfico da Figura 15, onde as linhas cinza horizontais indicam as cotas de interesse, conforme descrito na seção 3.2.2 e listadas na Tabela 6.

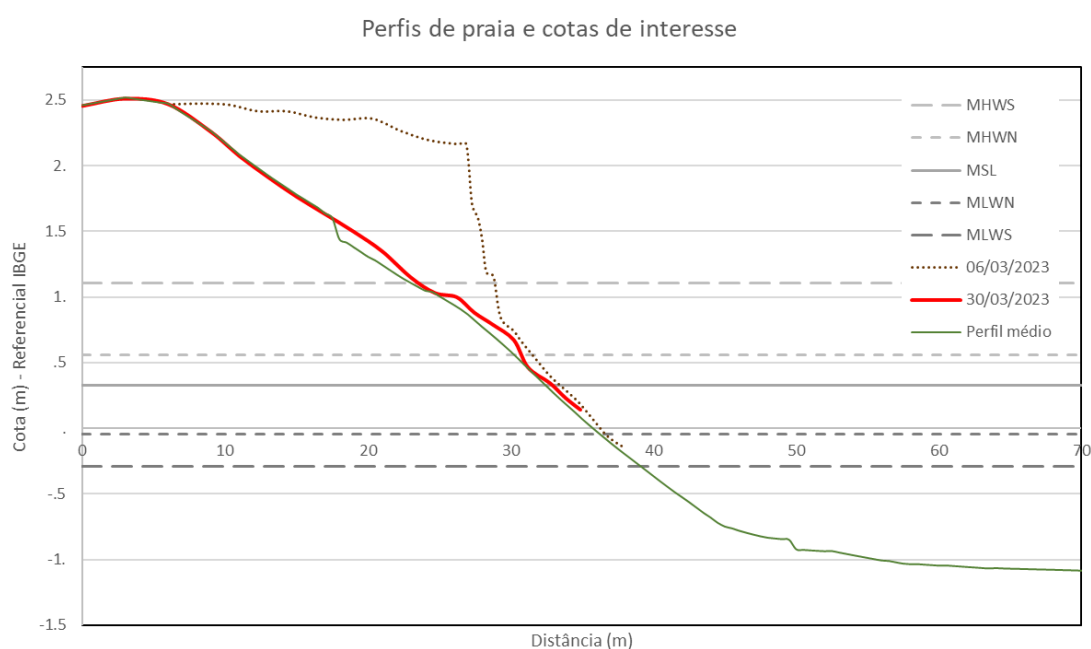


Figura 15 – Perfis do terreno inicial (06/03/2023) e da rampa recém executada (30/03/2023); a média dos levantamentos realizados ao longo da pesquisa (Perfil médio); e cotas de interesse: Média das Preamares de Sízigia ou *mean high water spring* (MHWS); Média das Preamares de Quadratura ou *mean high water neap* (MHWN); Nível Médio do Mar ou *mean sea level* (MSL); Média das Baixamares de Quadratura ou *mean low water neap* (MLWN); e Média das Baixamares de Sízigia ou *mean low water spring* (MLWS).

Foram estabelecidos três perfis para o nivelamento periódico, espaçados entre si a cada dois metros e centrados no eixo de projeto da rampa, além de dois eixos externos à área com intervenção, um em cada bordo, para servirem de comparação. Foi também estabelecida uma segunda rampa, de controle, na mesma enseada, ambas indicadas na Figura 16.



Figura 16 – Indicação de perfis para monitoramentos (Fonte: adaptado de Google Earth, abril/2023).

Os nivelamentos foram feitos inicialmente com o uso de nível ótico e posteriormente com utilização de Estação Total. A partir do dia 30/03/2023 iniciou-se o monitoramento semanal dos perfis estabelecidos, até 16/01/2024. Posteriormente, observada a baixa mobilidade dos perfis monitorados, a periodicidade foi redefinida para quinzenal. Definiu-se ainda a necessidade de levantamentos excepcionais posteriores a eventos meteorológicos extremos, tais como tempestades e ressacas. Ressalta-se que a área mais baixa do estirâncio somente é passível de nivelamento por terra em ocasiões de maré baixa, motivo pelo qual os levantamentos foram programados para dias em que fosse viável abarcar a maior distância possível.

Para o tratamento dos levantamentos topográficos iniciais foi utilizado o *software* Topograph, já para os demais levantamentos topobatimétricos é usado o software Excel, com posterior apresentação gráfica por meio dos softwares QGis e AutoCAD.

Os perfis obtidos no monitoramento foram avaliados frente às diferentes condições climáticas a fim de inferir a resposta morfológica, bem como a tendência erosiva ou não. Além disso, foram também realizados nivelamentos em 05/04/2023 e 19/05/2023 após os eventos climáticos da passagem do ciclone Bomba (02/04/2023) e aviso de ressaca (18/05/2023), respectivamente.

A declividade do perfil, juntamente com a caracterização granulométrica dos sedimentos subsidia a classificação nos estágios de dissipativo a reflexivo, proposta por Wright, Short e colaboradores (1984, apud Caliar, 2003), conforme exposto na seção 2. Além disso, esses mesmos dados permitem o estabelecimento e comparação de um Perfil de equilíbrio teórico, segundo Brunn (1954), onde x é a posição horizontal ao longo do

perfil, A é função do diâmetro mediano dos sedimentos e m é constante de ajuste.

$$h(x) = A * x^m \quad \text{Equação 5 (Perfil de equilíbrio)}$$

Apesar do valor amplamente adotado de $m = 2/3$, Dean (1977) observou, após medição em diversas praias que esta constante pode variar entre 0,52 a 0,82. Nesta pesquisa foram feitas algumas simulações alterando o valor da constante.

Para a comparação dos perfis de praia medidos *in loco* com o perfil de equilíbrio calculado, foi realizada a interpolação dos dados deste monitoramento com dados *offshore* previamente obtidos em levantamento batimétrico realizado em 2017, disponibilizados pelo LDSC. O perfil de equilíbrio foi calculado a partir de dados do monitoramento dos sedimentos, apresentados na seção 4.2.3, e a análise comparativa está exposta na seção 4.3.

3.3.3 Análise granulométrica dos sedimentos

Os locais de coleta foram dispostos ao longo do eixo central da rampa experimental, sempre nos mesmos pontos (projeção horizontal), de forma a identificar se ocorre alteração na composição granulométrica ao longo do tempo em cada posição, o que pode representar um indicativo de deposição ou remoção de sedimentos. A fim de comparar as diferentes amostras, foram estabelecidos como pontos de coleta as posições correspondentes aos níveis médios de preamar e baixamar de sizígia e de quadratura, além do nível médio, por serem áreas com perspectiva de atuação de maré. As cotas foram calculadas a partir da série de dados de nível do mar do ano de 2022 e suas projeções demarcadas no perfil inicial da rampa (Figura 17), sendo mantidas as coordenadas horizontais ao longo da pesquisa. As coletas e análises de sedimentos foram realizadas mensalmente.

A metodologia de caracterização dos sedimentos inicialmente seguiu o preceituado pelo Manual de Engenharia Costeira do exército norte-americano (CERC, 1984), com peneiramento a seco, adotadas as peneiras nos seguintes diâmetros: 9,5 mm, 4,75 mm (limite superior da areia), 1,68 mm, 0,841 mm, 0,425 mm, 0,25 mm e 0,075 mm (limite inferior, a partir do qual ocorrem as frações de silte e argila). Entretanto, foram observadas grande quantidade de argila aderida ao redor dos grãos bem como ineficiência no destorroamento.



Figura 17 – Indicação da posição dos pontos de coleta de sedimentos, ao longo da rampa experimental (Fonte: acervo pessoal, Agosto/2023) - acrescentado destaque nos pontos de coleta e alinhamento.

A análise granulométrica por difração a *laser* utilizou o equipamento Malvern Mastersizer 2000, com os seguintes parâmetros: obscuração na faixa de 10% a 20%, rotação fixa de 3500 rpm e 3 min de ultrassom na intensidade 10 Hz; foram realizadas três réplicas, sendo adotada a média entre elas. Por fim, os dados foram compilados e processados com o uso da ferramenta Gradistat, desenvolvida por Blott e Pye (2001).

Como a granulometria a *laser* resulta em uma distribuição volumétrica das partículas, a compilação destes resultados com os de gravimetria do peneiramento considerou a ponderação das massas específicas. Para tanto foi realizada a verificação das massas específicas dos sedimentos finos e grossos, separadamente, pelo método do picnômetro, conforme estabelecido pela ABNT NBR 16916:2021, para grãos secos.

Os descritores estatísticos monitorados foram: diâmetros médio (D_m – valor médio dos diâmetros) e mediano (D_{50} - representativo de 50% da distribuição), desvio padrão (σ - em relação ao valor central), assimetria (s - indica a predominância de uma dada fração nos caudais em relação à fração central) e curtose (k - indica o grau de seleção do caudal em relação à seleção da porção central). Tal escolha baseou-se no trabalho desenvolvido por Folk e Ward (1957), que os apontou como principais descritores a serem monitorados. Após a análise granulométrica e obtenção dos descritores, foi acompanhada a variação

temporal destes, em cada ponto de coleta, correspondentes às cotas definidas na seção 3.2.1.

Foi realizada também a identificação dos sedimentos utilizando a classificação de Larssonneur (1977) modificada por Dias (1996), aplicável para os diferentes ambientes da costa brasileira, conforme Tabela 4. Considerando o resultado de Guimarães et al. (2007) apresentado na seção 2.2, e após a verificação tátil-visual das amostras, adotou-se a premissa de que se trata de amostras do grupo litoclástico. Sendo assim, não foram realizadas análises para determinar o teor de carbonatos.

Tabela 4 – Extrato da tabela de Classificação de Sedimentos proposta por Larssonneur (1977) modificada por Dias (1996), grupo Litoclástico; Legenda: Md = Mediana; L = Lama; c = Coquina; s = Seixos; g = Grânulos; R = Rodolitos (Fonte: DIAS, 2004).

SUBDIVISÕES PRINCIPAIS	SEIXOS, COQUINAS OU RODOLITOS L < 15%; s+c+r > 50%		GRANULOS L < 15%; s+c+r < 50% Md > 2mm		AREIAS L < 15%; areia + lama > 50% Md < 2mm					SEDIMENTOS LAMOSOS L > 15%		
	SEIXOS LITOCLASTICOS		GRANULOS LITOCLASTICOS		AREIAS LITOCLASTICAS					LAMA TERRIGENA		
SEDIMENTO LITOCLASTICO carbonatos < 30%	s+c+r > 70%	s+c+r < 70%	s+c+r > 15%	s+c+r < 15%	15% < superior a 2 mm < 50 %		superior a 2 mm < 15%			L < 25%	25% < L < 75 %	L > 75%
	SL1a cascalho litoclástico	SL1b cascalho litoclástico	GL1a grânulos litoclásticos c/cascalho	GL1b grânulos litoclásticos	s+c+r > g AL1a areia litoclástica c/cascalho	g > s+c+r AL1b areia litoclástica c/ grânulos	0.5 a 2mm. AL1c areia litoclástica grossa a muito grossa	0.25 a 0.5mm AL1d areia litoclástica média	0.05 a 0.25mm AL1e areia litoclástica fina a muito fina	LL1a lama terrigena arenosa	LL1b lama terrigena arenosa	LL1c Lama terrigena

4 Resultados e discussões

4.1 Caracterização física da Enseada do Fundão

4.1.1 Regime de ventos

A Figura 18 apresenta a série temporal completa da velocidade horária do vento na Estação Meteorológica do Galeão. A velocidade média ao longo de todo o período foi de 10,7 km/h e a máxima registrada foi de 50 km/h.

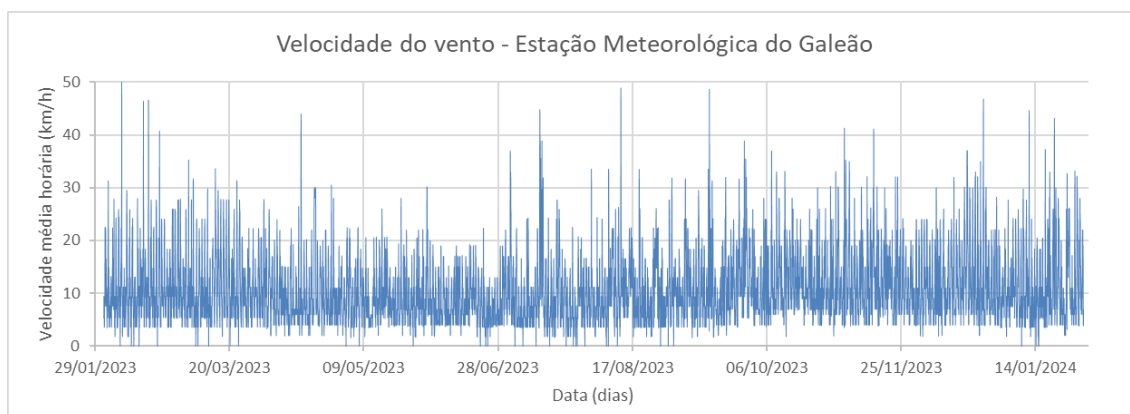


Figura 18 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período do monitoramento: de 01/02/2023 a 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

Ressalta-se que, a fim de realizar a comparação com os demais resultados, a distinção entre os períodos de “bom” e “mau” tempo segue a mesma metodologia citada na seção 3.3, correspondendo ao intervalo entre 24/09 a 20/03 e 21/03 a 23/09, respectivamente.

As Figuras 18 e 19 representam recortes da série temporal, correspondentes aos períodos de bom e mau tempo, respectivamente. A linha preta tracejada indica o valor médio de cada série, sendo de 11,8 km/h em bom tempo, e 9,7 km/h em mau tempo. Já a linha vermelha indica a média móvel a cada 48h, indicando a permanência do vento, fator importante na formação e desenvolvimento das ondas locais.

Observa-se de antemão que não há uma distinção tão grande entre as características dos ventos em cada um destes períodos, a despeito dos resultados apontados por Oliveira (2015). O período de mau tempo apresentou desvio padrão de 2,66 km/h, e o de bom tempo foi de 2,37 km/h; ambos apresentaram valores médios próximos

à média da série completa, de 10,7 km/h. Tal situação parece refletir a condição mais abrigada das águas da Baía de Guanabara, em comparação ao restante do litoral fluminense.

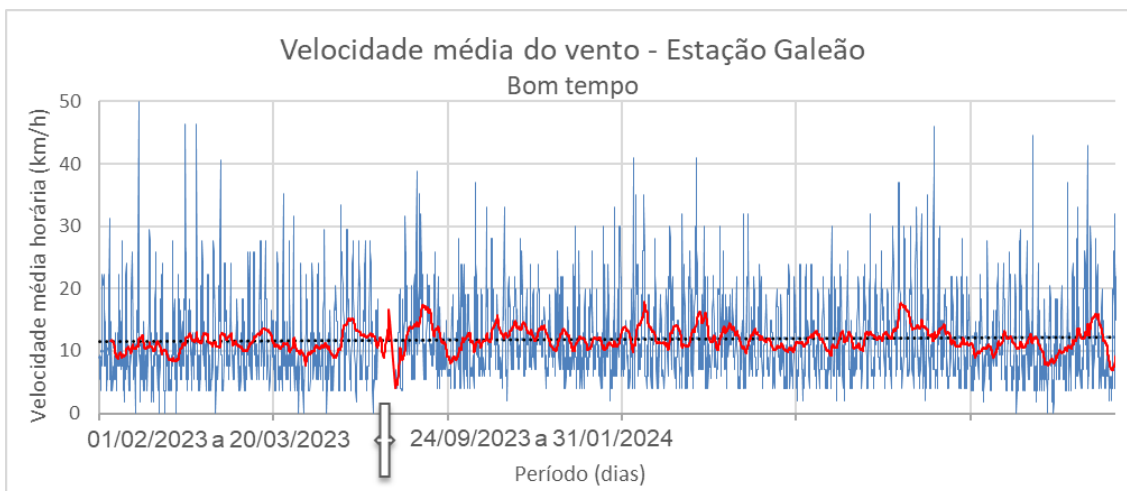


Figura 19 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período de Bom tempo: primavera e verão; a linha preta tracejada indica o valor médio e a linha vermelha a média móvel a cada 48h (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

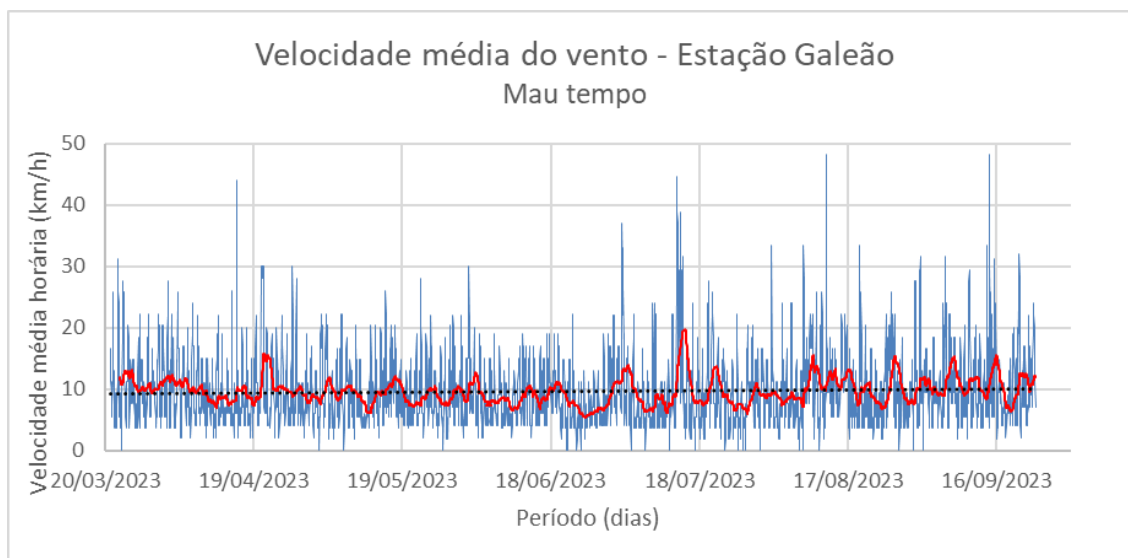


Figura 20 – Dados horários de velocidade média do vento, na Estação Meteorológica do Galeão, para todo o período de Mau tempo: outono e inverno; a linha preta tracejada indica o valor médio e a linha vermelha a média móvel a cada 48h (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

A série de dados de medição de vento local, disponibilizada pelo LAMCE, não

dispõe de registro contínuo e apresentou poucos dados coincidentes com o período do monitoramento da rampa, porém foi adotada para verificar se os ventos medidos na Estação Meteorológica do Galeão estariam compatíveis com os observados na área de estudo. As Figuras 20 e 21 ilustram a comparação entre ambas as séries.

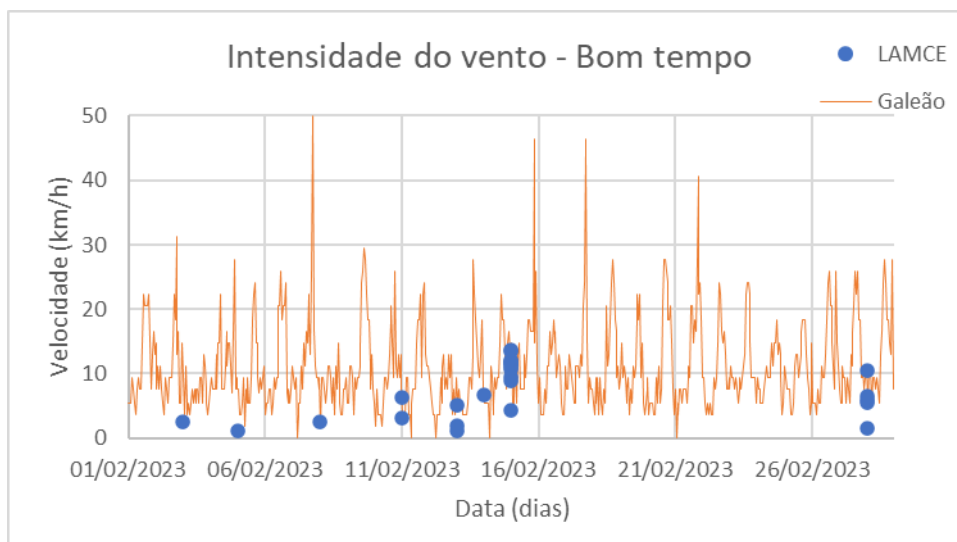


Figura 21 – Comparação entre dados de intensidade de vento obtidos nas Estações Meteorológicas do Galeão e do CENPES, no mês de Fevereiro/2023, representando o período de Bom tempo (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat e pelo LAMCE).

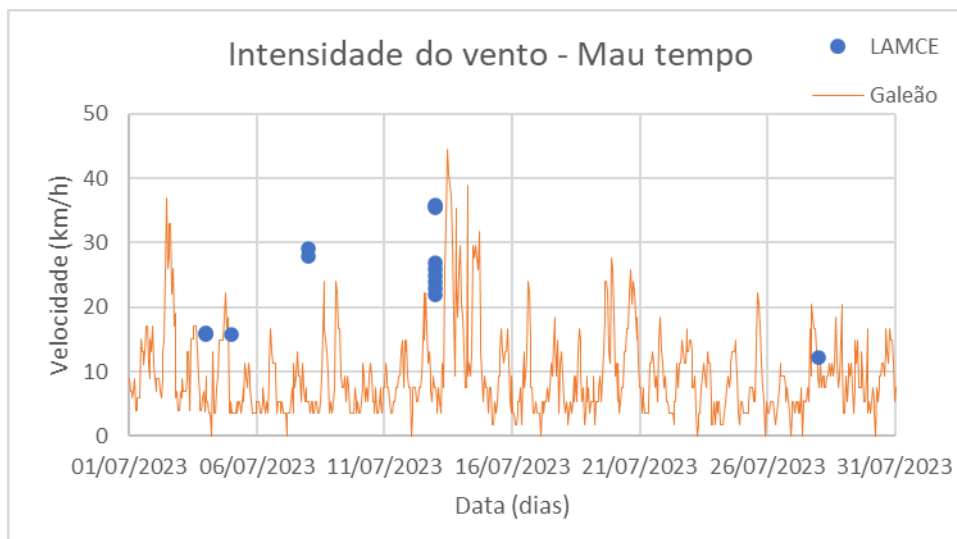


Figura 22 – Comparação entre dados de intensidade de vento obtidos nas Estações Meteorológicas do Galeão e do CENPES, no mês de Julho/2023, representando o período de Mau tempo (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat e pelo LAMCE).

Observa-se que a série do CENPES não dispõe de dados suficientes para uma adequada caracterização do clima de vento. Porém pode-se considerar que existe uma

coerência entre as duas medições, levando a entender que a estação do Galeão representaria adequadamente a situação local quanto à intensidade dos ventos. Além disso, como as ondulações que chegam à praia são formadas ao longo de toda a superfície da baía, a estação do Galeão estaria suficientemente próxima da região de interesse. Sendo assim, este trabalho adota os dados horários de vento da Estação Meteorológica do Galeão.

A Figura 23 resume na forma de Rosa dos Ventos, a distribuição dos valores médios horários de velocidade e direção do vento medidos na Estação Meteorológica do Galeão, ao longo de todo o intervalo desta pesquisa e separadamente em cada período definido na seção 3.3.

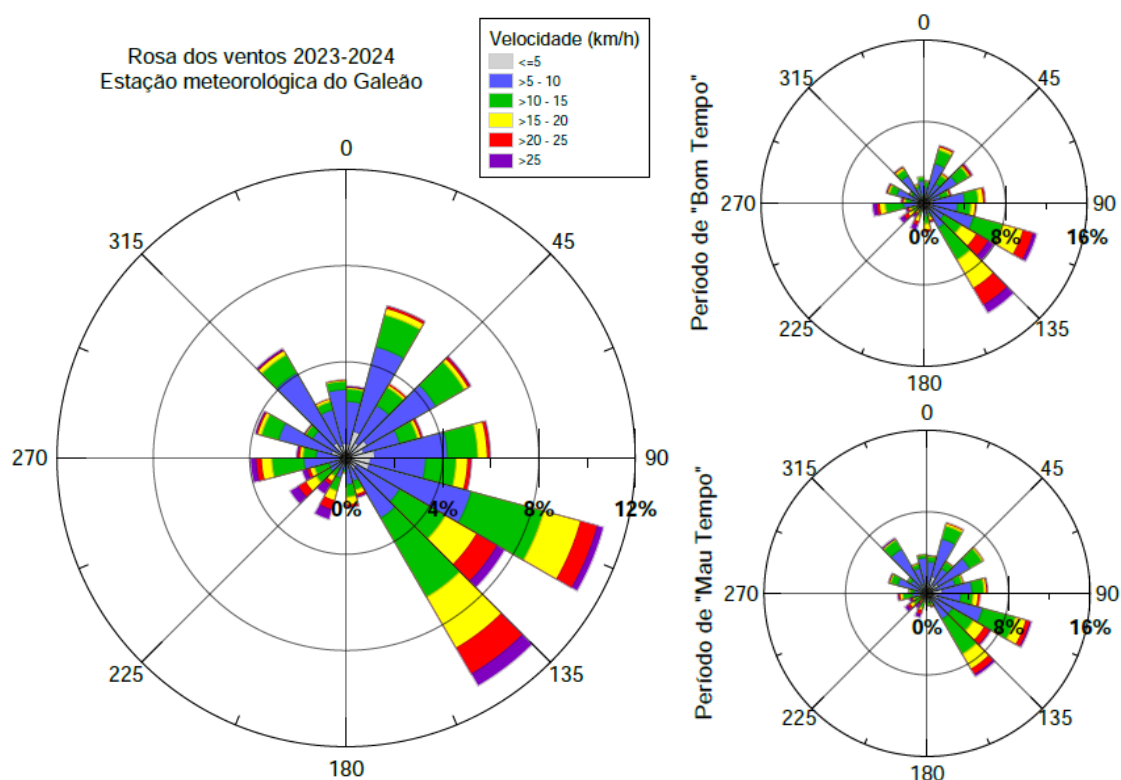


Figura 23 – Rosas de ventos elaboradas a partir das séries de dados obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024, médias horárias. À direita estão separados os períodos considerados de “Bom tempo” (acima) e “Mau tempo” (abaixo) (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

Das rosas de ventos, infere-se que a direção dominante nessa região seria de sudeste o longo de todo o ano. Entretanto, devido a incidência de ventos de lés-nordeste ser direta e com maior comprimento de pista, esta aparenta ser a direção reinante.

Ressalta-se que, apesar do período de bom tempo apresentar velocidades maiores, o período de mau tempo apresenta uma permanência maior de ventos de nordeste, que

encontram uma pista sem obstáculos (com incidência direta na praia experimental) para o desenvolvimento de ondas, propiciando as condições mais severas nesta enseada.

A Figura 24 ilustra o posicionamento da Enseada do Fundão dentro da Baía de Guanabara, apontando dois principais casos de pistas de vento para a formação de ondas locais. Já é possível observar que, devido sua localização dentro da baía, a pista fica limitada às suas dimensões, restringindo a altura das ondas locais.

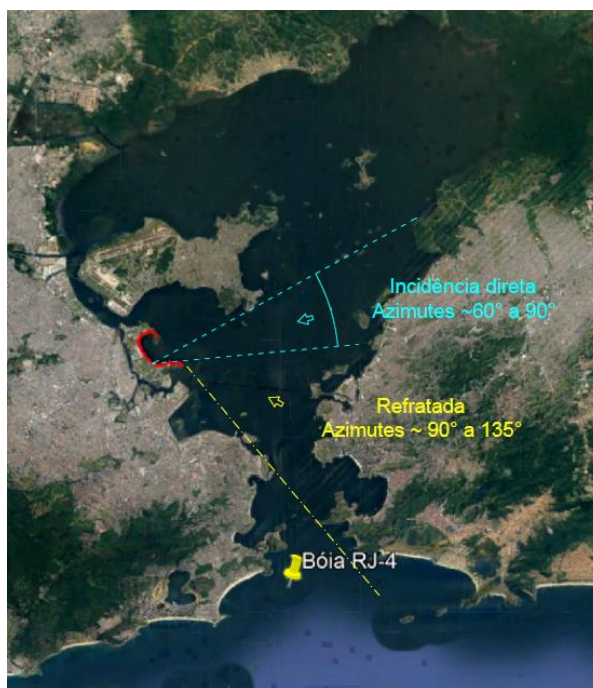


Figura 24 – Identificação das possíveis pistas de vento para a formação de ondas locais, com indicação dos azimutes aproximados; SRC: WGS 84, sem escala (Fonte: Adaptado de Google Earth Pro, dezembro/2020).

Para a estimativa de altura de onda a partir do vento, foram estabelecidos dois principais grupos de incidência, conforme as considerações apontadas na Figura 24: incidência direta para os ventos com azimute entre 60° e 90°, sendo adotado comprimento de pista aproximado de 17km; e incidência indireta para os ventos com azimutes maiores do que 90° e menores do que 135°, utilizando comprimento de pista de 15km até o ponto de refração. Ressalta-se que, no comprimento de pista para a incidência indireta não foi considerado qualquer trecho externo à baía, mesmo quando o alinhamento indicaria essa possibilidade. Isso se deveu ao fato de o monitoramento das ondas e ventos na boia RJ-4 e na rampa experimental terem indicado que as ondas oceânicas não conseguem atingir a enseada do Fundão, encontrando uma descontinuidade na pista, conforme será discutido

na seção 4.1.3. As demais direções de vento foram desconsideradas para a formação de ondas, por falta de comprimento de pista. A Figura 25 apresenta os resultados de altura de onda na praia, estimados a partir da série diária de ventos da Estação Maregráfica do Galeão.

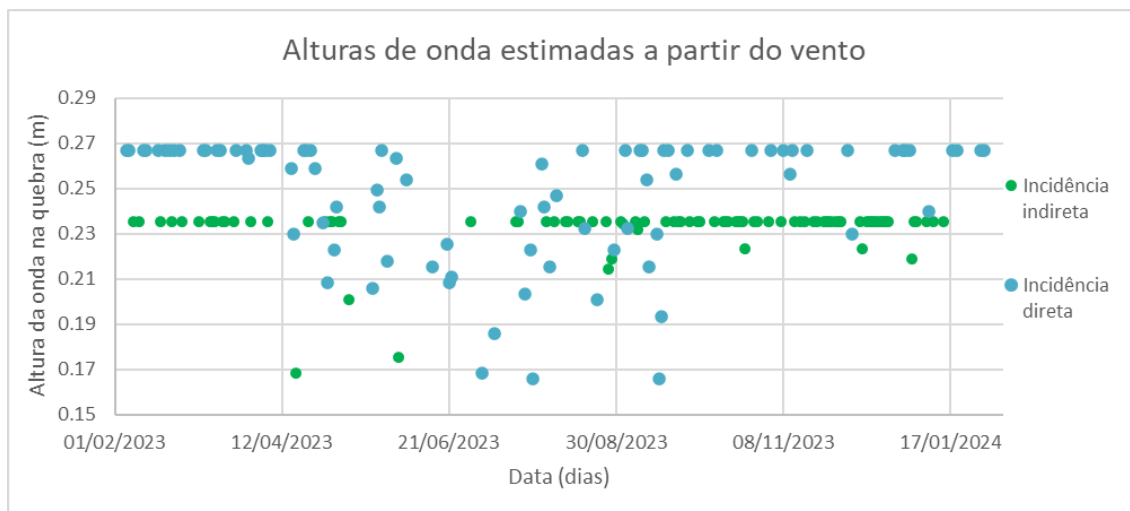


Figura 25 – Alturas de onda na quebra, estimadas a partir dos dados diários de vento obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

Os ventos com incidência direta apresentaram velocidade média de 2,73 m/s e resultaram em estimativa de ondas com média das alturas médias de 25 cm. Já os de incidência indireta resultaram em altura média de 23 cm, muito embora tenham intensidade média de 3,75 m/s. Tal discrepância é esperada, pois as maiores intensidades de vento são vindas de sul. Além disso, o fato de a pista do vento ser mais curta na direção sudeste, se reflete em apenas 10% das ondas atingirem seu completo desenvolvimento nesta direção. Já na direção lés-nordeste, em que a pista é mais longa e o vento menos intenso, 47% das ondas atingem a condição de mar desenvolvido (*swell*). A comparação da altura de onda estimada com o monitoramento local está discutida na seção 4.1.3, juntamente com o regime de ondas local.

Os resultados de tensão de cisalhamento estimada serão contextualizados e discutidos na seção 4.2.3, juntamente com a caracterização dos sedimentos.

4.1.2 Regime de maré

A variação de nível d'água obtida pelo marégrafo da Ilha Fiscal mostrou-se coerente com a variação da pressão ao longo do fundeio preliminar do ADV, validando a abrangência dos seus dados para a área de estudo. O nível médio do mar (MSL) obtido

pela média simples da série completa apresentada na seção 3.2.1 encontra-se na cota 0,333 metros, em relação ao referencial do IBGE, está indicado pela linha vermelha na **Figura 1** Figura 26.

A variação média da maré de sizígia foi obtida pela diferença entre as cotas MHWS e MLWS, resultando em 1,45m de variação. Segundo a classificação proposta por Davies (1964), tal valor enquadra a região como ambiente de micromaré. Oliva e Silva (2018) destacam que morfologia das praias do tipo micromaré é predominantemente determinada por processos da zona de espraiamento e da zona de surfe. Entretanto, ressalta-se que para uma melhor contextualização, este parâmetro deve ser avaliado juntamente com o clima de ondas, como será apresentado na seção 4.1.3.

A análise harmônica da série de dados apresentada na seção 153.2.1 forneceu os valores de frequência, amplitude e fase para as constantes da maré na região. As constantes mais influentes (com amplitude acima de 1 cm) estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Frequência, amplitude e fase das principais constantes harmônicas da maré na região de estudo

CONSTANTE	FREQUÊNCIA	AMPLITUDE (cm)	FASE (°)
*M2	0.081	30.056	93.00
*S2	0.083	17.277	100.42
*O1	0.039	10.710	94.39
*SSA	0.000	5.973	94.63
*K1	0.042	5.891	155.09
*K2	0.084	5.084	70.47
*M4	0.161	4.717	78.56
MSF	0.003	4.085	282.86
*N2	0.079	3.986	116.77
*MKS2	0.081	3.582	328.77
MM	0.002	3.341	101.98
*Q1	0.037	3.323	66.98
MSM	0.001	2.687	189.57
*MS4	0.164	2.261	177.69
*MN4	0.160	2.162	33.79
MU2	0.078	2.125	106.73
MF	0.003	1.940	359.41
*TAU1	0.039	1.501	140.57
L2	0.082	1.373	109.84
*P1	0.042	1.276	132.49
NU2	0.079	1.059	122.83

Os valores obtidos foram considerados compatíveis com os fornecidos pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), referentes à estação Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal).

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos para as cotas de MHWS, MHWN, MLWN e MLWS, calculadas a partir das constantes da Tabela 5, bem como o MSL supracitado. Os resultados obtidos para as cotas de interesse foram considerados compatíveis com os contantes na Carta Náutica 1501 (DHN, 2024), todos referenciados ao Nível de Redução: MSL = 0,7m; nível de meia maré ou *Half tide level* (HTL) = 0,7m; média das menores baixa-mares ou *Mean Lower Low Water* (MLLW) = 0,1m; e média das maiores preamares ou *Mean Higher High Water* (MHHW) = 1,2m. A Figura 26 traz a sobreposição das cotas de interesse calculadas, em relação à série completa utilizada.

Tabela 6 – Cotas de interesse, referenciadas ao Nível de Redução (NR) e ao IBGE.

TIDAL DATUMS	Nível reduzido NR (m)	Cota referenciada ao IBGE (m)
MHWS	1.401	1.058
MHWN	1.055	0.712
MSL	0.676	0.333
MLWN	0.296	-0.047
MLWS	-0.049	-0.392

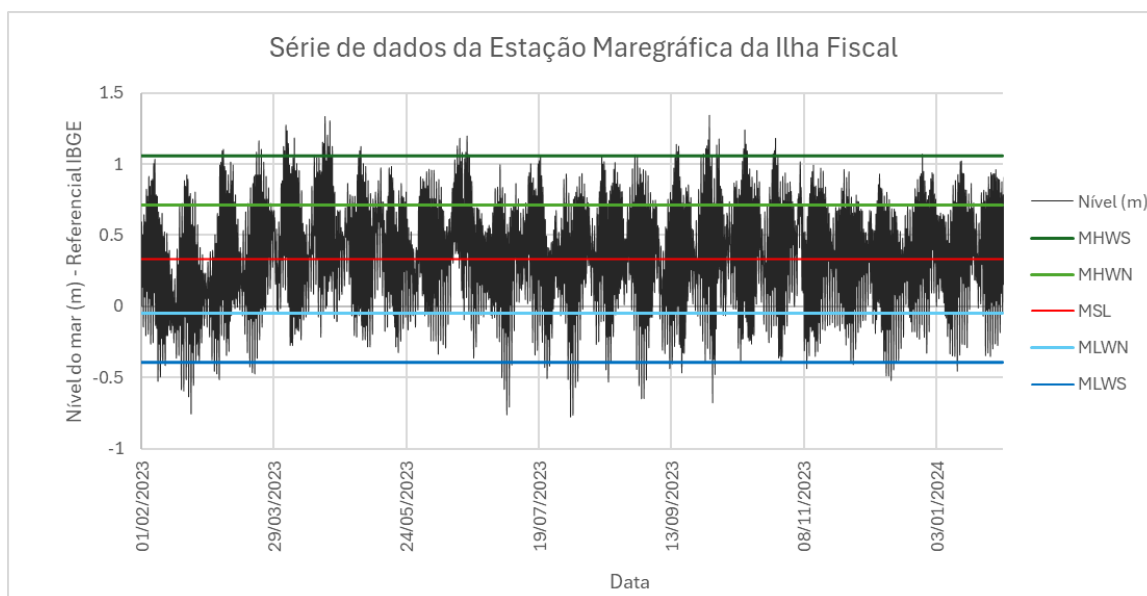


Figura 26 – Série de dados de nível do mar, obtidos da Estação Maregráfica da Ilha Fiscal, tomados a cada 5min, em relação ao referencial do IBGE; no período de 01/02/2023 a 31/01/2024; e cotas de interesse: Média das Preamares de Sízigia ou *mean high water spring* (MHWS); Média das Preamares de

Quadratura ou *mean high water neap* (MHWN); Nível Médio do Mar ou *mean sea level* (MSL); Média das Baixamares de Quadratura ou *mean low water neap* (MLWN); e Média das Baixamares de Sízigia ou *mean low water spring* (MLWS). (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).

O Fator de Forma, calculado segundo metodologia de Defant (1958 apud Pugh, 1987) citada também na referida seção, foi de 0,35, expressando uma maré com predominância semidiurna e desigualdade diurna, segundo classificação do autor (entre 0,25 e 1,5). Tal classificação vai ao encontro do constante na literatura, conforme exposto na seção 2.1.

A série de dados de nível do mar subsidiou também a elaboração da Curva de Permanência, segundo metodologia proposta por Trenhaile e Layzell (1981), a qual ilustra o percentual de tempo em que cada cota permanece submersa ao longo de todo o período da série de dados.

A Figura 27 apresenta as curvas de permanência submersa e acumulada elaborada a partir dos dados de nível do mar total, medidos no marégrafo da Ilha Fiscal. Observa-se nesta figura que a cota com maior taxa de permanência encontra-se acima do MSL, o que indica a influência da maré meteorológica na sobrelevação do nível médio ao longo do período monitorado. Além disso, este pico de permanência coincide com o trecho do terreno original em que se verifica a distinção entre talude e praia, ou seja, onde efetivamente acontece a erosão do sopé da encosta.

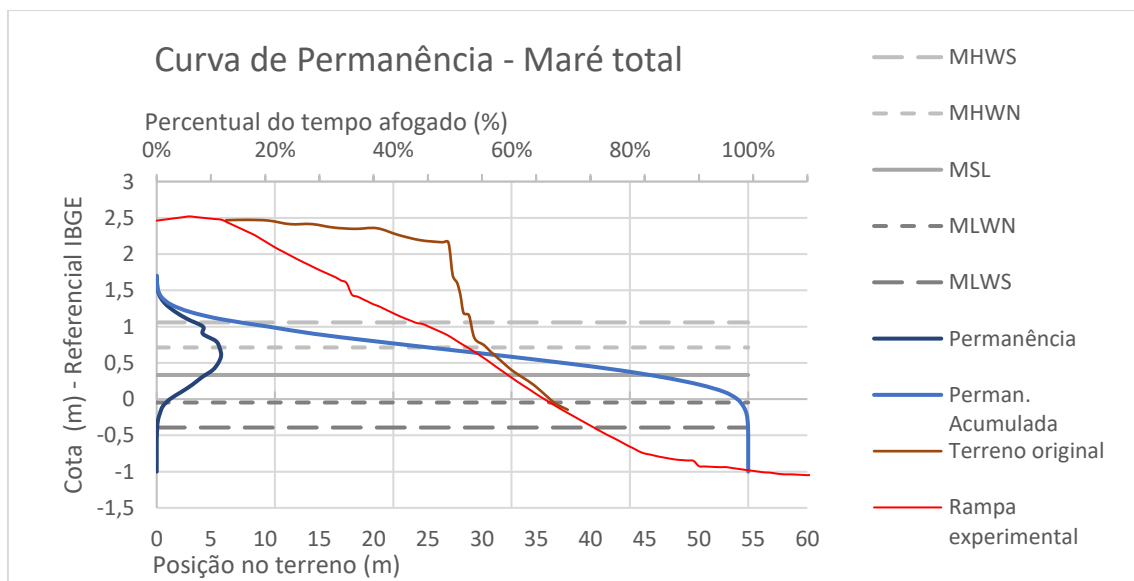


Figura 27 – Curvas de permanência submersa e acumulada, segundo série de dados do Marégrafo da Ilha Fiscal, no período de 01/02/2023 a 31/01/2024; cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).

A Figura 28 apresenta as curvas de permanência submersa e acumulada elaborada a partir da previsão de maré astronômica resultante da análise harmônica dos dados medidos no marégrafo da Ilha Fiscal. Os picos nesta curva não se apresentam tão proeminentes quanto os observados em outros ambientes de maré semidiurna, como sugerido por Pugh (1987) sinalizando influência de constantes de desigualdade diurna. O maior pico coincide com a MHWN, bem como com a faixa de maior atuação do processo erosivo, como se pode observar pela mudança de declividade do perfil do terreno original (em marrom).

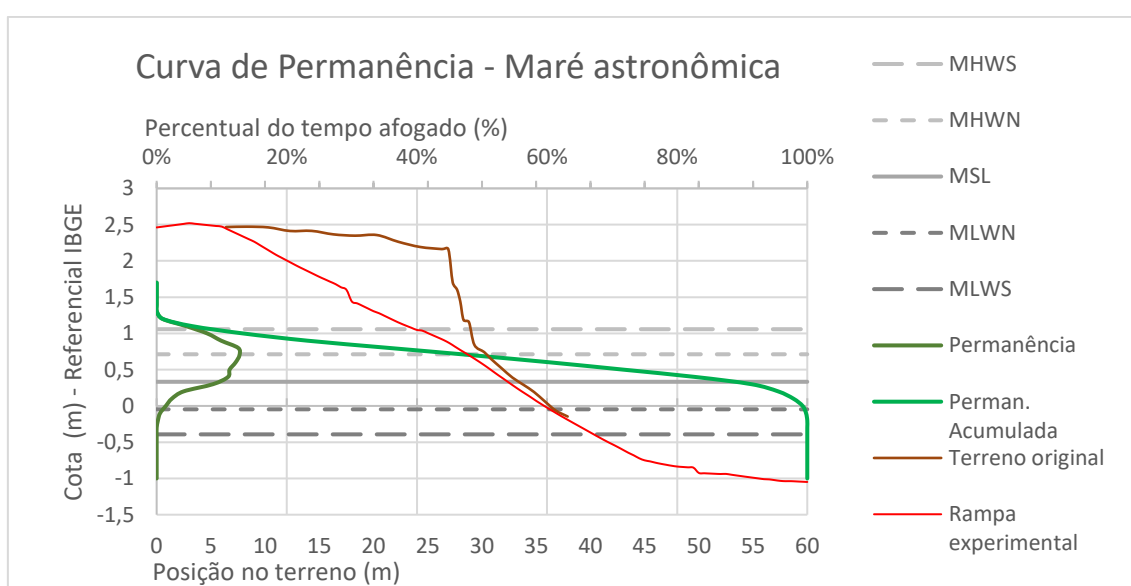


Figura 28 – Curvas de permanência submersa e acumulada, segundo previsão de maré astronômica para o período de 01/02/2023 a 31/01/2024; cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).

A comparação entre as curvas de permanência obtidas para a maré astronômica prevista e obtida a partir da maré total medida, encontra-se na Figura 29. Observa-se que a distribuição da curva da maré total abrange uma faixa ligeiramente mais ampla, o que é esperado por incluir outros fatores tais como os meteorológicos. Ainda é possível perceber que tal diferença é maior na porção superior da praia, indicando que tais fenômenos têm maior contribuição na sobrelevação do NMM. Além disso, essa curva apresenta uma maior assimetria entre os trechos acima e abaixo do pico, com declividade ligeiramente mais íngreme na parcela superior.

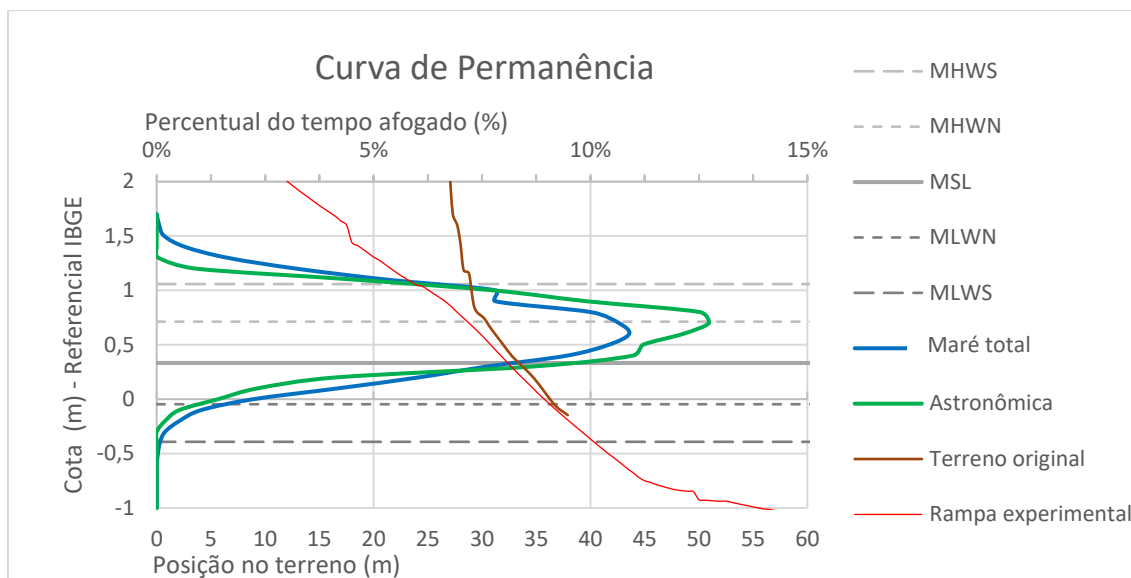


Figura 29 – Curvas de permanência submersa, segundo série de dados do Marégrafo da Ilha Fiscal (Maré total), no período de 01/02/2023 a 31/01/2024 e segundo previsão de maré astronômica para o mesmo período (Astronômica); cotas de interesse; e perfil do terreno antes e logo após a intervenção (Fonte: elaboração própria, a partir de dados fornecidos pela DHN).

Diante do exposto, destaca-se que, o regime de maré atuante na região de estudo é de micro maré, com predominância semidiurna e desigualdade diurna. A principal contribuição das ondas de maré no processo erosivo é o fato de permitir que as ondas de gravidade atinjam o sopé do talude, viabilizando a ocorrência do mecanismo de erosão da base da escarpa descrito por Komar (1976), conforme apresentado na seção 1.1.

4.1.3 Regime de ondas de vento

A Figura 30 apresenta os valores de altura significativa, período médio e direção principal, obtidos no fundeio preliminar do ADV em 06/02/2023, e em 17/05/2023, na mesma região. Ressalta-se que no dia 06/02/2023 a medição ocorreu no intervalo das 9:20h às 17h, em situação de maré enchente de sizígia, desde a baixa-mar até a preamar subsequente. Já o fundeio de 17/05/2023 se estendeu desde 8:20h até 17:00h, iniciando na enchente de sizígia até parte da vazante subsequente.

Observa-se que os valores de altura significativa das ondas se mostraram baixos, bem como seus períodos; apresentando valores médios de 3 cm e 3,6 s no levantamento de 06/02/2023 e 5,6 cm e 4,8 s em 17/05/2023. Destaca-se que a direção das ondas é limitada pela conformação geográfica da enseada, predominando no quadrante noroeste, mas não chega a ser definida pela morfologia do fundo, dada a profundidade do fundeio

ser significativamente maior do que a altura de onda aferida (cerca de 3m contra poucos centímetros).

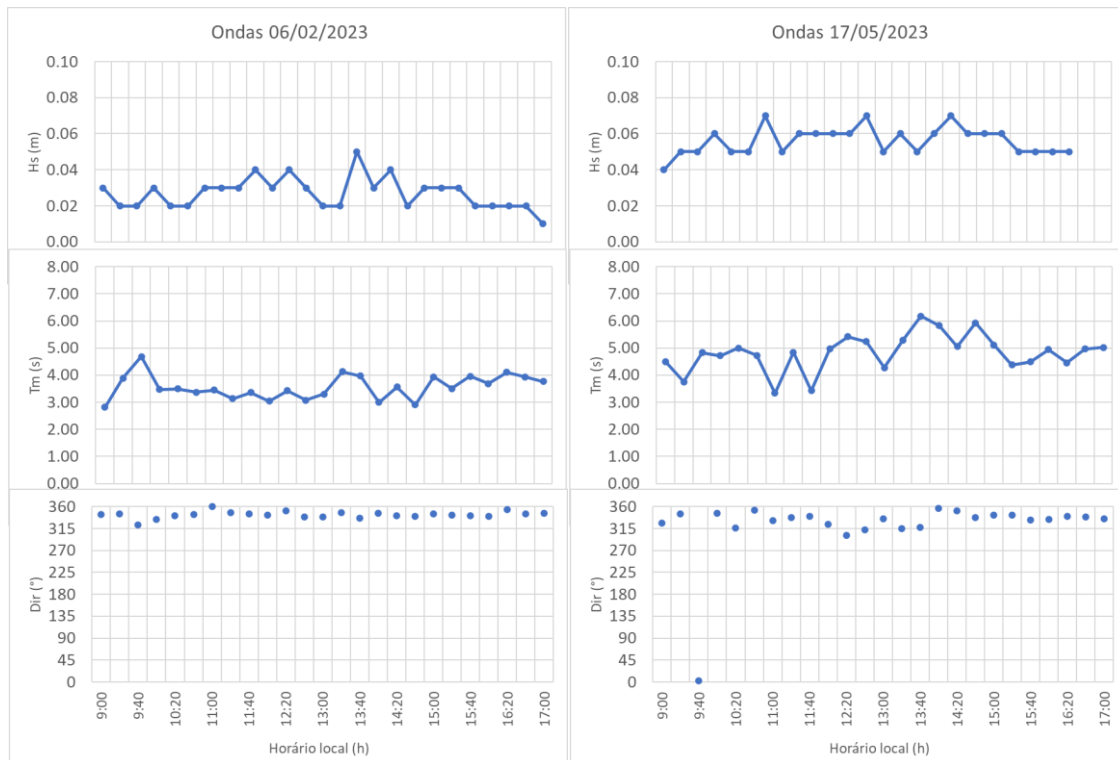


Figura 30 – Medição dos parâmetros de onda com ADV: Altura significativa (Hs, em metros), período médio (Tm, em segundos) e direção principal (Dir, em graus); à esquerda, fundeio preliminar em 06/02/2023; à direita: fundeio em 17/05/2023.

A Figura 31 traz um trecho das séries temporais já apresentadas na seção 4.1.1, com os dados de velocidade e direção do vento nos períodos de aquisição dos dados de ondas e correntes pelo ADV. Observa-se que no dia 17/05/2023, em que a altura das ondas foi maior, a velocidade e a direção do vento estiveram mais constantes, corroborando a hipótese de que a duração do vento é fator crucial para o desenvolvimento da onda.

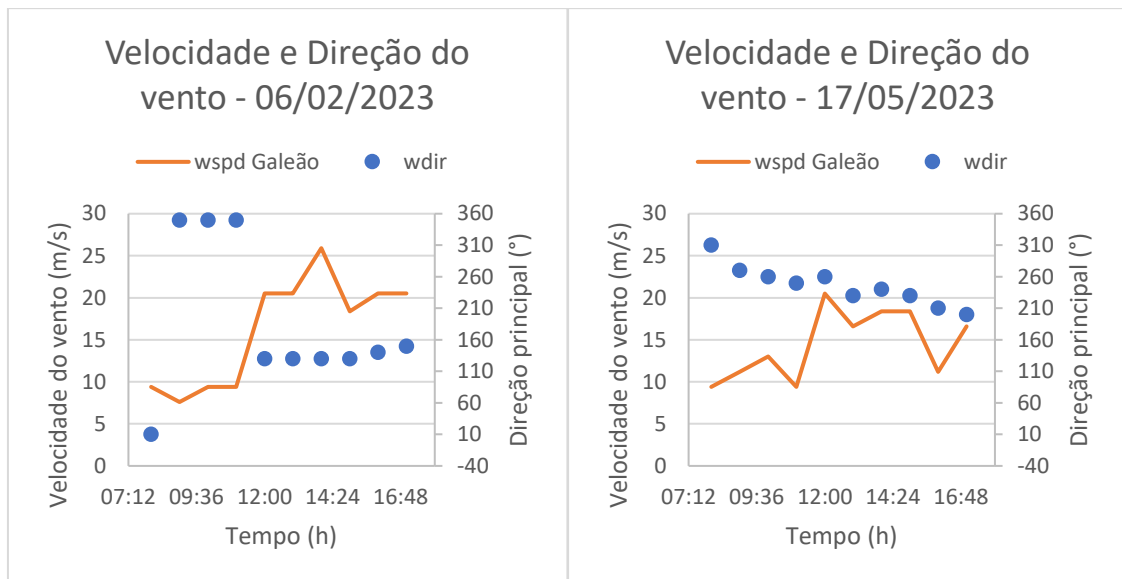


Figura 31 – Excerto dos dados de velocidade e direção do vento, nos intervalos dos fundeios; à esquerda, fundeio preliminar em 06/02/2023; à direita: fundeio em 17/05/2023 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

A série temporal completa do monitoramento semanal da altura de ondas, após o ajuste de metodologia, está disposta na Figura 32. Obteve-se um valor médio para a altura das ondas na praia de 9,11 cm, e máximo de 21 cm. Quando comparado com a amplitude de maré apresentada na seção 3.1.1, obtém-se o parâmetro $RTR=15,92$. Tal valor indica que a região está sujeita à maré como forçante predominante, segundo critério estabelecido por Masselink e Short (1993). Muito embora seja uma região de micromaré, observa-se que sua atuação predomina, devido às alturas de onda muito baixas.

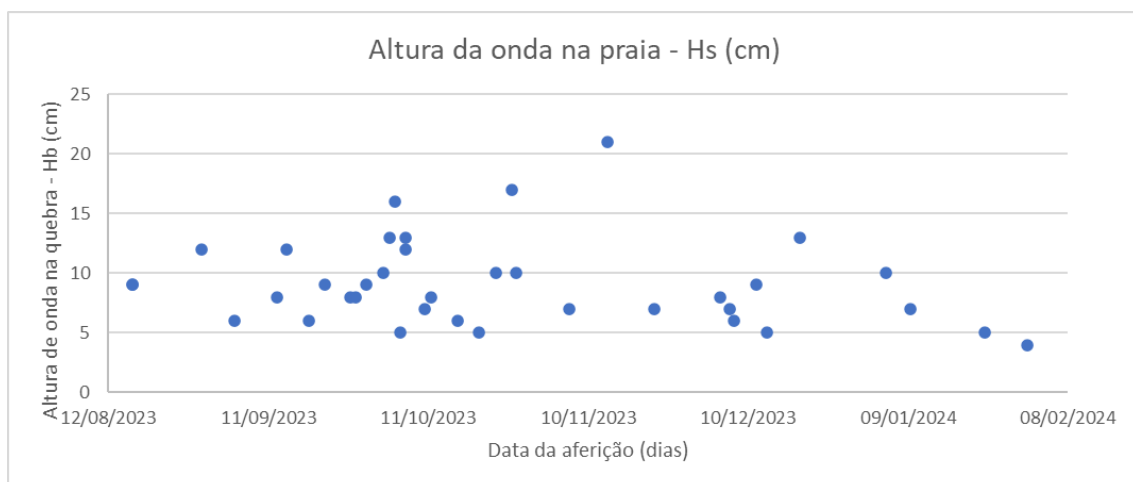


Figura 32 – Série temporal da altura média de onda na praia, aferida no alinhamento do eixo da rampa, com uso de régua e gravação de vídeo.

A fim de verificar a correlação entre o vento e a formação da onda, foram plotados nas Figuras 32 e 33 os dados de intensidade e direção do vento, respectivamente, contra a altura de onda na praia. Embora pudesse ser esperada uma boa correlação entre a intensidade do vento e a onda formada, devido ao seu mecanismo de formação e desenvolvimento, observa-se na Figura 33 que isso não ocorre. Ainda que haja uma tendência de crescimento, as alturas de onda não acompanham o ganho de velocidade do vento em toda sua proporção. Tal situação coaduna com a verificada na seção 4.1.1, onde foi observada a limitação causada pelo comprimento de pista, em cerca de metade dos casos.

Nota-se ainda que a pista não é o único fator limitante para o desenvolvimento das ondas, quando analisada a Figura 34. Mesmo tendo um comprimento de pista menor do que o aferido na direção lés-nordeste, os ventos com direção entre 120° e 180° foram responsáveis pelas maiores medições de altura de onda. Isso se deve ao fato desta direção apresentar uma maior frequência de ventos de maior intensidade, como indicado nas rosas de vento da Figura 23.

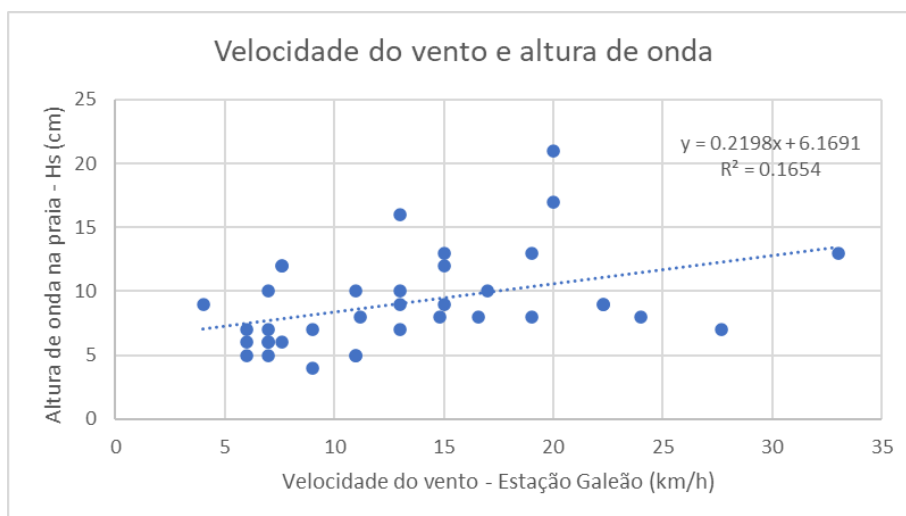


Figura 33 – Comparação dos dados horários de intensidade do vento com a altura de onda na praia, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

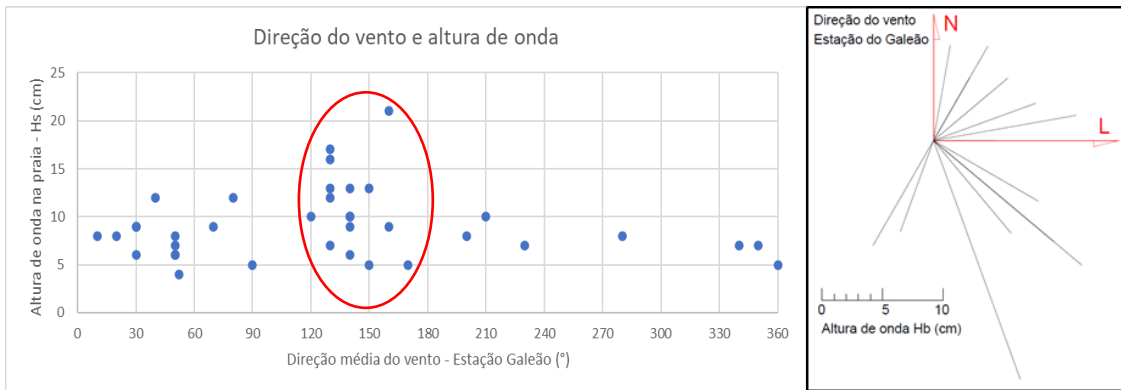


Figura 34 – Comparação dos dados horários de direção do vento com a altura de onda na quebra, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

As Figuras 34 e 35 apresentam os dados de altura significativa e direção média de onda aferidos na Bóia RJ-4, respectivamente, comparados à altura de onda na praia, medida em frente à rampa experimental, com o intuito de averiguar se as ondas de mar aberto entrariam na baía e afetariam as ondas na área de monitoramento. Observa-se na Figura 35 que não há correlação entre as alturas de onda, indicando que as ondas locais são exclusivamente formadas no espelho d’água da Baía de Guanabara. A Figura 36 examina ainda se haveria alguma direção preferencial, em que as ondas pudessem, excepcionalmente, adentrar a BG, como observado em outras localidades internas da baía. Entretanto, também não é possível apontar tal direção, indicando que, mesmo que algumas ondas de mar aberto possam chegar a pontos internos à BG, este não é o caso da Enseada do Fundão.

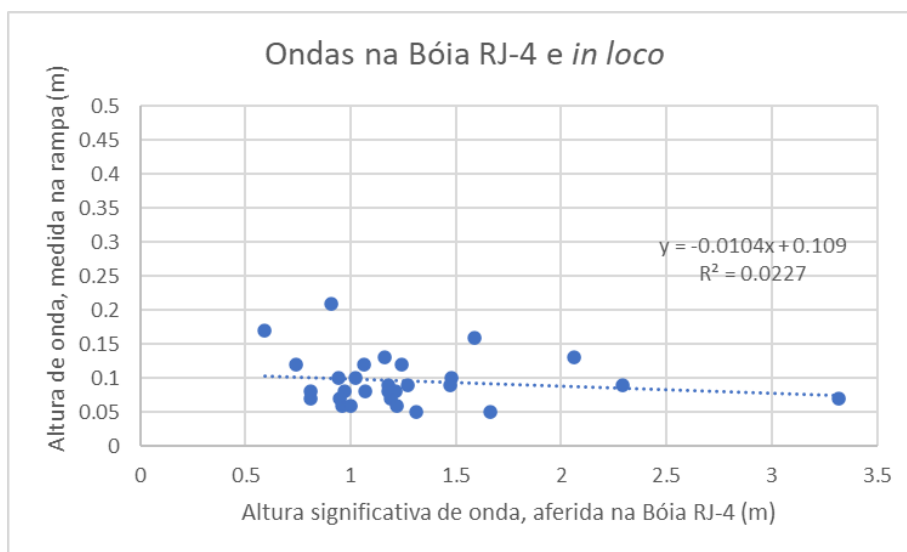


Figura 35 – Comparação dos dados de altura significativa da onda em mar aberto com a altura de onda na

rampa, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma PNBoia).

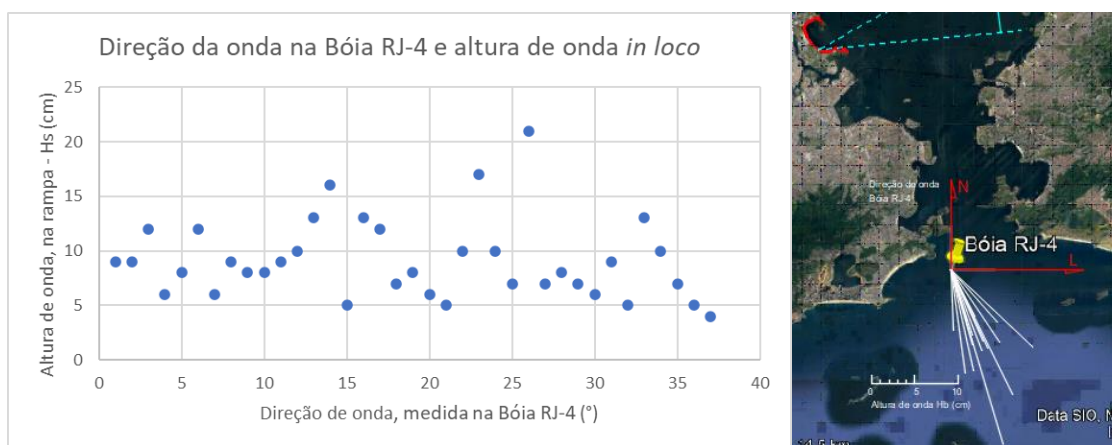


Figura 36 – Comparação dos dados de direção da onda em mar aberto com a altura de onda, aferida no alinhamento do eixo da rampa (Fonte: elaboração própria; inclui dados disponibilizados pela plataforma PNBoia).

A Figura 37 traz a comparação entre as alturas de onda estimadas na seção 4.1.1, a partir dos dados de vento, e as aferidas no local de monitoramento. Observa-se que, embora o método tenha fornecido resultados satisfatoriamente aproximados, em ordem de grandeza, a estimativa superestimou a altura de onda. Além de serem menores, os valores medidos não guardam proporção com os estimados, indicando que existem outros fatores que dificultam o desenvolvimento da onda em sua plenitude. A presença de ilhotas e a própria refração são possíveis dispersores de energia não considerados na estimativa. Além disso, o método considera o valor médio diário da velocidade do vento, porém é possível que, em alguns casos, não haja constância suficiente para aplicar essa simplificação.

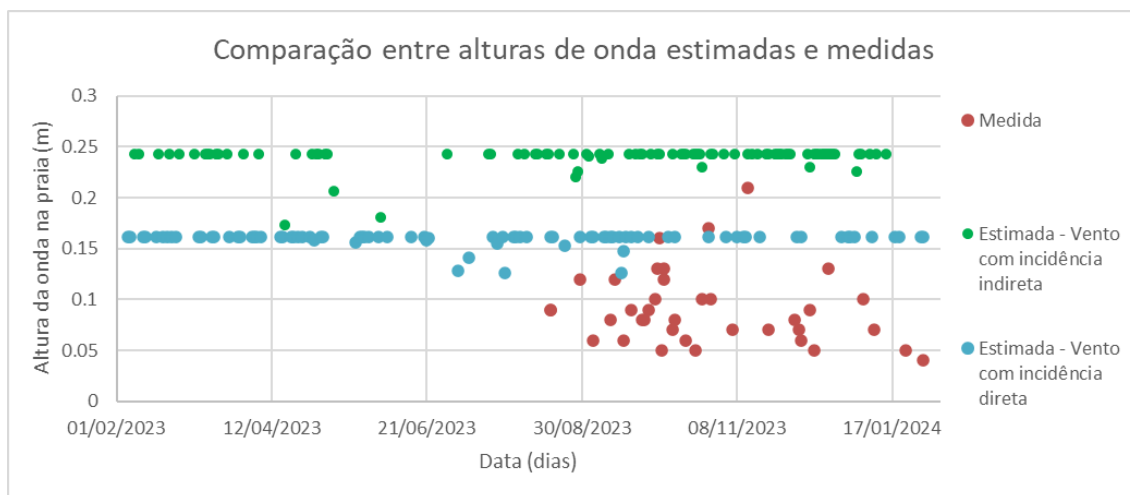


Figura 37 – Alturas de onda na praia, medidas *in loco* e estimadas a partir dos dados diários de vento obtidos da Estação Meteorológica do Galeão, no período de 01/02/2023 até 31/01/2024 (Fonte: elaboração própria, a partir de dados disponibilizados pela plataforma Meteostat).

Diante do exposto, pode-se inferir que as ondas que incidem na Enseada do Fundão são formadas pela atuação do vento no espelho d'água da Baía de Guanabara, limitadas em grande medida pelo comprimento de pista associado à sua direção, ainda que influenciadas pela intensidade dos ventos. Observou-se que os ventos atuam em cerca de metade dos dias nas principais direções formadoras de ondas, sendo metade do tempo na direção lés-nordeste, com incidência direta na rampa experimental e metade na direção sudeste, com incidência de onda refratada na Ponta do Bom Jesus. Estima-se ainda que metade das ondas incidentes não atinja seu completo desenvolvimento, por limitação no comprimento da pista, especialmente na direção sudeste, onde a intensidade é maior e a pista mais curta.

Oliveira (2015) destaca que praias orientadas perpendicularmente às ondas de maior energia, (como é o caso deste trecho da enseada em relação às ondas de incidência direta) tendem a sofrer maiores impactos do que aquelas abrigadas por promontórios rochosos ou orientadas transversalmente à ortogonal de onda, como seriam os demais trechos, ou mesmo este segmento, em relação às ondas com incidência direta. Sendo assim, se considerada a estimativa de altura de onda pelo vento, haveria maior preocupação quanto ao processo erosivo pelas ondas de incidência direta, em especial neste trecho onde elas são perpendiculares à linha de costa. Entretanto, observando conjuntamente os dados de medição local, percebe-se que as ondas de vento de sudeste, embora com menor pista, atingem as maiores alturas na praia. Tal condição será discutida conjuntamente com os resultados de monitoramento topobatimético e sedimentar, na seção 4.2.

4.1.4 Regime de correntes

No que diz respeito à caracterização das correntes na região de estudo, o resultado do fundeio preliminar do ADV em 06/02/2023, está resumido na rosa de correntes da Figura 38, com velocidades horizontais em m/s. Infere-se do gráfico que, na maior parte do tempo as correntes apresentam baixa velocidade (menores do que 0,1 m/s).

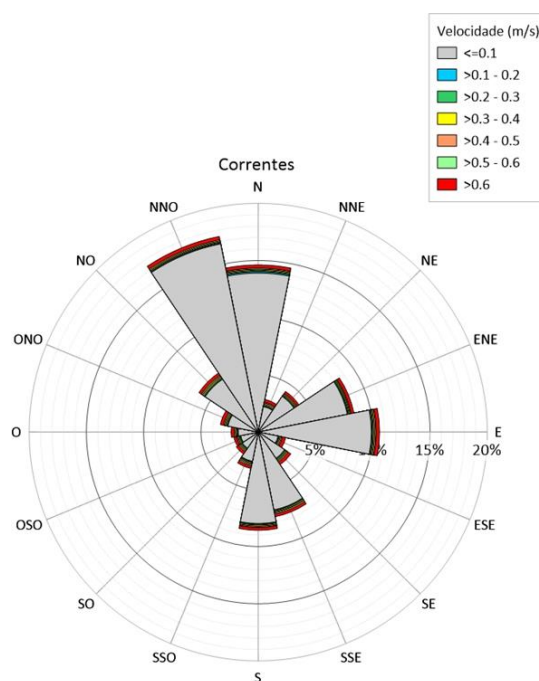


Figura 38 – Rosa de correntes, com velocidade em m/s, dados obtidos na campanha preliminar de fundeio do ADV (06/02/2023).

A Figura 39 apresenta as rosas de correntes elaboradas a partir do conjunto de dados obtidos nas campanhas de derivadores, na região mais próxima à praia possível. Observa-se que, na proximidade com a costa as correntes assumem uma maior tendência para leste do que no ponto de fundeio do ADV, com velocidades igualmente baixas. Ainda é possível destacar que a intensidade das correntes na vazante é maior do que na enchente.

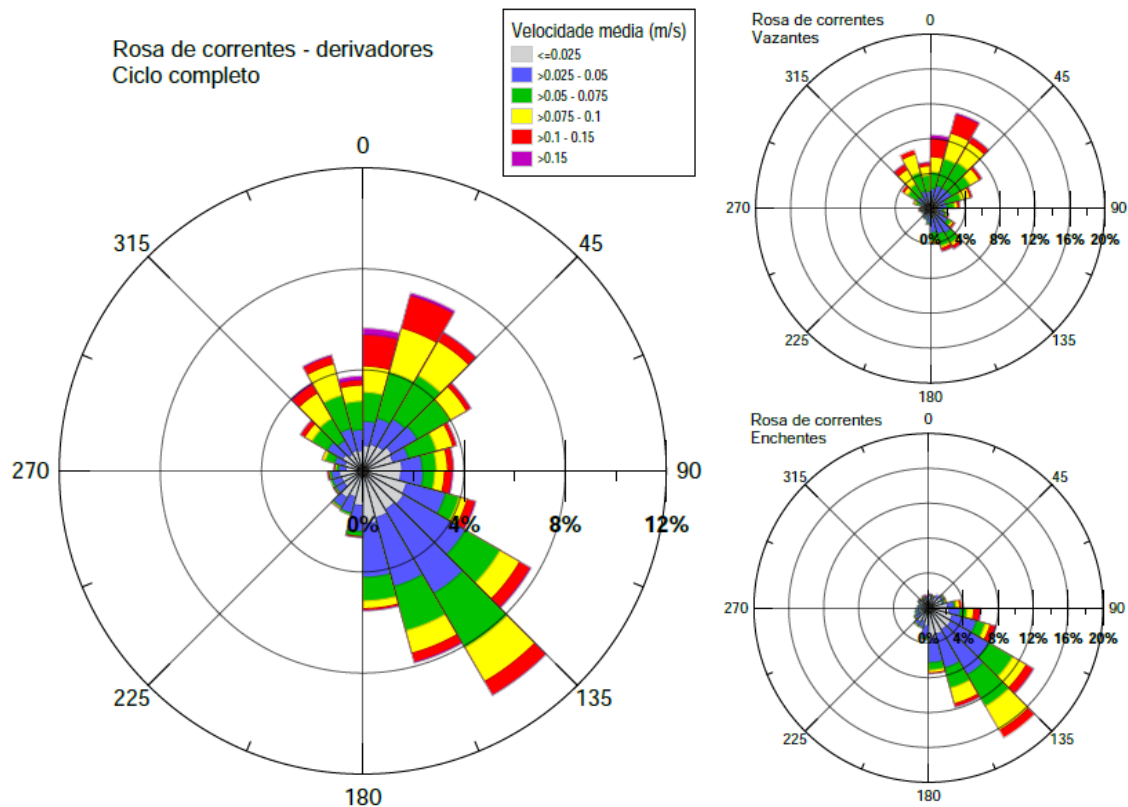


Figura 39 – Rosas de correntes, com velocidade em m/s, dados consolidados das diversas campanhas de derivadores; à direita estão separados os períodos correspondentes às marés Vazante (acima) e Enchente (abaixo).

Observa-se na Figura 39 que as direções das correntes nos momentos de maré vazante e enchente não são simplesmente perpendiculares à costa, como em praias abertas. Especialmente na maré enchente é possível perceber que as correntes assumem direção bastante peculiar, indicando a ocorrência de uma circulação local mais complexa.

Os modelos hidrodinâmicos elaborados por Buraschi (2024) indicam a ocorrência, dentro da enseada, de “zonas de convergência e divergência, que começam e terminam segundo a situação de maré (...) No meio dessas feições ocorrem os mínimos das correntes”. Especificamente na região da rampa deste trabalho, tais estudos apontam ainda para a ocorrência de “uma corrente preferencial paralela à costa que vai, aproximadamente, do ponto de referência Mangue (ex-restaurante), em direção à Escola de Educação Física e Desportos” (Buraschi, 2024). A autora associa tal fenômeno à existência de um banco de areia próximo à costa neste trecho. Infere-se dos resultados gráficos da pesquisa de Buraschi (2024), que estas correntes paralelas à costa, no trecho próximo à rampa apresentam sentido preferencial para o sudeste, nas marés de enchente sendo mais intensas próximo à preamar. Próximo à meia maré vazante o sentido da

corrente inverte, passando a ter direção para noroeste, com baixa intensidade.

Sendo assim, é possível inferir que o regime de correntes é fortemente associado ao ciclo de marés, além de apresentar baixas velocidades, não representando contribuição expressiva para o processo erosivo do talude. Uma possível atuação no transporte de sedimentos de fundo será discutida na seção 4.2.3, juntamente com o monitoramento granulométrico.

4.2 Monitoramento morfodinâmico

4.2.1 Identificação dos trechos com tendência erosiva

As linhas de costa obtidas de cada uma das imagens listadas na Tabela 3 foram sobrepostas à ortofotocarta mais recente (2019), e estão apresentadas na Figura 40. O quadro azul destaca a região onde foi observado o maior recuo linear, justamente no trecho da intervenção monitorada. Ressalta-se que, no alinhamento da rampa, foi aferido um recuo de 29 metros em relação à imagem mais antiga (1975), conforme apontado em amarelo, no quadro.

As diferenças observadas entre as linhas de costa em cada ano, no alinhamento da rampa experimental, resultam nas taxas de recuo dispostas na Tabela 7, onde é possível observar um crescimento de 31% da taxa na última década em relação aos anos iniciais. Os resultados obtidos por esta pesquisa não são suficientes para explicar esse aumento, porém pode-se considerar uma linha de continuação dos estudos a fim de correlacionar com uma possível intensificação dos eventos meteorológicos.

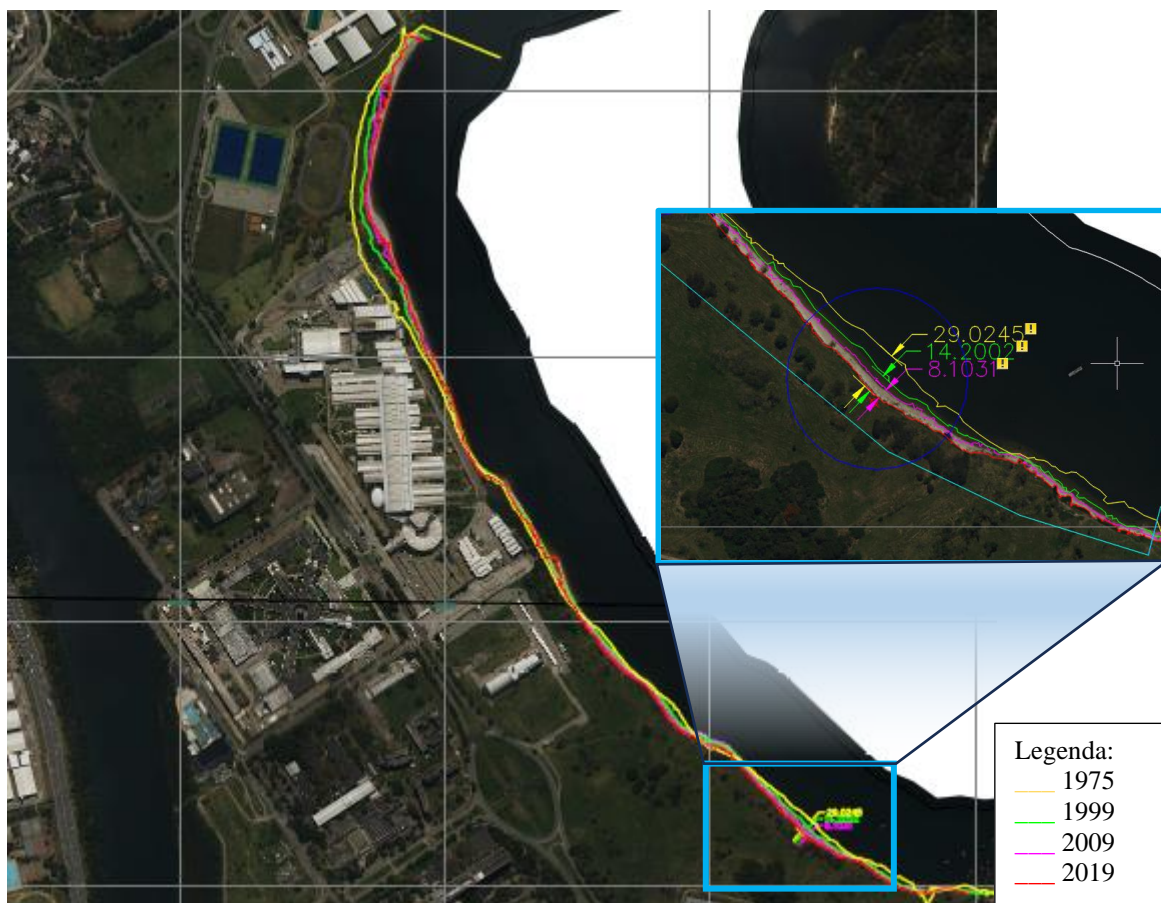


Figura 40 – Linhas de costa traçadas a partir das ortofotocartas e aerofotografias, sobrepostas à ortofotocarta de 2019 (sistema de representação SIRGAS 2000; UTM 23S; sem escala); quadro contendo destaque para a região da rampa experimental, com valores de recuo linear da linha de 2019 em relação a cada uma das anteriores (Fonte: elaboração própria a partir de imagens disponibilizadas pelo IPP).

Tabela 7 – Taxas de recuo observadas entre linhas de costa de cada ano, no alinhamento da rampa experimental (Fonte: elaboração própria, a partir de imagens fornecidas pelo IPP).

Taxa de recuo observada (m/ano)				
Ano	1975	1999	2009	2019
1975	0	0.62	0.62	0.66
1999		0	0.61	0.71
2009			0	0.81
2019				0

Para além desta medição pontual, ao longo de toda a enseada, foi adotado o método do Polígono de Mudança, proposto por Smith e Cromley (2012), sendo estabelecidos três diferentes setores ao longo da enseada, conforme a predominância dos fenômenos de erosão ou progradação: norte, central e sul, ilustrados na Figura 41.

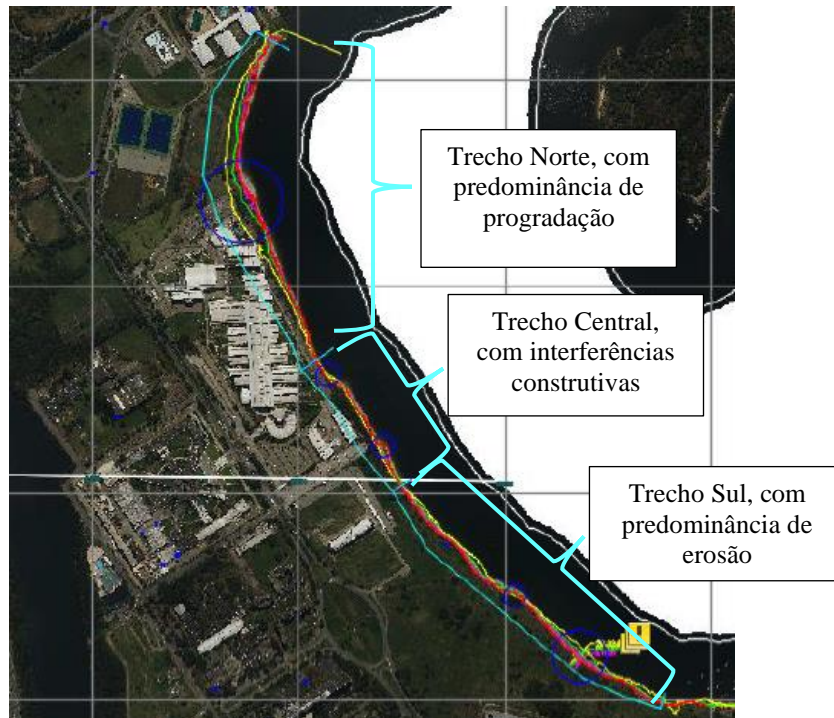


Figura 41 – Ilustração esquemática da separação dos trechos para a aplicação do Método do Polígono de Mudança, sobrepostas à ortofotocarta de 2019 (sistema de representação SIRGAS 2000; UTM 23S; sem escala).

Os resultados de variação das linhas de costa, obtidos após a linearização, estão resumidos no gráfico da Figura 42. Observando-se os resultados anuais dos três trechos conjuntamente, ressalta-se a diferença entre os fenômenos observados no primeiro período (de 1975 a 1999), onde a progradação predominava como um todo; diferentemente do aferido no período mais recente, em que a erosão predomina. Tal discrepância pode sinalizar uma mudança no equilíbrio dinâmico da enseada.

A comparação entre as linhas de costa indicou predominância da progradação no trecho norte, como sinalizado na Figura 41, porém a maior contribuição na área acrescida ocorreu entre os anos de 1975 e 1999, tendo reduzido drasticamente o acréscimo observado na última década, como pode ser inferido do gráfico na Figura 42. Já o trecho sul, apresenta o predomínio do processo erosivo, como apontado na Figura 41. Ressalta-se ainda que a contribuição dos últimos 10 anos é equivalente à verificada entre 1975 e 1999, conforme Figura 42, confirmando que o recuo em todo o trecho é análogo ao apresentado na Tabela 7.

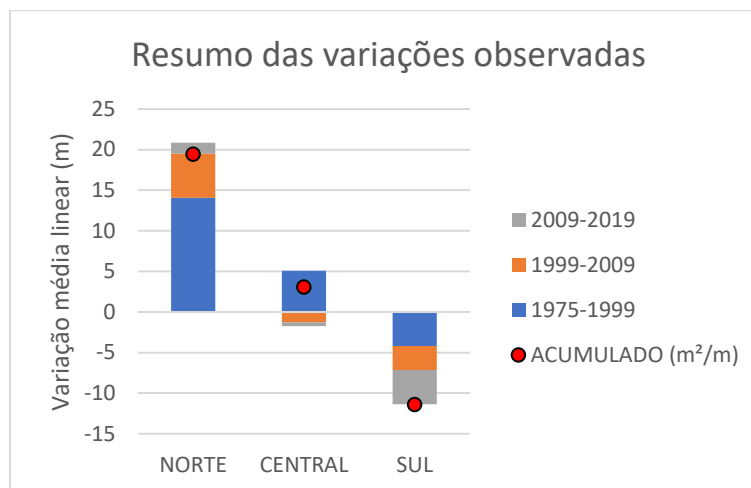


Figura 42 – Resumo das variações lineares observadas em cada um dos trechos, acumulando os períodos entre imagens disponíveis; variações positivas indicam progradação e valores negativos, erosão; o ponto vermelho marca a variação total observada desde 1975 até 2019, congregando todas as alterações, tanto positivas quanto negativas.

A variação observada nas linhas de costa ao longo dos anos, suscita um transporte de sedimentos direcionado para noroeste, com deposição final próxima à Ponta do Catalão, o que coaduna com o modelo de transporte de sedimentos elaborado por Mendonça e Ribeiro (2014), apresentado na Figura 7, bem como os resultados dos modelos hidrodinâmicos elaborados por Buraschi (2024), apresentados na seção 4.1.4. Entretanto, cabe ressaltar que esta análise observa apenas a variação em área de projeção, não se debruçando sobre alterações volumétricas e de morfologia, que poderiam abranger uma maior complexidade de processos.

4.2.2 Evolução morfológica do perfil de praia

As fotografias da Figura 43 ilustram a condição de terreno preexistente na área de pesquisa (à esquerda), bem como a intervenção recém executada (à direita). Destacam-se na fotografia da esquerda os indícios do processo erosivo em andamento: pequenos blocos de solo desagregados e com vestígios de vegetação ao pé do talude, vegetação crescendo inclinada em relação à vertical e formato côncavo da face do talude. Já a Figura 44 apresenta a situação atual da rampa experimental, após o período de monitoramento. É possível perceber que o trecho com intervenção não demonstra sinais de erosão, como os que ainda são presentes nos trechos adjacentes, mostrados nas Figuras 46 e 46 a seguir. Além disso, observa-se o recobrimento do trecho emerso por vegetação rasteira similar às preexistentes na região. Na faixa do estirâncio foi registrado o surgimento de vegetação

de restinga, semelhante às de outros trechos de praia desta mesma enseada.



Figura 43 – Fotografias da área de monitoramento, antes (06/03/2023 - esquerda) e imediatamente após a intervenção (24/03/2023) – (Fonte: acervo pessoal, março/2023).



Figura 44 – Fotografia da rampa experimental, após o período de monitoramento – (Fonte: acervo pessoal, janeiro/2024).

O monitoramento topobatimétrico resultou em perfis de praia a cada levantamento, para cada um dos alinhamentos estabelecidos na Figura 16. A Figura 45 apresenta a situação inicial e final do eixo da rampa experimental e dos perfis de controle laterais noroeste (NW) e sudeste (SE). Pode-se observar que o alinhamento de Controle NW apresentou um recuo da ordem de 2 m, o que pôde ser constatado também

visualmente no local, após a desagregação de bloco de solo, conforme ilustrado na Figura 46. A margem sudoeste também apresentou queda de bloco de solo, porém não na exata posição do alinhamento monitorado, o que pode ser visualizado nas fotografias da Figura 47, muito embora o gráfico da Figura 45 não indique essa alteração no perfil. Observa-se ainda que, ao contrário das encostas adjacentes, o perfil de praia no trecho rampeado apresentou boa estabilidade.

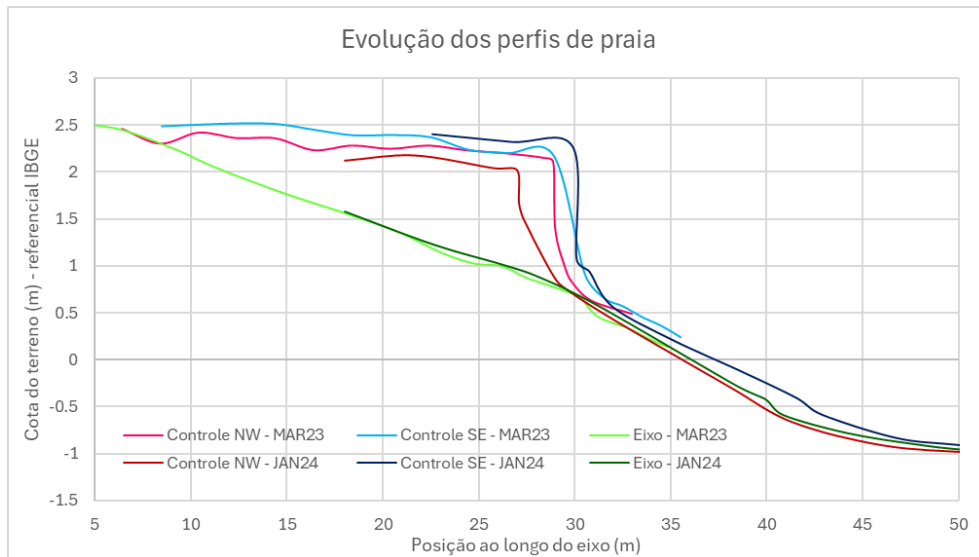


Figura 45 – Perfis de praia no início e fim do monitoramento topobatimétrico; no eixo da rampa experimental, e nos perfis de controle NW e SE.



Figura 46 – Fotografia da encosta imediatamente a noroeste da rampa experimental, em diferentes datas, com destaque para o bloco de solo desagregado – (Fonte: acervo pessoal, outubro/2023 - esquerda e janeiro/2024 - direita).



Figura 47 – Fotografias da encosta imediatamente a sudeste da rampa experimental, com destaque para o bloco de solo desagregado, visto por baixo (esquerda) e por cima (direita) – (Fonte: acervo pessoal, janeiro/2024).

A Figura 48 apresenta um compilado dos perfis topobatimétricos, levantados no eixo da rampa experimental ao longo de todo o período de monitoramento. Destaca-se que, apesar das variações medidas, a conformação geral do perfil e praia permaneceu bastante estável, apontando para a efetividade da intervenção proposta. Ressalta-se ainda que dentre estes levantamentos estão inclusas as campanhas feitas após períodos de ressaca (05/04/2023 e 19/05/2023), e mesmo assim não apresentaram diferença topográfica significativa.

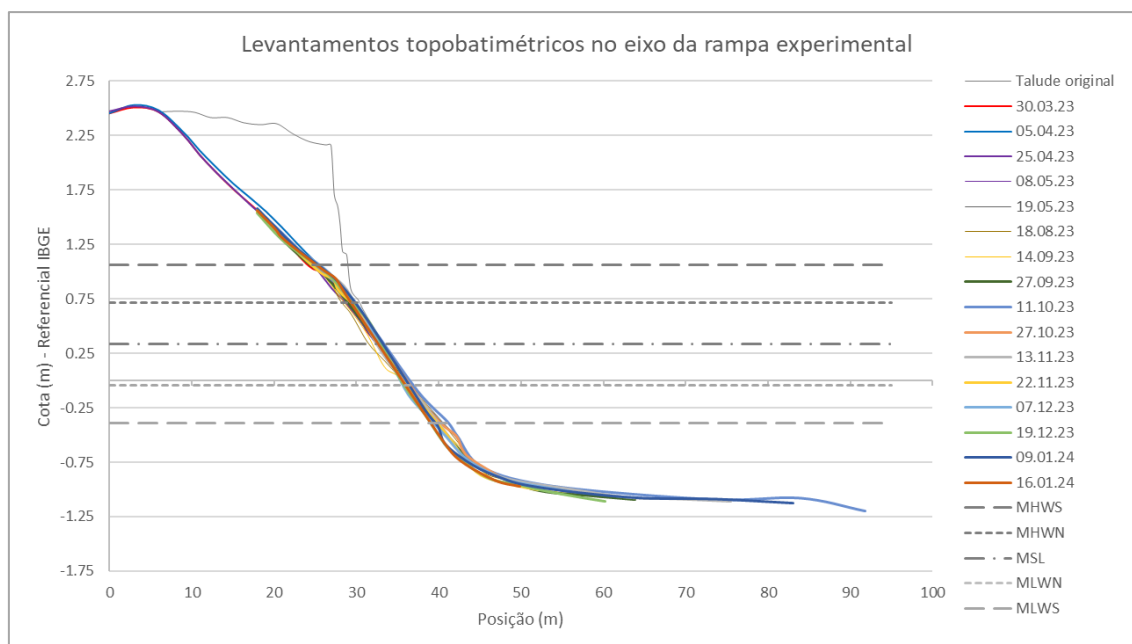


Figura 48 – Compilado dos levantamentos topobatimétricos realizados no eixo da rampa experimental ao longo do monitoramento.

Considerando a variação pontual em cada uma das campanhas, foi possível estabelecer uma análise estatística, agrupada por faixas de praia, conforme consta na Figura 49. Observa-se que a média das variações observadas entre as campanhas é bem menor do que o desvio padrão, indicando que, apesar de sofrer alterações, o perfil tende a voltar ao valor central. Tal mecanismo reforça a hipótese de estabilidade do talude conformado.

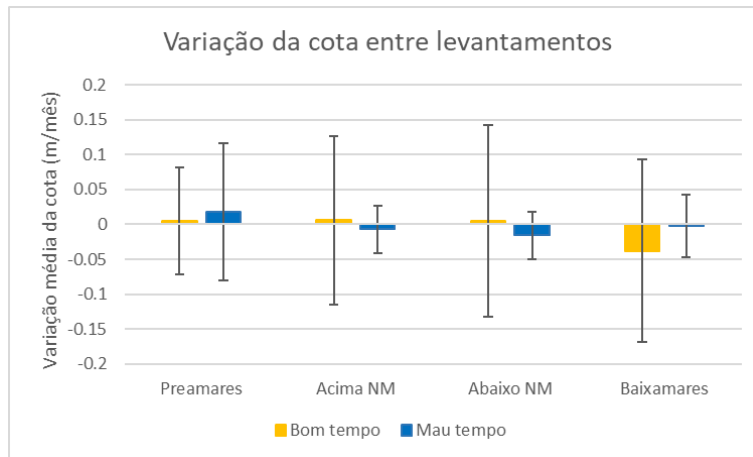


Figura 49 – Compilado dos levantamentos topobatimétricos realizados no eixo da rampa experimental ao longo do monitoramento.

A Figura 50 apresenta os trechos dos perfis topobatimétricos relativos ao início do monitoramento (30/03/2023), o fim do período de Mau tempo (27/09/2023) e o fim do período de Bom tempo (16/01/2024).

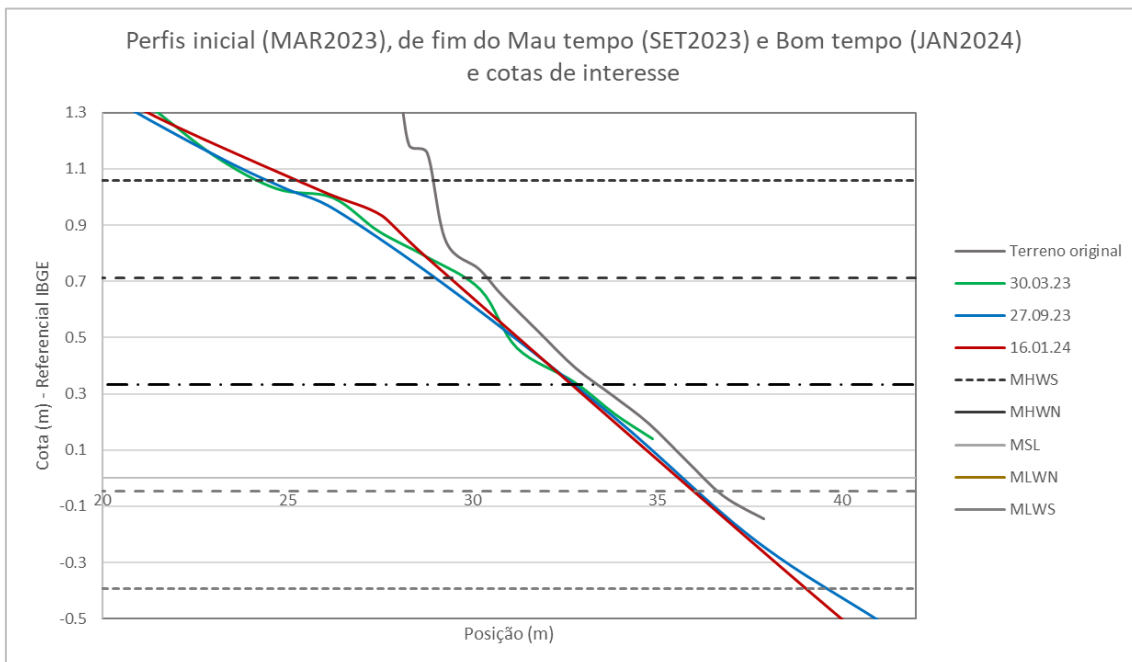


Figura 50 – Compilado de variações topográficas registradas ao longo do monitoramento, com distinção

entre as parcelas referentes aos períodos de Bom e Mau tempo; a escala do eixo à esquerda foi ampliada para melhor visualização.

Em um aspecto geral pode-se observar uma manutenção no perfil de praia, com pouca variação de cota. Visualmente, o período de Mau tempo (linha azul em relação à verde) acumula predominância de erosão. Já o período de Bom tempo (linha vermelha em relação à azul), apresenta trecho de deposição de sedimentos na parte mais alta do perfil, acima do nível médio, e erosão abaixo do MLWN. A Figura 51 e a Tabela 8 resumem essas informações de forma quantitativa, com maiores detalhes.

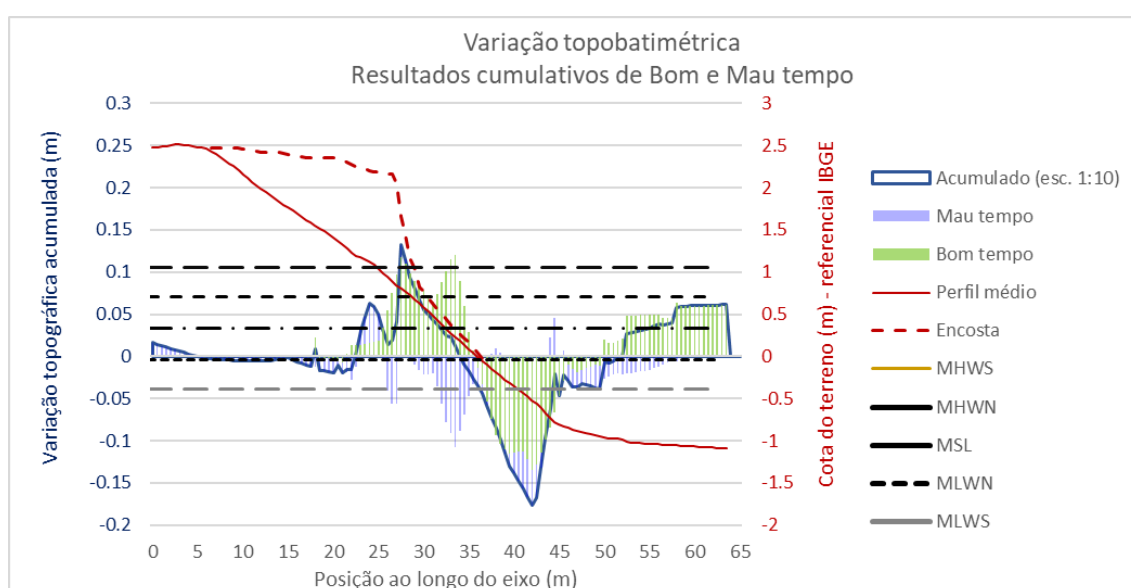


Figura 51 – Compilado de variações topográficas registradas ao longo de um ano de monitoramento, com distinção entre as parcelas referentes aos períodos de Bom e Mau tempo; a escala do eixo à esquerda foi ampliada para melhor visualização.

A Figura 51 apresenta as variações topográficas aferidas ao longo do monitoramento, agrupadas nos períodos de Bom e Mau tempo. Observa-se que a curva azul indica o resultado cumulativo após ambas as situações, apontando para um acúmulo de sedimentos na faixa acima do MSL, cuja principal contribuição teria ocorrido no período de Bom tempo. O período de Mau tempo teria inclusive reduzido esta deposição, como reportado pela literatura, neutralizando a deposição no trecho entre o MSL e o MLWN. Além disso, a curva da variação acumulada indica ainda um rebaixamento da cota mais significativo no trecho entre o MLWN e o MLWS, suscitando que esta alteração seja resultado principalmente da ação das ondas. O gráfico reporta ainda um trecho de deposição no trecho abaixo das cotas de variação de maré, com comprimento limitado a

cerca de 10 metros. Infere-se que esta região apresente baixa energia, criando condições propícias para que o material desagregado da encosta seja espalhado e acumulado neste trecho, gerando um platô, que também pode ser observado no perfil médio constante na Figura 15.

A Tabela 8 resume as variações topográficas observadas ao longo do monitoramento, segregando em resultados devidos ao período de Mau tempo e de Bom tempo, separados em quatro faixas principais, relativas às cotas de maré. O resultado acumulado representa um valor médio de acúmulo (positivo) ou remoção (negativo) relativo a todo o período do monitoramento.

Tabela 8 – Consolidação das variações topográficas de cada trecho do perfil, no eixo da rampa experimental, separados por período de Bom e Mau tempo.

	Entre preamares	Acima do NM	Abaixo do NM	Entre baixamares
Distância projetada (m)	4.86	3.71	3.88	4.05
Saldo do Bom tempo (m ² /m)	2.85	0.97	-0.37	-2.27
Bom tempo - linearizado (cm/m)	5.86	2.61	-0.96	-5.61
Saldo do Mau tempo (m ² /m)	-0.99	-1.31	-0.37	-1.51
Mau tempo - linearizado (cm/m)	-2.04	-3.52	-0.96	-3.72
Acúmulo (cm/m)	3.82	-0.92	-1.92	-9.33

Observa-se que houve um pequeno acréscimo de material na região entre preamares, porém um rebaixamento maior na região entre baixa-mares. Considerando que este trecho de praia deixou de fornecer material de desagregação do talude, faz sentido que esta remoção ocorra, possivelmente devido ao contínuo espalhamento do material a sotamar, sem a alimentação que vinha ocorrendo. Embora não seja um grande volume, é importante considerar que este movimento provavelmente continuará ocorrendo, devendo ser avaliada sua relevância e impacto no contexto da intervenção.

O monitoramento dos perfis laterais B e D, internos à rampa experimental, conforme Figura 16 da seção 3.3.2, deu origem ao gráfico da Figura 51. Estão dispostas a diferença entre as cotas à direita (D) e à esquerda (B) do eixo, a fim de verificar se há tendência de transporte longitudinal dos sedimentos. Ressalta-se que o trecho é bastante curto, dificultando uma conclusão acurada, servindo apenas de indício para um estudo direcionado. É possível observar que essa diferença esteve mais acentuada logo nos primeiros levantamentos, tendo reduzido ao longo do ano. Esse mecanismo coincide com as observações visuais de campo, com constatação de maior acúmulo de sedimentos na parcela direita da rampa (perfil D), em detrimento da esquerda (perfil B). Segundo o exposto, o perfil teria iniciado com uma pequena declividade (da ordem de 10 a 20 cm)

para direita, propiciando maior retenção de sedimentos. Dessa forma, não se pode concluir pela existência de transporte longitudinal de sedimentos, mas sim indicar uma regularização natural do terreno.

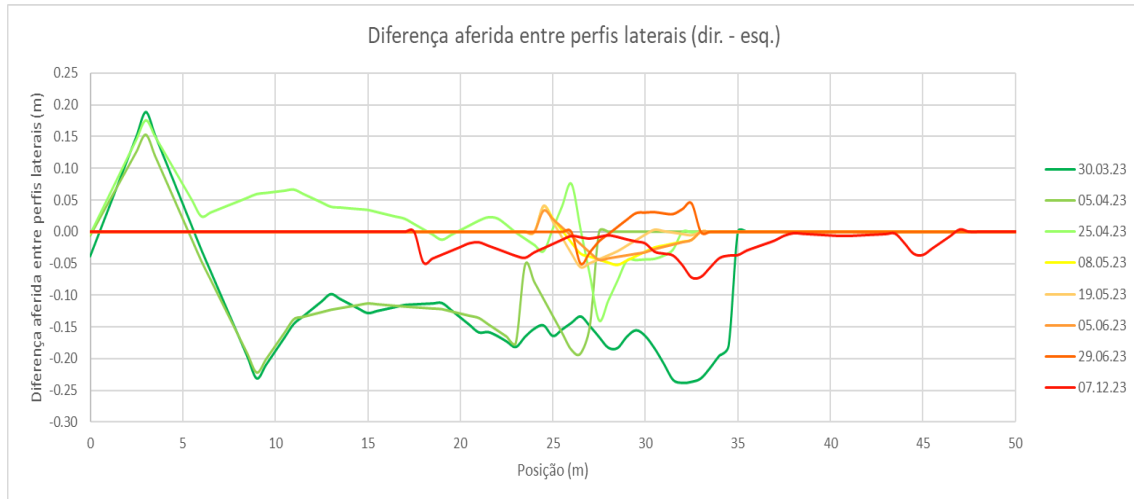


Figura 52 – Resumo das diferenças observadas entre os perfis D e B, laterais direita e esquerda, respectivamente.

A rampa de controle, indicada na Figura 16 da seção 3.3.2, somente foi executada em outubro/2023, e foi monitorada quinzenalmente até dezembro. A declividade de corte foi um pouco maior (cerca de 1:12), também em concordância com o perfil de praia preexistente abaixo do talude. Porém, devido à limitação de disponibilidade da retroescavadeira, a largura desta rampa ficou em 6 metros, mais estreita do que os 10 metros projetados, para que ficasse com as mesmas dimensões da rampa experimental. Além disso, foi observado que as condições de microclima locais não eram efetivamente iguais às da rampa experimental, inviabilizando uma adequada comparação. As observações visuais e medições de ondas apontaram para condições distintas de incidência de ondas, num mesmo intervalo de tempo. Diante das diversas diferenças observadas e devido a impossibilidade logística de realizar o monitoramento completo dos dois locais, optou-se por descontinuar os levantamentos nesta rampa de controle. Ainda assim, a Figura 53 traz os perfis de início e fim do período monitorado, apresentando uma condição igualmente estável.

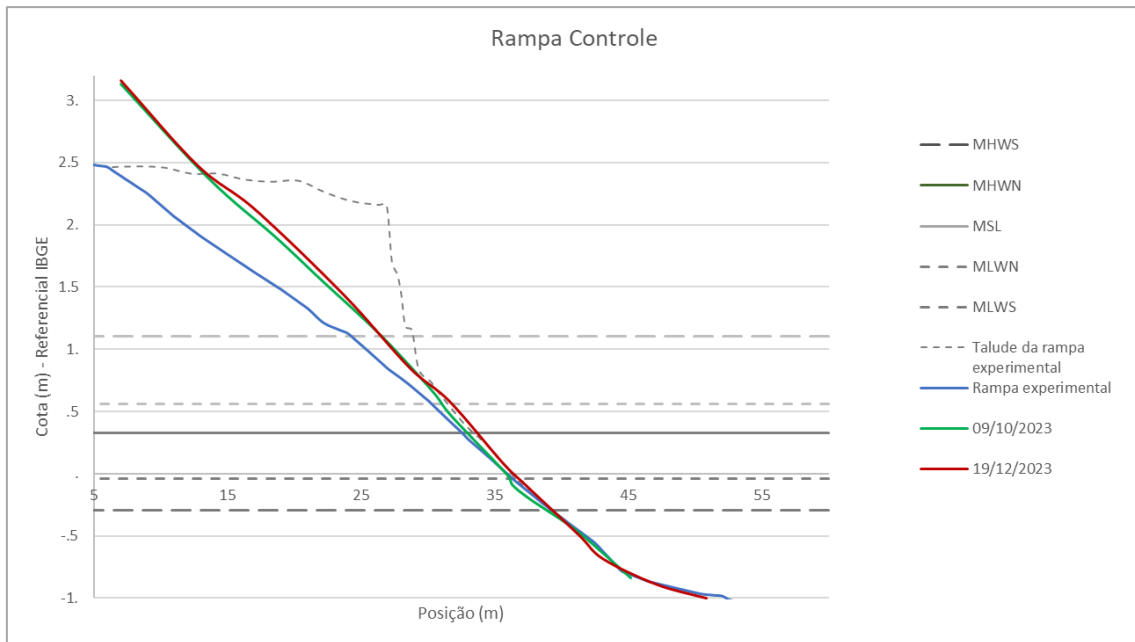


Figura 53 – Variação topográfica registrada na rampa de controle, comparada com a rampa experimental.

A Figura 44 apresenta fotografias da rampa de controle, recém executada e após o período de monitoramento. Da mesma forma que na rampa experimental, nota-se que o trecho com intervenção não demonstra sinais de erosão, bem como o recobrimento do trecho emerso por vegetação rasteira. Entretanto, na rampa controle ainda não há indícios de vegetação de restinga.



Figura 54 – Fotografias da rampa de controle recém executada (esquerda) e ao fim do monitoramento (direita)– (Fonte: acervo pessoal, outubro/2023 - esquerda e janeiro/2024 - direita).

Para a comparação dos perfis de praia medidos *in loco* com o perfil de equilíbrio calculado, foi realizada a interpolação dos dados deste monitoramento com dados previamente obtidos em levantamento batimétrico realizado em 2017, disponibilizados pelo LDSC. O perfil de equilíbrio foi calculado a partir de dados do monitoramento dos

sedimentos, apresentados na seção 4.2.3, e a análise comparativa está exposta na seção 4.3.

4.2.3 Análise granulométrica dos sedimentos

A coleta dos sedimentos ao longo do período de monitoramento forneceu a evolução temporal de sua composição nos pontos indicados na Figura 17, permitindo inferir como a intervenção proposta responderia às forçantes locais. A Figura 55 resume os resultados obtidos nessas coletas, quanto à distribuição das frações cascalho, areia e finos. Observa-se inicialmente que houve um significativo aumento na fração arenosa nas amostras da faixa das preamares, com maior contribuição da parcela média. As amostras do nível médio também sofreram essa alteração, porém em menor magnitude. Tal resultado vai ao encontro do apresentado na seção 4.2.2, que apontou acúmulo de sedimentos nestas faixas.

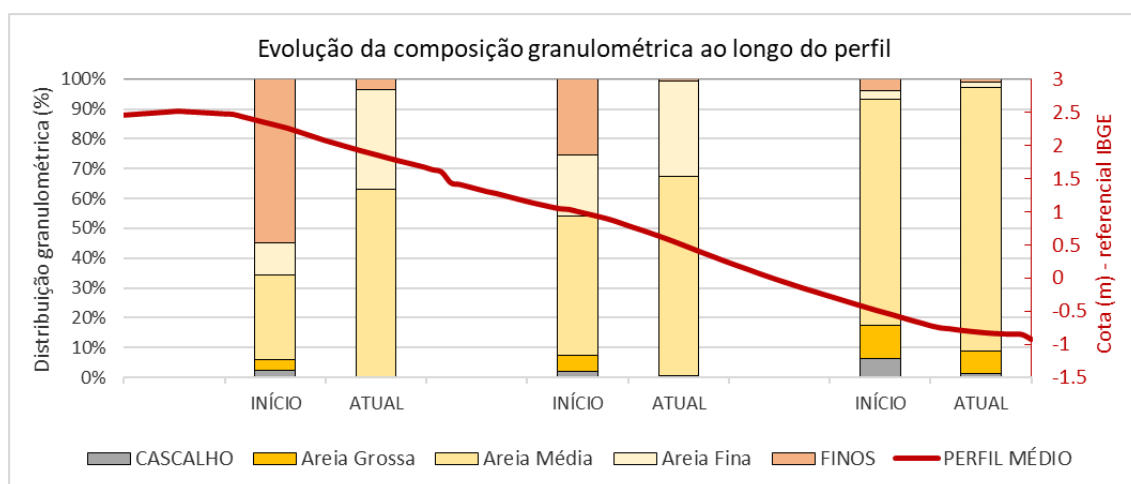


Figura 55 – Variação das frações dos sedimentos em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.

As amostras apresentaram massa específica de 2,65 kg/dm³ na fração grossa e 2,51 kg/dm³ na fração fina, apontando para uma composição mineralógica distinta entre estas frações. Tal situação pode ser devida ao fato de grãos com alto teor de quartzo em sua composição terem maior resistência ao desgaste e fracionamento, mantendo sua granulometria mais grossa, enquanto os argilominerais apresentam menor massa específica. Porém, neste caso específico, pode-se considerar que há também uma contribuição da heterogeneidade do material do aterro, que apresentou as maiores quantidades de finos, sendo possivelmente o fornecedor desta fração nas demais faixas

do perfil.

A Figura 56 ilustra com maior detalhe a evolução da composição granulométrica das mesmas amostras da Figura 55. Neste gráfico é possível observar que o acréscimo de fração arenosa ocorreu principalmente com areia fina, compatível com a condição de baixa energia das ondas que atingem o local, sem capacidade de transporte de grão mais grossos. Observa-se ainda que a distribuição granulométrica das amostras do nível médio e da preamar, eram bastante distintas no início do monitoramento e tornaram-se muito similares ao final, apontando para um recobrimento homogêneo de toda esta região emersa. Ainda, estas curvas nas regiões mais altas diferenciam-se significativamente da curva observada na região da baixamar, indicando um material bastante diferente. Ou seja, essa evolução leva a crer que o material encontrado na baixamar permaneceu o mesmo ao longo do tempo, e o sedimento depositado nas regiões superiores é homogêneo e distinto deste.

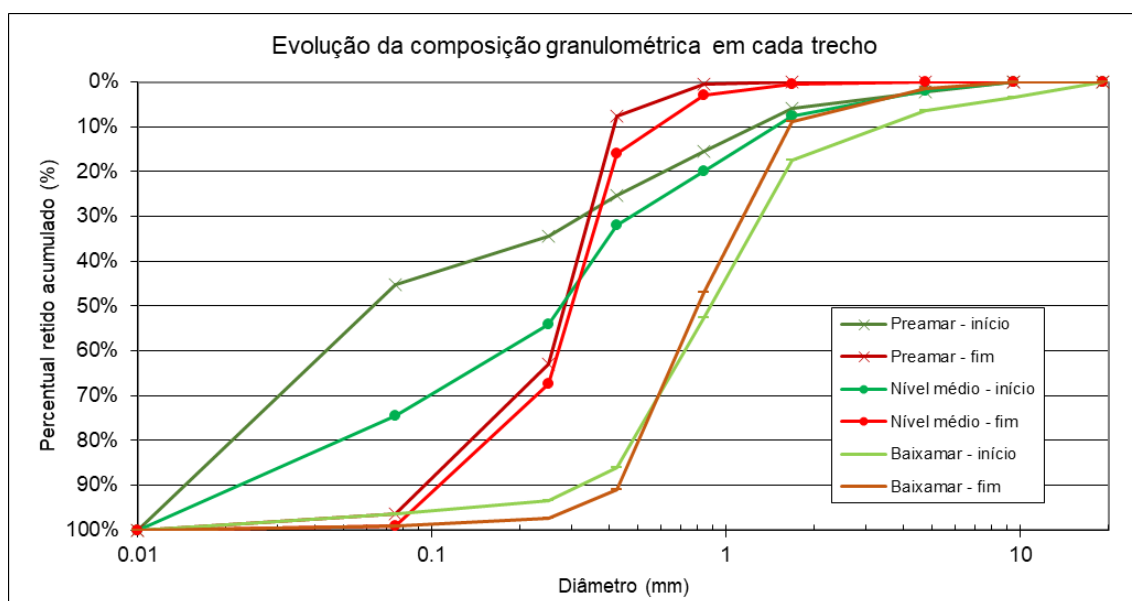


Figura 56 – Variação da composição granulométrica dos sedimentos em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.

As Figura 57Figura 61 exibem o comportamento dos descritores estatísticos das amostras ao longo do tempo, separadas conforme o ponto de coleta. O desvio padrão em relação à média sinaliza o grau de seleção dos grãos na amostra como um todo. Já a curtose, indica o grau de seleção do caudal em relação à seleção da porção central. Por fim, a assimetria, revela a predominância de uma dada fração (grossa ou fina) nos caudais em relação à fração central.

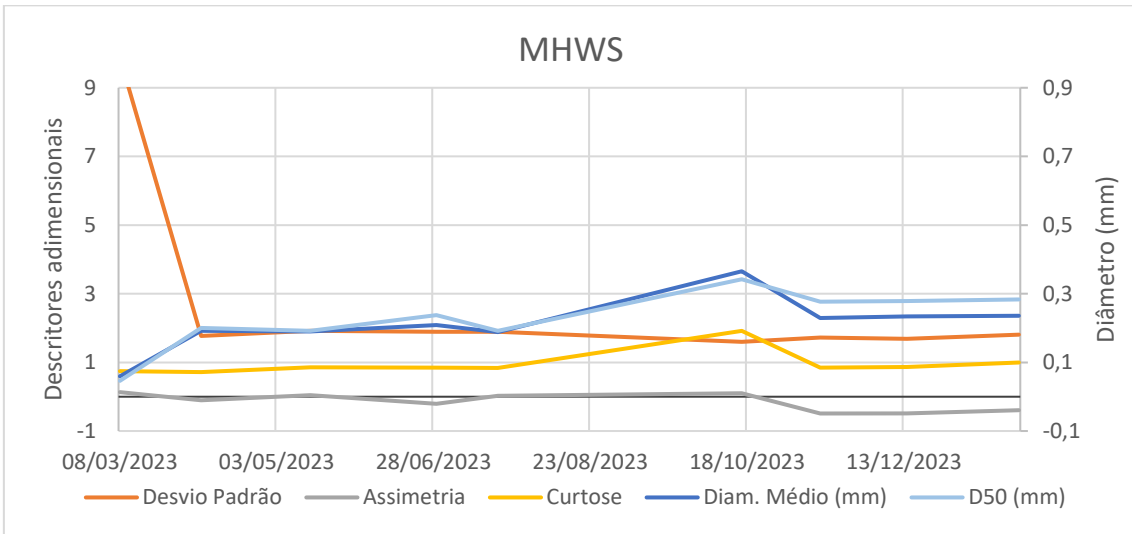


Figura 57 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da preamar de sizígia.

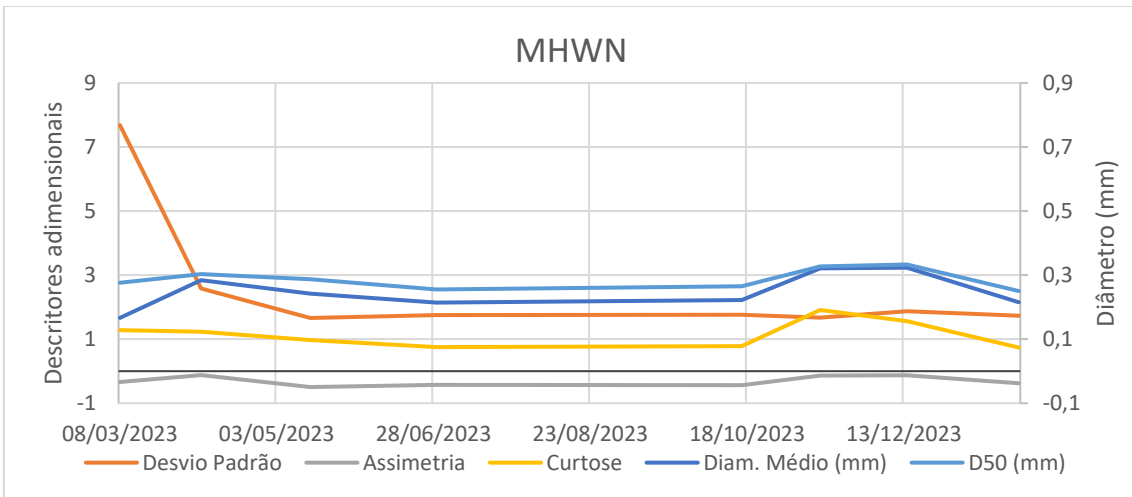


Figura 58 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da preamar de quadratura.

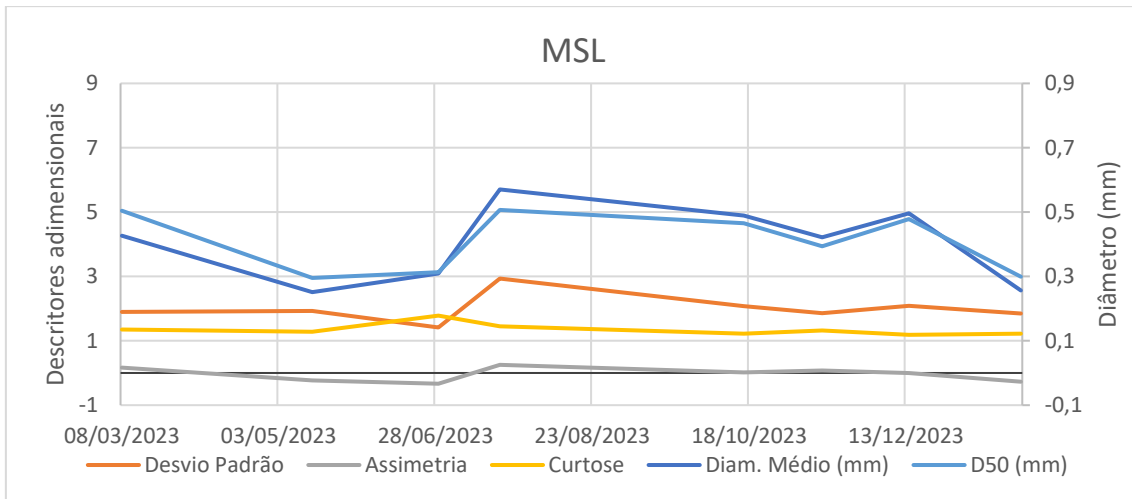


Figura 59 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota do nível médio do mar.

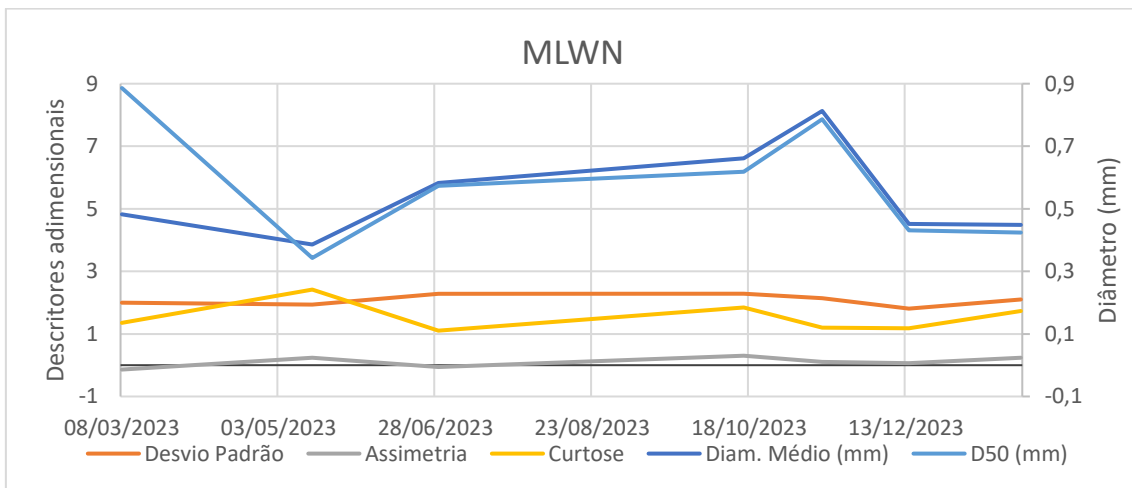


Figura 60 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da baixamar de quadratura.

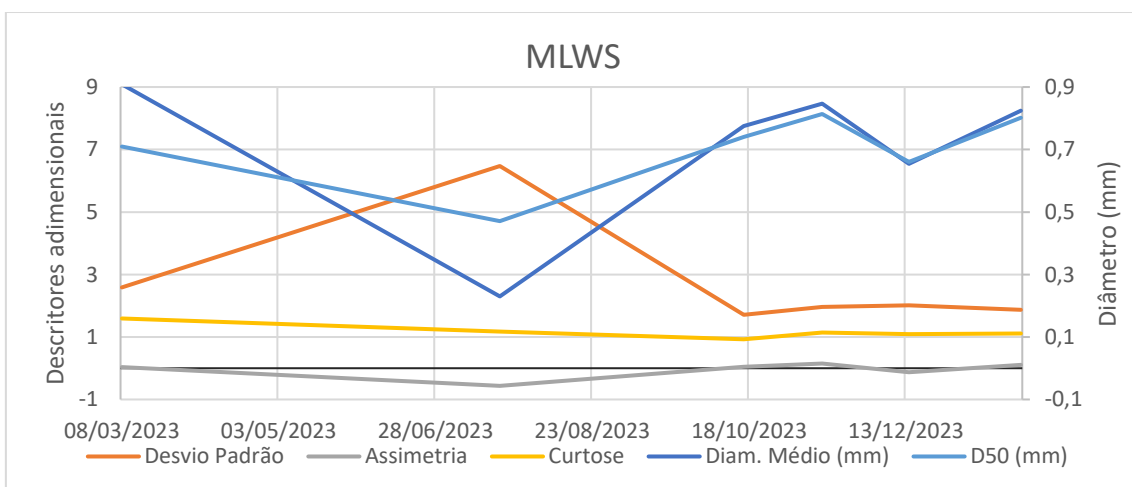


Figura 61 – Evolução temporal dos descritores estatísticos dos sedimentos, coletados na cota da baixamar de sizígia.

O desvio padrão alto apresentado pelas amostras iniciais nas cotas de preamares ressalta a alta heterogeneidade do “solo” do terreno original, que contém elevado teor de finos, mas também pequenos pedregulhos e areia grossa. O restante das amostras pode ser considerado como “muito bem selecionada” (desvio padrão menor do que 0,35), conforme classificação proposta por Folk e Ward (1957); à exceção da amostra de 31/07/2023 na baixamar de sizígia. Esta amostra apresentou desvio significativamente maior, simultaneamente a alterações em outros parâmetros, como: redução nos diâmetros médio e mediano, além de assimetria negativa. Essa amostra ilustra a heterogeneidade presente também na região de baixamares, como um reflexo do seu processo de formação oriundo da desagregação de solo em blocos. A Figura 62 ilustra a presença de bolsões de material fino, em meio aos sedimentos arenosos, porém de forma aglomerada. É possível que estes finos sejam oriundos de pedaços de blocos que se desprenderam do talude anteriormente, com coesão suficiente para se manter aglutinado até então. Como a energia das ondas é baixa, a dispersão desse material extremamente fino e coeso pode ser lenta, mantendo resquílios de solo em meio aos sedimentos.



Figura 62 – Aspecto visual dos sedimentos na cota da baixamar de sizígia, com a presença de “bolsões” de finos - (Fonte: acervo pessoal, março/2024).

Em geral as amostras apresentaram pouca ou nenhuma assimetria e curtose positiva, sendo classificadas como leptocúrticas, com caudais relevantes, e picos altos e finos. O diâmetro mediano de cada amostra está legendado como D50, representando uma tendência central na distribuição granulométrica. Esta característica é adotada como subsídio para a definição do Perfil de equilíbrio, que está apresentado na seção 4.3. Os

resultados de diâmetro mediano estão também consolidados na Figura 63.

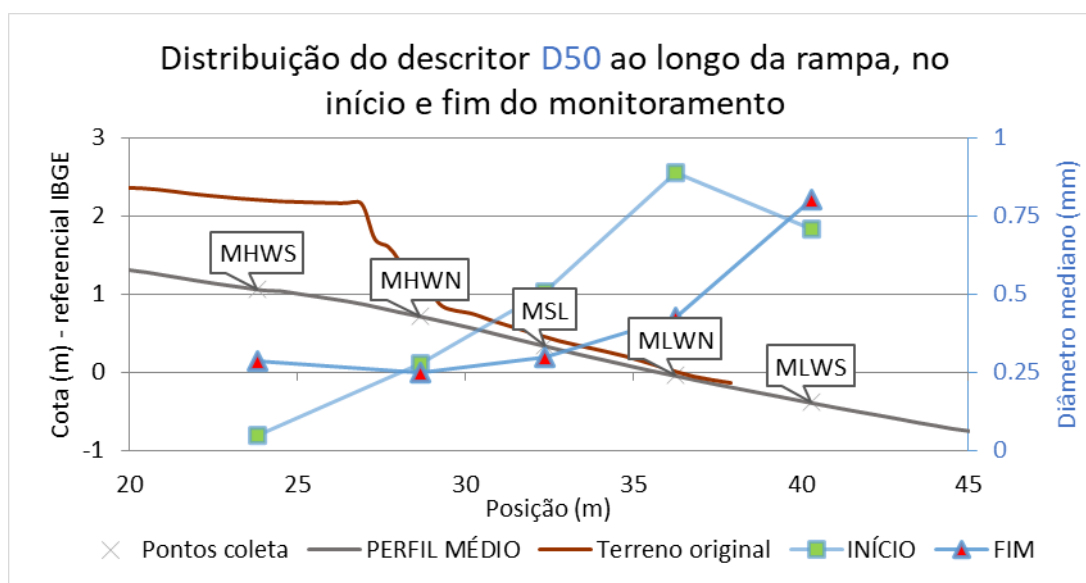


Figura 63 – Evolução temporal do diâmetro mediano dos sedimentos, em diferentes cotas ao longo da rampa experimental, comparadas entre o início e o fim do monitoramento.

Quanto à Classificação de Sedimentos apresentada na seção 3.3.3, pode-se considerar que, diante do exposto, as amostras iniciais na faixa de preamares eram do tipo “lama terrígena arenosa” (LL1b – com percentual lamoso maior do que 25%), e passaram a ser do tipo “areia litoclástica média” (AL1d – com mediana entre 0,25 a 0,5 mm e menos de 15% de fração superior a 2mm), após o período monitorado. Já as amostras na faixa das baixa-mares, continuaram sendo do tipo “areia litoclástica grossa” (AL1c – com mediana entre 0,5 a 2 mm e menos de 15% de fração superior a 2mm).

4.3 Análise interdisciplinar dos resultados

Short (2012) descreve as praias dominadas por micromaré como sendo de baixo ganho de elevação, granulometria grossa, irregular, com estirâncio de baixo gradiente ($\ll 1^\circ$) e até mesmo planícies de lama que podem ter centenas de metros de largura. O monitoramento da morfologia e dos sedimentos demonstrou que as características da praia experimental se alinham a esta descrição. O trecho do estirâncio apresenta cerca de 6° de declividade, porém o segmento imediatamente abaixo já exhibe gradiente menor do que 1° . Observa-se também a presença de uma planície de mais de 40 metros, porém não foi realizada análise do tipo de sedimento neste trecho. A granulometria grossa estaria restrita à faixa das baixamares, nesta praia, porém tornou-se arenosa em todo o perfil, ao fim do

monitoramento.

A aferição do diâmetro mediano permitiu o estabelecimento de perfis de equilíbrio, conforme metodologia estabelecida por Bruun (1954). Inicialmente adotou-se o valor de $m = 2/3$ e os diâmetros medianos das amostras inicial ($D50 = 0,5\text{mm}$) e final ($D50 = 0,3\text{mm}$) coletadas na cota do nível médio. A Figura 64 apresenta estes dois perfis, nas cores azul e vermelha, respectivamente. Observa-se que, numa perspectiva ampla, nenhuma destas duas curvas se ajusta bem ao perfil medido. Optou-se por alterar o valor da constante m dentro dos limites propostos por Dean (1977), chegando-se ao valor de 0,615, que forneceu o perfil de melhor ajuste ao medido (em verde, na Figura 64).

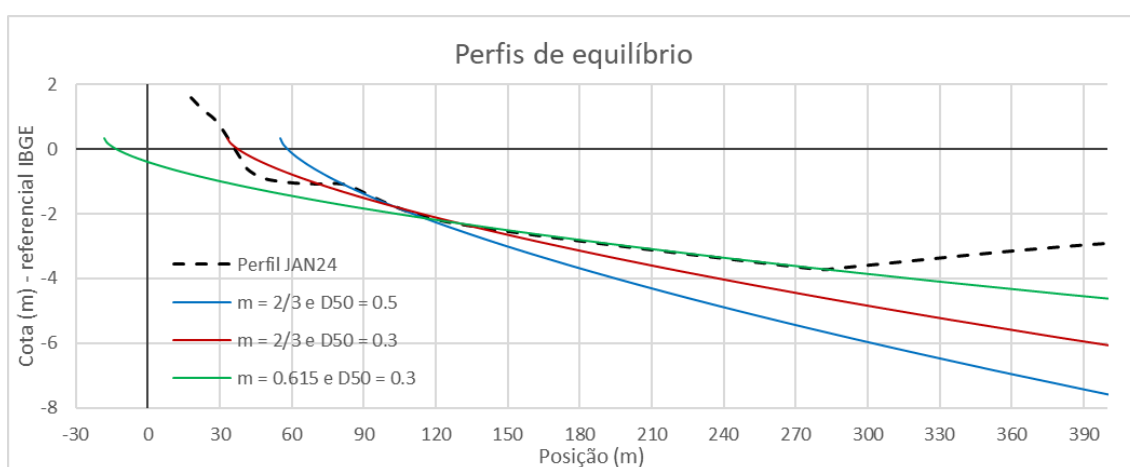


Figura 64 – Comparação do Perfil de Equilíbrio teórico com o medido, escala ampla.

Ressalta-se, apesar do aparente ajuste da curva verde ao perfil medido, ela implicaria uma tendência erosiva muito intensa na parcela superior da praia, contrariando o observado na seção 4.2.2. Sendo assim, é possível que o sedimento que compõe o trecho inferior do perfil seja diferente dos que foram monitorados, limitados ao estirâncio. Tal hipótese encontra argumento também no histórico apresentado na seção 2.2, bem como na análise fotogramétrica, que indicam que este trecho estaria fora da área do aterro de 1952.

A fim de aferir a diferença entre os perfis no início e fim do monitoramento, a Figura 65 ilustra os mesmos perfis de equilíbrio, porém em uma escala maior, com ênfase no trecho de maior movimentação de sedimentos. Além disso, neste gráfico é feita a distinção entre o perfil medido em março/2023 e janeiro/2024. Entretanto, não há alteração suficiente para extrair conclusões robustas quanto a alguma tendência de ajuste de morfologia.

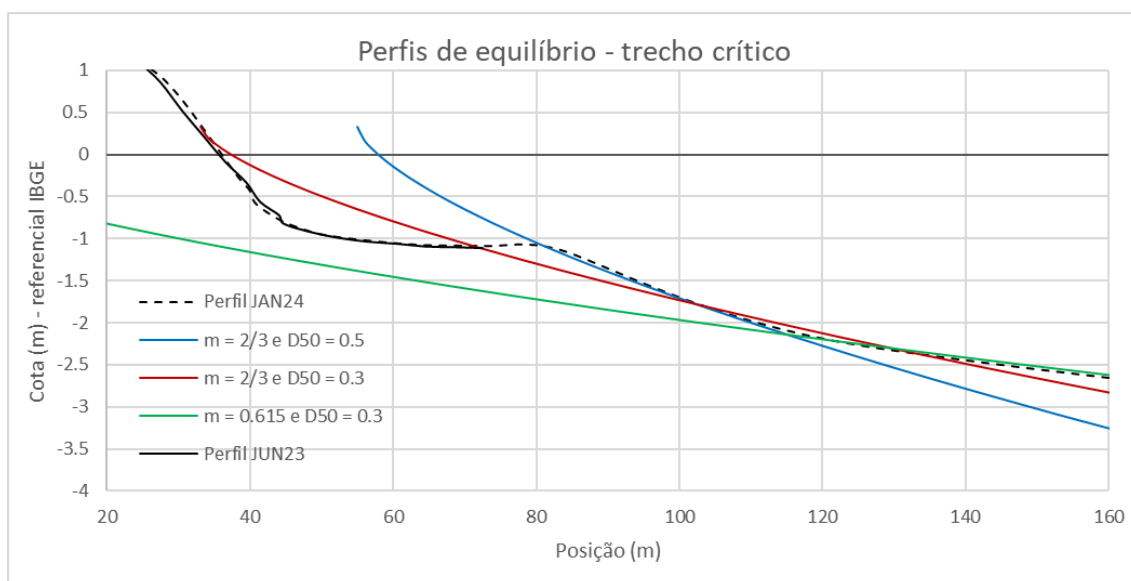


Figura 65 – Comparação do Perfil de Equilíbrio teórico com o medido, com ênfase no trecho crítico, de maior movimentação de sedimentos.

Observa-se que o perfil que adota o diâmetro mediano inicial apresenta melhor ajuste apenas no trecho inicial do aprofundamento do talude (a partir dos 80 metros). Por fim, o perfil que considera a granulometria final e a constante $2/3$ indica que a atual conformação morfológica apresenta tendência de deposição no trecho superior do perfil, e de erosão no restante da profundidade.

Os resultados de vento e análise granulométrica permitem a comparação de valores estimados de tensão de fundo e tensão crítica de transporte, possibilitando verificar se haveria transporte de sedimentos nessas condições. Para as situações de vento máximo de 50 km/h (13,9 m/s) e médio de 10,7 km/h (3,0 m/s), o ábaco da Figura 11 fornece as tensões de fundo de 1,1 Pa e 0,3 Pa, respectivamente. A tensão crítica para a mobilização dos sedimentos pode ser estimada conforme equação proposta por Shields (1936):

$$\tau_{cr} = 0,05 * (\rho_s - \rho_w) * g * D \quad \text{Equação 6 (tensão crítica de transporte de sedimento)}$$

Considerando as massas específicas apuradas na seção 4.2.3, infere-se que as tensões de fundo causadas pelas ondas geradas por ventos máximo e médio, seriam críticas para a mobilização de sedimentos de até 1,38mm e 0,38mm, respectivamente, conforme apontado na Figura 66. Infere-se do gráfico, que a tensão por corrente correspondente à máxima intensidade do vento seria capaz de mobilizar a maior parte dos

sedimentos ao longo de todo o estirâncio (grãos com diâmetro inferior a 1,38 mm). Entretanto, a velocidade média de vento observada somente mobilizaria cerca de 10% dos sedimentos na faixa de baixamar, e 60% a 70% dos sedimentos nas demais cotas (grãos com diâmetro inferior a 0,38 mm).

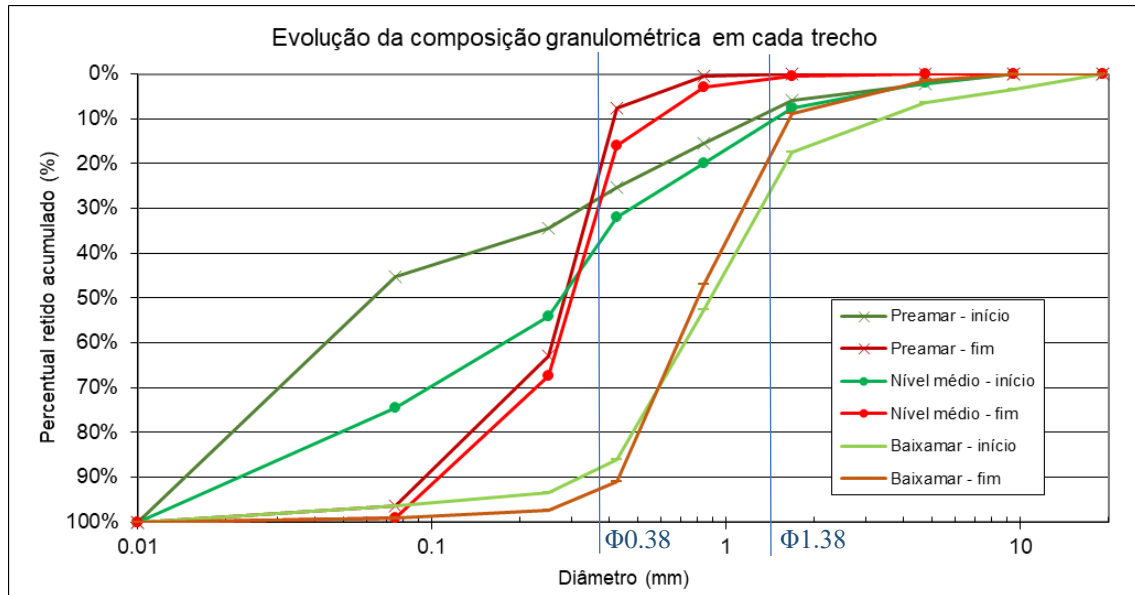


Figura 66 – Indicativo dos diâmetros mobilizados pelos ventos máximo e médio.

Muito embora seja apenas uma estimativa simplificada, tal resultado vai ao encontro do observado na seção 4.2.2, que apontou maior alteração na composição granulométrica dos trechos superiores, e manutenção no trecho de baixamar. Por outro lado, a seção 4.2.2 apontou ainda para uma maior alteração de perfil na parcela submersa, que contraditoriamente seria menos suscetível à ação das ondas. Sendo assim, pode-se supor que exista um mecanismo combinado de ação de ondas e correntes que potencializa o transporte dos sedimentos nessa região, embora sujeita a correntes de baixa intensidade e ondas com pouca energia.

O processo erosivo inicia com a desagregação paulatina do solo ao sopé do talude, por ação da permanência do nível do mar mesmo com ondas de baixa energia. Essa escavação retira a sustentação da parcela superior do terreno, que acaba por se desprender na forma de blocos. Os blocos desprendidos caem na beira da praia e são desagregados e espalhados pela ação do mar. Como não há ondas com grande capacidade de transporte de sedimentos, esse material é muito lentamente espalhado ao longo da praia, formando um longo trecho de leito plano e de baixa compactação, observado nos levantamentos da Figura 45 e mais explicitamente na comparação com os perfis de equilíbrio, Figura 65.

A presença das raízes de vegetação superficial fortalece a coesão destes blocos, retardando seu deslocamento. Além disso, as árvores maiores, os blocos de rocha e os resquícios de vegetação caídos em frente ao talude protegem a margem, ao dissipar a energia das ondas, também fornecendo algum suporte às parcelas superiores do solo.

Klein et al. (2004) estabelecem três tipos de sedimentos, conforme seu diâmetro médio, correlacionados ao estado dissipativo da praia. Segundo tal trabalho, praias refletivas apresentam declividade acima de $8,5^\circ$ e sedimentos do Tipo 3 (de 0,5 a 1,0 mm); praias intermediárias contêm sedimentos dos três tipos; e praias dissipativas exibem sedimentos do Tipo 1 (0,1 a 0,2 mm). O talude original, preexistente à intervenção, apresentava declividade de cerca de 29° na face em erosão (Figura 48) e diâmetro médio 0,43 mm na cota do MSL (Figura 59), configurando uma praia reflexiva neste trecho, por sua alta declividade. Já a praia experimental monitorada, apresenta declividade de $5,7^\circ$ (Figura 48) e diâmetro médio de 0,26 mm na cota do MSL (Figura 59), indicando uma praia com condição intermediária, mais propícia à estabilidade. Ressalta-se que nos demais trechos da enseada a declividade do talude chega até cerca de 90° , como pode ser observado na Figura 67.



Figura 67 – Vista frontal da praia experimental e regiões adjacentes - (Fonte: acervo pessoal, agosto/2023).

5 Conclusões

A comparação entre as linhas de costa das ortofotocartas e fotografias aéreas ao longo de 45 anos indicou preponderância da progradação no trecho norte da enseada e predomínio do processo erosivo no trecho sul, local de estudo desta dissertação. A variação observada nas linhas de costa ao longo dos anos, suscita um transporte de sedimentos direcionado para noroeste, com deposição final próxima à Ponta do Catalão, indicando um possível déficit de sedimentos na região sul; o que coaduna com os modelos de transporte de sedimentos (reportado por Mendonça e Ribeiro, 2014) e de circulação (simulados por Buraschi, 2024). Entretanto, cabe ressaltar que esta análise observou apenas a variação em área de projeção, não se debruçando sobre alterações volumétricas e de morfologia, que poderiam abranger uma maior complexidade de processos.

Observações visuais no local, combinadas com os demais resultados de monitoramento, evidenciaram que a sistemática do processo erosivo na região sul envolve essencialmente a desagregação paulatina do solo ao sopé do talude, fazendo desprender blocos maiores da camada superficial do terreno. Considerando que o talude não se trata de duna arenosa, mas é composto de solo com presença de finos e altamente compactado, a ação das ondas ocorre mais pela permanência do nível do mar, do que pela intensidade das ondas em si. Não se trata do simples transporte de sedimentos soltos, mas da desagregação deste solo compactado, com posterior espalhamento do material. Sendo assim, a energia das ondas isoladamente não pode ser diretamente associada ao avanço do processo de recuo da linha de costa.

A presença das raízes de vegetação superficial fortalece a coesão dos blocos, retardando seu deslocamento. Além disso, as árvores maiores, os blocos de rocha e os resquícios de vegetação caídos em frente ao talude protegem a margem, ao dissipar a energia das ondas. Estas observações inspiraram a solução proposta, de uma rampa que dissipe a energia das forças hidrodinâmicas.

A caracterização hidrodinâmica do ambiente revelou correntes de baixa intensidade, associadas aos ciclos de maré, e ondas geradas localmente pelo vento, de baixa energia devido ao comprimento limitado de pista. As ondas atuaram na movimentação de sedimentos na rampa experimental, porém em um processo lento e cumulativo. Não foram observadas significativas alterações na conformação geral do perfil, apenas ligeiro acúmulo e remoção de material superficial.

O monitoramento da altura de onda na quebra levou ao valor médio de 9 cm, e

máximo de 21 cm. Essa média, combinada com a amplitude de maré (amplitude média da maré de sizígia de 1,2 m), forneceu o parâmetro RTR de 15,92. Tal valor indica que a região está sujeita à maré como forçante predominante, segundo critério estabelecido por Masselink e Short (1993).

Muito embora seja uma região de micromaré, observa-se que sua atuação predomina, devido às alturas de onda muito baixas. Pode-se inferir que o regime de correntes é fortemente associado ao ciclo de marés, além de apresentar baixas velocidades, não representando contribuição significativa para o processo erosivo do talude. A principal contribuição das ondas de maré no processo erosivo é o fato de permitir que as ondas de gravidade atinjam o sopé do talude, localizado entre os MSL e MHWN (Figura 62), viabilizando a ocorrência do mecanismo de erosão da base da escarpa. A assimetria das correntes ao longo do ciclo de marés pode contribuir para um transporte de sedimentos, ainda que lento e seletivo. Dada sua baixa energia, esse transporte estaria limitado aos materiais mais finos e possivelmente associado à ressuspensão pelas ondas em dias de maior energia.

A comparação da altura de onda estimada com a efetivamente aferida no local indica que as ondas que atingem a costa nessa região são formadas localmente. Das rosas de ventos, infere-se que a direção dominante nessa região seria de sudeste ao longo de todo o ano. Entretanto, devido a incidência de ventos de léis-nordeste ser direta e com maior comprimento de pista, esta aparenta ser a direção reinante. Pela estimativa de altura de ondas a partir da série histórica do vento, somente 10% das ondas atingiram seu completo desenvolvimento para ventos na direção sudeste, pelo fato de a pista do vento ser curta. Já na direção léis-nordeste, em que a pista é um pouco mais longa e o vento menos intenso, 47% das ondas atingem a condição de mar desenvolvido. Apesar do período de bom tempo (meses de verão) apresentar velocidades maiores, o período de mau tempo (meses de inverno) apresenta uma permanência maior de ventos de nordeste, que encontram uma pista sem obstáculos (com incidência direta na praia experimental) para o desenvolvimento de ondas, propiciando as condições mais severas nesta enseada. Além disso, o período de mau tempo apresentou maiores durações de vento, o que favorece ondas mais energéticas. Os ventos com incidência direta apresentaram velocidade média de 2,73 m/s e resultaram em estimativa de ondas com média das alturas médias de 25 cm. Já os de incidência indireta resultaram em altura média de 23 cm, muito embora tenham intensidade média de 3,75 m/s.

A intervenção proposta visou atuar na redução da energia das ondas que atingem

a costa, na medida em que transforma um talude altamente refletivo (declividade próxima a 30° do talude natural) em praia dissipativa (declividade de cerca de 6° da intervenção). A rampa criada torna-se um espaço onde a onda espraia, dissipando sua energia. Dessa forma, o processo erosivo passa a ser mitigado, uma vez que não há energia suficiente para mobilizar grandes volumes de solo, bem como deixa de existir a condição de talude vertical, propícia ao desprendimento de solo em blocos.

O monitoramento da evolução temporal dos perfis, ao longo de um ano após a intervenção, apresentou manutenção no perfil de praia com pouca variação de cota, a despeito de pequenas variações, apontando para a efetividade da intervenção proposta. A média das variações observadas entre as campanhas foi significativamente menor do que o desvio padrão, indicando que, apesar de sofrer alterações, o perfil tende a voltar ao valor central.

O período de Mau tempo acumulou predominância de erosão e o de Bom tempo, apresentou trecho de deposição de sedimentos na parte mais alta do perfil, acima do nível médio, e erosão abaixo do MLWN (nível médio das baixamares de quadratura). O resultado acumulado após ambas as situações, apontou para um acréscimo de sedimentos na faixa acima do MSL (nível médio), cuja principal contribuição teria ocorrido no período de Bom tempo. O período de Mau tempo teria inclusive reduzido esta deposição, como reportado por Oliveira (2015), neutralizando a deposição no trecho entre o MSL e o MLWN. Além disso, a curva da variação acumulada indicou um rebaixamento da cota mais significativo no trecho entre o MLWN e o MLWS (nível médio das baixamares de sizígia), suscitando que esta alteração seja resultado principalmente da ação das ondas.

Os resultados reportaram ainda um trecho de deposição no trecho abaixo das cotas de variação de maré, indicando que a região apresenta baixa energia, criando condições propícias para que o material desagregado da encosta seja espalhado e acumulado neste trecho. Estes resultados são condizentes com a comparação do perfil de equilíbrio estimado (teórico) com os perfis topobatimétricos, que indicaram que a atual conformação morfológica apresenta tendência de deposição no trecho superior do perfil, e de erosão no restante da profundidade. Desta forma, o rampeamento estaria contribuindo para a estabilização do terreno on shore, na medida em que é esperado que ainda haja algum transporte de sedimentos da região do leito marinho próximo à costa, sendo depositado no trecho de praia acima da cota de nível médio do mar, até que seja atingido o perfil de equilíbrio.

A análise granulométrica apontou para um acréscimo de fração arenosa,

principalmente com areia fina, compatível com a condição de baixa energia das ondas que atingem o local, sem capacidade de transporte de grãos mais grossos. Observou-se ainda que a distribuição granulométrica das amostras do nível médio e da preamar, eram bastante distintas no início do monitoramento e tornaram-se muito similares ao final, apontando para um recobrimento homogêneo de toda esta região emersa. Já na região entre baixa-mares o material permaneceu com a mesma distribuição granulométrica ao longo do tempo, suscitando que o sedimento depositado nas regiões superiores é distinto deste. O acréscimo da fração areia no material de recobrimento da rampa experimental pode estar associado a um processo de retirada da fração fina, e não transporte da fração arenosa. Isso porque as correntes e ondas locais não apresentam energia suficiente para o transporte de material arenoso de outra região.

Diante do exposto, considera-se que os resultados obtidos indicam uma efetiva mitigação do processo erosivo local por meio da intervenção proposta, com a estabilização do trecho de talude alterado. A identificação da mecânica do processo e seus fatores intervenientes apontam ainda que a manutenção da vegetação local também pode contribuir para essa mitigação. A caracterização das condições climáticas e sedimentares mostrou-se indispensável para aferir a viabilidade da intervenção, bem como para servir de subsídio para a definição da declividade mais adequada para cada trecho de costa, com suas particularidades. Por fim, ressalta-se que o adequado gerenciamento costeiro tem um grande potencial de contribuição ambiental e social, na manutenção e transformação destas áreas.

6 Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.
- AMADOR, E. *Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos - Homem e Natureza*. Rio de Janeiro: Retroarte Gráfica e Editora, 1997.
- BARRETO, N. R.; SANTOS, J. R. U. dos; MANTOVANELLI, R., NASCIMENTO, T. M., THOMPSON, D., & ALBINO, J. (2016). Alterações da morfologia em planta de uma praia de enseada após a instalação de estruturas rígidas: O caso de Itaipava, Espírito Santo. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 17(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i2.838>.
- BENEDET, L. et al. Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, v. 51, n. 8–9, 2004.
- BIRD, E.C.F. *Coastal Geomorphology: An introduction*. 2ª edição. Chichester. Wiley and Sons, 2008.
- BLOTT, S.J. e PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Process and Landforms*, Egham, n° 26. 2001. Disponível em <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/esp.261>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- BOSBOOM, J. e STIVE, M.J.F., 2023, Coastal Dynamics. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Publisher TU Delft, 2023.
- BOSE, M. A. *Os Efeitos da Elevação do Nível do Mar e do Balanço Sedimentar em um Hotspot Erosivo*, 2019. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2019.
- BRASIL, M. Panorama da Erosão Costeira no Brasil. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/publicacoes-mma>>.
- BRUUN, P. Coastal Erosion and the Development of Beach Profiles. *Beach Erosion Board Technical Memo*, No. 44, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1954.
- BURASCHI, G. V. Circulação hidrodinâmica e transporte de resíduos na Baía de Guanabara: o caso da enseada do Fundão-RJ, 2024. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2024.

- CALLIARI, J.L.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO Jr., E. Morfodinâmica praias: uma breve revisão. *Revista Brasileira de Oceanografia*, São Paulo, Vol.: 51, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-77392003000100007>. Acesso: 11 jul. 2023.
- CARTER, D. J. T. Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results. *Ocean Engineering*, v. 9, n. 1, 1982.
- Coastal Engineering Research Center – CERC, (1984). *Shore Protection Manual*. U.S. Army Corp of Engineers.
- CHEN, W.L.; MULLER, P.; GRABOWSKI, R.C.; DODD, N. Green Nourishment: An Innovative Nature-Based Solution for Coastal Erosion. *Frontiers in Marine Science*. Pequim, Vol.: 8, fev. 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.814589/full>. Acesso em: 09 ago. 2023.
- COIMBRA, J. P. P. (org.). *Atlas da Região Hidrográfica V: Baía de Guanabara e sistemas lagunares de Maricá e Jacarepaguá*. 1. ed. Rio de Janeiro: AGEVAP, 2021.
- CONSUNI. RESOLUÇÃO CONSUNI/UFRJ nº 182, de 24 de março de 2023. Aprova as atas das sessões de 02/03 (extraordinária) e 09/03/2023, com 1 (uma) abstenção. Rio de Janeiro: Conselho Universitário, 2023. Disponível em: https://sei.ufrj.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=3099441&id_orgao_publicacao=0. Acesso em 25 abr. 2023.
- COWELL, P. J.; THOM, B. J. Coastal evolution: Late quaternary shoreline morphodynamics. Em: *Continental Shelf Research*. cap. 2, p. 33–59, 02784343, 1994. DOI: 10.1016/0278-4343(95)00074-7.
- DAVIES, J.L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphology*, 8, Mortensen Sonderheft, pp. 127-142.
- DEAN, R. G. Equilibrium beach profiles: U. S. Atlantic and Gulf coasts. *Ocean Engineering Report No. 12*, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE, 1977.
- DHN. *Carta Náutica 1501*. Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha. Rio de Janeiro. Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha, 2024.
- DIAS, G.T.M. Classificação de Sedimentos Marinhos Proposta de Representação em Cartas Sedimentológicas. *Anais do 39º Congresso Brasileiro de Geologia*, (3): 423-426, 1996.

- EUROSION, 2004. *A Guide to Coastal Erosion Management Practices in Europe*. Contract B4e3301/2001/329175/MAR/B3. Prepared by Rijkswaterstaat/RIKZ. The Hague, The Netherlands.
- FERREIRA, C. M. S. L. A. *Geomorphology and Morphodynamics of Embayed Beaches in Contrasting Environments*. Algarve: Universidade do Algarve, 2012.
- FOLK, R. e WARD, W. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957. Disponível em: [http://www.aqqua.uqam.ca/articles/Folk_Ward_27\(1\)-3.pdf](http://www.aqqua.uqam.ca/articles/Folk_Ward_27(1)-3.pdf). Acesso em 27 set. 2023.
- GAMBOA, T. Mapas contam a história da Ilha do Fundão - Pesquisadores do Instituto de Geociências remontam a evolução cartográfica da região. *Jornal da UFRJ*, p. 18, abr. 2007.
- GUIMARÃES, M. S. D. et al. Caracterização textural dos sedimentos superficiais de fundo e dinâmica sedimentar na Baía de Guanabara. *Revista Tamoios*, v. 2, 2007.
- HAMM, L.; CAPOBIANCO, M.; DETTE, H.H; LECHUGA, A.; SPANHOFF, R.; STIVE, M.J.F. A summary of European experience with shore nourishment, *Coastal Engineering*, Volume 47, Issue 2, 2002, Pages 237-264, ISSN 0378-3839 Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00127-8). Acesso em: 19 ago. 2023.
- HASSELMANN, K. et al. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP)*, 1973.
- KOMAR, P.D. *Beach. Processes and sedimentation*. Prentice – Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 429, 1976.
- KOMAR, P. D.; GAUGHAN, M. K. Airy wave theory and breaker height prediction. *Coastal Engineering Proceedings*, n. 13, p. 20, 29 jan. 1972.
- LARSONNEUR, C. La cartographie de's dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise du points et utilisée em Manche. *Journal Redi oceanog.*, 2:34-39, 1977.
- LIMA, M.; ALVES, F.; MARTO, M.; COELHO, C. Medidas de Mitigação e adaptação à Erosão Costeira e Aos Efeitos das Alterações climáticas. *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 42, nº 1, p. 61–70, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5894/rh42n1-cti7>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- LUIJENDIJK, A. et al. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>. Acesso em 07 mar.2024.

- MARCHAND, M. (Ed.). *Concepts and Science for Coastal Erosion Management: Concise report for policy makers*. Deltares, Delft. 2010.
- MASSELINK, G.; SHORT, A. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. Article in *Journal of Coastal Research*. 1993. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/279908459>>.
- MATHEW, R.; WINTERWERP, J. C. Sediment dynamics and transport regimes in a narrow microtidal estuary. *Ocean Dynamics*, v. 70, n. 4, p. 435–462, 1 abr. 2020.
- MELO, M. *Unidades geoambientais e áreas de preservação permanente como instrumentos de auxílio para o planejamento ambiental – o caso da via costeira de Natal/RN*, 2014. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal., 2014. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/19783/1/MarceuDeMelo_DISSERT.pdf. Acesso em: 26 jun. 2023.
- MENDONÇA, R. P.; RIBEIRO, V. A. F. *Análise da Dinâmica Sedimentar no Entorno da Ilha do Fundão, Rio de Janeiro-RJ*, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- MMA, 2018: *Projeto SMC-Brasil: recuperação de praias: documento temático*. [Ministério do Meio Ambiente, et al.]. Brasília, DF. 143p. ISBN: 978-85-7738-360-3. Disponível em: <https://smcbrasil.ufsc.br/manuais-documentos-tematicos/documentos-tematicos/>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- MONTGOMERY, J. M.; BRYAN, K. R.; MULLARNEY, J. C.; HORSTMAN, E. M. Attenuation of storm surges by coastal mangroves. *Geophysical Research Letters*, nº 46, p. 2680–2689, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018GL081636>. Acesso em: 19 ago. 2023.
- MUEHE, D. Definição de limites e tipologias da orla sob os aspectos morfodinâmico e evolutivo. In: Carlos Robert de Moraes & Ademilson Zamboni (org.), *Projeto Orla – subsídios para um projeto de gestão*, pp.13-32, Ministério do Meio Ambiente (MMA) / Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPO), Brasília, DF, Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/patrimonio-da-uniao/destinacao-de-imoveis/arquivos/2020/manual_do_projeto_orla-subsidios-para-um-projeto-de-gestao-2004.pdf. Acesso em 25 set. 2023.
- MUEHE, D.; VALENTINI, E. *O Litoral do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. Rio de Janeiro: FEMAR, 1998.
- OLIVA, F. G.; SILVA, M. A. M. Subsídios à gestão costeira integrada na região oceânica de Niterói/RJ: uma análise do comportamento morfodinâmico da praia de Itacoatiara. *Revista Continentes (UFRRJ)*. ano 7, n. 12, 2018 (ISSN 2317-8825).

- OLIVEIRA, L. A. K. Variabilidade interanual do clima de ondas e tempestades e seus impactos sobre a morfodinâmica de praias do litoral sudeste do estado do Rio de Janeiro. 2015. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2015.
- PBMC, 2016: Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.
- PUGH, D. T. *Tides, surges and mean sea-level*. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd., 1987.
- RIO DE JANEIRO. *Decreto Estadual do Rio de Janeiro n° 38.260/2005*. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.
- ROSATI, J.D. Concepts in Sediment Budgets. *Journal of Coastal Research*. Vol. 21, n° 2, p. 307-322, mar. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/250083353_Concepts_in_Sediment_Budgets. Acesso em: 11 ago. 2023.
- SHEPARD, F. P. *Submarine geology*. 2a ed. ed. New York: Harper's geoscience series, 1963.
- SHORT, A. D. Coastal Processes and Beaches. *Nature Education Knowledge*. 3(10):15. 2012. Disponível em: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/coastal-processes-and-beaches-26276621/>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- SMITH, M. J.; CROMLEY, R. G. Measuring Historical Coastal Change using GIS and the Change Polygon Approach. *Transactions in GIS*, v. 16, n. 1, p. 3–15, 6 fev. 2012.
- STIVE, M. J. F. et al. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, v. 47, n. 2, p. 211–235, dez. 2002.
- STRONKHORST, J.; HUISMAN, B.; GIARDINO, A.; SANTINELLI, G.; SANTOS, F.D. Sand nourishment strategies to mitigate coastal erosion and sea level rise at the coasts of Holland (The Netherlands) and Aveiro (Portugal) in the 21st century. *Ocean & Coastal Management*. Vol. 156, p. 266-276, abr. 2018. ISSN 0964-5691. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.017>. Acesso em: 19 ago. 2023.
- TRENHAILE, A. S.; LAYZELL, M. G. J. Shore Platform Morphology and the Tidal Duration Factor. *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 6, n. 1, p. 82, 1981.

van RIJN, L.C. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, v. 54, n. 12, p. 867-887, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>.

WRIGHT, L. D.; THOM, B. G. Coastal depositional landforms: A morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, v. 1, n. 3, 1977.

YOUNG, I. R. *Wind Generated Ocean Waves*. 1st. ed. Kidlington: Elsevier, 1999. v. 2.