PROJETO DE PROLONGAMENTO DOS GUIA-CORRENTES DO CANAL DE MARÉ DA LAGOA DE ITAIPU-RJ

Andreia Monteiro Queima
Isabela de Souza Cabral

Projeto de Graduação apresentado aos Cursos de Engenharia Ambiental e Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessáriosà obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar ColonnaRosman

Rio de Janeiro
Março de 2014

PROJETO DE PROLONGAMENTO DOS GUIA-CORRENTES DO CANAL DE MARÉ DA LAGOA DE ITAIPU-RJ

Andreia Monteiro Queima
Isabela de Souza Cabral

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DOS CURSOS DE ENGENHARIA AMBIENTAL E ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA AMBIENTAL E ENGENHEIRA CIVIL

Examinado por:

_____

Prof. Paulo Cesar ColonnaRosman, Ph.D.

_____

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D.Sc.

_____

Eduardo González-GorbeñaEisenmann, D.Sc.

Rio de Janeiro
Março de 2014

Queima, Andreia Monteiro

Cabral, Isabela de Souza

Projeto de Prolongamento dos Guia-Correntes do Canal de Maré da Lagoa de Itaipu – RJ/ Andreia Monteiro Queima e Isabela de Souza Cabral. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

xiv, 91 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar ColonnaRosman

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Ambiental, 2014/ Curso de Engenharia Civil, 2014

Referências Bibliográficas: p. 76-77

1. Lagoa de Itaipu; 2. Guia-correntes; 3. Canal de Maré; 4. Modelagem Computacional; 5.Modelo de propagação de ondas; 6. Dimensionamento de estruturas de enrocamento I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental e Civil. III.Projeto de Prolongamento dos Guia-Correntes do Canal de Maré da Lagoa de Itaipu – RJ

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental e Engenheiro Civil.

PROJETO DE PROLONGAMENTO DOS GUIA-CORRENTES DO CANAL DE MARÉ DA LAGOA DE ITAIPU-RJ

Andreia Monteiro Queima

Isabela de Souza Cabral

Marçode 2014

O sistema lagunar Piratininga-Itaipu, situado na Região Oceânica de Niterói, tem sofrido um intenso processo de degradação ambiental nas últimas décadas. Os níveis tróficos das lagoas desse sistema lagunar são motivo de preocupação, já que a eutrofização pode comprometer as espécies da vida aquática desses corpos d'água. Desde 2009, o Instituto Estadual do Ambiente – INEAbusca implementar medidas no processo de revitalização do sistema lagunar e, assim, sugeriu-se o projeto de prolongamento dos guia-correntes da lagoa de Itaipu, visto que há um assoreamento na embocadura dessa lagoa que tende a comprometer a renovação das águas entre a lagoa e o mar. Este trabalho teve por finalidade dimensionar o prolongamento desses guia-correntes, com o intuito de estabilizar a embocadura da lagoa e reter a areia trazida pelas ressacas do mar. O dimensionamento foi feito tendo como base principal o *CoastalEngineering Manual* (2011) que fornece uma versão mais atualizada dos métodos utilizados nos projetos de dimensionamento de estruturas de enrocamento. Para definir a altura de onda de projeto e avaliar o comprimento necessário das estruturas de enrocamento, utilizou-se como auxílio o modelo de propagação de ondas do software SisBaHiA®, que forneceu, a partir dos dados do clima de ondas da região em águas profundas, as alturas das ondas que atingem a região costeira onde os guia-correntes estão situados. No dimensionamento das estruturas, foram avaliados diferentes níveis de maré e foi proposta a divisão de cada guia-correntes em cinco trechos, levando em consideração as profundidades, alturas de onda e possibilidade de arrebentação em cada parte. Assim, foram calculadas as massas das pedras de enrocamento e a geometria das seções transversais para cada trecho proposto.

Palavras-chave: Lagoa de Itaipu, Guia-correntes, Modelo de Propagação de Ondas, Estrutura de Enrocamento, Altura da Onda de Projeto.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer and Civil Engineer.

EXTENSION DESIGN OF THE JETTIES LOCATED IN THE TIDAL INLET OF ITAIPU LAGOON – RJ

Andreia Monteiro Queima

Isabela de Souza Cabral

March/2014

Over the past decades, the Piratininga-Itaipu Lagoon System, located in the oceanic region of Niterói, has been the target ofan intense process of environmental degradation. Environmental organizations are concerned with the trophic levels of the lagoons, since eutrophication can compromise aquatic species that live in these water bodies. Since 2009, INEA (State Institute for the Environment) seeks to implement measuresto revitalize this lagoon system. For this reason, it was suggested to extend the jetties located in the Itaipu Lagoon, as there issilting at the mouth of this lagoon that tends to compromise renewal of water between the lagoon and the sea. This study aims to dimension the extension of these jetties, in order to stabilize the mouth of the lagoon and retain the sand brought by big storm swells. The dimension was based on the *Coastal Engineering Manual* (2011), which provides the most current methods in the designof rubble-mound structures. The wave propagation model of the software SisBaHiA® was used to define the wave height design and evaluate the required length of the structures.The models have provided the heights of waves hitting the coastal region where the jetties are located, from the data of waves in deep water.For the extension design of the jetties, it was evaluated different tidal levels and it was proposed the division of each structure in 5 sections, taking into account the depth, wave heights and the possibility of breaking waves on each section. This way, the mass of stones and the geometry of the rubble-mound sections for each part were calculated.

Keywords: Itaipu Lagoon, Wave Propagation Model, Rubble-mound Structures,Wave Height Design.

Agradecimentos – Andreia Monteiro Queima

Em especial, gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio incondicional, por me ensinarem a perseguir meus objetivos e sempre acreditarem em mim. Obrigada pelo exemplo de determinação e por todo amor que me dão. Também à minha irmã, pela amizade e por sempre ter sido uma referência.

Ao Prof. Paulo Rosman, por todos os ensinamentos e oportunidades. Pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e por me inspirar a buscar mais conhecimento na área.

À secretária Marise, pelo carinho, por não medir esforços para nos ajudar e resolver nossas questões administrativas.

Todos os meus amigos da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, por toda ajuda e boa vontade em explicar os mais variados assuntos, além de criarem um ambiente agradável e prazeroso de se trabalhar.

Aos meus amigos da Engenharia Civil, por todos os momentos compartilhados durante esses anos, com certeza tornaram a caminhada menos penosa nas horas mais difíceis. Obrigada também aos professores da UFRJ por todo aprendizado adquirido nesse curso.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo investimento na minha formação como Engenheira Civil.

Agradecimentos – Isabela de Souza Cabral

Quero agradecer a todos os professores que passaram os conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia Ambiental , em especial ao professor Rosman pelos ensinamentos, pela dedicação, atenção e pela paciência durante a realização desse trabalho.

Aos meus queridos amigos companheiros de curso que fizeram com que esse período da minha vida fosse inesquecível, com ótimas recordações e grandes momentos de diversão e estudo.

Aos alunos da AECO (Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica) pela ajuda, disposição em tirar dúvidas e pelo ótimo ambiente de trabalho que faz com que seja um grande prazer ir ao Fundão. Agradeço também à Marise pela enorme boa vontade em ajudar a resolver todos os problemas na AECO e por ser uma pessoa que traz uma ótima energia ao laboratório.

Aos meus amigos que sempre estavam na torcida, ouvindo as dificuldades enfrentadas durante o curso, comemorando cada conquista e proporcionando momentos de muita alegria.

Por fim, agradeço à minha mãe e aos meus irmãos que sempre me deram apoio, carinho e sempre estavam ao meu lado nos momentos difíceis. E agradeço ao meu pai que não está mais aqui, mas se não fosse ele eu não seria a pessoa que sou hoje. Sou muito grata pela vida repleta de alegria e carinho que ele e minha mãe me proporcionaram.

1 Conteúdo

1 Introdução 1

1.1 Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu 1

1.2 Guia-correntes 4

1.2.1 Aspectos Estruturais e Funcionais de Guia-correntes 5

2 Objetivo 9

3 Referencial Teórico 9

3.1 Ondas de Gravidade 10

3.2 Propagação de Ondas 12

3.2.1 Teorias das Ondas 14

3.2.1.1 Teoria Linear 16

3.2.1.2 Teoria de Stokes de 2ª Ordem 17

3.2.2 Modelo de Propagação de Ondas 17

3.3 Critério de Arrebentação 19

3.4 Profundidade de Fechamento 20

3.5 Marés 21

3.5.1 Maré Astronômica 21

3.5.2 Maré Meteorológica 22

3.5.3 Análise dos Dados de Maré 23

3.6 Estruturas de Enrocamento 25

3.6.1 Massa das Pedras do Enrocamento 26

3.6.2 Cota da Crista 27

3.6.3 Largura da Crista 29

3.6.4 Camadas da Estrutura 30

3.6.4.1 Espessura da Camadas 31

4 Metodologia 32

5 Modelo de Propagação de Ondas....33
5.1 Dados....34
5.1.1 Batimetria....34
5.1.2 Clima de Ondas....35
5.1.2.1 Onda de Projeto ao Largo....41
5.2 Cenários de Ondas Simulados....42
5.3 Resultados do Modelo de Propagação de Ondas....45
6 Dimensionamento....52
6.1 Comprimento dos Guia-correntes....52
6.2 Parâmetros Hidrodinâmicos....54
6.2.1 Critério de Arrebentação....54
6.2.2 Onda de Projeto da Estrutura....55
6.2.3 Níveis de Maré....56
6.3 Seções Transversais....58
6.3.1 Massa dos Blocos de Enrocamento (W_{50})....64
6.3.2 Cota da Crista....65
6.3.3 Largura da Crista....67
6.3.4 Camadas da Estrutura....68
6.3.4.1 Espessura da Camada Exterior (Armadura)....68
6.4.3.2 Massa e Espessura do Enrocamento da Subcamada....69
6.4.3.3 Massa das Unidades de Enrocamento do Núcleo....70
6.3.5 Quadros Resumos do Dimensionamento dos Guia-correntes....71
6.3.6 Ordem de grandeza da Estimativa de Custos....72
7 Conclusão....74
8 Recomendações....76
9 Referências....77
Anexo 1....79

Anexo 2 91
Anexo 3 91
Anexo 4 92
Anexo 5 93

Índice de Figuras

Figura 1: Foto tirada em 10/2013 do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, Niterói - RJ. 1
Figura 2: Imagem do Google Earth obtida em 02/2012 do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu em Niterói – RJ. 2
Figura 3: Foto tirada em 10/2013 dos guia-correntes da Lagoa de Itaipu, Niterói – RJ. 2
Figura 4: Imagem do Google Earth da região de interesse obtida em 27.01/2011, com indicações dos blocos de ações previstas e respectiva prioridade retirada do relatório técnico da COPPETEC feito a pedido do INEA. 3
Figura 5: Geotube® utilizado na construção de um guia-correntes. 6
Figura 6: Enrocamentos naturais. 6
Figura 7: Principais tipos de blocos artificiais (CEM, 2011). 7
Figura 8: Enrocamentos artificiais (Tetrápodes). 7
Figura 9: Imagem georreferenciada do Google Earth obtida em 10/2013 mostrando os guia-correntes do estuário Itajaí-Açu – SC. 8
Figura 10: Imagem georreferenciada do Google Earth obtida em 01/2014 mostrando o assoreamento na embocadura da Lagoa de Itaipu, Niterói - RJ. A simetria da linha de praia nos dois lados dos guia-correntes indica que não há deriva dominante dos sedimentos para um dos lados. 9
Figura 11: Principais parâmetros de uma onda. 11
Figura 12: Representação esquemática da refração de ondas pela batimetria. 13
Figura 13: Representação esquemática da difração de ondas (Mason 1981 pg 65). 13
Figura 14: Regiões de validade das teorias de onda. (CEM, 2011) 15
Figura 15: Formulação da Teoria de Airy. (CEM, 2011) 16
Figura 16: Layout do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA®. 19

Figura 17: Ábaco com o índice de profundidade de arrebentação em função de $H_b/(gT^2)$ (CEM, 2011). 20
Figura 18: Exemplo de registro de maré evidenciando as marés de sizígia e de quadratura. Fonte: DHN Local: Porto de Itaquí, São Luís. 22
Figura 19: Registro de maré meteorológica em Niterói - RJ. 23
Figura 20: Tabela retirada da Carta Náutica da Baía de Vitória. 23
Figura 21: Representação esquemática do run-up (galgamento) e run-down sobre o talude de uma estrutura hidráulica. (CEM, 2011).....28
Figura 22: Seções transversais típicas para estruturas de enrocamento.(CEM, 2011) 30
Figura 23: Cartas Náuticas utilizadas na obtenção dos dados de batimetria para o modelo de propagação de ondas. 34
Figura 24: Mapa base com as isolinhas de batimetria da região de estudo utilizado no modelo de propagação de ondas. 35
Figura 25: Figura do Google Earth do ponto de geração dos dados de onda em relação à área de estudo. 36
Figura 26: Gráfico gerado a partir do clima de ondas da região de estudo com a frequência de ocorrência das ondas por direção principal de propagação. 37
Figura 27: Imagem do Google Earth obtida em 2009 mostrando a geometria da praia de Itaipu e a Serra da Tiririca que bloqueia as ondas de leste/sudeste na região próxima dos guia-correntes da Lagoa de Itaipu. 37
Figura 28: Análise das possíveis direções das ondas que chegariam na área de estudo levando em conta a geometria da região. 38
Figura 29: Gráfico gerado a partir dos dados do clima de ondas das alturas significativas das ondas por direção de propagação. 39
Figura 30: Gráfico gerado a partir dos dados do clima de ondas dos períodos de pico das ondas por direção de propagação.....40
Figura 31: Grades de propagação de Onda utilizadas no software SisBaHiA®.....45
Figura 32: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das Isolinhas de Amplificação para as ondas de direção de propagação sul (Az: 195º), período de pico de 12s no Nível Médio do Mar. 46
Figura 33: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas SisBaHiA® das Isolinhas de Amplificação para as ondas de direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 12s no Nível Médio do Mar.....47

Figura 34: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sul (Az: 195º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Médio do Mar. 48
Figura 35: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Médio do Mar. 49
Figura 36: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no NR-CN1511. 50
Figura 37: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Máximo do Mar (NR-CN1511+1,5m). 50
Figura 38: A figura à esquerda mostra a representação esquemática da refração dadas isolinhas de batimetria e a figura à direita mostra o resultado de um modelo de propagação de ondas do SisBaHiA® que mostra esse mesmo efeito de refração para as isolinhas de batimetria da região de estudo, semelhantes às do esquema. 51
Figura 39: Gráfico de frequência acumulada das alturas significativas de onda gerado a partir dos dados do clima de ondas. 52
Figura 40: Mapa gerado a partir do modelo de propagação de ondas do SisBaHiA® com ondas propagando na direção sudoeste, azimute 205º, período de pico de 14s, altura significativa de onda em águas profundas de 5,0m (H_e equivalente a 0,14% do tempo) no Nível Máximo do Mar. 53
Figura 41: Representação esquemática do prolongamento dos guia-correntes da lagoa de Itaipu. 54
Figura 42: Perfil da praia de Itaipu gerado a partir da batimetria obtida da Carta Náutica 1511. 54
Figura 43: Ábaco do CEM com a estimativa do critério de arrebentação da Praia de Itaipu. 55
Figura 44: Resultado com zoom nas estruturas do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação Az: 205º, período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Máximo do Mar (NR-CN1511+1,5m). 56
Figura 45: Gráfico de frequência de ocorrência da maré meteorológica na região de estudo. 57
Figura 46: Curva de permanência da maré astronômica da região de estudo. 57

Figura 47: Representação dos três níveis de maré utilizados no estudo. 58
Figura 48: Vista em planta das seções transversais dos guia-correntes com as isolinhas de batimetria no NR-CN1511. 59
Figura 49: Esquema da vista longitudinal dos guia-correntes, dando uma noção das cotas das cristas em cada trecho em relação ao nível d'água. Os comprimentos não estão mostrados na escala correta. 67
Figura 50: Representação esquemática de uma seção transversal dos guia-correntes mostrando as camadas da sua estrutura. 68

Índice de Tabelas

Tabela 1: Coeficientes K_D.....27
Tabela 2: Coeficientes de forma e Porosidade para várias unidades de armadura 29
Tabela 3: Frequência de período de pico na direção de propagação sul. 41
Tabela 4: Frequência de período de pico na direção de propagação sudoeste.....41
Tabela 5: Tempo de Retorno das ondas obtido pelo software SMADA® a partir das maiores alturas mensais do clima de ondas da região.....42
Tabela 6: Frequência dos períodos de pico para ondas com alturas maiores que 6,0 m ao largo.....43
Tabela 7: Direções das ondas simuladas.....44
Tabela 8: Parâmetros dos piores cenários simulados levando em conta as direções que obtiveram os maiores fatores de amplificação na região das estruturas, em diferentes períodos e com a altura de onda de tempo de recorrência de 10 anos. 44
Tabela 9: Parâmetros dos modelos de propagação de ondas. 45
Tabela 10: Dimensionamento dos guia-correntes norte e sul no nível máximo de água do projeto. 61
Tabela 11: Dimensionamento dos guia-correntes norte e sul no nível médio do mar. 62
Tabela 12: Dimensionamento dos guia-correntes norte e sul com o nível mínimo de água do projeto.....63
Tabela 13: Cotas e alturas da crista em cada seção transversal dos guia-correntes norte e sul. 66
Tabela 14: Valores das arestas (D_{sub}) dos cubos de massa equivalente a $W_{50}/10$ das subcamadas dos guia-correntes. 69

Tabela 15: Valores do dimensionamento por trecho do guia-correntes Norte. 71
Tabela 16: Valores do dimensionamento por trecho do guia-correntes Sul. 71
Tabela 17: Massas dos blocos do enrocamento da subcamada e do núcleo por trecho e as espessuras das camadas de armadura e subcamada. 72
Tabela 18: Dimensionamento considerando os processos construtivos. 72
Tabela 19: Volumes por trecho e total das estruturas e das pedras do enrocamento...73

1 Introdução

Este trabalho busca realizar o projeto básicodo prolongamento dos guia-correntes construídos na lagoa de Itaipu, situada no município de Niterói, Rio de Janeiro, visto o assoreamento presente na embocadura da lagoa e a necessidade de melhorar a renovação das águas do sistema lagunar com o mar.

1.1 Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu

O sistema lagunar de Piratininga-Itaipu, localizada na Região Oceânica do município de Niterói, nas últimas décadas tem se mostrado vítima de um intenso processo de degradação ambiental, caracterizado por ocupação de favelas e loteamentos nas margens das lagunas, por condições precárias de infraestrutura sanitária, despejo de esgotos sanitários *in natura*, desmatamento das matas ciliares e erosão das encostas.

Figura 1: Foto tirada em 10/2013 do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, Niterói - RJ.

As lagoas de Piratininga e Itaipu eram originalmente sistemas independentes.As intervenções que começaram a alterar as características naturais das lagunas tiveram início em 1946, quando o Departamento Nacional de Obras e Saneamento, realizou a abertura de um canal de ligação entre a Lagoa de Piratininga e a de Itaipu, o Canal de Camboatá. A obra foi feita com o intuito de evitar as enchentes que ocorriam com frequência na época e, assim, conter as epidemias causadas por doenças transmitidas pelos mosquitos. No entanto, isso causou o rebaixamento do nível d'água em Piratininga, ocasionando transformações nas condições hidráulicas e ambientais do sistema. (Mach & Longo, 1998)

Figura 2: ImagemdoGoogle Earth obtida em 02/2012 do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu em Niterói – RJ.

Durante uma segunda intervenção, destinada à urbanização, foram aterrados os alagados entre as duas lagunas (1976) formando o atual bairro de Camboinhas e foi aberto o canal (1978) que ligou a Laguna de Itaipu ao mar e foram instalados dois *guia-correntes* na sua embocadura. Com a abertura deste canal, a renovação das águas do sistema lagunar com o mar passou a ser permanente. Originalmente, a lagoa de Itaipu era uma lagoa em regime de cheia, isto é, só se conectava com o mar quando houvesse rompimento da barra do canal natural que frequentemente ficava fechado. Geralmente os eventos de ruptura ocorriam em épocas de fortes chuvas, quando o nível d'água da lagoa ficava acima do nível médio do mar.

Figura 3: Fototirada em 10/2013 dos guia-correntes da Lagoa de Itaipu, Niterói – RJ.

Em 2008, a SERLA (Secretaria Estadual de Rios e Lagoas) executou o projeto de escavação de um túnel no costão rochoso de Piratininga (Túnel do Tibau), que restabeleceu a ligação da Lagoa de Piratininga com o mar, por meio de um sistema de comportas, objetivando a renovação das águas no interior da laguna.

Apesar das intervenções realizadas, a qualidade ambiental da lagoa, nos dias de hoje, ainda encontra-se em estado crítico. Nos verões de 2010 e 2011, publicadas pelos jornais locais, novas ocorrências de mortandade em massa de peixes foram observadas em Piratininga.

Com a necessidade de medidas a serem tomadas no processo de revitalização do sistema lagunar em questão, o Instituto Estadual do Ambiente – INEA busca, desde 2009, implementar obras de melhoria nas lagoas.

No relatório técnico elaborado em 2013 pela COPPETEC a pedido do INEA, foram propostos cinco blocos de ações com o intuito de revitalizar a condição ambiental das lagoas, como mostrado na Figura 4. Dentre essas ações estão as desobstruções do túnel do Tibau e do Canal da Camboatá, construção de soleira para controle de níveis de água na Lagoa de Piratininga e transição para o Canal de Camboatá, dragagem nos canais de maré das duas lagoas para melhorar a renovação das águas e aumentar a capacidade de saque de excessos volumétricos de agua em época de cheias, bem como de nutrientes e poluentes do sistema.

Figura 4: Imagem do Google Earth da região de interesse obtida em 27.01/2011, com indicações dos blocos de ações previstas e respectiva prioridade retirada do relatório técnico da COPPETECfeito a pedido do INEA.

A troca de água entre o mar e as lagunas é importante devido ao fato de assegurar a qualidade da água do sistema lagunar. Se a concentração de nutrientes das lagoas-

for muito alta, pode ocorrer eutrofização e causar efeitos adversos à vida aquática. Esse processo vem se intensificando com o lançamento de grande volume de esgotos domésticos nas lagunas.

O estoque de nutrientes em um corpo d'água é definido pelo seu nível trófico. Um corpo d'água com estoque adequado de nutrientes é denominado oligotrófico. Corpos d'água oligotróficos, em geral, estão em equilíbrio com a natureza, apresentam grande diversidade biológica etem águas claras, se não houver muitos sedimentos em suspensão.

Considerando os níveis tróficos presentes no sistema lagunar, atualmente a lagoa de Piratininga é hipertrófica, enquanto a lagoa de Itaipu é mesotrófica. O grau de hipertrofismo da primeira está relacionado com fonte alóctone de nutrientes e com alto tempo de residência no corpo d'água. A renovação das águas de Itaipu com o mar impede a ocorrência de estágios mais críticos de eutrofização, apesar de esta lagoa receber uma carga de esgoto maior que a de Piratininga.

1.2 Guia-correntes

No canal de maré da lagoa de Itaipu foram construídos dois guia-correntes que são estruturasrígidas ligadasàcosta com a finalidade de impor uma dada posição às correntes e efetivar a ligação permanente da lagoa com o mar. Normalmente, essa estrutura se aplica a casos onde a foz é migratória ou intermitente como era o caso da lagoa de Itaipu.

Diferentes nomes populares são usados para o enrocamento projetado para estabilizar barras de estuários,por exemplo "molhe", "quebra-mar" e "espigão". Embora semelhante a um molhe ou a um espigão, em termos técnicos, o enrocamento a ser projetado neste estudo é de fato um GUIA-CORRENTES. Na literatura inglesa seria um *jetty.* O nome decorre da sua função principal.

Assim como molhes e quebra-mares, os guia-correntes são estruturas costeiras de seção transversal trapezoidal, que constituem um obstáculo à propagação normal da agitação das ondas, permitindo a quebra da sua energia. O mecanismo de quebra está relacionado com a percolação no seu interior e com a arrebentação da agitação no próprio talude.

Como qualquer obra costeira, deve ser concebida para interagir harmoniosamente com os elementos forçantes naturais do meio, pois somente dessa forma são capazes de proporcionar o resultado desejado. Os forçantes naturais são ondas, ventos e as vari-

ações de nível d’água. As ondas são, sem dúvida, o elemento mais importante a ser considerado nesse tipo de projeto. Como são estruturas instaladas em águas rasas, interferem necessariamente nos processos litorâneos locais e por essa razão são projetadas considerando tal interferência.

1.2.1 Aspectos Estruturais e Funcionais de Guia-correntes

Existem diversas alternativas construtivas que podem ser utilizadas na construção de guia-correntes. Cada uma possui suas vantagens e desvantagens e a escolha da alternativa ideal deve levar em consideração as características do local de implantação, disponibilidade de material e os recursos financeiros. Os tipos mais comuns de soluções estruturais na construção de guia-correntes são os enrocamentos naturais e artificiais etubos geossintéticos.

Um tipo de tubo geossintético muito utilizado são as unidades Geotube® que sãode tecido de polipropileno de alta resistência que, quando cheios de areia, representam elementos maciços e contínuos. Quando empilhados, funcionam como uma estrutura sólida. AFigura 5 a seguir mostra um exemplo dessa estrutura para a composição de um núcleo de um guia-correntes.

Para instalação do tubo geossintético são utilizadas barcas especiais em que o geotêxtil é levado até o local de implantação, preenchido de areia e liberado através da abertura da parte da embarcação em que o tubo geossintético estava sustentado. O grau de precisão de lançamento de unidades Geotube® depende de alguns fatores tais como: profundidade, condições de marés locais, condições climáticas, correntes, além das condições dos equipamentos de posicionamento utilizados. Essa instalação é considerada bem rápida em relação a outros tipos de estrutura.

Figura 5: Geotube® utilizado na construção de um guia-correntes.

No caso da figura, por se tratar de uma região de profundidades pequenas, a instalação do Geotube®foi feita com gabaritos metálicos, como mostrado no fundo da figura 5.

Para estruturas de enrocamento, é muito importante uma escolha adequada do tipo de enrocamento a ser utilizado no projeto, prevendo disponibilidade de material, capacidade de quebra de energia das ondas, peso próprio, necessidade de manutenção e custo de implantação. As figuras 6, 7 e 8ilustram típicos exemplos deenrocamentos naturais e artificiais que são geralmente utilizados em construções de molhes, quebra-mares e guia-correntes.

Figura 6: Enrocamentos naturais.

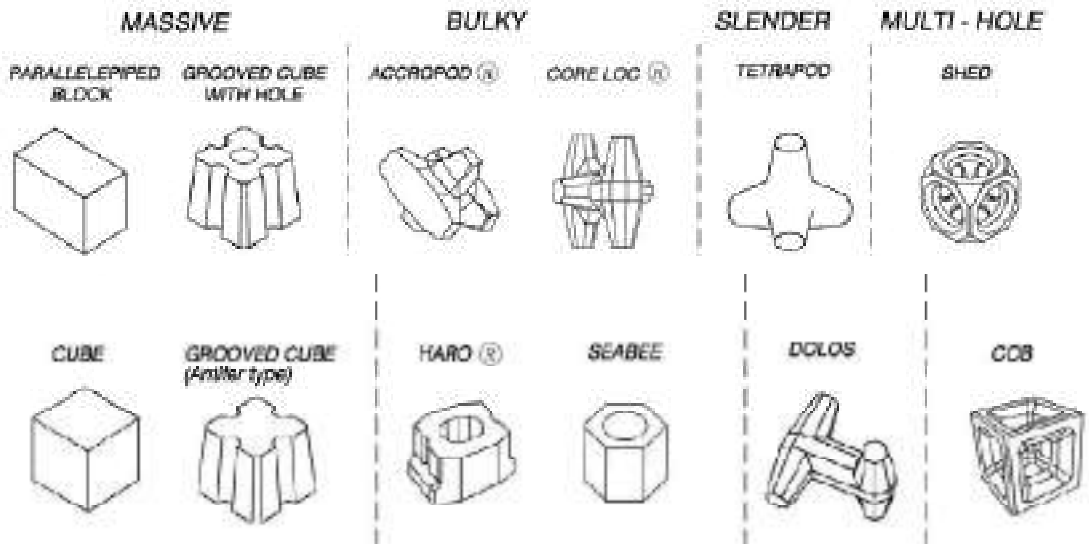


Figura 7: Principaistipos de blocos artificiais (CEM,2011).

Figura 8: Enrocamentos artificiais (Tetrápodes).

Os guia-correntes permitem que a maré enchente entre nos estuários e a subsequente maré vazante saia por entre os molhes. Em um canal de maré estável,a maré vazante é relativamente maior que a enchente, mais sedimentos saem do que entram na lagoa evitando, assim, a necessidade de dragagem. Porém, o projeto dessas estruturas deve ser feito de forma correta, com comprimento, largura e peso das pedras de enrocamento suficientes para que sua função seja satisfeita.

A Figura 9 mostra um exemplo de guia-correntes que permitem de maneira satisfatória que mais sedimentos saiam do que entrem na embocadura do estuário de Itajaí-Açu em Santa Catarina.

Figura 9: Imagemgeorreferenciada do Google Earth obtida em 10/2013 mostrando os guia-correntes do estuário Itajaí-Açu – SC.

No caso de estudo, a construção dos guia-correntes da lagoa de Itaipu em Niterói não se deu de forma correta com comprimento e altura inadequados, de modo que sua função de assegurar o escoamento entre lagoa e o mar está sendo prejudicada devido ao assoreamento na embocadura do canal. Os efeitos desse assoreamento podem ser facilmente observados não só no canal como também na lagoa. Na Figura 10, obtida no Google Earth em janeiro de 2014, podemos notar claramente esse assoreamento.

Pelo comprimento do guia-correntes estar muito curto, quase coincidindo com o final da faixa de areia, o transporte litorâneo de sedimentos passa pela frente do canal de maré, pela ação conjunta da maré de enchente com as ondas do mar, os sedimentos são carreados para o interior do canal de maré. Já a maré vazante não tem a ação das ondas para ajudar na movimentação dos sedimentos que ficam presos dentro do canal, como se fosse uma armadilha de areia. Ainda, em épocas de ressaca do mar, como as cotas das cristas dos guia-correntes são baixas, as ondas passam por cima das estruturas carreando também sedimentos para dentro do canal de maré.

Como já mencionado anteriormente, o INEA tem buscado medidas para revitalização do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu e no estudo feito pela COPPETEC em 2013 a pedido desse órgão ambiental, foi proposto o prolongamento dos guia-correntes do canal de maré da lagoa de Itaipu com o objetivo de propiciar estabilidade hidrossedimentológica no canal, acabando com os assoreamentos e aumentando a estabilidade dos arcos de praia adjacentes.

Convém destacar que não há risco relevante do alongamento e alteamento dos guia-correntes causarem efeitos deletérios nos arcos de praia que os ladeiam. Pode-se

notar nas diversas imagens do Google Earth entre 2004 e 2013e também nas Figuras 3 e 10 deste trabalho que a linha de costa é simétrica em relação ao eixo do canal de maré. Tal fato indica que não há deriva residual de sedimentos para um dos lados e que os alinhamentos estão em equilíbrio dinâmico. Portanto, o alongamento do guia-correntes não irá acumular sedimentos de um lado causando erosão do outro.

Figura 10: Imagemgeorreferenciada do Google Earth obtida em 01/2014 mostrando o assoreamento na embocadura da Lagoa de Itaipu, Niterói - RJ. A simetria da linha de praia nos dois lados dos guia-correntes indica que não há deriva dominante dos sedimentos para um dos lados.

2 Objetivo

Tendo em vista os esforços do Instituto Estadual do Ambiente – INEA de melhorar as condições ambientais do sistema lagunar Piratininga-Itaipu e o assoreamento presente na embocadura da lagoa de Itaipu que pode comprometer a renovação das águas desse corpo d'água com o mar, o presente trabalho tem como objetivo dimensionar o prolongamento dos guia-correntes da lagoa de Itaipu e sua estrutura de enrocamento, tendo como auxílio a utilização de modelagem computacional para avaliar as características das ondas na região da estrutura.

3 Referencial Teórico

Para o projeto básico de dimensionamento dos guia-correntes, faz-se necessário a busca de conceitos, critérios e fórmulas empíricas a serem utilizadas. Ainda, por se tratar de uma estrutura hidráulica, é preciso estudar as características hidrodinâmicas e físicas da área de interesse.Foram utilizadas duas fontes principais para ametodologia do trabalho que são o *CoastalEngineering Manual* (CEM 2011) e o *Shore Protection Manual*(SPM 1984), ambos do Corpo de Engenheiros do Exército Americano.

Neste capítulo são abordados conceitos importantes que serão fundamentais para o entendimento da metodologia do dimensionamento dos guia-correntes.

3.1 Ondas de Gravidade

Tratam-se de ondas geradas pelo vento, com período da ordem de alguns segundos, mediante a transferência de quantidade de movimento para a superfície de água, a qual se deforma na busca de sua nova forma de equilíbrio, dando origem à onda propriamente dita.

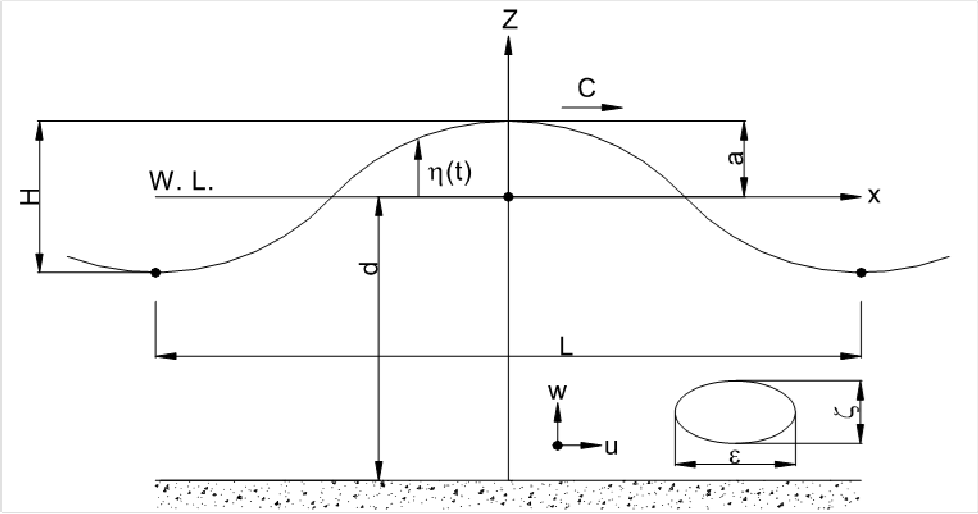
As ondas formadas nesse processo dependem da intensidade do vento, da duração da ação desse vento, e da extensão da área de atuação do vento sobre a superfície de água, chamada de *pista*. Dentro da área de geração as ondas apresentam uma forma "desorganizada", e essa onda é chamada de *vaga*. Fora da área de geração as ondas começam assumir uma forma mais suave, mais simétrica e mais organizada e então passam a ser chamadas de *ondulação*.

Ao descrevermos matematicamente a onda do mar por uma função dependente de um único período (ou frequência) estamos dizendo que essa onda é monocromática. Entretanto a onda real do mar não tem um período único (espectro descontínuo), mas sim uma faixa de períodos (espectro contínuo). Isso se deve ao fato de que no processo de geração das ondas o vento transfere quantidade de movimento para a água e as ondas vão sendo formadas com alturas e períodos dependente da velocidade do vento e do tempo de atuação do vento sobre a área de geração, resultando num estado de mar (conjunto de ondas) com diversos períodos, ou seja num espectro contínuo. Admitindo que o processo seja linear, podemos dizer que o estado de mar real seja dado pelo somatório de várias ondas monocromáticas.

Em termos espaciais, a onda real do mar é tridimensional, ou seja as relações geométricas em cada uma das direções de referência são igualmente importantes. Entre-

tanto, em analogia ao que foi considerado com relação ao período, podemos admitir que a onda real do mar é o resultado do somatório de várias ondas de alturas, comprimentos (períodos) e direções de propagação diferentes. (VALENTINE& ROSMAN 2010)

A Figura 11 a seguir mostra os principais parâmetros das ondas.



η(t) – forma da onda
L – comprimento da onda
T – período da onda
d – profundidade
x – abscissa. Origem na crista
t – tempo
z – coordenada vertical. Origem na linha d'água. Negativo para baixo
c – cerelidade da onda (velocidade)

u - velocidade horizontal da partícula
w - velocidade vertical da partícula
α_x – aceleração horizontal da partícula
α_z – aceleração vertical da partícula
ε - deslocamento horizontal da partícula
ζ - deslocamento vertical da partícula
a – amplitude da onda
H – altura da onda

Figura 11: Principais parâmetros de uma onda.

O conhecimento dessas ondas e das forças que elas geram é essencial para o dimensionamento de obras costeiras, pois elas são o fator mais importante na determinação da geometria das praias, planejamento e projeto de marinas, hidrovias, medidas de proteção da costa, estruturas hidráulicas. A estimação das condições das ondas se faz necessária em quase todos os estudos de engenharia costeira. (Cap.1_PartII_CEM 2011)

3.2 Propagação de Ondas

Para entendermos melhor os fenômenos que interferem na propagação de ondas no mar, alguns conceitos importantes devem ser considerados. Primeiramente, deve-se deixar claro o conceito de águas profundas e águas rasas, sendo a condição de águas profundas aquela em que a profundidade local é maior que a metade do comprimento de onda e a de águas rasas quando a profundidade é menor que 4% do comprimento de onda. (VALENTINI & ROSMAN, 2010)

A propagação de ondas desde águas profundas até águas rasas sofre interferência de diversos fenômenos que resultam na alteração de comprimento, diminuindo a medida que a profundidade também diminui. Além disso, observa-se que as ondas próximas à costa apresentam variações de direção da propagação e de altura. Desse modo, uma onda junto à costa apresenta comprimento, direção de propagação e altura diferentes daquelas correspondentes às dessa mesma onda em águas profundas. Tais variações podem ser determinadas em primeira aproximação através das características geométricas às quais as ondas são submetidas durante seu processo de propagação. (VALENTINI & ROSMAN, 2010)

Deve-se chamar a atenção para o fato de que o período da onda permanece constante durante a sua propagação. Este resultado surge da aplicação da Teoria dos Raios ao problema. Essa teoria mostra que mudanças no período da onda só podem ocorrer quando as propriedades do meio de propagação variam com o tempo, o que não acontece numa plataforma continental estática. (ROSMAN, 1992)

Dentre os principais fenômenos que interferem na propagação das ondas estão a refração e difração. A refração das ondas ocorre em águas rasas, porque a velocidade de propagação da onda diminui à medida que a profundidade também diminui. Dessa forma,o trecho daonda que está em profundidades menores se propaga mais devagar do que o trecho da onda que está em águas mais profundas. O resultado é deformação da onda em plantaque tende a se curvar e se alinhar com as curvas de nível do fundo do mar. Na Figura 12está representado graficamente esse fenômeno.(VALENTINI & ROSMAN, 2010)

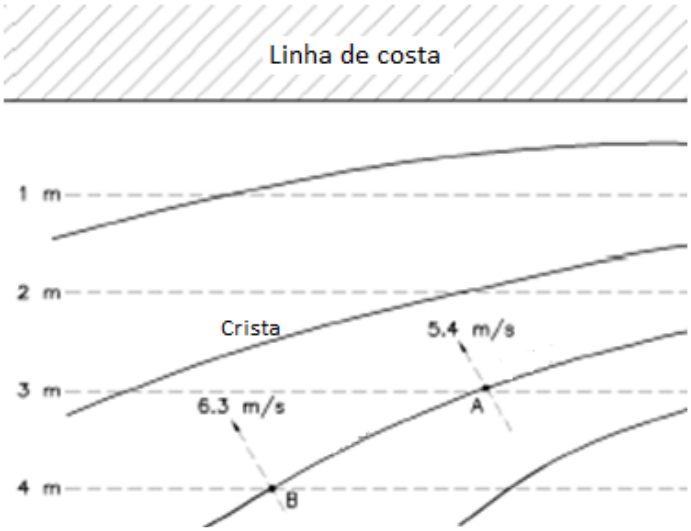


Figura 12: Representaçãoesquemática da refração de ondas pela batimetria.

A difração é a mudança na trajetória da onda em função do encontro com uma barreira, como por exemplo, uma ilha. Nesse processo a onda se deforma em planta devido à transferência lateral de energia, isto é ao longo da crista da onda. Se há variação de energia na lateral, há variação na altura da onda uma vez que a energia é proporcional ao quadrado da altura. A Figura 13 mostra esquematicamente esse fenômeno, onde existe um obstáculo que intercepta a propagação da onda definindo uma área onde há variação a altura chamada *região de sombra (região II)*, devido à analogia com o mesmo processo da ótica (VALENTINI & ROSMAN, 2010).

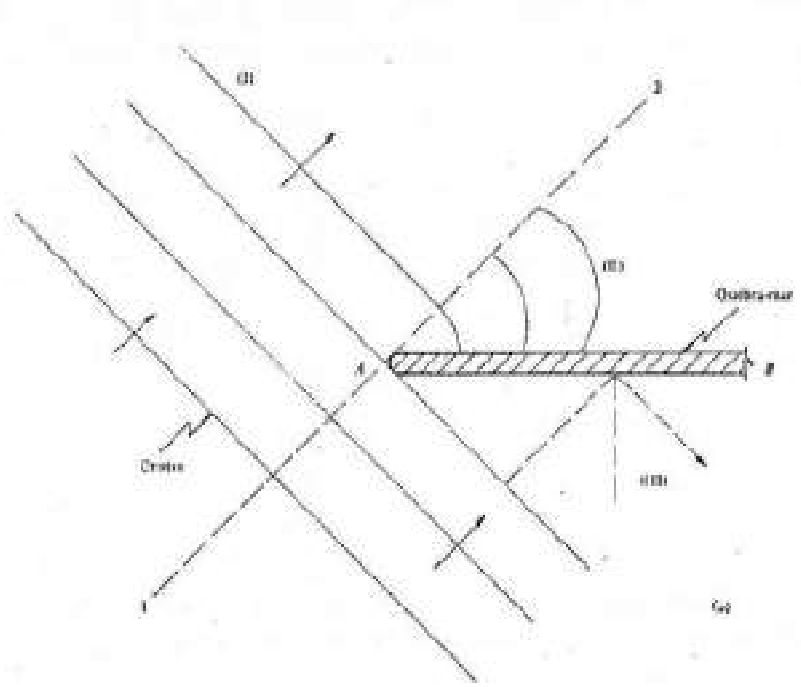


Figura 13:Representaçãoesquemática da difração de ondas (Mason 1981 pg 65).

A reflexão constitui um fenômeno tão importante quanto a refração e difração de ondas principalmente em projetos de estruturas portuárias. A reflexão de ondas implica na reflexão da energia das ondas e não em sua dissipação, portanto múltiplas reflexões em um recinto portuário e a ausência de dissipação de energia nos níveis necessários, podem resultar num aumento da energia e, consequentemente, num aumento da agitação, o que é indesejável em instalações portuárias. (VALENTINI & ROSMAN, 2010)

A arrebentação das ondas é também um importante fenômeno que deve ser considerado. O aumento da altura leva à instabilidade fazendo com que a onda arrebente, dissipando sua energia na forma de turbulência e de trabalho na zona de arrebentação.A zona de arrebentação é portanto uma região de grande dissipação de energia.A condição de estabilidade da onda pode ser avaliada através de sua esbeltez, dada pela relação entre a altura e o comprimento de onda. O limite dessa condição ocorre quando a velocidade da partícula de água na crista da onda se iguala à velocidade de propagação da onda, caso a velocidade da partícula aumente, a onda se desestabiliza e arrebenta.(VALENTINI & ROSMAN, 2010).

Quando a onda passa a se propagar em águas mais rasas ela diminui de velocidade e de comprimento, para manter o fluxo de energia constante ocorre um aumento na altura da onda e, dessa forma, um aumento na densidade de energia. A esse fenômeno dá-se o nome de empinamento (*shoaling*), que também deve ser considerado em projetos de estruturas costeiras.

3.2.1 Teorias das Ondas

Na observação ou medição do movimento de partículas de um fluido em escoamento é praticamente impossível seguir a trajetória de uma dada partícula, como se faz quando se observa o movimento de um objeto sólido. Quando se segue a trajetória de um dado objeto em movimento, independente da posição do observador, o movimento observado é o mesmo. No caso do movimento de partículas de um fluido, é muito mais conveniente se observar o escoamento das partículas passando pelo local de observação, do que tentar seguir a trajetória de uma partícula específica. Evidentemente, em contraste com o caso anterior, dependendo do local de observação o escoamento, ou o movimento, observado será diferente.

Chama-se descrição Lagrangeana àquela em que se descreve o movimento observando a trajetória da partícula que se move. E descrição Euleriana é aquela em que se observa o movimento através do escoamento das partículas que passam pelo ponto de observação. No caso Lagrangeano o movimento é independente da posição do observador, mas no caso Euleriano, o movimento depende da posição do observador. (ROSMAN, 1997)

Existemdiversas teorias que procuram representar matematicamente a forma da onda, velocidade de propagação, etc. Existe desde a teoria mais simples (Teoria de Airy ou Teoria Linear) até teorias mais complexas onde várias hipóteses simplificadoras são abandonadas, tais como: fluido homogêneo e incompressível, tensão superficial desprezível, fluido ideal ou invíscido; uma onda não interage com outra, amplitude de onda pequena, etc. Na Figura 14apresenta-se um guia para escolha da teoria mais apropriada.

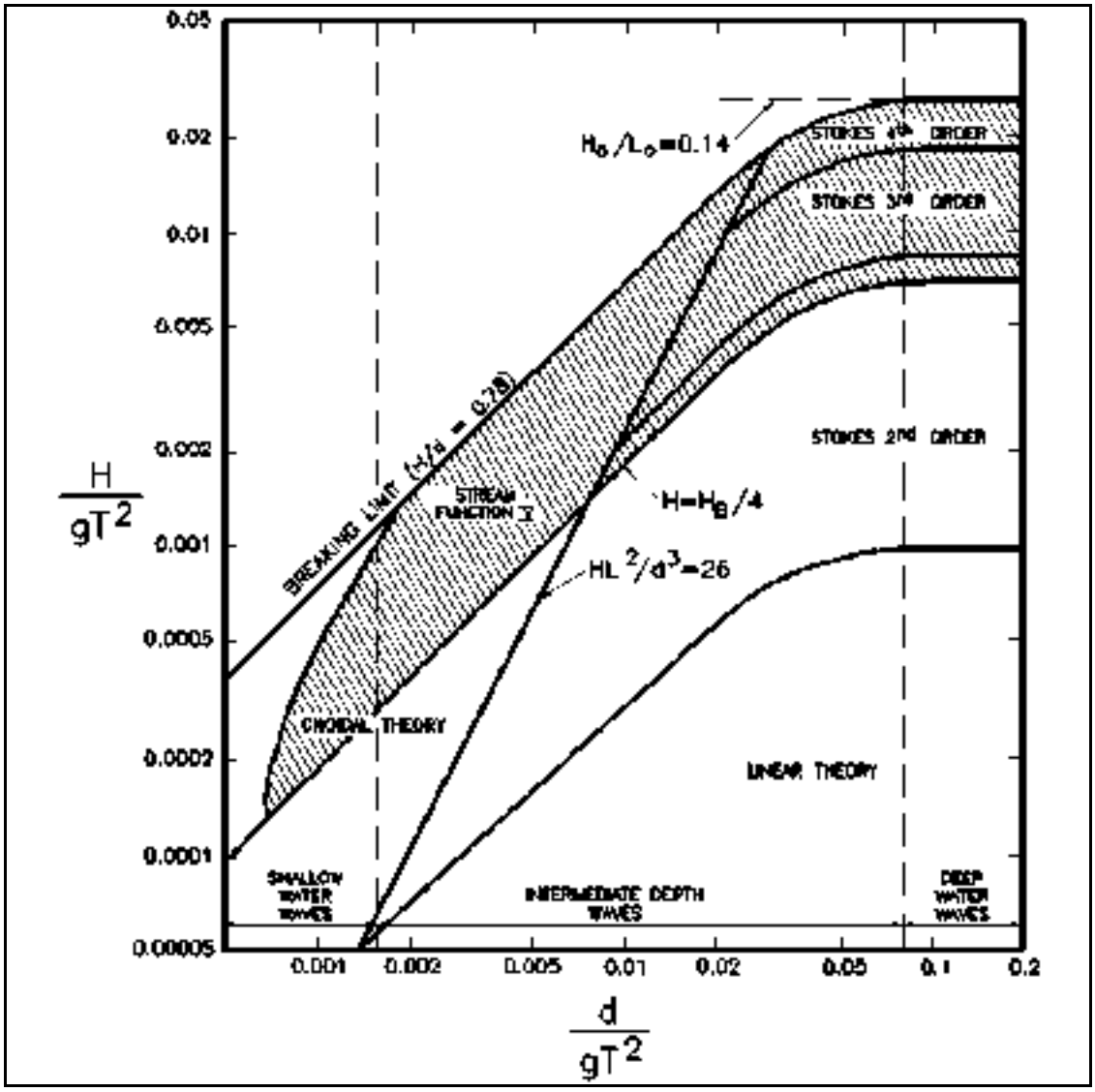


Figura 14: Regiões de validade das teorias de onda. (CEM, 2011)

3.2.1.1 Teoria Linear

A Teoria Linear, também chamada de Teoria de Airy, é a teoria de ondas mais simples, sendo aplicada para ondas onde a amplitude é pequena em relação ao comprimento.

Nesta teoria é assumido que o fluido é homogêneo, invíscido (sem viscosidade), incompressível e irrotacional e que o fundo é horizontal, fixo e impermeável.

A equação da superfície livre é dada por:

$$\eta(t) = \frac{H}{2}\cos 2\pi\left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

Na Figura 15 abaixo mostram as características das ondas obtidas pela Teoria Linear para águas rasas, intermediárias e profundas.

Relative Depth	Shallow Water $\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$ $kd < \frac{\pi}{10}$	Transitional Water $\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$ $\frac{\pi}{10} < kd < \frac{\pi}{2}$	Deep Water $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$ $kd > \frac{\pi}{2}$
1. Wave profile	Same As >	$\eta = \frac{H}{2}\cos\left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right] = \frac{H}{2}\cos\theta$	< Same As
2. Wave celerity	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Wavelength	$L = T\sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Group velocity	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right]C$	$C_g = \frac{1}{2}C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Water particle velocity (a) Horizontal	$u = \frac{H}{2}\sqrt{\frac{g}{d}}\cos\theta$	$u = \frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$u = \frac{\pi H}{T}e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\cos\theta$
(b) Vertical	$w = \frac{H\pi}{T}\left(1+\frac{z}{d}\right)\sin\theta$	$w = \frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$w = \frac{\pi H}{T}e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\sin\theta$
6. Water particle accelerations (a) Horizontal	$a_x = \frac{H\pi}{T}\sqrt{\frac{g}{d}}\sin\theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$a_x = 2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\sin\theta$
(b) Vertical	$a_z = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\left(1+\frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$a_z = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\cos\theta$
7. Water particle displacements (a) Horizontal	$\xi = -\frac{HT}{4\pi}\sqrt{\frac{g}{d}}\sin\theta$	$\xi = -\frac{H}{2}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$\xi = -\frac{H}{2}e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\sin\theta$
(b) Vertical	$\zeta = \frac{H}{2}\left(1+\frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$\zeta = \frac{H}{2}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$\zeta = \frac{H}{2}e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}\cos\theta$
8. Subsurface pressure	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g\eta\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g\eta e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} - \rho g z$

Figura 15: Formulação da Teoria de Airy. (CEM, 2011)

3.2.1.2 Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Como já foi visto na Figura 14, quando a altura de onda vai crescendo, outras teorias devem ser utilizadas, para melhor solução do problema. Geralmente as ondas de gravidade não possuem pequenas amplitudes. De fato, do ponto de vista da engenharia, ondas de maiores aturas são levadas em conta em obras costeiras.

A fim de aproximar a solução completa para ondas do mar, são desenvolvidas aproximações sucessivas de forma a aprimorar as equações hidrodinâmicas da Teoria Linear para ondas de gravidade. Cada teoria de ondasbusca melhorar a conformidade entre os resultados das ondas teóricas e das ondas observadas. Estas soluções de ordens superiores ou estendidas para ondas de gravidade são frequentemente chamadas de teorias de ondas não-lineares. A Teoria de Stokes de 2ª ordem é uma entre essas teorias que é amplamente utilizada. (CEM, 2011)

Aequação da superfície livre para esta teoria é a seguinte:

$$\eta(t) = \frac{H}{2}\cos 2\pi\left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right) + \frac{\pi H^2}{8L}\left(1 + \frac{3}{2\,\mathrm{senh}^2\left(2\pi d/L\right)}\right)\coth\frac{2\pi d}{L}\cdot\cos 4\pi\left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right) \quad (2)$$

Pode-se perceber que, neste caso, coloca-se um termo adicional à equação de Airy. Nesta teoria é considerada a variação de profundidade. A partir de Stokes 2ª ordem, há transporte de massa, pois as órbitas das partículas não são fechadas.

3.2.2 Modelo de Propagação de Ondas

O modelo de propagação de ondas utilizado no SisBaHiA® é baseado no modelo REF/DIF que, segundo TEIXEIRA et al (2006), simula a propagação e deformação de ondas monocromáticas lineares em zonas de fundos de inclinação suave. É baseado na aproximação parabólica de ângulo largo da equação de Berkhoff, estendida por Kirby, o que permite o estudo da propagação de ondas cujo ângulo de incidência não exceda $\pm 45^o$. Este modelo leva em conta os efeitos de refração, difração (apenas da direção transversal à de propagação da onda), presença de correntes e de dissipação de energia devido àarrebentação e ao atrito com o fundo, não levando em conta, no entanto, os fenômenos de reflexão. Desta forma, trata-se de um modelo mais rápido e eficiente com

pequenos requerimentos em termos de memória computacional, comparativamente a outros, como por exemplo, os baseados na aproximação elíptica. Este fator possibilita a sua aplicação a grandes áreas costeiras. Devido ao fato de não ter em conta os fenômenos de reflexão, não pode ser aplicado em zonas onde esta tem um papel importante.

As equações do modelo são resolvidas através do Método das Diferenças Finitas (MDF). A discretização espacial do domínio é feita com uma malha regular retangular. O modelo calcula a altura ea direção de propagação da onda em cada ponto da malha de diferenças finitas.

Os dados a fornecer ao modelo REF/DIF são:

- as características da agitação incidente (período, direção e amplitude de onda);
- as características da malha de diferenças finitas (comprimento da malha em x e em y e espaçamento entre nós da malha);
- a batimetria no domínio de cálculo.

Para a aplicação do modelo, deve-se garantir queo fundo é de inclinação suave (até um valor do declive de 1:3); o ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção de propagação principal, não deve ultrapassar os 45°, devido à utilização da aproximação parabólica de ângulo largo.

Como limitações do REF/DIF, saliente-se o fato de tratar de um modelo de ondas regulares. O modelo leva em conta apenas a difração de ondas na direção transversal à direção de propagação de ondas, fato pelo qual não deve ser utilizado em zonas abrigadas por obstáculos. Além disso, este modelo, por ser parabólico, não deve ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes, pois a componente de onda refletida é desprezada.

Na Figura 16 a seguir é mostrado o *layout* do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® utilizado neste projeto e nele podem ser analisados os dados de entrada necessários para simular os modelos.

Deve-se definir a Grade de Propagação de Ondas (GPO) fornecendo as coordenadas da origem, comprimento total e o número de subdivisões do Lado Transverso

àCosta (LTC) e do Lado de Incidência de Ondas (LIO). Além disso, a definição do ângulo norte do LTC é de fundamental importância na definição das direções de propagação de ondas a serem modelados.

Além da definição da GPO, devem serdefinidas as características das ondas unitárias incidentes àLIO, ou seja, deve-se definir o período da onda, o nível de maré, a amplitude e o azimute da onda incidente.

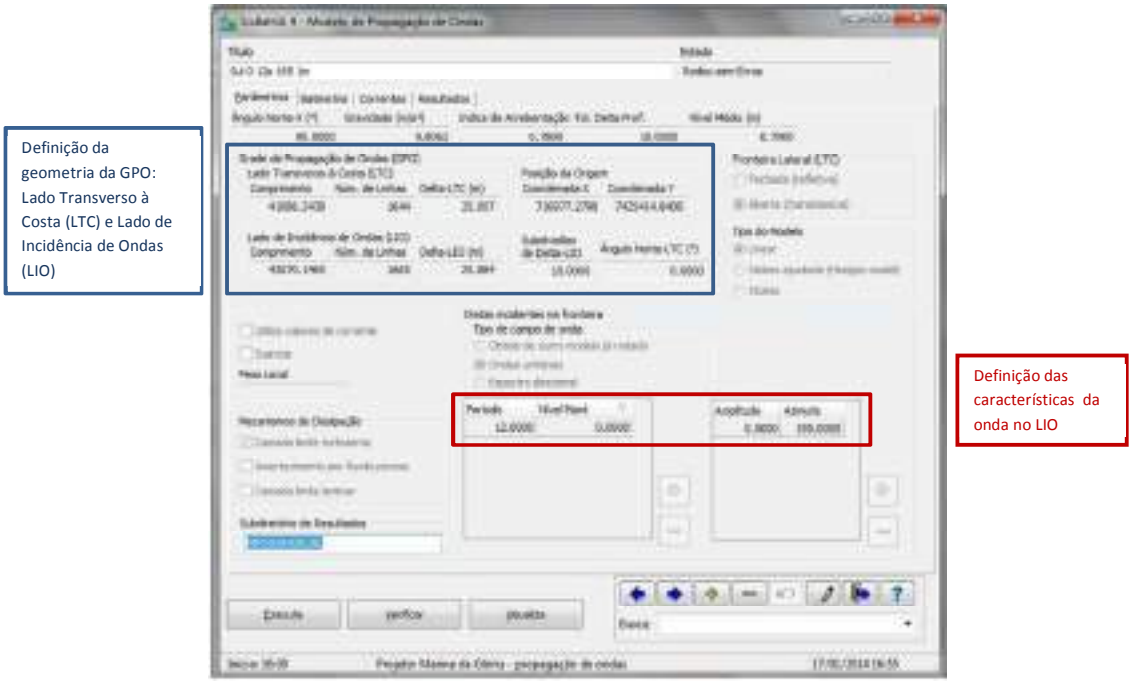


Figura 16: Layout do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA®.

3.3 Critério de Arrebentação

Muitos estudos foram realizados para desenvolver relações que possam prever a altura da onda no momento incipiente de quebra H_b. Existem muitas definições para arrebentação incipiente, a mais comum é o momento em que a altura da onda é máxima.

O critério de arrebentação da praia relaciona a altura de arrebentação com a profundidade de arrebentação: $\gamma_b = \frac{H_b}{d_b}$. MCCOWAN (1981) determinou teoricamente $\gamma_b = 0.78$ para ondas regulares viajando em um fundo horizontal. Esse valor é comumente usado em projetos de engenharia como uma primeira estimativa do critério de

arrebentação, mas análises de dados experimentais mostram que a relação entre a profundidade de arrebentação e altura de arrebentação é mais complexa do que a equação $\frac{H_b}{d_b} = 0.78$. Sendo assim, tal equação não deve ser usada com propósitos de dimensionamento. Estudos posteriores estabeleceram que os índices de arrebentação variam de acordo com o talude da praia e da esbeltez das ondas.

Para o caso de estudo, optou-se por estimar a relação $\frac{H_b}{d_b}$, através do ábaco na Figura 17 retirada do Cap. 4 - Parte II - CEM 2011, onde a abscissa $H_b/(gT^2)$representa a esbeltez da onda relacionando sua altura com seu comprimento e tanβ representa o talude da praia.

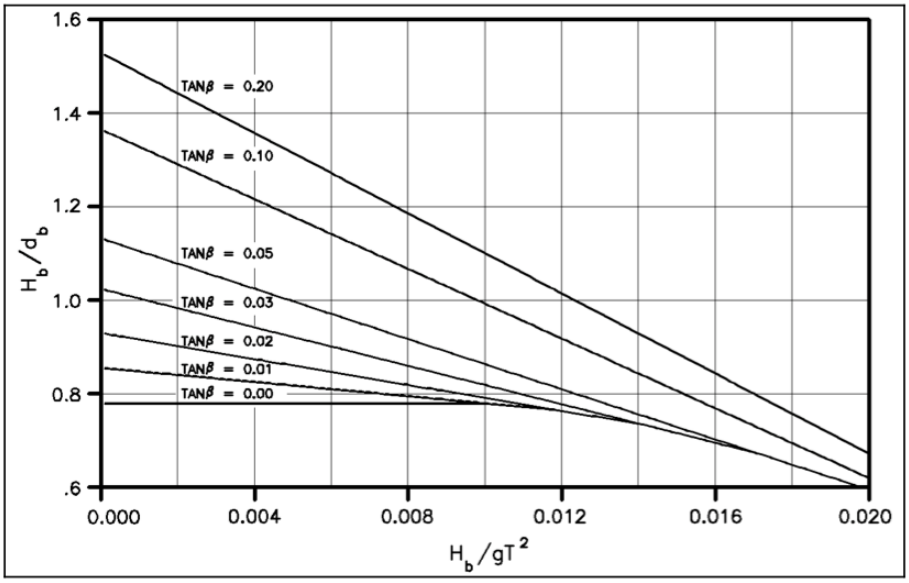


Figura 17:Ábaco com o índicede profundidade de arrebentação em função de $H_b/(gT^2)$ (CEM, 2011).

3.4 Profundidade de Fechamento

Com o objetivo de determinar o comprimento necessário dos guia-correntes, deve-se calcular a profundidade de fechamento, que representa o elemento de separação entre a zona de transporte ativo de sedimentos e a zona mais profunda na qual ocorre baixa taxa de sedimentação e erosão.

Segundo KRAUSet al. (1999), para um dado ou característico intervalo de tempo, a profundidade de fechamento é a profundidade no meio litorâneo submerso mais próximo da faixa de praia na qual não existe significativa mudança na batimetria nem tampouco ocorre uma troca importante de sedimentos entre o setor litorâneo e o segmento offshore.

Baseado em experimentos laboratoriais e algumas medições de campo, HALLERMEIER (1978, 1981) desenvolveu um procedimento para prever empiricamente a profundidade de fechamento usando condições extremas de ondas.

A altura significativa de onda efetiva H_ee o período de onda efetivo $T_e$foram baseados em condições excedidas somente em 12 horas por ano, ou seja, 0,14 por cento do tempo. A equação a seguir foi encontrada para determinar a profundidade de fechamento h_c.

$$h_c = 2{,}28H_e - 68{,}5(\frac{{H_e}^2}{g{T_e}^2}) \quad (3)$$

3.5 Marés

Marés são ondas com períodos bem marcantes: de aproximadamente 12 horas ou 24 horas. São geradas por efeitos astronômicos decorrentes das posições relativas entre a Terra, o Sol e a Lua e, por esse motivo, essa onda é chamada de *maré astronômica*. Oscilações de nível que ocorrem decorrentes de efeitos meteorológicos geram a *maré meteorológica*. Em obras costeiras, o estudo dos níveis das marés na região é imprescindível e deve-se levar em conta tanto os efeitos da maré astronômica como os da maré meteorológica.

3.5.1 Maré Astronômica

Nas situações de *lua nova* e de l*ua cheia* os três corpos celestes estão alinhados e os efeitos gerados pela Lua somam-se àqueles gerados pelo Sol, portanto as preamares são mais altas e as baixamares são mais baixas. Nesses casos diz-se que a maré é de *sizígia*. Nas situações de *lua crescente* e de *lua minguante*, a Lua e o Sol fazem um ângulo reto com a Terra no vértice, portanto as influências da Lua e do Sol estão defasadas. Nessa situações as marés são chamadas de *maré de quadratura,* apresentando preamares e baixamares menos pronunciadas que nos casos de sizígia.

Os registros de maré mostrados na Figura 18 mostram claramente as situações de maré de sizígia e de quadratura. Repare que para aproximadamente um mês de registro, as alturas da maré aumentam e diminuem a cada 7 dias aproximadamente. Ou seja, em um mês tem-se duas sizígias e duas quadraturas.

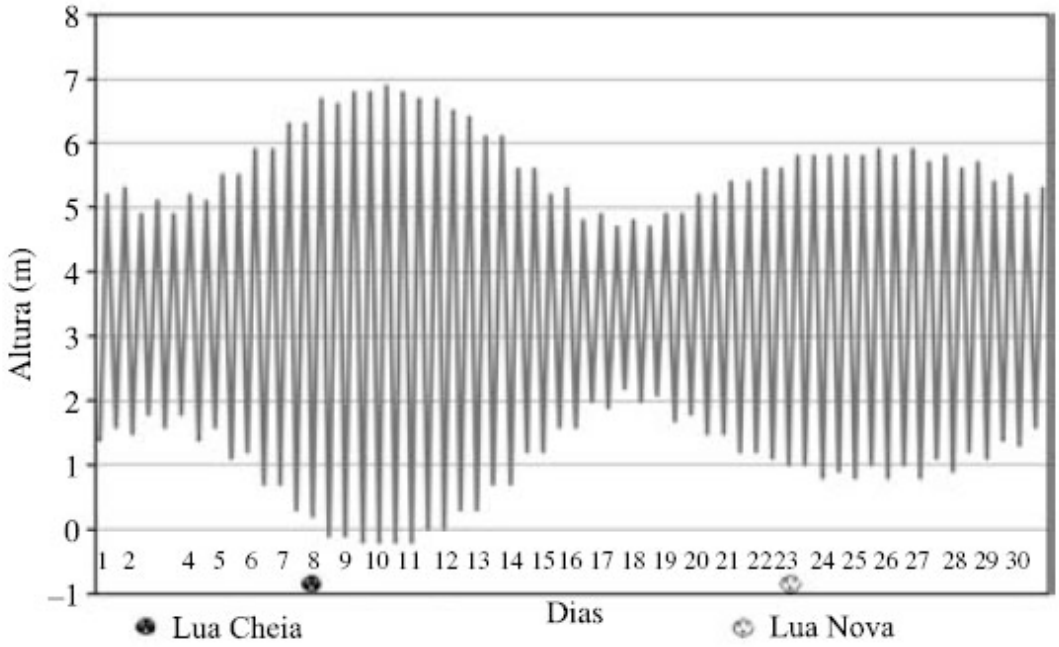


Figura 18:Exemplode registro de maré evidenciando as marés de sizígia e de quadratura. Fonte: DHN Local: Porto de Itaquí, São Luís.

3.5.2 Maré Meteorológica

O problema da maré não se resume apenas aos agentes astronômicos. O registro de maré num ponto da costa geralmente é diferente daquele previsto pela maré astronômica devido ao fato de que as oscilações de nível do mar refletem efeitos meteorológicos, que são chamados de *marémeteorológica.* Esses efeitos são causados por variações de pressão atmosférica, empilhamentos ou afastamentos da massa d'água junto à costa devido à ação de ventos, e efeitos de acumulação de água por ação de ondas, resultando em variações de nível que podem assumir valores bastante significativas a ponto de provocar inundações, ou transtornos à navegação, etc.

No Rio de Janeiro, por exemplo, a maré meteorológica chega a ser da mesma ordem de grandeza da maré astronômica, na casa de 0,8 a 1,0m de altura. Isto significa que pode acontecer de o nível observado ser até o dobro daquele previsto maré astronômica. O maior problema reside no fato de que os agentes responsáveis pela maré meteorológica são aleatórios e portanto não são previsíveis e devem ser tratados estatisticamente a partir dos dados observados num dado local e por um longo período de tempo.

A Figura 19a seguir apresenta os registros de maré obtidos simultaneamente por dois equipamentos distintos instalados na Ponta da Armação (baía de Guanabara, RJ). Na figura, a linha vermelha representa níveis previstos de maré astronômica e a linha

azul mostra os níveis reais medidos, que englobam os efeitos de marés astronômica e meteorológica. As linhas pontilhadas retratam os níveis médios do mar previstos e medidos ao longo dos dias. Observa-se que no início da série os dados medidos praticamente coincidem com os valores previsto, já no final do período representado os dados medidos se distanciam muito daqueles previstos. Neste caso não se trata de erro de medição, mas sim da ocorrência de efeitos meteorológicos que se somaram aos astronômicos. A maré meteorológica se caracteriza pela variação do nível médio diário, i.e., a diferença entre a linha pontilhada azul e a linha pontilhada vermelha.

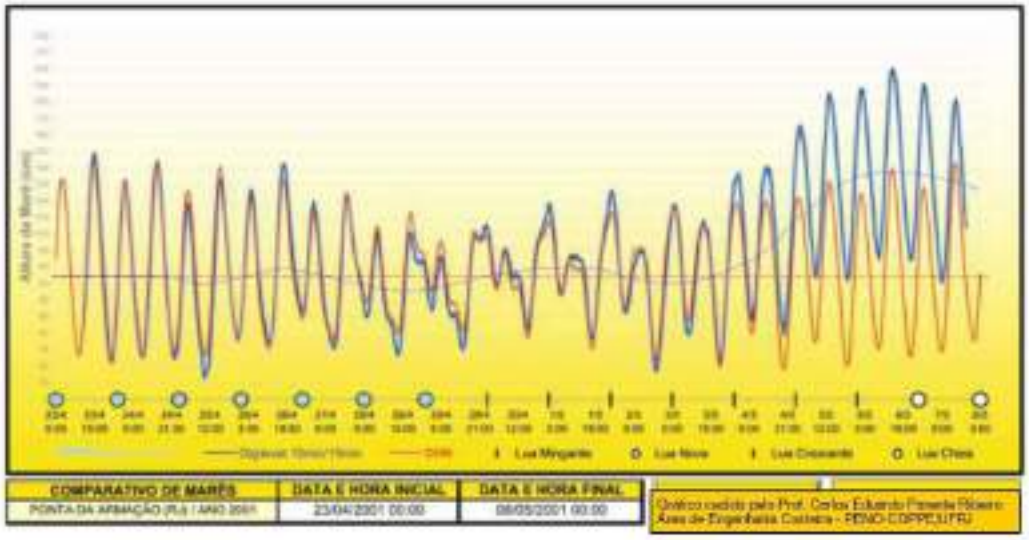


Figura 19:Registrode maré meteorológica em Niterói - RJ.

3.5.3 Análise dos Dados de Maré

Em Cartas Náuticas apresentam quadros resumindo informações gerais sobre níveis de maré, como exemplificado na Figura 20 abaixo.

INFORMAÇÕES SOBRE A MARÉ

Lugar	Lat.	Long.	H.W.F.&C	Altura sobre o N.R		
				M.H.W.S	M.H.W.N	M.S.L
Vitória	20°19',18	040°19',05	III h42min	146cm	105cm	80cm
Tubarão	20°17',30	040°14',62	III h20min	148cm	104cm	82cm

Figura 20:Tabela retirada da Carta Náutica da Baía de Vitória.

A seguir algumas definições de níveis de maré apresentados nas cartas npauticas:

N.R. = Nível de Redução, ou referência de nível à qual são definidas as cotas, *z*, de maré e de profundidades. Vale destacar que as cotas de níveis de maré são positivas quando acima do NR e negativas quando abaixo. Porém, as profundidades *h* apresentadas nas Cartas Náuticas seguem lógica oposta, pois são apresentadas como $h = -z$, a batimetria é o negativo da cota. Em geral o NR fica próximo da mais baixa baixamar de sizígia no local.

M.S.L. = *MeanSeaLevel*- Nível Médio do Mar (NMM) no local da medição da maré. Convém destacar que não representa um nível médio no sentido estatístico. O MSL não corresponde necessariamente ao nível com permanência de 50%, i.e., o nível abaixo do qual os níveis de maré para um dado local permaneceriam por 50% do tempo.

M.H.W.N = *Mean High WaterNeap*- Média das Preamares de Quadratura.

M.H.W.S = *Mean High Water Spring* - Média das Preamares de Sizígia.

H.W.F.& C. = *High WaterFull&Change*- Preamar de Lua Cheia & Nova: Define-se "Estabelecimento do Porto" como o atraso médio entre a hora da passagem da Lua no meridiano do Porto e a hora da preamar de sizígia.

Em locais com marés que apresentam desigualdades diurnas ainda se definem:

M.H.H.W = *MeanHighestHightWater*- Média das Preamares Mais Altas de Sizígia.

M.L.H.W = *MeanLowest High Water*- Média das Preamares Mais Baixas de Sizígia.

M.H.L.W = MeanHighestLowWater - Média das Mais Altas Baixamares de Sizígia.

M.L.L.W = *MeanLowestLowWater* - Média das Mais Baixas Baixamares de Sizígia.

Um detalhe importante que diz respeito às cotas de referência de nível, é o *zero IBGE* é definido pelo *datum*geodésico do país e nivela todas as cotas terrestres sendo utilizado em todos os mapas e levantamentos topográficos. O *zero hidrográfico* é definido pelo nível médio das baixamares de sizígia de um dado local sendo utilizado na navegação e em todos os levantamentos hidrográficos. Assim sendo o valor do zero hidrográfico não é absoluto, mas sim relativo a um dado local e, portanto, cada carta náutica apresenta o valor do zero hidrográfico correspondente. O engenheiro costeiro utiliza ambas as referências uma vez que sua atividade se desenvolve na interface do continente com o mar, com isso para cada região há uma relação particular que deve ser obedecida para ajustar o nivelamento topográfico ao hidrográfico.

3.6 Estruturasde Enrocamento

Estruturas costeiras devem ser projetadas para satisfazer uma série de critérios conflitantes, incluindo a estabilidade estrutural, desempenho funcional, impactos ambientais, custos de implementação e de manutenção e outras restrições que adicionam desafio à tarefa do dimensionamento. Critérios de estabilidade estrutural são muitas vezes expressos em termos das condições extremas que uma estrutura costeira deve resistir sem sofrer danos significativos. Essas condições incluem geralmente ondas com tempo de recorrência de alguns anos. Porém, os critérios em que condições extremas podem ser satisfeitas por vezes são limitados por uma questão de redução dos custos de implementação, dependendo do orçamento do projeto. As consequências de danos ocasionais são mais economicamente viáveis do que o primeiro custo de um estrutura invulnerável aos efeitos de eventos extremamente raros. Dessa maneira, devem ser considerados tanto os custos fixos como os variáveis do projeto, assumindo que se trata de uma obra que eventualmente permite um certo nível de danificação na estrutura por algum efeito adverso e que deverá ser reparado.

O critério de desempenho funcional deve ser estabelecido de acordo com o efeito desejado da estrutura nas proximidades ou em termos de sua pretendida função. Por exemplo, um quebra-mar construído para garantir a segurança de um porto deve proporcionar o funcionamento das diversas atividades dentro de condiçõesaceitáveis na área portuária. Já um guia-correntes, que tem níveis de segurança menos exigentes, terá critérios de desempenho funcional diferentes ao do quebra-mar, pois o comprometimento parcial ou total de sua função será menos prejudicial do que por em risco a segurança de um porto.

Os danos em uma estrutura de enrocamento são progressivos e é preciso um longo período de ação de ondas destrutivas para comprometer o funcionamento da estrutura. Por isso é necessário a escolha de uma onda de projeto que leve em consideração a frequência de ondas com capacidade de causar danos e os custos da construção e manutenção.(Cap.5_Parte VI_CEM2011)

O tipo de ação das ondas que chegam na estrutura podem variar ao longo da mesma, assim como o nível do mar varia de acordo com o tempo, por isso as condições

da onda de projeto devem ser estimadas em várias seções da estrutura para várias condições de nível do mar. (SPM, 1984)

Em projetos estruturais em geral, é importante a determinação das cargas e os esforços que elas geram nos elementos da estrutura, deformações e condições de estabilidade. No caso de enrocamentos expostas ao ataque de ondas, com o complicado fluxo das ondas impactando naestrutura, não é possível calcular as cargas geradas pela força das ondas em uma unidade do enrocamento. Além disso, a forma complexa das pedras e sua colocação aleatória, torna o cálculo das forças de reação entre as unidades adjacentes impraticável. Consequentemente, cálculos determinísticos da estabilidade dos blocos do enrocamento não podem ser realizados. Dessa forma, cálculos de estabilidade são baseados em testes de modelos hidráulicos,relacionando as características das ondas incidentes e as respostas estruturais, normalmente expressos em termos dos movimentos dos blocos. (Cap.5_Parte VI_CEM2011)

3.6.1 Massa das Pedras do Enrocamento

HUDSON (1974), propôs as seguintes formula para pedras, com duas camadas de armadura, sem transpasse de água: (Cap.5_Parte VI_CEM2011)

$$W_{50} = \frac{\rho_S \, H^3}{K_D \left(\frac{\rho_S}{\rho_W} - 1\right)^3 cot\alpha} \quad (4); \qquad D_{50} = \left(\frac{W_{50}}{\rho_S}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Onde:

H =	Altura da onda de projeto [m]
ρ_s =	Massa específica da pedra [Kg/m³]
ρ_w =	Massa específica da água [Kg/m³]
W_{50}=	Massa média das pedras da camada externa[Kg].Admite-se uma variabilidade de 20% no peso das pedras, sendo que pelo menos 50% das pedras tenham massa igual ou maior que W_{50}.
D_{50} =	Aresta de um cubo de pedra com massa W_{50} [m]
cotgα =	*m* componente horizontal do talude; (*m*H:1V)

K_D = Coeficiente de estabilidade

Segundo o SPM (1984), o coeficiente K_D para o dimensionamento com a equação acima depende de vários fatores além da declividade do talude da estrutura, altura da onda e peso específico da água no local. Segundo testes em laboratório realizados por Hudson e Jackson, as principais variáveis para estabelecer os valores de K_D uma estrutura de enrocamento são:

-Forma das unidades de armadura;
-Número de unidades que compõem a espessura da camada de armadura;
-Maneira de colocação das unidades de armadura;
-Rugosidade da superfície e ângulo das extremidades dos blocos
(travamento das unidades de armadura);
-Tipo de onda que está atacando a estrutura (quebrando ou ondulação);
-Parte da estrutura (tronco ou cabeço);
-Ângulo de incidência da onda de projeto;
-Escala do modelo (número de Reynolds);

A Tabela 1 foi retirada do Cap.5_parte VI_CEM2011 baseada no SPM(1984) considerando níveis admissíveis de dano na estrutura.

Tabela 1: Coeficientes K_D

Forma das pedras	Colocação	Dano (D)			
		0-5%		5-10%	10-15%
		Arrebentação	Ondulação	Ondulação	Ondulação
Liso arredondado	Aleatória	2.1	2.4	3.0	3.6
Rugoso Angular	Aleatória	3.5	4.0	4.9	6.6
Rugoso Angular	Especial	4.8	4.8	-	-

Fonte: Cap. 5 Parte VI CEM2011

3.6.2 Cota da Crista

A altura da crista deve levar em consideração a altura de galgamento (run-up) das ondas sobre o talude da estrutura. Nos casos em que não é admitido o sobrepasse de água por cima da crista, o nível degalgamento é determinante na definição da altura da estrutura.

A altura de galgamento é calculada comoa altura máxima de espraiamento da onda sobre o talude da estrutura, medida verticalmente, em relação ao níveldo mar. Ela depende da rugosidade, permeabilidade, porosidade e talude da estrutura, e das características das ondas incidentes como altura e esbeltez. (Cap. 5_Parte VI_CEM2011)

Quanto mais permeável for a estrutura, menor será a capacidade da água de subir na mesma, pois parte da água irá penetrar por entre suas unidades, ocasionando menor galgamento, conforme ilustrado na Figura 21abaixo.

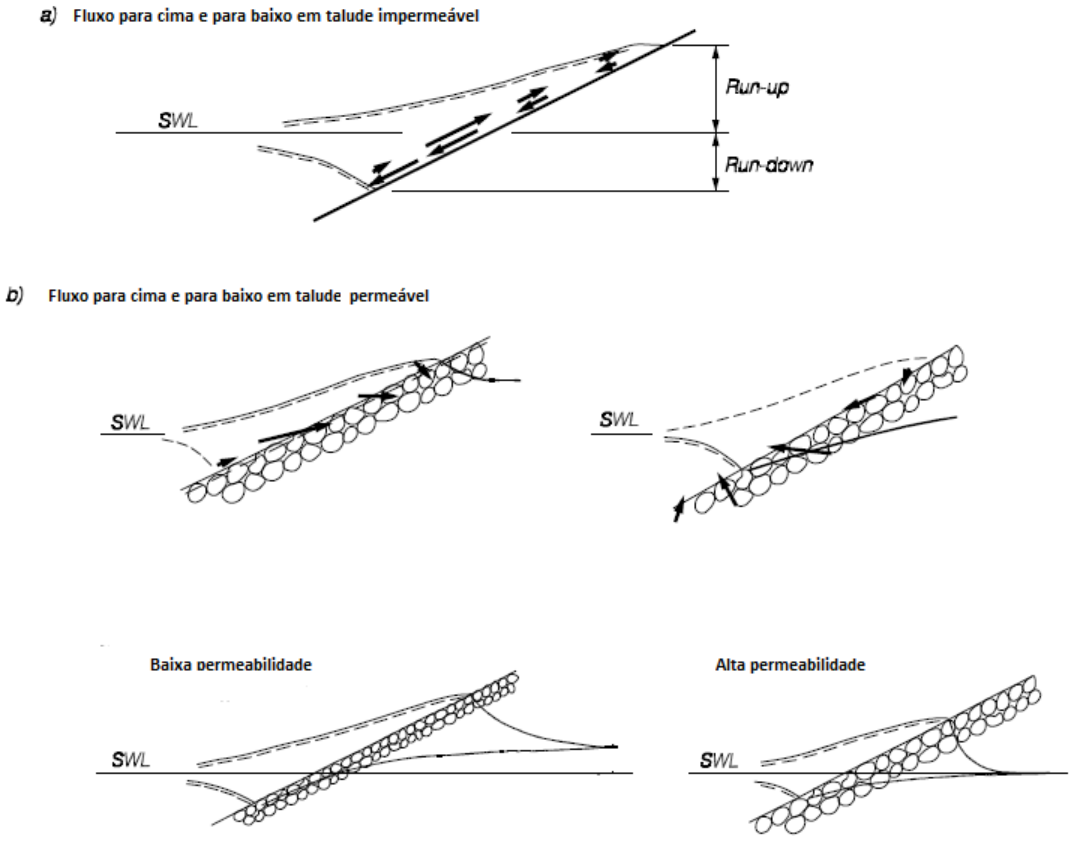


Figura 21:Representação esquemática do run-up (galgamento) e run-down sobre o talude de uma estrutura hidráulica. (CEM, 2011)

Se a cota da crista for menor do que a altura de galgamento das ondas, ocorrerá o sobrepasse de água por cima da estrutura. No caso em que não é admitido o sobrepasse, a cota da crista será maior do que a cota atingida pela máxima elevação do mar, alcançada pela combinação dos níveis de elevação devido ao galgamento e às marés.

3.6.3 Largura da Crista

A largura da crista depende muito do grau de sobrepasse de água por cima da mesma, onde não haverá sobrepasse a largura da crista não é crítica, ou seja, não é crucial para a estabilidade estrutural. Através de umestudo sobre a largura da crista das estruturas de enrocamento sujeitas ao galgamento, chegou-se a conclusão que a largura mínima para a crista iguala a largura combinada de três unidades de armadura (n=3).

Quando a estrutura é sujeita a sobrepasse de água por cima da crista, a largura da crista é obtida através da equação:(Cap. 5_Parte VI_CEM2011)

$$B = n.k_{\Delta}.\left(\frac{W}{W_r}\right)^{1/3} (6)$$

Sendo que B é a largura da crista, n é o número de blocos de enrocamento que deve obedecer ao mínimo de 3, k_{Δ} o coeficiente de forma que depende do tipo de blocos empregados na armadura da estrutura, W o peso dos blocos empregados na primeira camada da estrutura e W_r o peso específico dos blocos de armadura. (SPM, 1975).

Na tabela 2 abaixo, tem-se os coeficientes de forma.

Tabela 2: Coeficientes de forma e Porosidade para várias unidades de armadura

Unidade de Armadura	n	Disposição dos Blocos	Coeficiente de Forma k_{Δ}	Percentual de Porosidade (P)%
Enrocamento (liso)	2	Aleatória	1,02	38
Enrocamento (rugoso)	2	Aleatória	1,00	37
Enrocamento (rugoso)	>3	Aleatória	1,00	40
Paralelepípedo	2	Especial	----	27
Cúbico (modificado)	2	Aleatória	1,10	47
Tetrápodo	2	Aleatória	1,04	50
Quadrípodo	2	Aleatória	0,95	49
Hexápode	2	Aleatória	1,15	47
Tribar	2	Aleatória	1,02	54
Dolos	2	Aleatória	0,94	56
Toskane	2	Aleatória	1,03	52
Tribar	1	Uniforme	1,13	47
Enrocamento	Classif.	Aleatória	------	37

Fonte: SPM, 1984

Em estruturas onde não é admitido o sobrepasse de água por cima da crista, a largura da crista é estimada como sendo o maior entre dois valores: $3\times D_{50}$ou 3,0m. O

valor 3,0m é aproximadamente o mínimo requerido para operação dos equipamentos de construção e manutenção da estrutura, de modo que os caminhões possam transitar pela crista levando as pedras de enrocamento.

3.6.4 Camadas da Estrutura

Uma estrutura de enrocamento é normalmente composta de um núcleo de um material mais fino, coberto por uma ou mais camadas de pedra maiores e uma camada exterior, com pedras ainda maiores que as anteriores. A Figura 22 a seguir ilustra típicas seções transversais, a primeira é uma seção idealizada que faz um uso mais completo da variedade dos tamanhos de pedra, porém, também é mais difícil de construir. A segunda ilustra uma seção recomendada que leva em consideração as complicações em construir partes submersas da estrutura.

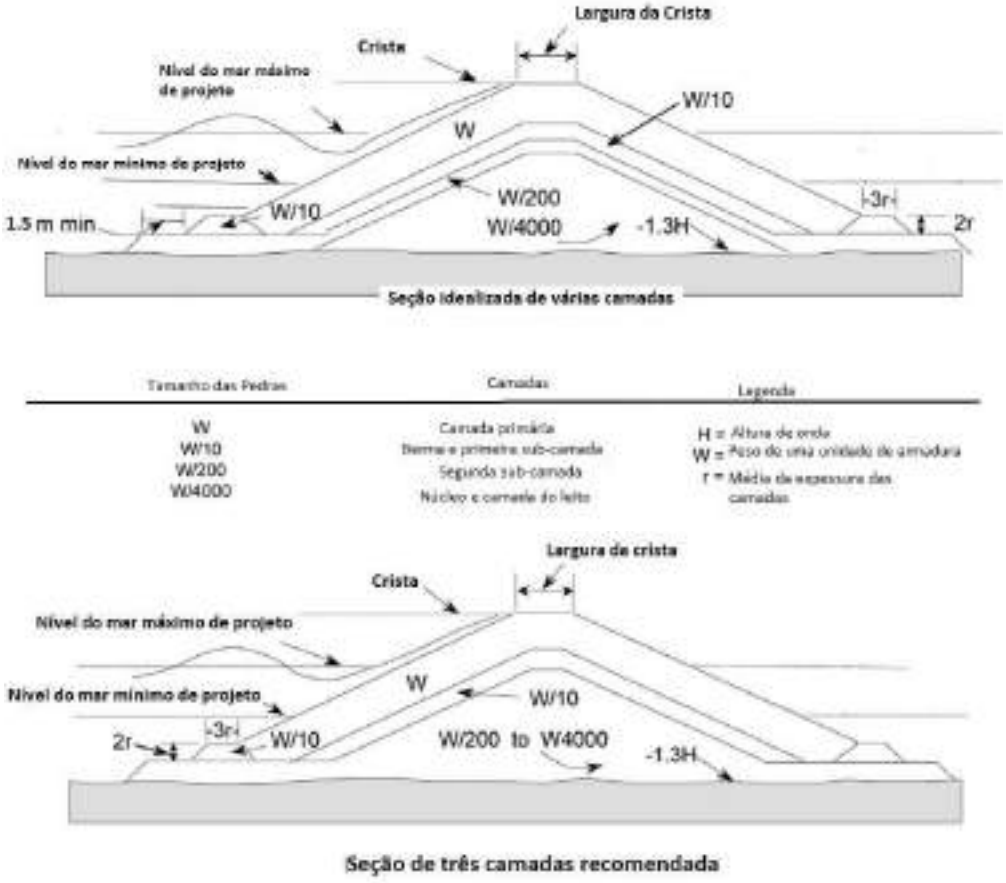


Figura 22:Seções transversais típicas para estruturas de enrocamento.(CEM, 2011)

3.6.4.1 Espessura da Camadas

As espessuras da camada externa(armadura) e das subcamadas são calculadas pela seguinte fórmula (Cap. 5_Parte VI_CEM2011):

$$r = nK_{\Delta}\left(\frac{W}{wa}\right)^{1/3} (7)$$

E a quantidade de unidades por área é definida pela equação (Cap.5_Parte VI_CEM2011):

$$\frac{N_a}{A} = nK_{\Delta}\left(1 - \frac{P}{100}\right)\left(\frac{w_a}{\mathrm{W}}\right)^{\frac{2}{3}} (8)$$

Onde:

r – espessura média da camada

K_{Δ} - Coeficiente de camada determinado experimentalmente na tabela tabela 2

n – número de unidades de pedra na espessura (tipicamente n = 2)

W- Pesode uma unidade de pedra

w_a – Peso específico da pedra

P – Porosidade média da camada de cobertura determinada experimentalmente na tabela 2.

A colocação das pedras de acordo com a densidade de compactação especificada deve ser seguida rigorosamente para garantir o travamento dos blocos entre si e assim garantir a estabilidade hidráulica das camadas.

Durante a construção a densidade de compactação pode ser mantida pela especificação de um desvio médioaceitável das distâncias entre os centros (em três dimensões) de duas unidades ou pode ser mantida pela contagem de unidades de pedra por área. Para colocação em camadas, cada fileira subsequente de pedras deve ser equilibrada e deslocada lateralmente da fileira anterior para evitar planos de falha. Seja como for, todo esforço deve ser realizado para garantir o travamento dos blocos entre si e a estabilidade das camadas.(Cap.5_Parte VI_CEM2011)

4 Metodologia

Primeiramente foram pesquisadas em literatura especializada todas as informações necessárias para o dimensionamento de estruturas de enrocamento. Foi escolhido como base o *CoastalEngineering Manual* (2011) que fornece uma versão mais atualizada dos métodos utilizados para dimensionar guia-correntes. Posteriormente foram levantados os dados necessários para o modelo de propagação de ondas: batimetria e clima de ondas.

Para definir a altura da onda de projeto ao largo, analisou-se o clima de ondas e utilizou-se o software SMADA® para fazer uma extrapolação de extremos e descobrir a altura de onda em águas profundas com um tempo de recorrência de 10 anos. A partir dos dados de águas profundas, utilizou-se o modelo do SisBaHiA® para propagar ondas com diferentes direções e períodos, a fim de avaliar as alturas de ondas que chegam na zona costeira na qual as estruturas estão situadas.

Para definir o comprimento necessário dos guia-correntes, foi feito o cálculo da profundidade de fechamento que define a profundidade a partir da qual as taxas de erosão e sedimentação são insignificantes. Para este cálculo, utilizou-se novamente o modelo de propagação de ondas do SisBaHiA®, para definir a altura significativa de onda efetiva e o período de onda efetivo na praia de Itaipu, a partir dos dados de onda ao largo.

Para projetar o dimensionamento de uma obra costeira, deve-se considerar as forçantes naturais mais importantes que são as ondas. Dois fatores importantes no dimensionamento de uma estrutura hidráulica marinha são a altura de onda de projeto e a possibilidade de a onda arrebentar em cima da estrutura, provocando os maiores esforços solicitantes na mesma.

Foi feita a estimativa do critério de arrebentação da praia de Itaipu que relaciona a altura de arrebentação com a profundidade de arrebentação para saber se as ondas quebram na estrutura e em quais profundidades.

De posse da batimetria, dividiu-se cada guia-correntes em nove seções a partir de 1,0m de profundidade no nível máximo do mar (NR-CN1511 + 1,5m) a cada 0,5m e cabeço com profundidade de 4,0m. A partir do critério de arrebentação da praia da Itaipu já estimado, estimou-se a altura de arrebentação da onda em cada seção para posteriormente determinar as alturas de onda de projeto para cada trecho da estrutura.

Foi definida a utilização de enrocamento natural, seguindo o tipo das estruturas já existentes. Com a equação de HUDSON (1974) determinou-se a massa dos blocos da camada exterior (armadura) para as dez seções transversais definidas. A partir dessas massas, podemos calcular as massas das camadas inferiores propostas, além das espessuras dessas camadas.

Para calcular a cota da crista necessária em cada seção transversal, foi considerado o nível máximo do mar e foi calculado o galgamento a partir do ábaco disponível no *Shore Protection Manual* (1984).

Através dos valores das massas dos blocos em cada seção, dividiu-se o guia-correntes em 5 trechos definindo as massas e características geométricas desses trechos, levando em consideração os processos construtivos.

5 Modelo de Propagação de Ondas

As características do meio de propagação das ondas podem variar devido a dois fatores que são a variação de profundidade e a presença de correntes. Correntes superficiais existem em todo o oceano, inclusive sobre a plataforma continental. Entretanto, para que o seu efeito sobre as ondas seja importante é necessário que a intensidade dessas correntes seja uma fração significativa da velocidade de propagação das ondas. Correntes costeiras fortes acontecem em regiões sujeitas à grandes variações de maré, ou, possivelmente, próximo a estuários e entradas de baías.

No caso da praia de Itaipu o efeito das correntes não será levado em consideração devidoao fato de a amplitude de maré ser relativamente pequena e a geometria da costa na área não é propícia à geração de correntes de maré intensas o suficiente para afetar a propagação das ondas, principalmente as de período mais longo, predominantes na região.

No que diz respeito à variações de profundidade, as inclinações observadas na vasta maioria das plataformas continentais (incluindo o caso de Itaipu) são bastante suaves e ascondiçõespara aplicação do modelo de propagação de ondas doSisBaHiA® são confortavelmente satisfeitas.

5.1 Dados

Os principais dados necessários no modelo de propagação de ondas do SisBaHiA® são os dados de batimetria e as características das ondas a serem modeladas que serão obtidas a partir do clima de ondas da região.

5.1.1 Batimetria

Para gerar a grade de batimetria do modelo de propagação de ondas foram utilizados dados obtidos a partir das cartas náuticas 1511 (Barra do Rio de Janeiro) com escala1: 20000, 1501 (Baía de Guanabara) com escala 1:50000 e 1506 (Proximidades da Baía de Guanabara) com escala 1:75000, fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. A Figura 23 mostra essas três cartas náuticas utilizadas no estudo.

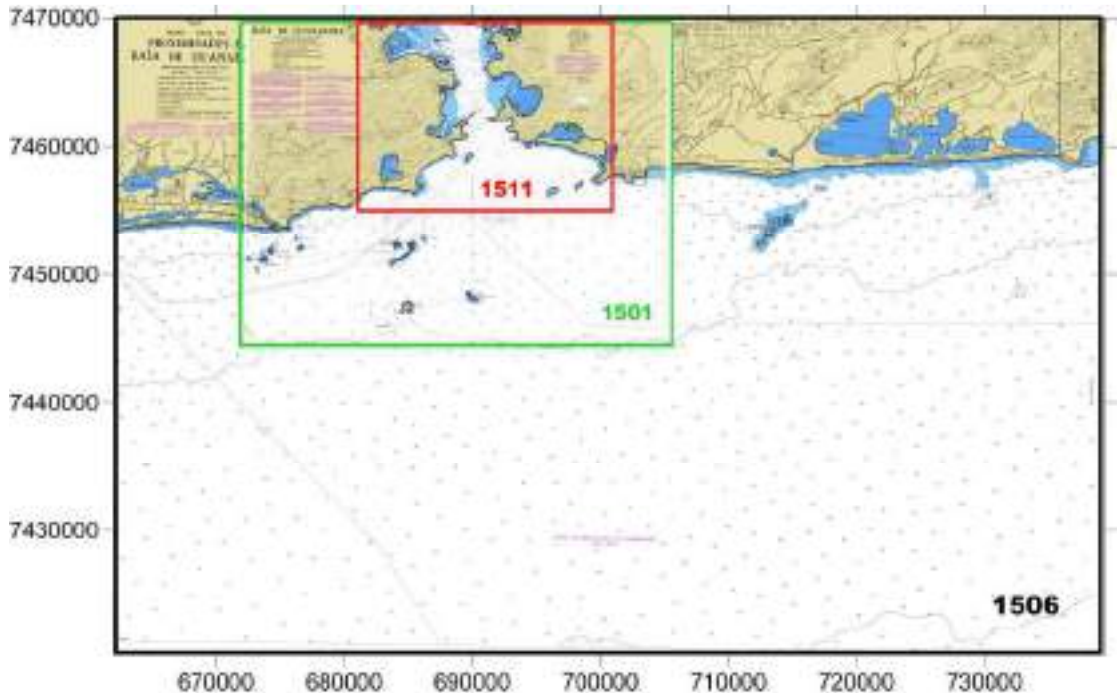


Figura 23:Cartas Náuticasutilizadas na obtenção dos dados de batimetria para o modelo de propagação de ondas.

Para digitalizar os pontos da batimetria, utilizou-se o software Surfer® 11 que possibilita também o ajuste da escala do mapa, definição das cores entre outros aspectos visuais. A Figura 24 apresenta o mapa base produzido a partir dos pontos de batimetria fornecidos pelas cartas náuticas e pela interpolação linear obtida a partir desses pontos.

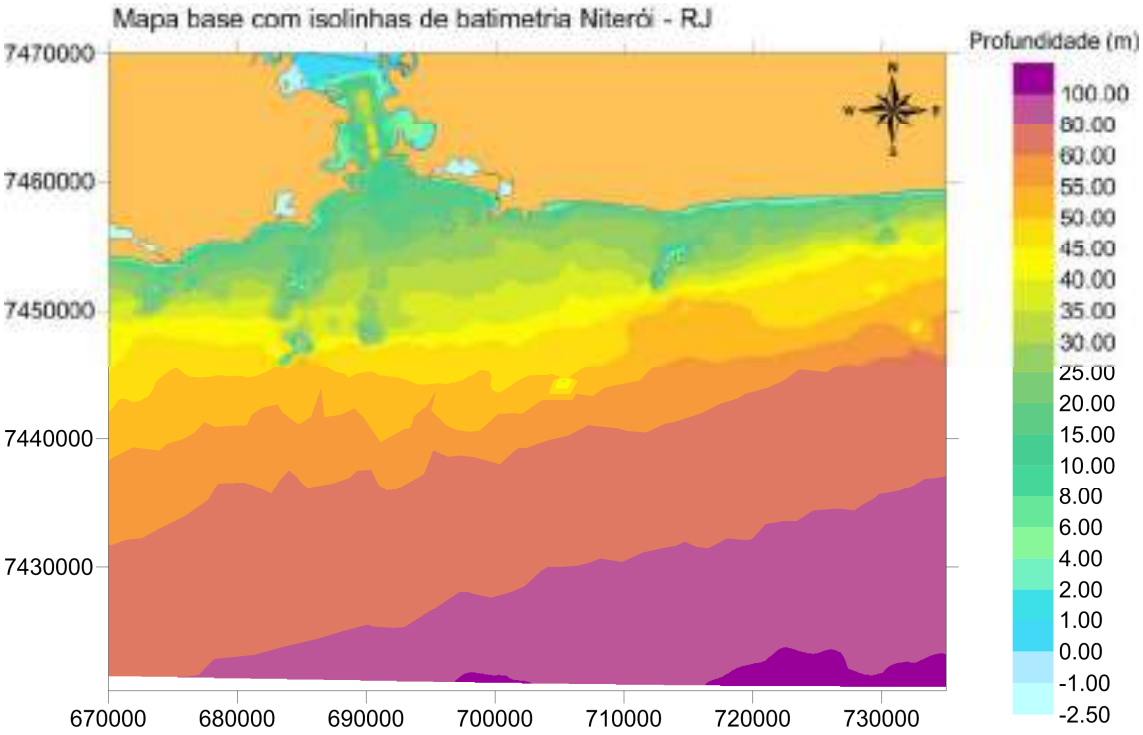


Figura 24:Mapa base com as isolinhas de batimetria da região de estudo utilizado no modelo de propagação de ondas.

5.1.2 Clima de Ondas

A análise do clima de ondas da região de interesse é imprescindível para a seleção adequada das características das ondas que serão utilizadas no modelo de propagação de ondas do SisBaHiA®. As ondas devem ser observadas em pontos afastados da costa, em águas profundas, para que as informações colhidas não sejam contaminadas por efeitos geométricos particulares do ponto de medição. Em outras palavras, sempre que possível as ondas devem ser observadas em águas profundas.

Como não existem dados de onda medidos na região, foram utilizados parâmetros estatísticos de ondulações previstas com modelo de geração e previsão de ondas-WaveWatch III®fornecidas pelo Laboratório de Instrumentação Oceanográfica LIOc/UFRJ. Os dados possuem um total de 61368 registros, computados de hora em hora no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2008, em um ponto de latitude 24S e longitude 42W, a 170 quilômetros da costa, conforme mostradona Figura 25.

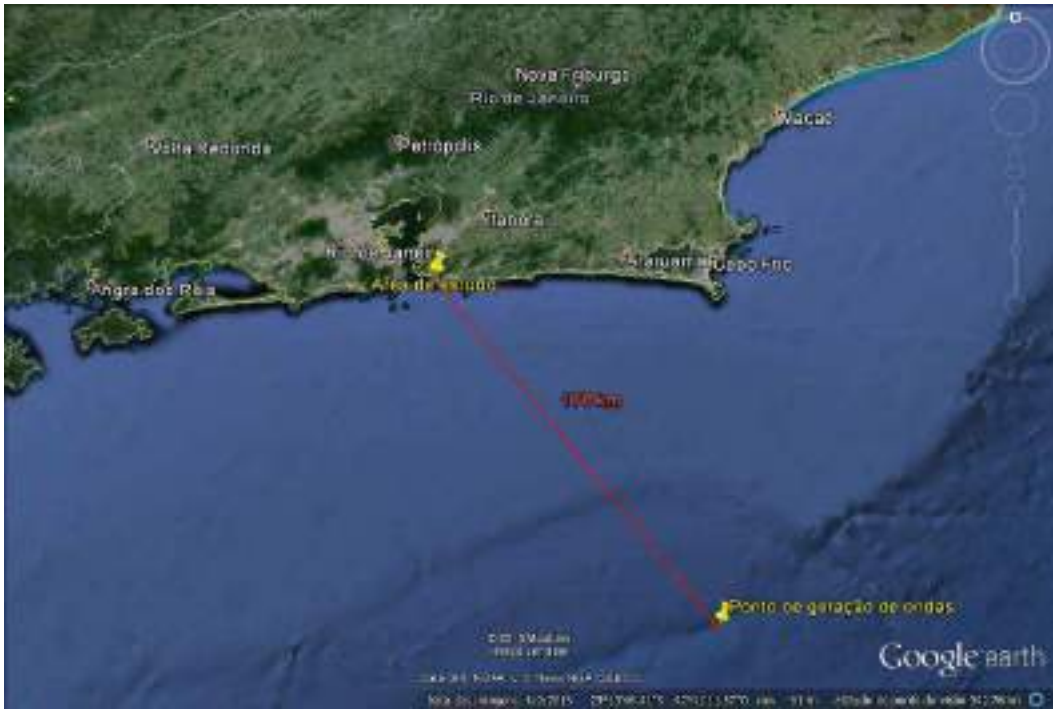


Figura 25:Figura do Google Earth do ponto de geração dos dados de onda em relação à área de estudo.

Para o estudo do clima de ondas da região de interesse, foram analisados os dados de onda:

- direção principal de propagação (azimute em graus): direção de propagação associado a faixa de maior energia do espectro registrado.
- período de pico (s): período associado a faixa de maior energia do espectro registrado.
- altura significativa (m): média do terço superior dos valores das ondas mais altas.

A partir da Figura 26que mostra a frequência de ocorrência das ondas por direção principal de propagação, pode-se observar que a direção sul é a mais frequente, seguida de nordeste e leste. Também é observado uma ocorrência significativa na direção sudeste e uma pequena em sudoeste. As demais direções podem ser desprezadas, já que possuem frequênciasmenores ou iguais a 0,1%.

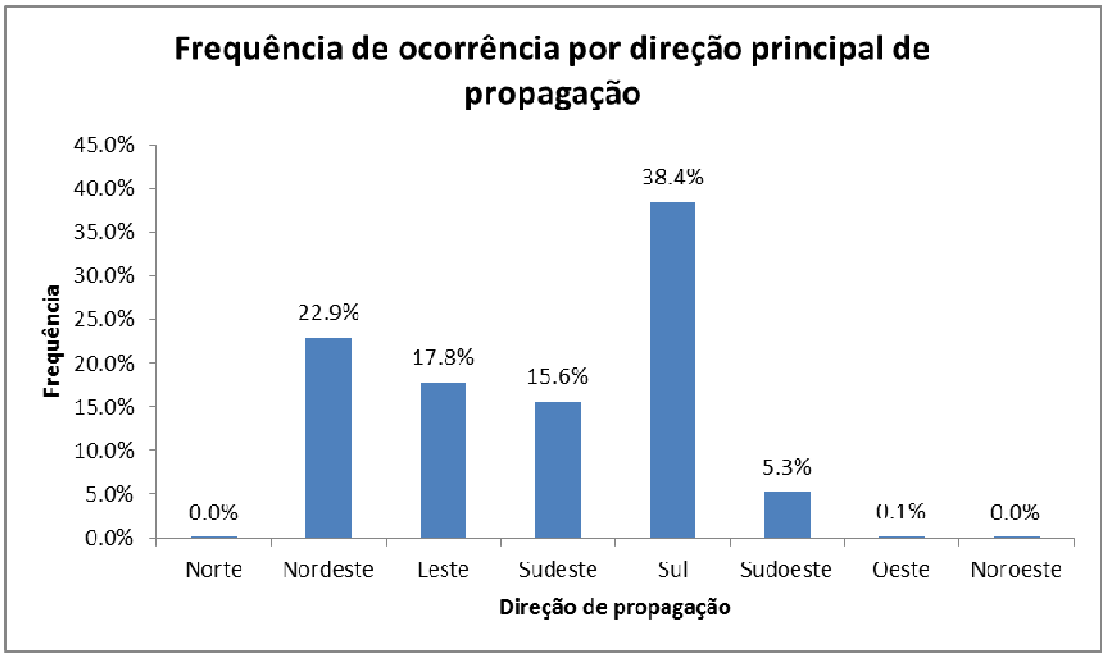


Figura 26:Gráfico gerado a partir do clima de ondas da região de estudo com a frequência de ocorrência das ondas por direção principal de propagação.

Devido à geometria da região, ilustrada na Figura 27, pode-se observar que as ondulações de leste/sudestesão bloqueadas pelo braço de terra pertencente à Serra da Tiririca à direita da praia de Itaipu.

Figura 27: Imagem do Google Earth obtida em 2009 mostrando a geometria da praia de Itaipu e a Serra da Tiririca que bloqueia as ondas de leste/sudeste na região próxima dos guia-correntes da Lagoa de Itaipu.

Já as ondulações de nordeste, mesmo sendo frequentes, não podem chegar a região de estudo devido ao posicionamento geográfico da praia de Itaipu (voltada para sul). Logo, conclui-se que as ondulações desul e sudoeste são as mais prováveis de atingir os guia-correntes como mostra a Figura 28.

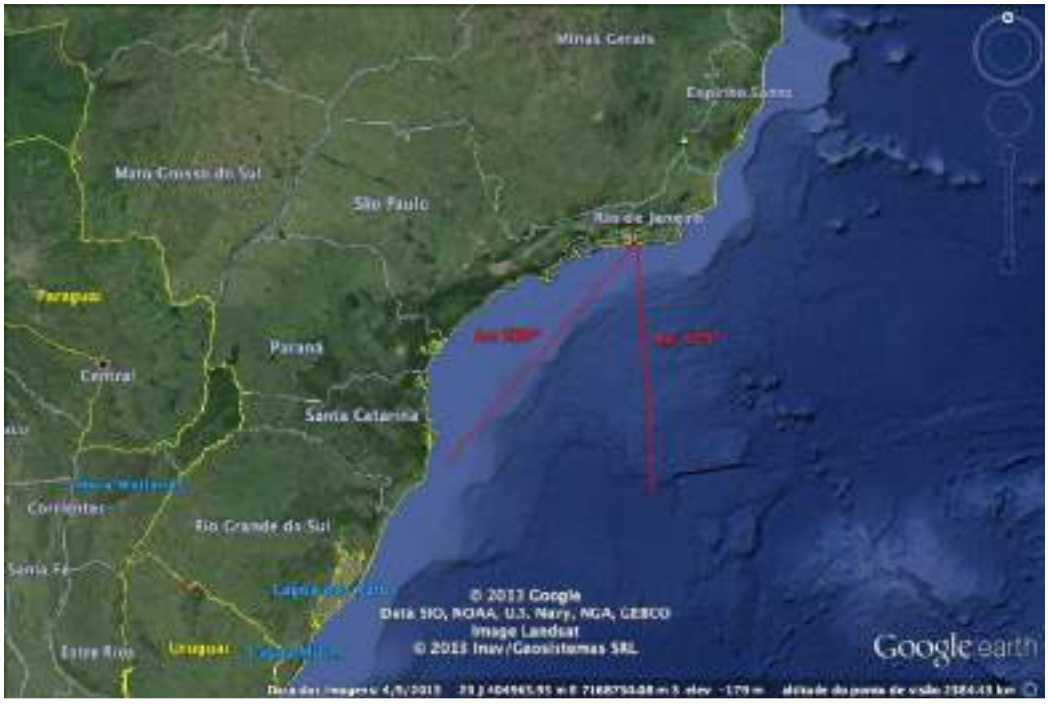


Figura 28:Análise das possíveis direções das ondas que chegariam na área de estudo levando em conta a geometria da região.

Pode-se observar ainda que é no quadrante sul/sudoeste onde estão concentradas as maiores alturas de onda (com valores maiores que 4 metros),a Figura 29 a seguir representa as alturas significativas de onda por direção de propagação.Tal fato confirma que tal quadrante é omais importantepara o estudo da onda de projeto na região.

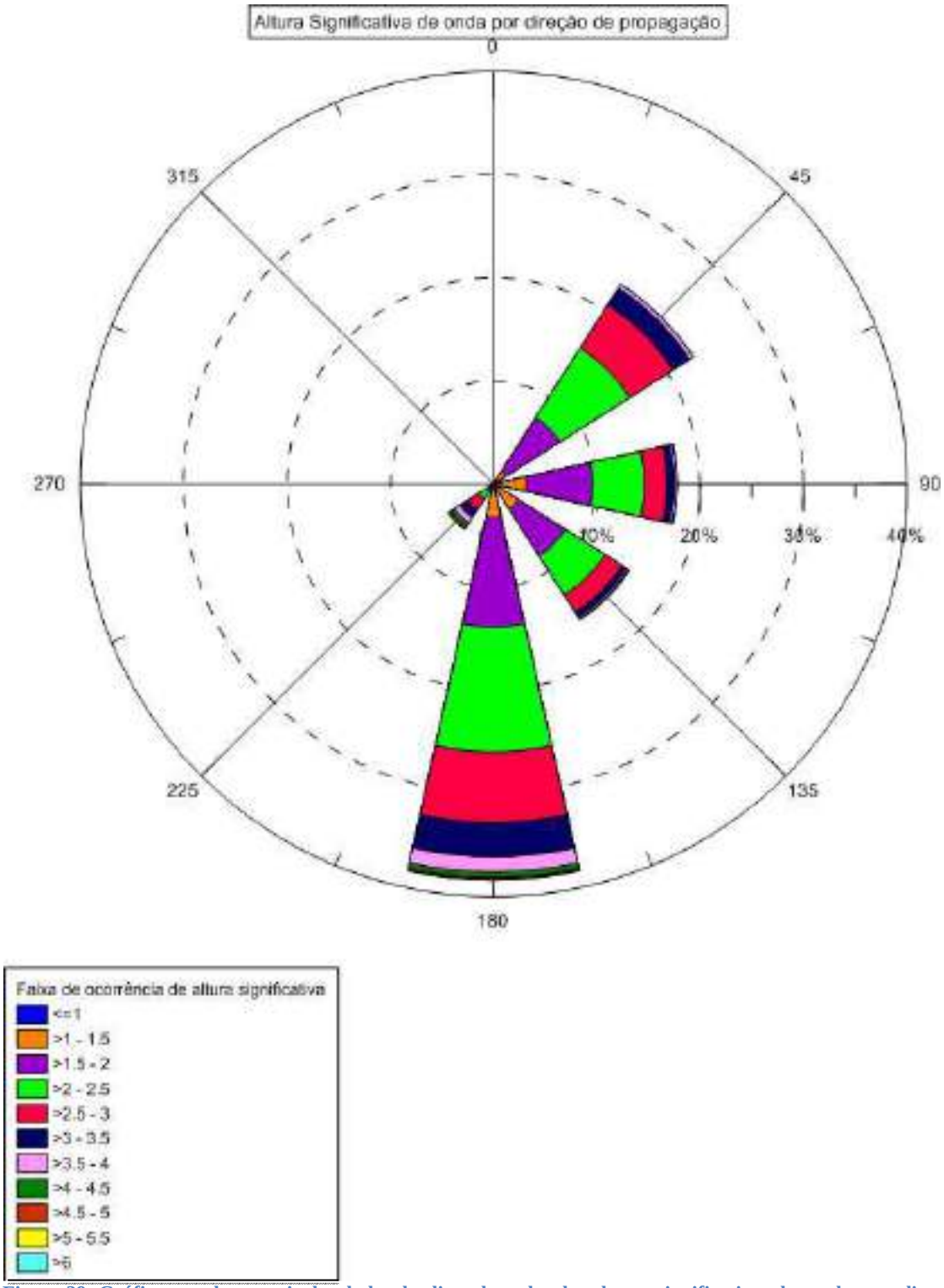


Figura 29: Gráfico gerado a partir dos dados do clima de ondas das alturas significativas das ondas por direção de propagação.

A distribuição dos períodos de pico por direção de propagação está representada na Figura30a seguir, aonde podemos observar que os maiores valores período de pico estão associados ao quadrante sul/sudoeste e direção sudeste.

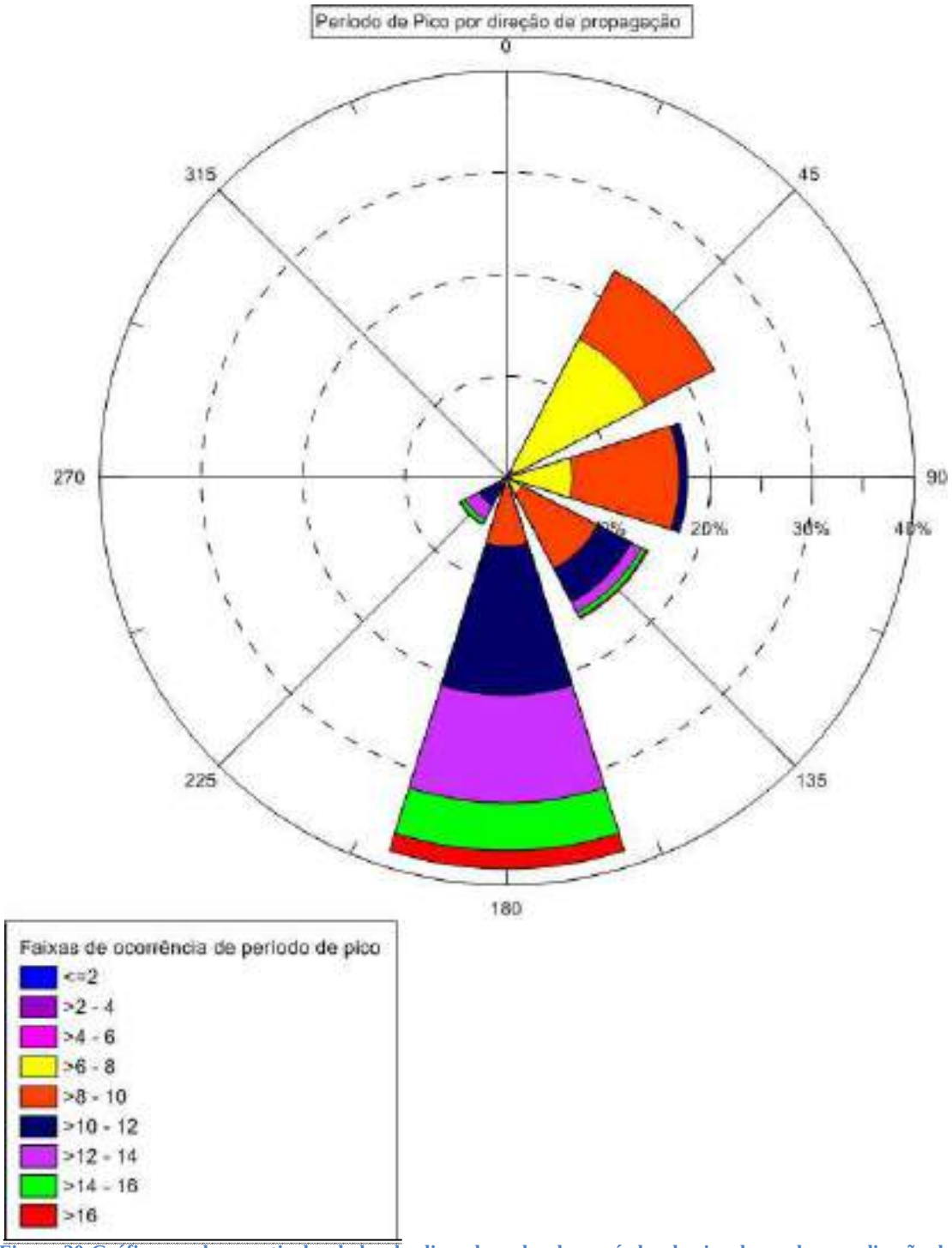


Figura 30:Gráficogerado a partir dos dados do clima de ondas dos períodos de pico das ondas por direção de propagação.

Pôde-se então definir a direção principal sul/sudoeste das ondas ao largo para propagação com o modelo de ondas do SisBaHiA®. A seguir temos a distribuição dos períodos de pico para região sul e sudoeste, em ambas o período de maior frequência é 12s.

Tabela 3: Frequência de período de pico na direção de propagação sul.

Frequência de período de pico na direção Sul	
Período (s)	Frequência
7-8	1.7%
8-9	5.2%
9-10	10.2%
10-11	16.1%
11-12	22.1%
12-13	14.6%
13-14	13.0%
14-15	9.3%
15-16	2.7%
>16	4.7%

Tabela 4: Frequência de período de pico na direção de propagação sudoeste.

Frequência de período de pico na direção Sudoeste	
Período (s)	Frequência
6-7	1.0%
7-8	2.7%
8-9	3.9%
9-10	6.6%
10-11	18.6%
11-12	25.6%
12-13	14.7%
13-14	14.4%
14-15	7.3%
15-16	2.2%
>16	2.6%

5.1.2.1 Onda de Projeto ao Largo

Neste projeto, optou-se por utilizar uma onda de projeto com um tempo de recorrência de 10 anos, já que, devido a sua natureza, a estrutura não necessita de um grau de segurança muito alto e existe a possibilidade de fazer manutenções, caso a estrutura seja eventualmente danificada.

Para estimar a onda em águas profundas com o tempo de recorrência de 10 anos, utilizou-se o software chamado SMADA® que fornece a curva probabilística (log normal) e as predições dos tempos de recorrência.Neste software, foi dado de entrada, a partir dos dados do clima de ondas obtido pelo WaveWatchIII®, os maiores valores mensais de altura de onda no período entre os anos 2002 e 2008.

A Tabela 5, obtida pelo software SMADA®, apresenta os valores dos tempos de recorrência para os dados fornecidos. A tabela com os valores das maiores alturas de onda mensais utilizadas nesse software encontra-se no Anexo 2.

Tabela 5: Tempo de Retorno das ondas obtido pelo software SMADA® a partir das maiores alturas mensais do clima de ondas da região.

Tempo de Retorno (anos)	Probabilidade	Predição
10	0.9972	6.35
20	0.9958	6.65
30	0.9917	6.81

Dessa forma a altura significativa da onda de projeto ao largo é assumida 6,4m. Para calcularmos a altura de onda de projeto na região da estrutura em águas rasas, utilizou-se o modelo de propagação de ondas doSisBaHiA®, tendo como base os resultados obtidos dos diferentes cenários de ondas simulados descritos na seção 5.2 deste trabalho. Os resultados de todos os modelos simulados estão no Anexo 1.

5.2 Cenários de Ondas Simulados

A modelagem de propagação de ondas foi feita em duas etapas. Primeiro foram simulados modelos com altura unitária para a onda que incide no LIO, o que nos permite, considerando a linearidade do fenômeno (desprezando-se efeitos não-lineares como iterações onda-onda e onda-corrente), tomar os resultados obtidos não como alturas de onda, mas como fatores de amplificação. Oobjetivo desta etapa foi encontrar as direções em que as ondas atingem a estrutura com os maiores fatores de amplificação, mantendo o período fixo e variando as direções de propagação. Foi utilizado o Modelo Linear de propagação de ondas do SisBaHiA® para essa etapa.

Depois de definidas as principais direções de propagação, foram simulados modelos com altura de onda com tempo de recorrência de 10 anos ao largo, em diferentes períodos com o objetivo de encontrar a maior altura de onda capaz de chegar nos guia-correntes. Definidos a direção e o período que resultam nas maiores alturas na região de

estudo, simulou-se para diferentes níveis de maré para comparar e garantir que a maior altura de onda propagada seja considerada no projeto. Para essa etapa utilizou-se o Modelo Stokes ajustado (Hedges Model) do SisBaHiA®, já que se trata de ondas de gravidade com amplitudes significativamente altas.

- **Direção de propagação (azimute)**: Devido aos motivos apresentados na seção 5.1, as direções de propagação simuladas serão 175º, 180º, 185°, 190º, 195º, 200º, 205º, 210º, 215º e220º. Para aferirmos a direção de onda que atinge a estrutura com maior altura, optou-se por simular ondas de 5º em 5º, devido a geometria que fornece uma janela pequena para entrada da ondulação, dessa forma, a rotação em apenas 5º na direção de propagação já pode fazer diferença.
- **Altura de onda:**Em todas as direções foi adotada altura de 1,0m para a onda que incide no LIO. Nas direções em que foram encontrados os piores cenários para estrutura, ou seja, os resultados em que as ondas atingem a região de estudo com as maiores alturas de onda (uma direção para sul e uma para sudoeste), foramfeitas simulações com altura de 6,4m com tempo de recorrência de 10 anos como visto na seção 5.1.2.1 deste estudo.
- **Período de onda**: Foi adotado em todas as direções simuladas com altura de 1,0m incidindo no LIO o período de 12s, por ser o mais frequente em tais direções como mostra as tabelas 3 e 4. Nas direções com os piores cenários foram simulados os períodos 14s, 15s,16s e 17s por ser a faixa de períodos associadaa altura de 6.4m como mostra a Tabela 6 a seguir.

Tabela 6:Frequência dos períodos de pico para ondas com alturas maiores que6,0 m ao largo.

Frêquencia de período de pico para ondas com altura maiores que 6.0 m ao largo	
Períodos (s)	Frequência
2-3	0,0%
3-4	0,0%
4-5	0,0%
5-6	0,0%
6-7	0,0%
7-8	0,0%
8-9	0,0%
9-10	0,0%
10-11	0,0%
11-12	0,0%
12-13	0,0%
13-14	0,0%
14-15	11,1%
15-16	22,2%
16-17	66,7%

- **Níveis do mar**:Todas as simulações foram feitas com o nível médio do mar igual a 0,7m acima do nível de redução da carta náutica. Ainda para os cenários com altura de 6,4m incidindo na LIO, foi simulado o nível máximo do mar igual a 1,5m acima do nível de redução da carta náutica e o nível mínimo do mar igual ao nível de referência da carta náutica. Os valores escolhidos para os níveis de maré serão melhor detalhados na seção 6.2.3.

Parâmetros das ondas simuladas:

- Todas as direções:

Tabela 7: Direções das ondas simuladas.

Azimute	Período (s)	Altura (m)	Teoria
175°,180°, 185°, 190°, 195° (sul)	12	1	linear
200°, 205°, 210°, 220° (sudoeste)	12	1	linear

- Piores Cenários:

Tabela 8: Parâmetros dos piores cenários simulados levando em conta as direções que obtiveram os maiores fatores de amplificação na região das estruturas, em diferentes períodos e com a altura de onda de tempo de recorrência de 10 anos.

Azimute	Período (s)	Altura (m)	Teoria
195° (sul)	14-15-16-17	6.4	Stokes ajustado
205°(sudoeste)	14-15-16-17	6.4	Stokes ajustado

Grade de propagação de onda:

Foram criadas duas grades de propagação de onda (GPO). Uma com o lado transversal a costa de azimute 180° para simulação das ondas de sul: 175° a 195° e uma com lado transversal a costa de azimute 210° para as ondas de Sudoeste: 200° a 220°.

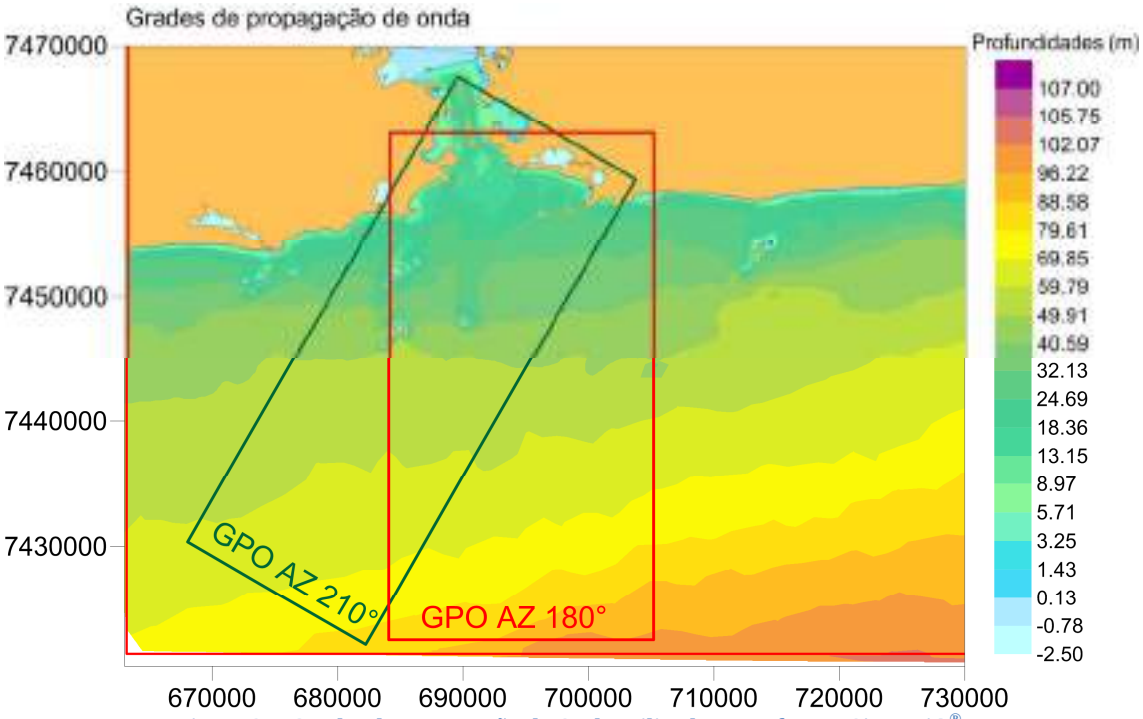


Figura 31: Grades de propagação de Onda utilizadas no software SisBaHiA®.

Tabela 9: Parâmetros dos modelos de propagação de ondas.

GPO (Azimute)	Delta LTC	Delta LIO	Nível médio (m)
180° (sul)	25	25	0.7
210°(sudoeste)	25	25	0.7

5.3 Resultados do Modelo de Propagação de Ondas

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos através do modelo de propagação de ondas do SisBaHiA®. Nesta seção serão mostrados apenas os piores cenários, ou seja, os resultados em que as ondas atingem a região de estudo com as maiores alturas. Todos os resultados simulados podem ser encontrados no Anexo 1.

Na primeira etapa, os resultados obtidos com os maiores fatores de amplificação foram na direção principal 195° (GPO S) e direção principal 205° (GPO SW)mostrados nas figuras 33 e 34 a seguir, respectivamente.

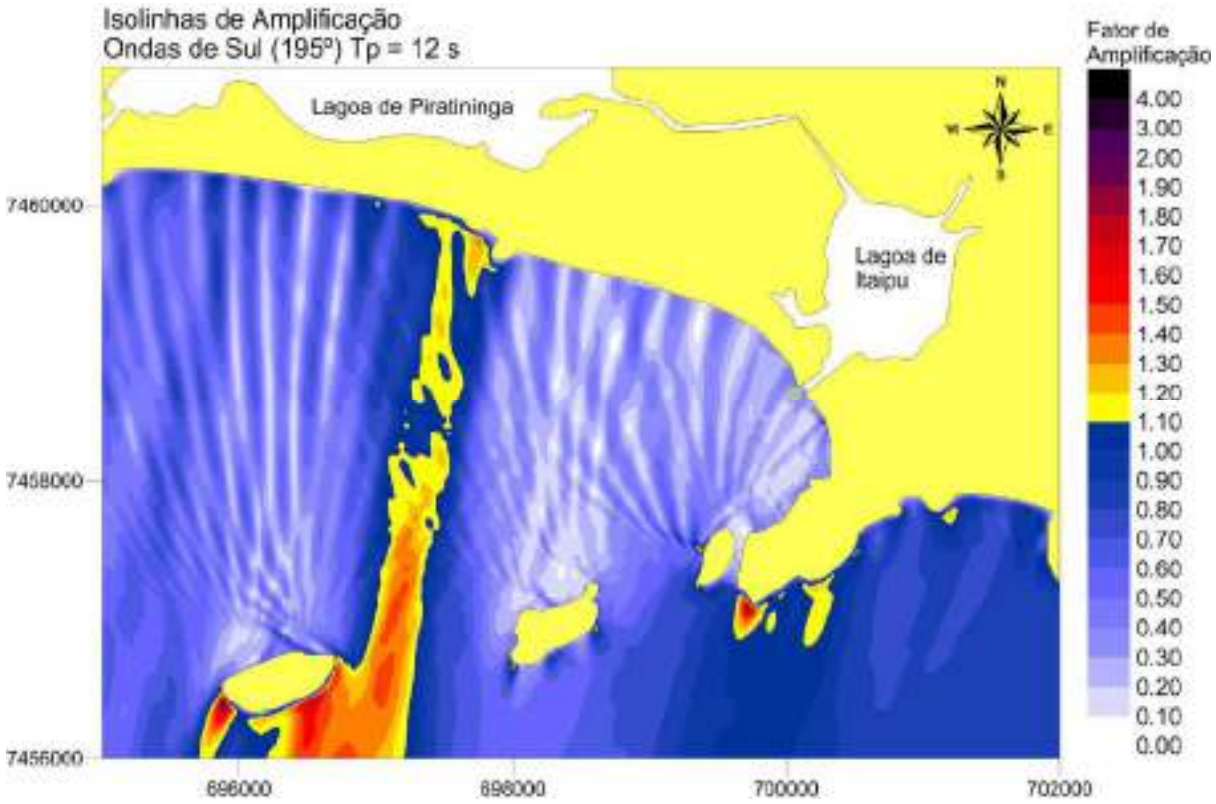


Figura 32: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das Isolinhas de Amplificação para as ondas de direção de propagação sul (Az: 195º), período de pico de 12s no Nível Médio do Mar.

O maior fator de amplificação encontrado na região da estrutura para direção sul da GPO foi de 0,46.Isso representa, na realidade, uma redução da altura das ondas em um pouco mais de mais de 50% em relação às ondas ao largo.

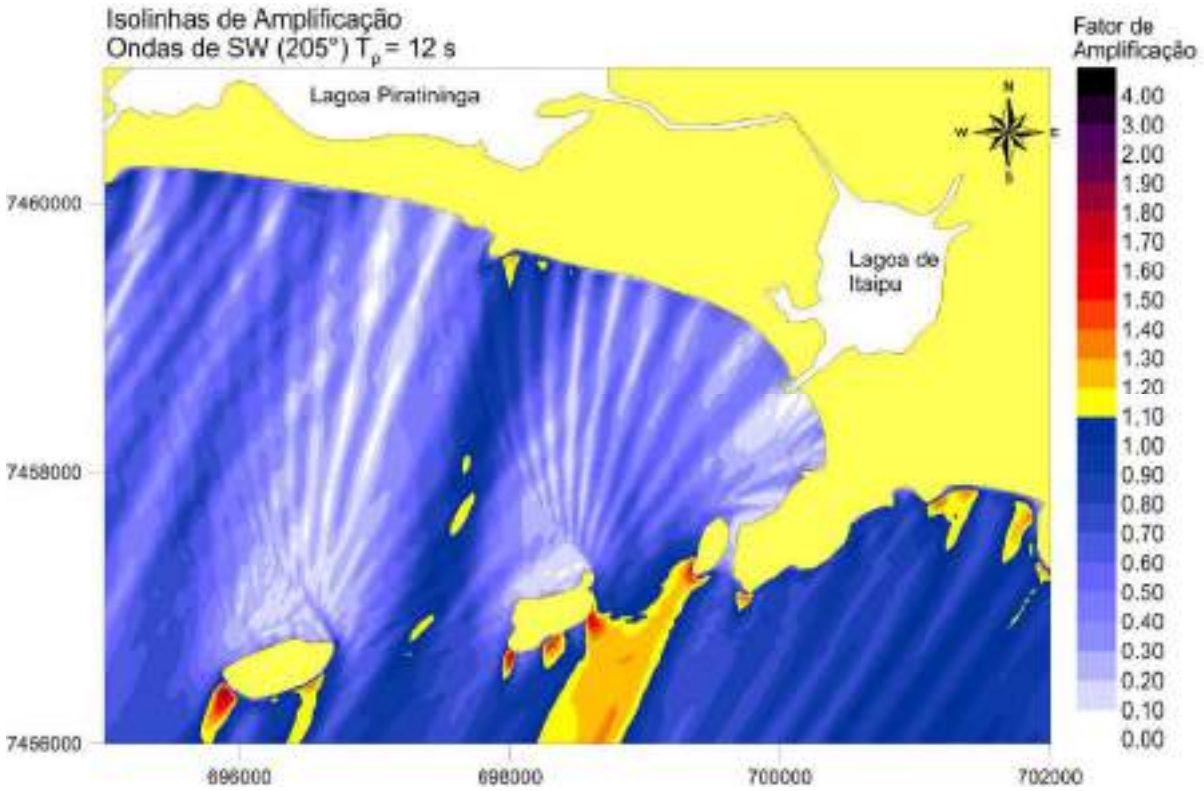


Figura 33:Resultado do Modelo de Propagação de Ondas SisBaHiA® das Isolinhas de Amplificação para as ondas de direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 12s no Nível Médio do Mar.

Para a direção sudoeste (GPO SW) o maior fator de amplificação encontrado na região dos guia-correntes foi 0,37, ou seja, uma redução de um pouco mais de 60% em relação à altura das ondas em águas profundas.

Na segunda etapa, com altura de onda incidente no LIO de 6,4 m,as maiores alturas de onda encontradas foram com o período de 14s, tanto para direção sul (195°) como para direção sudoeste (205°), mostrados nas figuras 35 e 36 a seguir respectivamente.

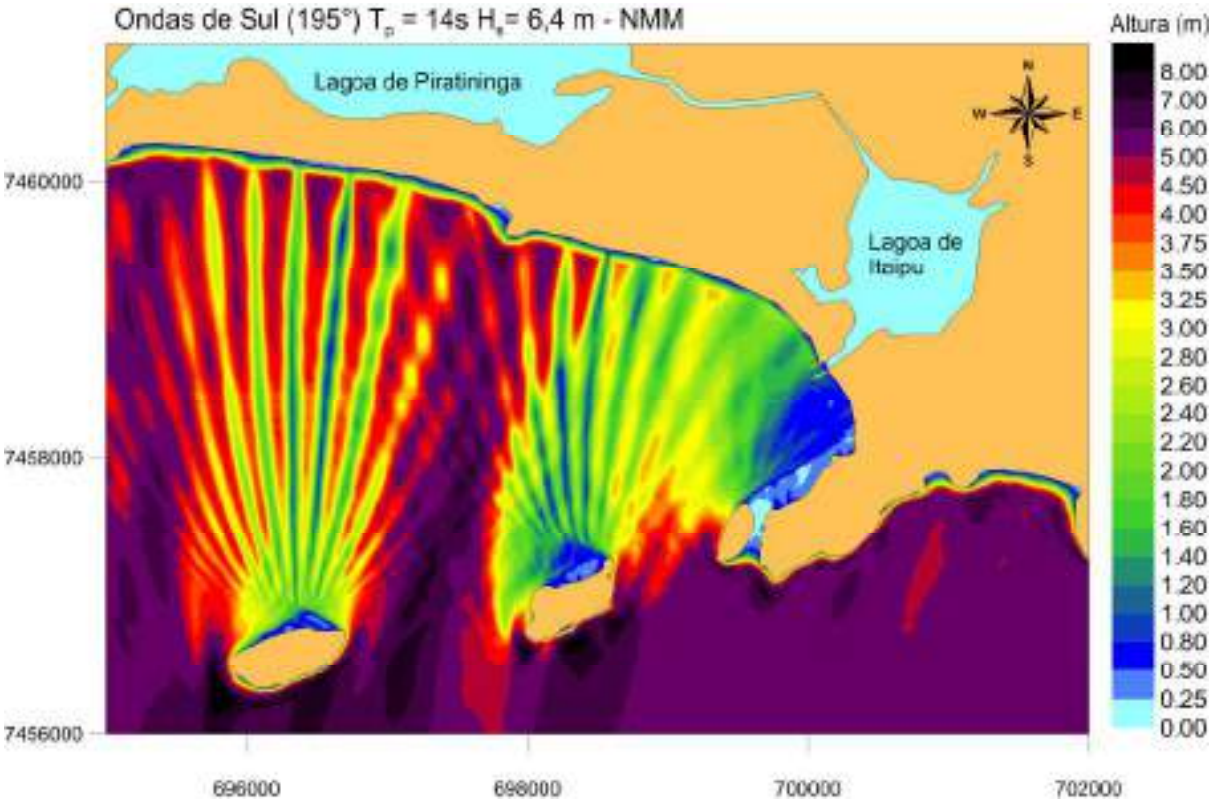


Figura 34: Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sul (Az: 195°), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Médio do Mar.

O maior valor de altura significativa de onda encontrado na região de estudo foi de aproximadamente 1,7 m, podemos notar que a estrutura está numa área de transição entre a coloração azul para a verde, ou seja, ondasem torno de 1,0 m e menores que 2,0 m.

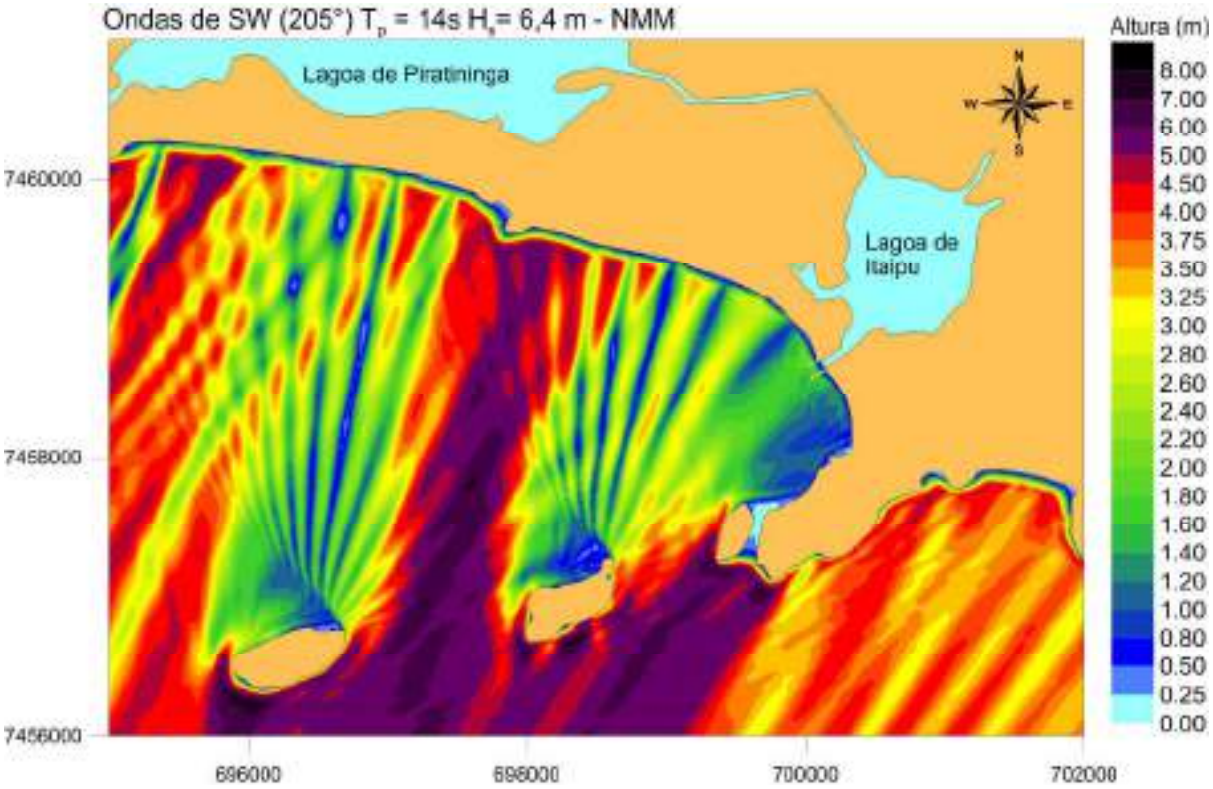


Figura 35:Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Médio do Mar.

Esse foi o cenário em que as maiores alturas de onda chegaram na estrutura, pode-se notar a coloração verde atinge completamente a área de interesse. A partir deste resultado foi definida a onda de 2,0 metros como a maior altura capaz de atingir a estrutura, ou seja, a maior altura significativa de onda de projeto.

Para garantir o resultado obtido como sendo o das maiores alturas de onda possível, simulou-se este mesmo cenário para o nível mínimo do mar (Nível de Redução da Carta Náutica 1511 - NR-CN1511) e nível máximo do mar (NR-CN1511+1,5m) respectivamente. Como podemos observar nas figuras 36e 37 a seguir, não foram encontradas diferenças significativas nos resultados.

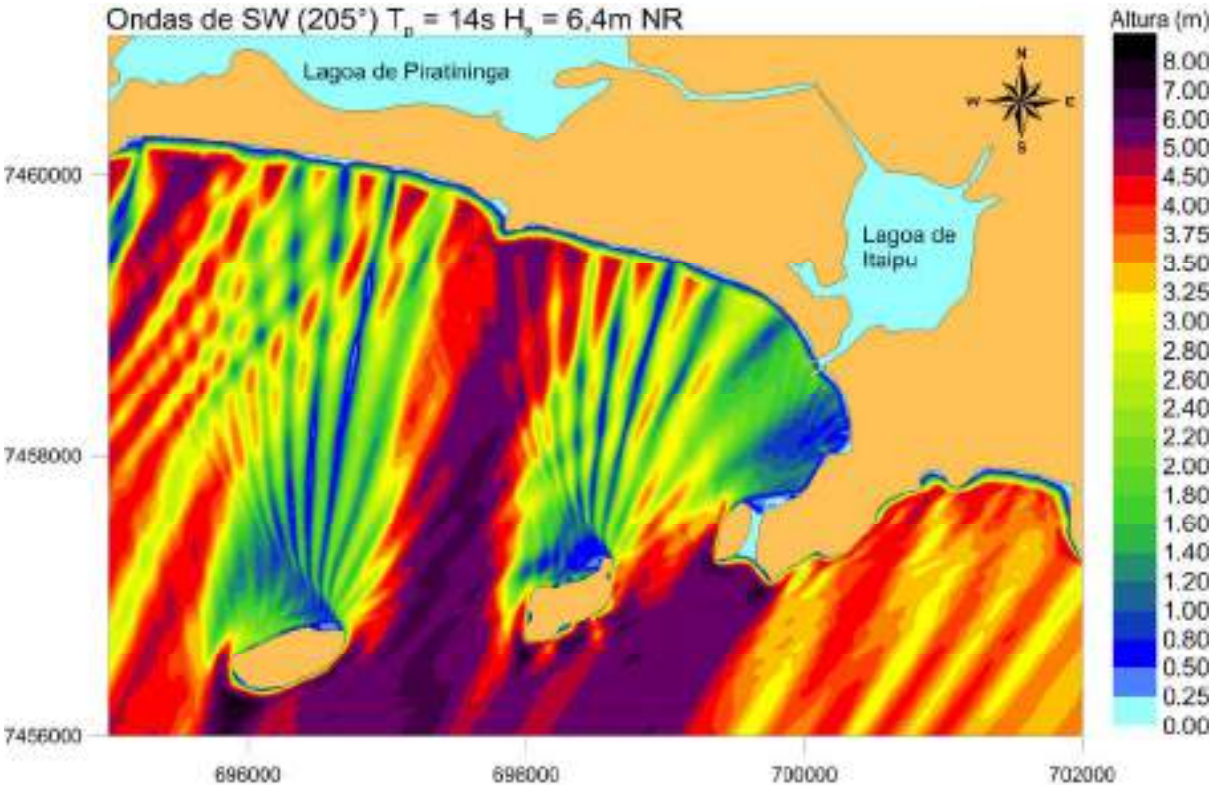


Figura 36:Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no NR-CN1511.

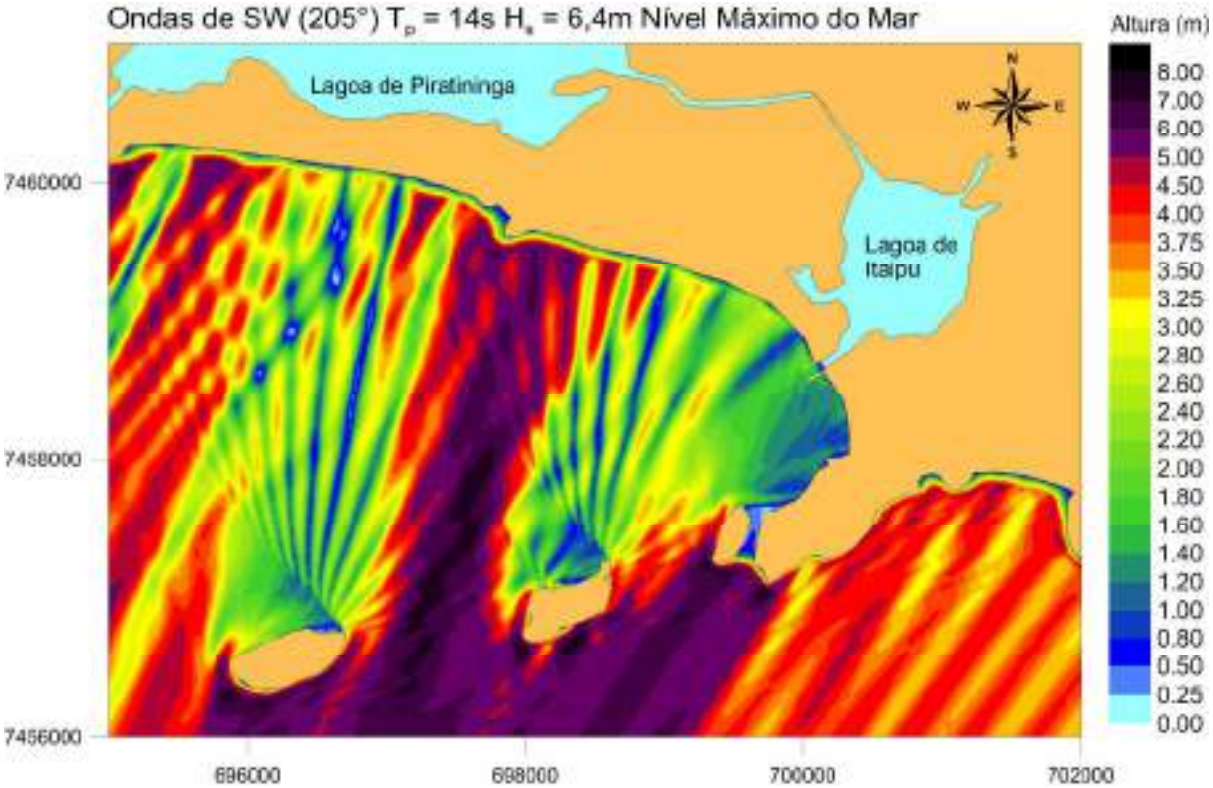


Figura 37:Resultado do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação sudoeste (Az: 205º), período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Máximo do Mar (NR-CN1511+1,5m).

Pode-se observar pelas colorações adjacentes à linha de costa, que a zona de arrebentação vai se aproximando da costa conforme a maré vai subindo. A linha azul adjacente à costa vista no resultado para o Nível de Redução da Carta Náutica 1511, mostrando que a arrebentação ocorre mais afastada da praia, já quase não é vista no resultado para o nível máximo do mar.

A direção principal de 195° foi a que forneceu os maiores fatores de amplificação, mas com a altura de 6,4 metros ao largo, foi a direção principal de 205° que apresentou as maiores alturas de onda na região da estrutura.Como foi usada a teoria linear no primeiro caso e Stokes no segundo, não podemos comparar os resultados obtidos com teorias diferentes. Além disso, os períodos de pico utilizados também são diferentes em cada etapa.

É importante ressaltar que a primeira etapa da modelagem de propagação das ondas desse estudo foi feito com o objetivo de encontrar as direções principais de propagação de ondas em que as ondas atingem a estrutura com maiores alturas, a partir dos fatores de amplificação de ondas unitárias ao largo. Portanto esta etapa não tinha o objetivo de quantificar e determinar as alturas de onda de projeto que foram determinadas na segunda etapa da modelagem.

Após a análise de todos os resultados podemos perceber que os guia-correntes estão numa área naturalmente abrigada pelas características geográficas da costa no local. Pelo efeito da refração, para as ondas de sul, a geometria do fundo faz com que haja uma focalização de energia na ponta do braço de terra conhecido como Serra da Tiririca e uma região de baixa energia na porção leste da praia de Itaipu. Tal fenômeno pode ser observado na comparação das figuras a seguir.

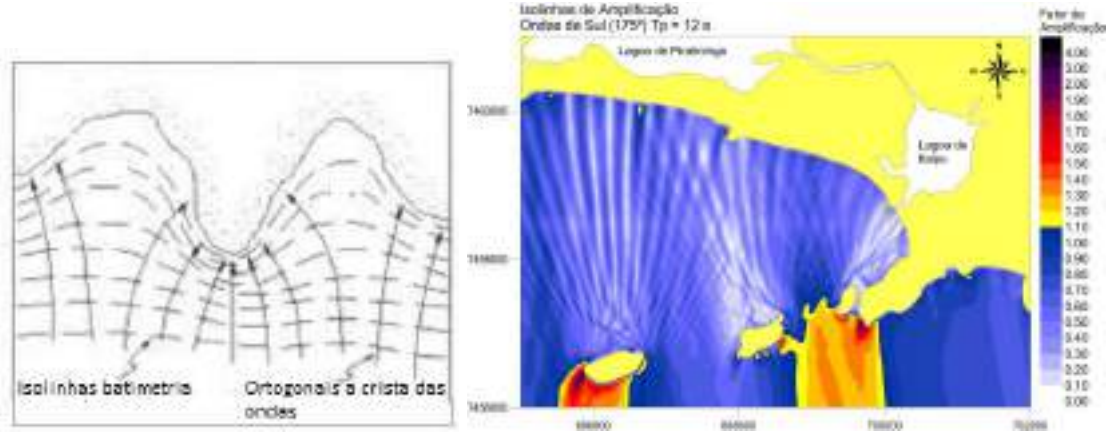


Figura 38: A figura àesquerda mostra a representação esquemática da refração dadas isolinhas de batimetriae a figura à direita mostra o resultado de um modelo de propagação de ondas do SisBaHiA® que mostra esse mesmo efeito de refração para asisolinhas de batimetria da região de estudo, semelhantesàs do esquema.

Além disso, as ilhas localizadas em frente às praias de Itaipu e Piratininga formam obstáculos, difratando as ondas e fazendo com que elas cheguem com menores alturas na região da estrutura em relação às ondas ao largo.

6 Dimensionamento

Para o dimensionamento dos guia-correntes da Lagoa de Itaipu teve-se como base principal o *CoastalEngineering Manual* (2011) que fornece uma versão mais atualizada dos métodos utilizados nos projetos de dimensionamento de estruturas de enrocamento. Nesta seção é mostrado detalhadamente os cálculos feitos para o comprimento dos guia-correntes, as massas das pedras do enrocamento,as cotas e larguras da crista, assim como o tipo e a espessura de cada camada das estruturas.

6.1 Comprimento dos Guia-correntes

Para obtenção da altura de onda que só é ultrapassada em 0,14% do tempo, H_e, foi traçado o gráfico da frequência acumulada da altura significativa como mostra a Figura 39 abaixo.

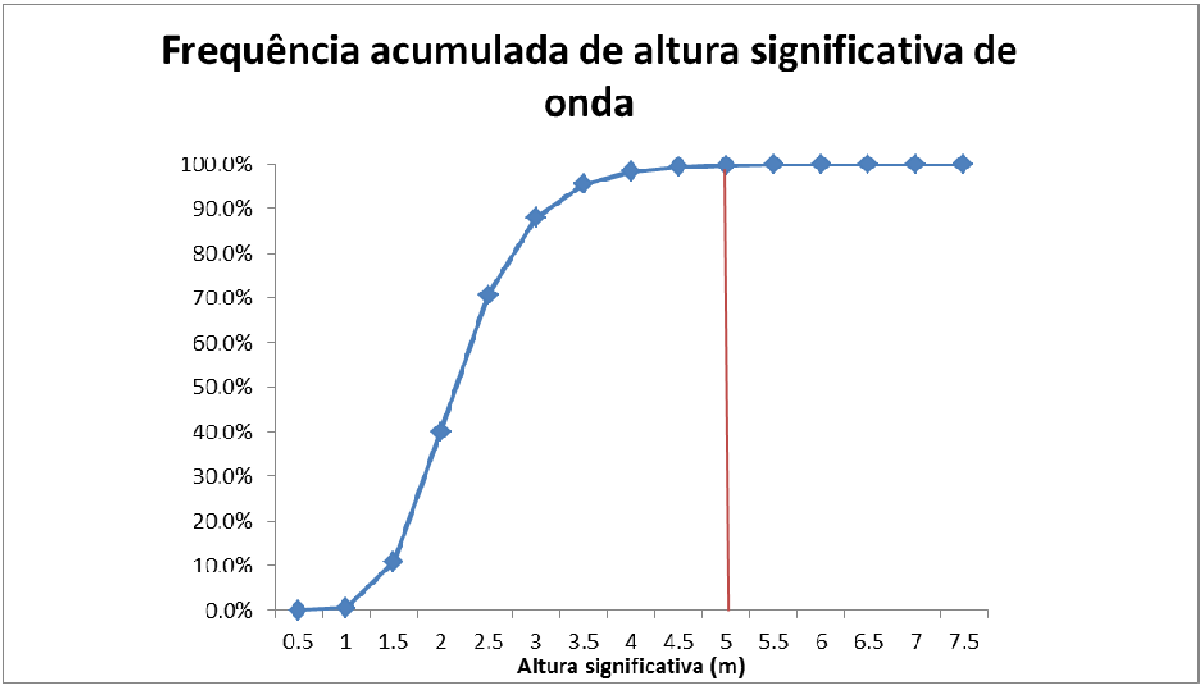


Figura 39: Gráfico de frequência acumulada das alturas significativas de onda gerado a partir dos dados do clima de ondas.

Logo H_e = 5m em águas profundas, com período associado de 14s. É necessário propagar esta onda através da modelagem com o SisBaHiA® para obter o valor de H_e na praia, o resultado para a direção de propagação com Az = 205° é mostrado na Figura 40.

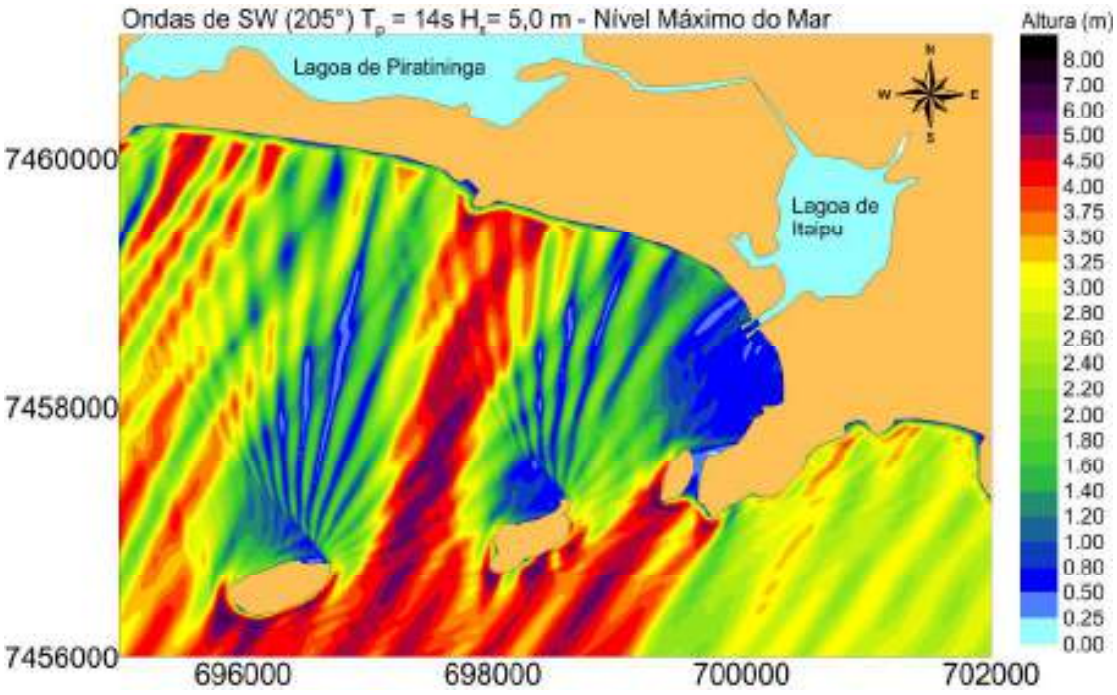


Figura 40:Mapa gerado a partir do modelo de propagação de ondas do SisBaHiA® com ondas propagando na direção sudoeste, azimute 205º, período de pico de 14s, altura significativa de onda em águas profundas de 5,0m (H_e equivalente a 0,14% do tempo) no Nível Máximo do Mar.

A partir desse resultado do modelo de propagação de onda, pode-se concluir que $H_e = 1{,}8\text{m}$ na praia com $T_e = 14s$. Assim, pela fórmula de HALLERMEIER (1978, 1981) a profundidade de fechamento é igual a 4,0m. Pra tal, temos:

- **Comprimento total de projeto:**guia-corrente norte -307m
  guia-corrente sul -325m
- **Prolongamento da estrutura atual:** guia-corrente norte -90m

guia-corrente sul -94m

Figura 41:Representação esquemática do prolongamento dos guia-correntes da lagoa de Itaipu.

6.2 Parâmetros Hidrodinâmicos

6.2.1 Critério de Arrebentação

Foi adotado para a região de estudo a relação entre a altura de arrebentação e a profundidade de arrebentação igual a 1, devido aos valores encontrados para o talude da praia e o fator de esbeltez das ondas. O talude da praia de Itaipu é aproximadamente igual atgβ = 0.04 como podemos visualizar na Figura 42 abaixo.

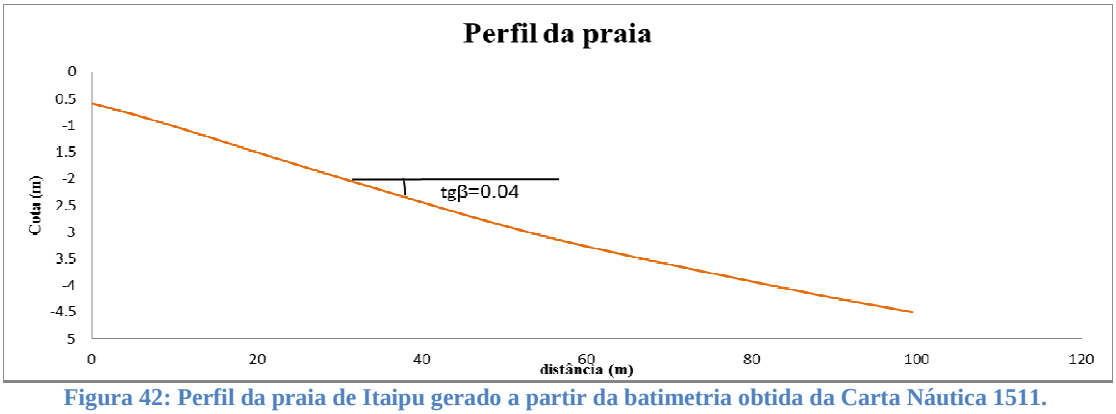


Figura 42: Perfil da praia de Itaipu gerado a partir da batimetria obtida da Carta Náutica 1511.

O fator de esbeltez das ondas que chegam na praia é, em média:

$$\frac{H_b}{(gT^2)} = 0.002$$

O que obtemos, através do ábaco do CEM, o seguinte resultado:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} \cong 1$$

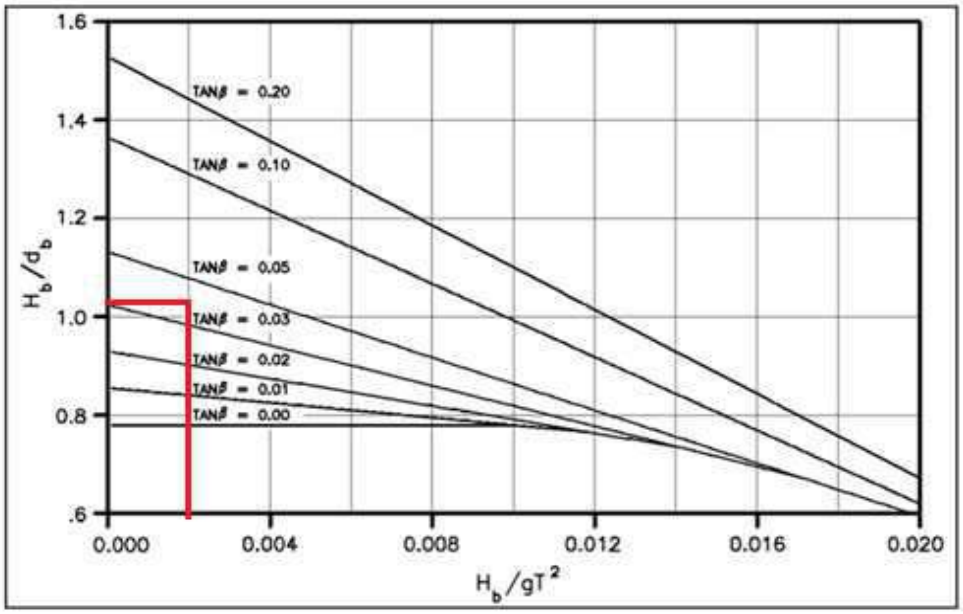


Figura 43:Ábaco do CEM com a estimativa docritério de arrebentação da Praia de Itaipu.

6.2.2 Onda de Projeto da Estrutura

A maior altura de onda encontradana estrutura, a partir dos resultados dos modelode propagação de ondas do SisBaHiA®, foi de 2,0mcom período de pico de 14s e azimute 205º conforme mostrado naseção 5.3. Como mostrado anteriormente, esse resultado foi obtido com a altura com tempo de recorrência de 10 anos ao largo calculado a partir do clima de ondas.

A altura da onda de projeto será considerada a altura de arrebentação nas seções em que as ondas arrebentam na estrutura.

Onde não ocorre arrebentação de ondas, será considerada a maior altura significativa de onda que atinge a estrutura, ou seja, 2,0 metros.

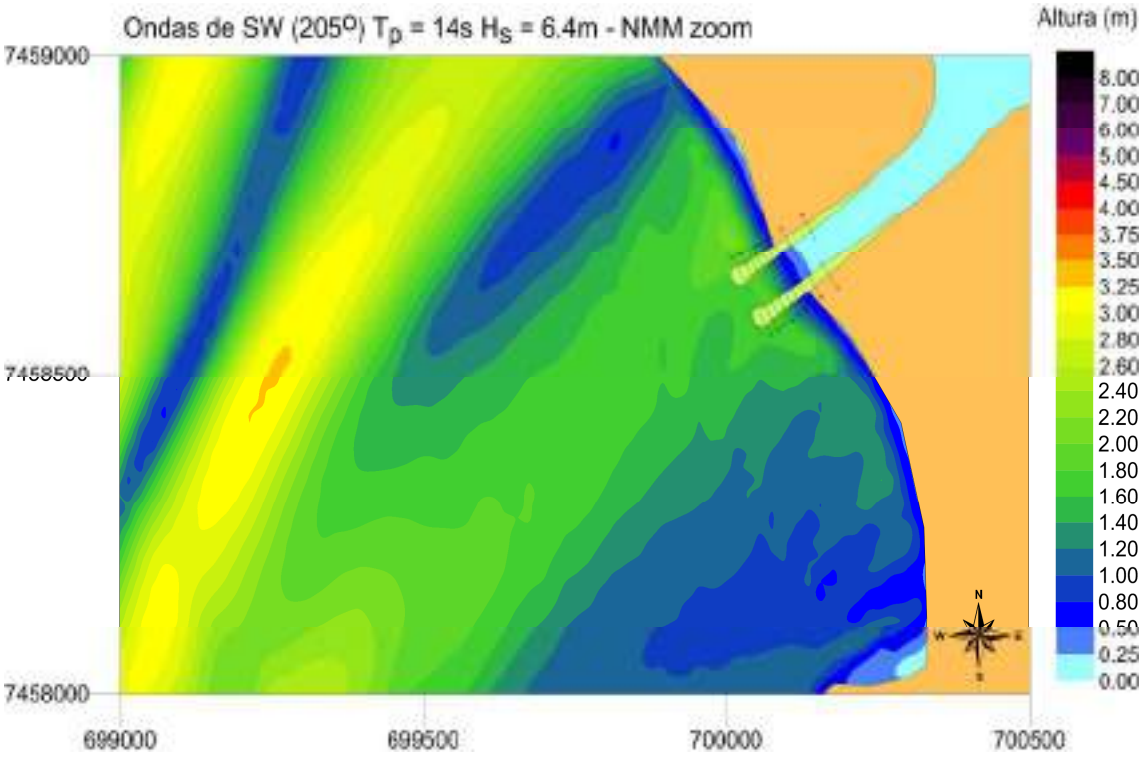


Figura 44:Resultado com zoom nas estruturas do Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® das ondas com direção de propagação Az: 205º, período de pico de 14s e altura ao largo igual a 6,4m no Nível Máximo do Mar (NR-CN1511+1,5m).

6.2.3 Níveis de Maré

Os parâmetros de nível de maré utilizados no dimensionamento dos guia-correntes foram os seguintes:

- **NR**–Nível de Redução da Carta Náutica - nível mínimo considerado no projeto- que equivale a média das mais baixasbaixamares de sizígia.
- **NMM**–Nível Médio do Mar - foi somado 0,7 metros ao NR da Carta Náutica para obter o nível médio do mar na região de estudo.
- **Nível Máximo do Mar** – Para o nível máximo considerado no projeto foi somado ao nível médio 0,8 metros, sendo 0,4metros a amplitude de maré astronômica a qual não é excedida em aproximadamente 40% do tempoe 0,4metrosa amplitude de maré meteorológica que ocorre em 3% do tempo, o que significa aproximadamente ocorrência de 2 vezes ao ano. Dando um total de 1,5 metros acima do NR da Carta Náutica.

Na Figura 45 abaixo,pode-se analisar os valores de amplitude de maré meteorológica por frequência de ocorrência. Adotou-se o valor de 0,4m que equivale a aproximadamente uma ocorrência de aproximadamente duas vezes ao ano (3% do tempo).

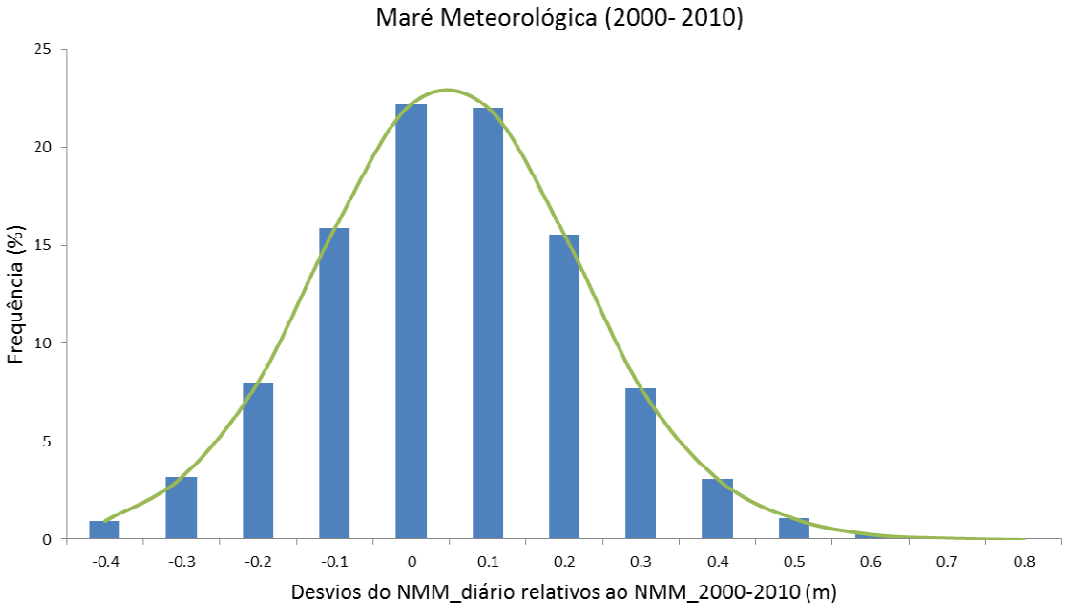


Figura 45:Gráfico de frequência de ocorrência da maré meteorológica na região de estudo.

A Figura 46a seguir mostra a curva de excedência da altura da maré astronômica, as constantes harmônicas foram calibradas para a região exterior da Baia de Guanabara através do software SisBaHiA®.Adotou-se a altura de 0,8m (0,4m de amplitude) que não é ultrapassada em 60% do tempo.

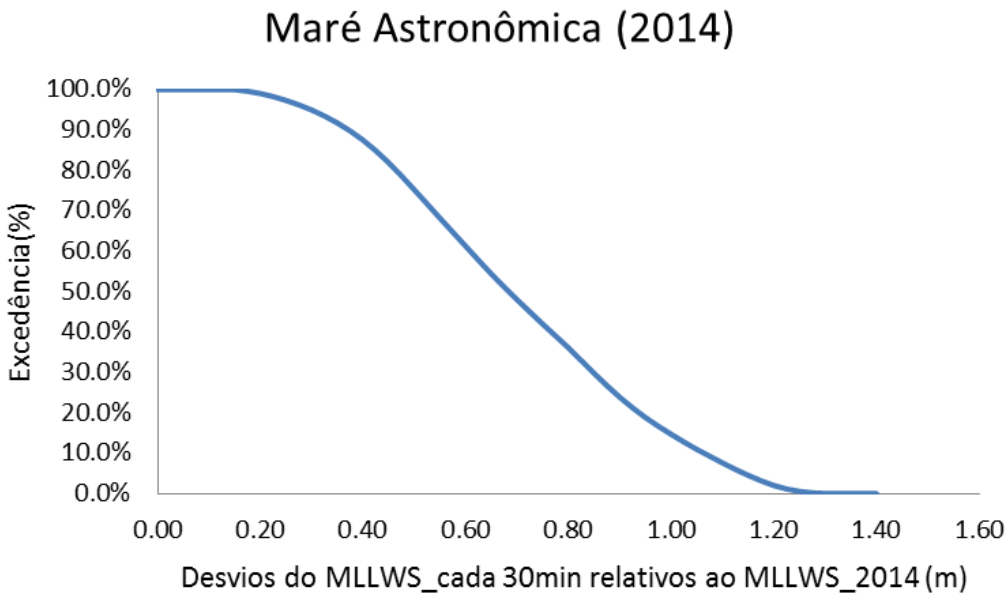


Figura 46:Curva de permanência da maré astronômica da região de estudo.

A Figura47 abaixo ilustra os 3 níveis de maré analisados.

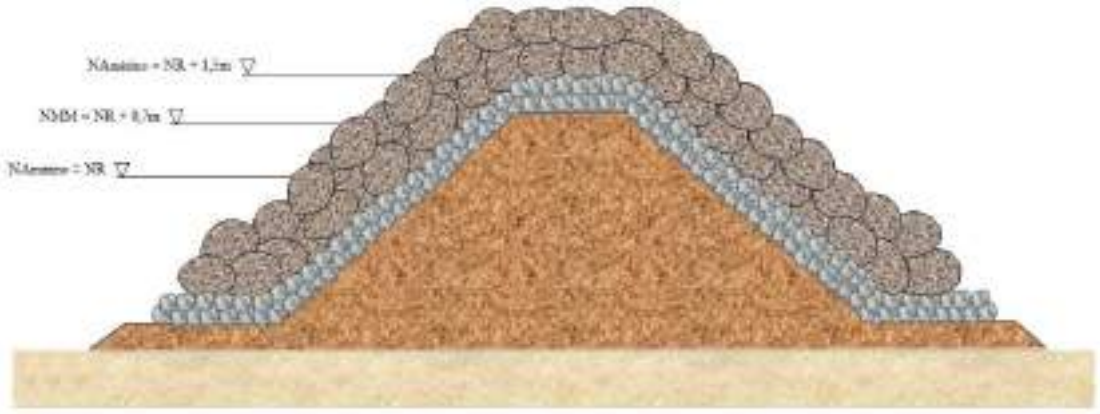


Figura 47:Representação dos três níveis de maré utilizados no estudo.

Os parâmetros hidrodinâmicos de projeto combinados levam em consideração situações de ressaca e tempestades que elevam o nível do mar. Vale ressaltar que apesar de nem todos os parâmetros exprimirem uma situação rara, como a maré astronômica que não é ultrapassada aproximadamente em40% tempo e a maré meteorológica que ocorre duas vezes ao ano, quando combinados com a onda de projeto de tempo de recorrência de 10 anos exprimem um evento suficientemente raro para o projeto. Ou seja, a não ser em situações raríssimas em que os máximos valores dos parâmetros hidrodinâmicos ocorram ao mesmo tempo, a estrutura será capaz de resistir aos esforços. Lembrando que para o projeto em questão torna-se mais viável economicamente o conserto de eventuais danos do que a construção de uma superestrutura para resistir a eventos extremamente raros com custos altíssimos de implantação.

6.3 Seções Transversais

Foram propostas 9 seções transversais mais a seção do cabeço para cada estrutura de enrocamento, tendo como referência o nível máximo de projeto: profundidades da Figura 49 a seguir (NR-CN1511) acrescidas de 1,5m. As seções foram desenhadas a partir de 1m de profundidade, a cada 0,5 metros. A figura 48 a seguir mostra a vista em planta dessas seções com as isolinhas de batimetria no NR-CN1511.

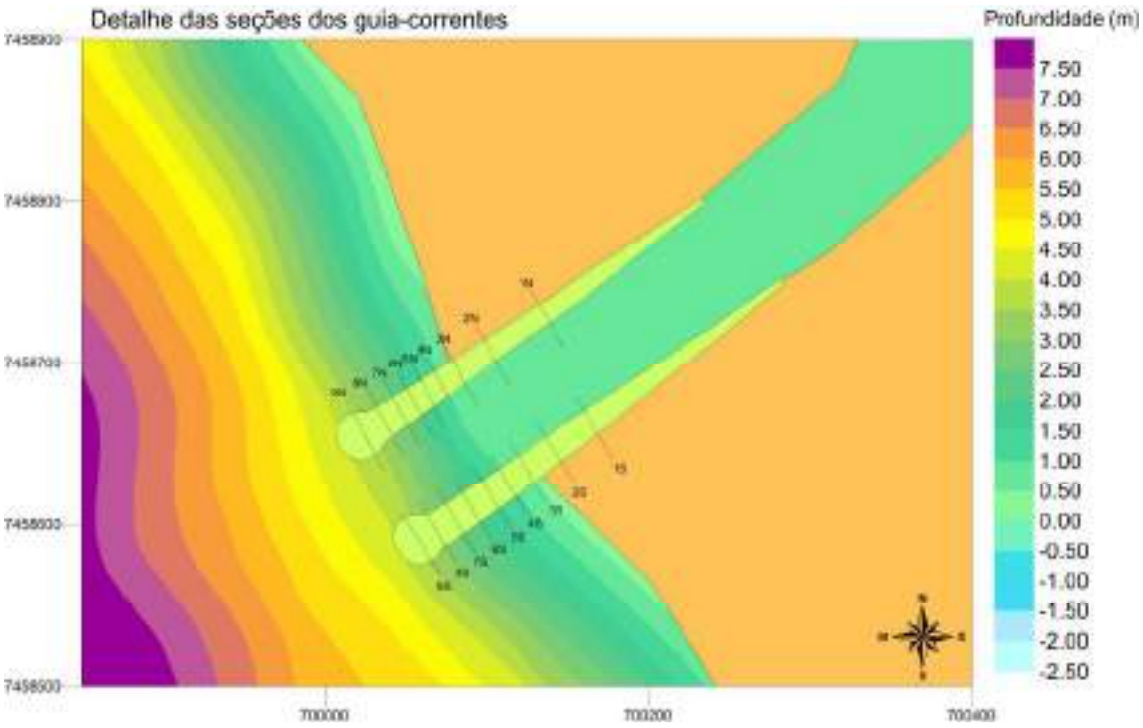


Figura 48: Vista em planta das seções transversais dos guia-correntes com as isolinhas de batimetria noNR-CN1511.

Para manter as seções fixas nos diferentes níveis de maré, a profundidade de uma mesma seção varia com a maré. Basta diminuir 0,8m das profundidades do nível máximo para obter as profundidades de cada seção no nível médio, da mesma forma, para definir as seções no NR-CN1511 basta diminuir 1,5m das profundidades do nível máximo. Por exemplo, a seção do cabeço que tem 5,5m de profundidade no nível máximo do mar, tem 4,7 metros de profundidade no NMM e 4,0 metros no NR-CN1511.

Dessa forma, foram estudados ostrês casos de nível de marépara as seções propostas e avaliado o lugar da seção crítica que é onde a onda de projeto de 2,0m arrebenta, gerando os maiores esforços na estrutura. A seguir estão as tabelas com os resultados obtidos para:

d – Profundidade em metros.

γ_b – Critério de arrebentação.

H – Altura da onda na seção transversal da estrutura em metros.

H'_0 – Altura equivalente da onda em águas profundas tendo sidoconsiderando apenas o efeito da refração cinemática (shoaling) na sua propagação.

Talude (cotgα) – m componente horizontal do Talude da seção transversal (mH; 1V).

K_D – Coeficiente de estabilidade.

W_{50} - Massa média das pedras da camada externa em toneladas.Admite-se uma variabilidade de 20% no peso das pedras, sendo que pelo menos 50% das pedras tenham massa igual ou maior que W_{50}.

D_{50} - Aresta de um cubo de pedra com massa W_{50} em metros.

Largura – Largura da crista da seção transversal em metros.

$\frac{H'_0}{(gT^2)}$ – Fator de esbeltez da onda na seção transversal da estrutura.

R/ H'_0 – Relação da altura de galgamento(R) por H'_0.

Altura de arrebentação em metros

Seção crítica: seção em que arrebenta a onda de projeto

As tabelas a seguir mostram o estudo feito para calcular e avaliar os resultados obtidos para os parâmetros listados acima. Com base nessas tabelas foi definido o dimensionamento das estruturas, elas não apresentam os resultados finais pois não levam em consideração os métodos construtivos, são os resultados diretos das fórmulas.Foi assumido, a priori, a massa específica da água igual 1030 kg/m^3 e a massa específica das pedras igual a 2650 kg/m^3.

O talude é de 1:1,5 para todas as seçõesda estrutura, de modo a facilitar a construção, adotando o método construtivo simples, com talude próximo ao natural (aproximadamente1:1,25) para pedras de enrocamento.

Caso 1: Nível Máximo de Projeto = NR-CN1511 + 1,5m

Tabela 10: Dimensionamentodos guia-correntes norte e sul no nível máximo de água do projeto.

Seção	d (m)	γ_b	H (m)	H'$_o$ (m)	Talude (cotg α)	K_D	W_{50} (t)	D_{50} (m)	Largura (m)	$\frac{H'_0}{gT^2}$	R/H'$_0$	Galgamento(m)
1N	1	1	1	0.7	1.5	3.5	0.13	0.37	3.0	0.00154	0.95	0.70
2N	1.5	1	1.5	0.9	1.5	3.5	0.44	0.55	3.0	0.00046	0.83	0.73
3N	2	1	2	1.3	1.5	3.5	1.04	0.73	3.0	0.00066	0.87	1.10
4N	2.5	1	2	1.3	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00069	0.88	1.17
5N	3	1	2	1.4	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00072	0.88	1.22
6N	3.5	1	2	1.4	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00075	0.88	1.27
7N	4	1	2	1.5	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00077	0.88	1.30
8N	4.5	1	2	1.5	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00079	0.90	1.37
9N	5	1	2	1.6	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00081	0.90	1.40
cabeço	5.5	1	2	1.6	1.5	3.2	1.14	0.75	3.0	0.00083	0.90	1.43
1S	1	1	1	0.7	1.5	3.5	0.13	0.37	3.0	0.00154	0.95	0.70
2S	1.5	1	1.5	0.9	1.5	3.5	0.44	0.55	3.0	0.00046	0.82	0.72
3S	2	1	2	1.3	1.5	3.5	1.04	0.73	3.0	0.00066	0.87	1.10
4S	2.5	1	2	1.3	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00069	0.88	1.17
5S	3	1	2	1.4	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00072	0.88	1.22
6S	3.5	1	2	1.4	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00075	0.88	1.27
7S	4	1	2	1.5	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00077	0.88	1.30
8S	4.5	1	2	1.5	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00079	0.90	1.37
9S	5	1	2	1.6	1.5	4	0.91	0.70	3.0	0.00081	0.90	1.40
cabeço	5.5	1	2	1.6	1.5	3.2	1.14	0.75	3.0	0.00083	0.90	1.43

d - profundidades máximas em cada seção

Caso 2: Nível Médio do Mar = NR-CN1511 + 0,7m

Tabela 11: Dimensionamentodos guia-correntes norte e sul no nível médio do mar.

Seção	d (m)	γ_b	H (m)	H'_o (m)	Talude (cotg α)	K_D	W_{50} (t)	D_{50} (m)	Largura (m)	$\frac{H'_0}{gT^2}$	R/H'_0	Galgamento (m)
2N	0.7	1	0.7	0.48	1.5	3.5	0.044	0.256	3.0	0.00100	0.90	0.43
3N	1.2	1	1.2	0.93	1.5	3.5	0.224	0.439	3.0	0.00193	0.96	0.89
4N	1.7	1	1.7	1	1.5	3.5	0.637	0.622	3.0	0.00052	0.85	0.85
critica	2	1	2	1.26	1.5	3.5	1.038	0.732	3.0	0.00066	0.87	1.10
5N	2.2	1	2	1.29	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00067	0.87	1.12
6N	2.7	1	2	1.35	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00070	0.88	1.19
7N	3.2	1	2	1.41	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00073	0.88	1.24
8N	3.7	1	2	1.46	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00076	0.89	1.30
9N	4.2	1	2	1.5	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00078	0.89	1.34
cabeço	4.7	1	2	1.54	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00080	0.90	1.39
2S	0.7	1	0.7	0.48	1.5	3.5	0.044	0.256	3.0	0.00100	0.90	0.43
3S	1.2	1	1.2	0.93	1.5	3.5	0.224	0.439	3.0	0.00193	0.96	0.89
4S	1.7	1	1.7	1	1.5	3.5	0.637	0.622	3.0	0.00052	0.85	0.85
critica	2	1	2	1.26	1.5	3.5	1.038	0.732	3.0	0.00066	0.87	1.10
5S	2.2	1	2	1.29	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00067	0.87	1.12
6S	2.7	1	2	1.35	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00070	0.88	1.19
7S	3.2	1	2	1.41	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00073	0.88	1.24
8S	3.7	1	2	1.46	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00076	0.89	1.30
9S	4.2	1	2	1.5	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00078	0.89	1.34
cabeço	4.7	1	2	1.54	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00080	0.90	1.39

d - profundidades em relação ao nível médio do mar em cada seção

Caso 3: Nível mínimo de projeto: NR-CN1511

Tabela 12: Dimensionamentodos guia-correntes norte e sul com o nível mínimo de água do projeto.

Seção	d (m)	γ_b	H (m)	H'$_o$ (m)	Talude (cotg α)	K_D	W_{50} (t)	D_{50} (m)	Largura (m)	$\frac{H'_0}{gT^2}$	R/H'$_0$	Galgamento (m)
3N	0.5	1	0.5	0.31	1.5	3.5	0.016	0.183	3.0	0.00064	0.87	0.27
4N	1	1	1	0.742	1.5	3.5	0.130	0.366	3.0	0.00154	0.82	0.61
5N	1.5	1	1.5	0.88	1.5	3.5	0.438	0.549	3.0	0.00183	0.97	0.85
6N	2	1	2	1.26	1.5	3.5	1.038	0.732	3.0	0.00066	0.87	1.10
7N	2.5	1	2	1.33	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00069	0.88	1.17
8N	3	1	2	1.39	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00072	0.88	1.22
9N	3.5	1	2	1.44	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00075	0.89	1.28
cabeço	4	1	2	1.48	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00077	0.89	1.32
3S	0.5	1	0.5	0.31	1.5	3.5	0.016	0.183	3.0	0.00064	0.87	0.27
4S	1	1	1	0.742	1.5	3.5	0.130	0.366	3.0	0.00154	0.82	0.61
5S	1.5	1	1.5	0.88	1.5	3.5	0.438	0.549	3.0	0.00046	0.97	0.85
6S	2	1	2	1.26	1.5	3.5	1.038	0.732	3.0	0.00066	0.87	1.10
7S	2.5	1	2	1.33	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00069	0.88	1.17
8S	3	1	2	1.39	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00072	0.88	1.22
9S	3.5	1	2	1.44	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00075	0.89	1.28
cabeço	4	1	2	1.48	1.5	4	0.908	0.700	3.0	0.00059	0.89	1.32

d - profundidades em relação ao NR-CN1511 em cada seção

6.3.1 Massa dos Blocos de Enrocamento (W_{50})

Assumindo as profundidades em relação ao nível máximo de mar de projeto, são propostas faixas de massas de pedra de enrocamento para5 trechosda estrutura:

Trecho 1 -Da raiz até a profundidade máxima de1,0m (origem até aseção 1N):região na zona de arrebentação, por isso foi adotado K_D = 3,5. Com $\gamma_b = 1$, a altura significativa da onda de projeto igual a 1m, teremos blocos com W_{50}igual a 130 kg.

Trecho 2 -Da profundidade máxima de 1,0m até a profundidade máxima de 1,5m (seção 1N a 2N):região na zona de arrebentação, por isso foi adotado K_D = 3,5. Com $\gamma_b = 1$, a altura significativa da onda de projeto igual a 1,5m, teremos blocos com W_{50} igual a 440 kg.

Trecho 3 -Da profundidade máxima de 1,5m até a profundidade máxima 3,5m (seção 2N até 6N):região parcialmente ou completamente na zona de arrebentação, dependendo do nível do mar, conforme o nívelde maré vai diminuindo, a zona de arrebentação vai se afastando da linha de costa. Por isso foi adotado K_D = 3,5 para todo o trecho, considerando as variações de maré. Se trata da região de arrebentação das maiores ondas, com $\gamma_b = 1$ a altura significativa da onda de projeto é a máxima para a região, igual a 2,0m.Teremos pedras com 1,038 tonelada.

Trecho 4 -Da profundida máxima de 3,5m até a profundidade máxima de 5,0(6N até o 9N):Em nenhuma situação de maré a onda de projeto máxima de 2m de altura ou ondas menorespodem arrebentar, se trata de uma região fora da zona de arrebentação, por isso o K_D = 4,0 foi adotado. A altura significativa da onda de projeto continua sendo a máxima para a região, igual a 2,0m.Foi calculada a pedra de 908 kg,

Trecho 5 - Da profundidade máxima de 5,0m até a profundidade máxima de 5,5 metros–Cabeço: Se trata de uma região mais vulnerável ao ataque das ondas, pois seu formato em arco proporciona uma menor ancoragem lateral das pedras em relação ao tronco da estrutura que é linear. Por isso foi considerado o K_D= 3,2, um poucomenor do que 4,0 (tronco), com objetivo de aumentar o peso das pedras, mesmo se tratando de uma região fora da zona arrebentação. Lembrando que o K_D está no denominador da fórmula de

Hudson. A altura significativa da onda de projeto continua sendo a máxima para a região, igual a 2,0m. Foi definida assim a pedra de 1,135 toneladas.

Vale ressaltar que outro método utilizado para aumentar a segurança do cabeço é construí-lo com um talude mais suave, pois aumentando o valor de cotgα é possível manter o mesmo peso das pedras mesmo diminuindo o valor de $K_{D,}$ pois ambos os termos estão no denominador da fórmula de Hudson. Contudo ao definir um talude que não seja próximoao natural, é preciso equipamentos especiais como guindastes para colocação das pedras uma de cada vez. Tal método construtivo torna a construção mais cara e demorada.

Como a estrutura do nosso caso de estudo é relativamente leve, optou-se por aumentar o peso das pedras do cabeço, mantendo o mesmo talude do tronco. Como se tratam de pedras da ordem de 1 tonelada, não será difícil encomendar das pedreiras.

6.3.2 Cota da Crista

Por ser em área urbana, a crista do enrocamento terá usos diversos, por exemplo, local para pesca e passeios. Portanto, considera-se que a crista deve ter uma altura suficiente para evitar galgamento de ondas, exceto em situações excepcionais.

Para a cota da crista em cada seção foi considerado:elevação do nível do mar de 1,5m acima do NR-CN 1511 + altura de galgamento calculada a partir do ábaco 7 – 20do SPMno Anexo4.

A seguir na Tabela 13 são mostrados os valores encontrados para a cota da crista em relação ao NR-CN 1511 e a altura da crista em relação ao fundo para todas as seções da estrutura. Os resultados não apresentam os valores finais do dimensionamento, foram usados como base para determinação das cotas finais.

Tabela 13: Cotas e alturas da crista em cada seção transversal dos guia-correntes norte e sul.

Seção	Cota da crista em relação ao NR (m)	Altura da crista em relação ao fundo (m)
1N	2.2	1.7
2N	2.2	2.2
3N	2.6	3.1
4N	2.7	3.7
5N	2.7	4.2
6N	2.8	4.8
7N	2.8	5.3
8N	2.9	5.9
9N	2.9	6.4
cabeço	2.9	6.9
1S	2.2	1.7
2S	2.2	2.2
3S	2.6	3.1
4S	2.7	3.7
5S	2.7	4.2
6S	2.8	4.8
7S	2.8	5.3
8S	2.9	5.9
9S	2.9	6.4
cabeço	2.9	6.9

NR- nível de redução da carta náutica 1511

Considerando os processos construtivos e agindo a favor da segurança são propostos 3 trechos lineares:

Trecho 1 - Da origem até a profundidade máxima de 1 metro (seção 1N):cota da crista igual a2,2 metros em relação aoNR-CN 1511, trata-se de um trecho na horizontal. Mesmo se tratando de uma região emersa em grande parte do tempo, é importante manter a cota proposta, calculada para a seção 1N e superestimada até a raíz da estrutura. Pois como verificado na visita de campo e confirmado pelos salva-vidas locais, o espraiamento da onda na faixa de areia da praia, dependendo do ângulo de ataque, pode passar por cima da estrutura e depositar sedimentos no interior do canal de maré.

Trechos 2, 3 e 4 - Da profundidade máxima de 1,0 metro até profundidade máxima de 5,0metros:começa na cota 2,2m (seção 1N)e aumenta linearmente até a cota 3,1m (seção 9N)em relação aoNR-CN 1511 com tangente igual a 0,0066, trata-se de um trecho com inclinação suave. Foi verificado que com esse valor de tangente todas as cotas das cristas das seções do trecho são iguais ou maiores do que os valores da Tabela 13. Para alcançar esse valor de

tangente foi preciso aumentar a cota da crista da seção 9N em 20cm em relação aoNR-CN 1511.

Trecho 5 - Da profundidade máxima de 5,0m até a profundidade máxima de 5,5 metros – Cabeço:a cota da crista permanece constante e igual a 3,1 metros, trata-se de um trecho na horizontal, pois dado que a maior cota necessária (2,9m) já foi alcançada.

A seguir na Figura 49 é mostrada uma representação esquemática longitudinal do guia-correntes para melhor visualização das massas dos trechos e das cotas em relação ao RN-CN1511 . O desenho está fora de escala, o comprimento total e de cada trecho não representa a realidade.

Figura 49:Esquema da vista longitudinal dos guia-correntes, dando uma noção das cotas das cristas em cada trecho em relação ao nível d'água. Os comprimentos não estão mostrados na escala correta.

6.3.3 Largura da Crista

No caso de estudo só é admitido o sobrepasse em condições muito extremas, a largura da crista é estimada como sendo o maior entre dois valores: $3\times D_{50}$ou 3,0 m. Como em nenhum trecho da estrutura o diâmetro é maior do que 1,0 m foi determinada a largura de 3,0 m para toda a estrutura. O diâmetro é estimado como sendo a aresta de um cubo com massa equivalente à unidade de enrocamento.

Para o potencial uso da crista do guia-correntes como pista de passeio, ponto de observação paisagística e local de pesca recreativa, será necessário implementar melhorias na crista projetada, revesti-la adequadamente e construir benfeitorias, grades, bancos, luminárias e escadas em pontos selecionados nos taludes. Dois bons exemplos destes usos são os guia-correntes construídos no Canal da Joatinga na Praia da Barra da Tijuca no Rio de Janeiro e na embocadura do Rio Camboriú em Santa Catarina.

É sugerido o cobrimento das pedras de enrocamento com um material maleável como piso de asfalto ou piso intertravado de blocos de concreto. É necessário um material que se adapte aos movimentos dos blocos de enrocamento a medida que eles reagem aos esforços hidrodinâmicos.

6.3.4 Camadas da Estrutura

Por ser região com facilidade de obtenção de pedras, optou-se por um enrocamento simples em três camadasde pedras com pesos decrescentes, sem berma, com baixa permeabilidade no núcleo. A Figura 50 mostra um esquema da seção tipo considerada.

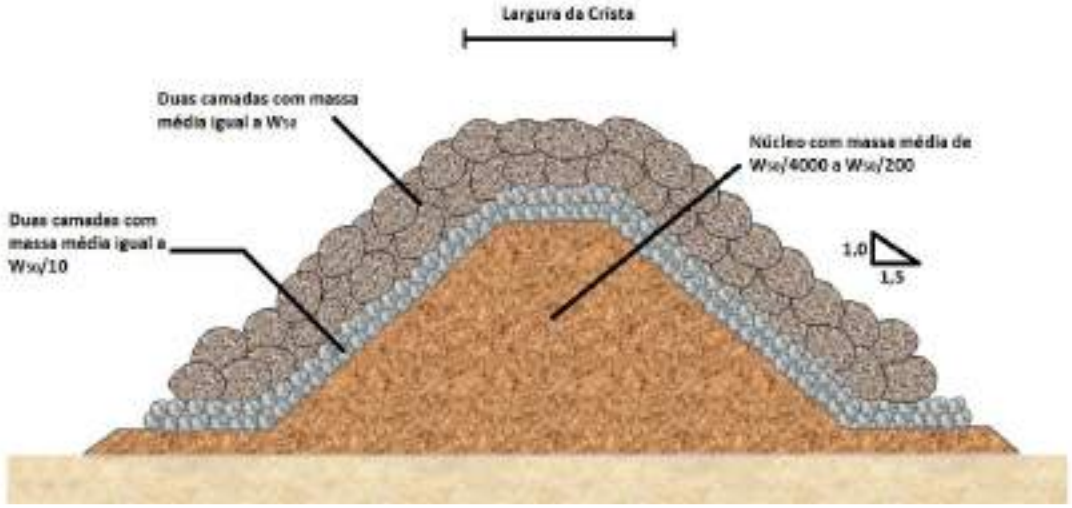


Figura 50:Representação esquemática de uma seção transversal dos guia-correntes mostrando as camadas da sua estrutura.

6.3.4.1 Espessurada Camada Exterior(Armadura)

A espessura da primeira camada de armadura pela fórmula (7) (Cap.5_Parte VI_CEM2011)podeser escrita da forma: r = 2 x $D_{50,}$ pois K_Δ = 1 pela Tabela 2; n = 2 (típico);

$\left(\frac{W}{wa}\right)^{\frac{1}{3}}$=$D_{50}$ = aresta do cubo de massa equivalente a unidade do enrocamento.

Da mesma forma, a fórmula (8) (Cap. 5_Parte VI_CEM2011)para determinação do número de unidades por área pode ser escrita da forma:$\frac{N_a}{A}$ = 1,26 x$\left(\frac{w_a}{W}\right)^{\frac{2}{3}}$, pois K_Δ = 1e P =37 pela Tabela 2; n =2;

Os valores de D_{50}equivalentes ao W_{50} estão calculados nas tabelas 10, 11 e 12. Assim, podemos definir:

Trecho 1 -Da raiz até a profundidade máxima 1m:W_{50}igual a 0,13t o que resulta em D_{50} = 0,37m. Dessa forma teremos espessura de 0,7m e 9unidades por m^2.

Trecho 2 - Da profundidade máxima de 1m até a profundidade máxima de 1,5m (seção 1N a 2N):teremos pedras com W_{50}igual a 0,44t o que resulta em D_{50} = 0,55m. A camada terá espessura de 1,1m e 4unidades por m^2.

Trecho 3 - Da profundidade máxima de 1,5m até a profundidade máxima 3,5m (seção 2N até 6N): Como foi definido a mesmamassa de pedra da região do cabeço, teremos blocos com 1,14t, D_{50} = 0,75m e espessura de 1,5m e 2unidades por m^2.

Trecho 4 - Da profundida máxima de 3,5m até a profundidade máxima de 5,0 (6N até o 9N): Foi calculada a massa de0,91t, D_{50} = 0,7m o que fornece o valor de 1,4m para a espessura da camada de armadura e3unidades por m^2.

Trecho 5 - Da profundidade máxima de 5,0m até a profundidade máxima de 5,5 metros-Cabeço: Teremos blocos com 1,14t, D_{50} = 0,75m e espessura de 1,5me 2unidades por m^2

Para facilitar os processos construtivos foi considerada a espessura de 1,5m **da profundidade máxima de 1,5m até o cabeço das estruturas, ou seja, nos trechos 3,4 e 5.**

6.4.3.2 Massa e Espessura do Enrocamento da Subcamada

As espessurasda subcamada também são calculadas pela fórmula(7)(Cap. 5_Parte VI_CEM2011).A massa de cada trecho é dada por $W_{50}/10$, logo a aresta do cubo de massa equivalente é dada por D_{sub}apresentado na Tabela 14 a seguir para os valores de W_{50} utilizados na camada primária:

Tabela 14: Valores das arestas (D_{sub}) dos cubos de massa equivalente a $W_{50}/10$ das subcamadas dos guia-correntes.

W_{50}(t)	W_{50} (t)/10	D_{sub} (m)
0,13	0,013	0,17
0,44	0,044	0,25
0,91	0,091	0,32
1,14	0,114	0,35

ComK_Δ = 1 pela Tabela 2; n = 2 (típico); P = 37, de forma análoga a camada exterior, temos para a subcamada:

Trecho 1 - Da raiz até a profundidade máxima 1m: $W_{50}/10$ igual a 13kg o que resulta em D_{sub}= 0,17m. Dessa forma teremos espessura de 0,34m e 44 unidades por m^2

Trecho 2 - Da profundidade máxima de 1m até a profundidade máxima de 1,5m (seção 1N a 2N): teremos blocos com $W_{50}/10$ igual a 44kg o que resulta em

D_{sub}= 0,25m. A camada terá espessura de 0,5m e 19 unidades por metro quadrado.

Trecho 3 - Da profundidade máxima de 1,5m até a profundidade máxima 3,5m (seção 2N até 6N): Como foi definido a mesma massa de pedra da região do cabeço, teremos blocos comW_{50}/10 igual a114 kg, D_{sub}= 0,35 e espessura de 0,70m e 10 unidades por metro quadrado.

Trecho 4 - Da profundida máxima de 3,5m até a profundidade máxima de 5,0 (6N até o 9N): Foi calculada a pedra de W_{50}/10 igual a91 kg, D_{sub}= 0,32 o que fornece o valor de 0,64m para a espessura da camada de armadura e 12 unidades por m^2.

Trecho 5 - Da profundidade máxima de 5,0m até a profundidade máxima de 5,5 metros-Cabeço Teremos blocos comW_{50}/10 igual a114kg, D_{sub}= 0,35 e espessura de 0,70m e 10 unidades por metro quadrado.

Para facilitar os processos construtivos foi considerada a espessura de 0,7m **da profundidade máxima de 1,5m até o cabeço das estruturas, ou seja, nos trechos 3,4 e 5.**

6.4.3.3 Massa das Unidades de Enrocamento do Núcleo

As unidades dessa camada terão massa igual a 1/4000 a 1/200 das massas da camada exterior (W_{50}), assim teremos para cada trecho:

Trecho 1 - Da raiz até a profundidade máxima 1m: W_{50}/4000 a W_{50}/200fornece blocos com32,5ga 650g.

Trecho 2 - Da profundidade máxima de 1m até a profundidade máxima de 1,5m (seção 1N a 2N): teremos blocos com 110ga 2200g.

Trecho 3 - Da profundidade máxima de 1,5m até a profundidade máxima 3,5m (seção 2N até 6N): teremos blocos com 290g a 5700g.

Trecho 4 - Da profundida máxima de 3,5m até a profundidade máxima de 5,0 (6N até o 9N):teremos blocos com 230 g a 4500g.

Trecho 5 - Da profundidade máxima de 5,0m até a profundidade máxima de 5,5 metros-Cabeço: teremos blocos com 290g a 5700g.

6.3.5 Quadros Resumos do Dimensionamento dos Guia-correntes

Tabela 15: Valores do dimensionamento por trecho do guia-correntes Norte.

		Coordenadas UTM		Profundidades máximas (m)			Cota da crista (m)		
Trecho	Comprimento (m)	inicial	final	inicial	final	Massa W_{50} (t)	inicial	final	Largura da crista (m)
1	156	700262,4E 7458821S	700136E 7458731S	Raíz	1,0	0,13	2,2	2,2	3,0
2	40	700136E 7458731S	700102E 7458708S	1,0	1,5	0,44	2,2	2,5	3,0
3	56	700102E 7458708S	700056E 7458675S	1,5	3,5	1,14	2,5	2,8	3,0
4	37	700056E 7458675S	700025,9E 7458654S	3,5	5,0	0,90	2,8	3,1	3,0
5	18	700025,9E 7458654S	700011,7E 7458645S	5,0	cabeço	1,14	3,1	3,1	3,0

Profundidades em relação ao nível máximo do mar de projeto; Cota da crista em relação ao NR-CN 1511; Coordenadas UTM do eixo da estrutura

Tabela 16: Valores do dimensionamento por trecho do guia-correntes Sul.

		Coordenadas UTM		Profundidades máximas (m)			Cota da crista (m)		
Trecho	Comprimento (m)	inicial	final	inicial	final	Massa W_{50} (t)	inicial	final	Largura da crista (m)
1	182	700312.2E 7458771S	700163.9E 7458665S	Raíz	1,0	0,13	2,2	2,2	3,0
2	28	700163.9E 7458665S	700140.9E 7458665S	1,0	1,5	0,44	2,2	2,4	3,0
3	62	700140.9E 7458665S	7000090E 7458648S	1,5	3,5	1,14	2,4	2,8	3,0
4	38	7000090E 7458648S	700058.8E 7458589S	3,5	5,0	0,90	2,8	3,1	3,0
5	15	700058.8E 7458589S	7000047E 7458582S	5,0	cabeço	1,14	3,1	3,1	3,0

Profundidades em relação ao nível máximo de projeto; Cota da crista em relação ao NR-CN 1511; Coordenadas UTM do eixo da estrutura

Abaixo na Tabela 17 são mostrados os valores das massas das unidades de enrocamento da subcamada e do núcleo e das espessuras das camadas de armadura e subcamada, comuns aos guia-correntes Norte e Sul.

Tabela 17: Massas dos blocos do enrocamento da subcamada e do núcleo por trecho e as espessuras das camadas de armadura e subcamada.

				Espessura das camadas (m)	
Trecho	Profundidade máxima (m)	Massa da Subcamada (t X 10^{-6})	Massa do Núcleo (t X 10^{-6})	Armadura	Subcamada
1	Raíz até 1	13	32,5 a 650	0.7	0.3
2	1 até 1.5	44	110 a 2200	1.1	0.5
3	1.5 até 3.5	114	290 a 5700	1.5	0.7
4	3.5 até 5	91	230 a 4500	1.5	0.7
5	5 até cabeço	114	290 a 5700	1.5	0.7

Levando em consideração a variabilidade das pedras de 20 %, a disponibilidade de tamanhos de pedra diferentes nas pedreiras e os processos construtivos a serem adotados, foi feito ainda um novo dimensionamento dos guia-correntes com um caráter mais prático. Nesse sentido consideramos apenas 3 trechos com pesos de pedra e geometria diferentes vista na Tabela 18.

Tabela 18: Dimensionamento considerando os processos construtivos.

						Espessura das camadas (m)			
Trecho	Profundidade máxima (m)	W_{50} (kgf)	Massa da Camada externa (Kgf)	Massa da Subcamada (kgf)	Massa do Núcleo (kgf)	Externa	Subcamada	Cota da crista (m)	Altura da crista (m)
1	Raíz até 1	1300	1100 a 1600	110 a 160	0,4 a 6,5	0.7	0.3	2.2	1.7
2	1 até 1.5	4500	3600 a 5400	360 a 540	1,0 a 22	1.1	0.5	2.4	2.4
3	1.5 até cabeço	12000	9600 a 14400	960 a 1440	3,0 a 57	1.5	0.7	3.1	7.1

Cota da crista em relação ao NR-CN1511; Altura da crista em relação ao fundo; Altura e cota da crista da seção final de cada trecho; Profundidades em relação ao nível máximo de projeto

O anexo 5 apresenta a seção transversal final de cada trecho, na escala de 1/100.

6.3.6 Ordem de grandeza da Estimativa de Custos

Foi feita uma estimativa dos custos de implantação dos guia-correntes. Foi calculado o volume total das estruturas e assumido uma porosidade de 40% para as pedras do enrocamento. Dessa forma foi definido o volume total de pedras como mostram as tabelas a seguir.

Tabela 19: Volumes por trecho e total das estruturas e das pedras do enrocamento

Guia-Correntes Norte		Guia-Correntes Sul	
Trecho	Volume (m^3)	Trecho	Volume (m^3)
1	1631	1	1903
2	730	2	511
3	6577	3	6814
Total	8937	Total	9227
De pedras	5362	De pedras	5536

Assumindo a pedreira em um raio de 10 km de distância da obra, estimamos o custo aproximadodos blocos colocados de 200 reais/m^3, considerando os custos do material, do transporte das pedras e da implantação dos blocos. Temos a estimativa orçamentária de: R$ 1.080.000,00 para o guia-correntes Norte e R$ 1.108.000,00 para o guia-correntes Sul.

Deve-se ainda adicionar ao custo estimado aqui, a taxa de perda levando em consideração fatores adversos que eventualmente podem acontecer durante a construção das estruturas, como por exemplo, o custo de refazimento após um evento de ressaca.

7 Conclusão

A altura da onda de projeto é o principal parâmetro que influencia o peso das unidades de enrocamento, devido ao fato de estar elevado à terceira potência na fórmula de Hudson. Uma pequena variação na altura da onda pode significar uma grande variação no peso das pedras, por isso tal parâmetro deve ser estudado com muita atenção, para que não sejam feitos cálculos superestimando ou subestimando a estrutura. Para o estudo da onda de projeto obteve-se dados de onda em águas profundas durante um período de sete anos, para a partir desses dados definir os cenários a serem simulados pelo modelo de propagação de onda do SisBaHiA®. Além dos dados do clima de ondas em águas profundas, é necessário avaliar a geometria da costa da região, para analisar as possíveis direções de propagação de onda que podem chegar na estrutura. Pela geometria da região da praia de Itaipu e pelas direções principais mais frequentes nos dados do clima de onda em águas profundas chegou-se a conclusão de que o principal quadrante a ser simulado é o sul/sudoeste. Para esse quadrante simulou-se diferentes direções de ondulação, para encontrar aquela em que as ondas chegariam com maiores alturas na região da estrutura. Encontrou-se os maiores fatores de amplificação para os azimutes de 205° (sudoeste) e 195° (sul). Para essas direções,variou-se os períodos das ondas (14s, 15s, 16s e 17s) e os níveis de maré (NR-CN1511, NMM e nível máximo do mar). As maiores ondas atingindo a estrutura foram encontradas no azimute 205°, com período de 14s no NMM.

Os guia-correntes estão em uma região abrigada, principalmente protegida pelo braço de terra conhecido como Serra da Tiririca e pelas ilhas em frente as praias de Itaipu e Piratininga. Além de formar uma barreira para as ondulações de sudeste/leste, para as ondulações de sul gera uma zona de baixa energia na parte leste da praia de Itaipu pelo efeito da refração. As ilhas localizadas em frente às praias de Itaipu e Piratininga também formam um obstáculo, difratando as ondas e fazendo com que elas cheguem com altura consideravelmente reduzida, em relação à altura ao largo, na região da estrutura. Por estar em uma região abrigada, a maior onda encontrada na região da estrutura tem 2,0 metros de altura. Assim a estrutura não necessita de pedras muito pesadas comparadas a outras estruturas desse tipo, com as maiores pedras não passando de 1,2 toneladas. No mesmo sentido, as cotas da crista não são muito altas, não passando de 3,1 metros em relação ao NR-CN1511.

Levar em consideração as variações de nível devido às marés astronômica e meteorológica é de extrema importância no projeto de estruturas hidráulicas desse tipo, não só para os cálculos das cotas da crista como também para avaliar as mudanças da zona de arrebentação. Quanto mais alto o nível do mar, mais próximo da praia as ondas irão arrebentar, conforme o nível da maré vai diminuindo, a zona de arrebentação vai se afastando da costa.Lembrando que os maiores esforços na estrutura são gerados pelas ondas arrebentando, uma dada seção da estrutura pode não estar na zona de arrebentação para certas situações do nível de maré e pode estar para outras situações. Esse foi o caso da porção mediana do nosso guia-correntes, mais precisamente o trecho 3. Para a maré máxima, apenas a seção que dá inicio ao trecho tem ondas arrebentando, com onível do marabaixando o trecho vai entrando na zona de arrebentação até ficar completamente em tal zona, com a maré mínima.

É importante ressaltar que este trabalho não caracteriza, de maneira alguma, um projeto pronto para implantação. Trata-se de um projeto básico com enfoque na avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos em que a estrutura estará sujeita e nos cálculos de dimensionamento das unidades do enrocamento. Para a implantação de guia-correntes deverá ser feito uma série de estudos, como análise dos custos de implantação e manutenção como a investigação do subsolo (mencionada na seção 9 deste trabalho), impactos ambientais gerados pela obra,dados topográficosdetalhados da região.

8 Recomendações

Como recomendação para trabalhos futuros e uma possível complementação deste, seria interessante a aplicação dos modelos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do SisBaHiA® em um domínio na região dos guia-correntes para avaliar a dinâmica das correntes e dos sedimentos na praia de Itaipu, no canal de maré e no interior da lagoa.

Deve-se ressaltar que antes da construção de qualquer estrutura que irá transferir cargas ao solo deve ser realizado o estudo geotécnico de investigação do subsolo para garantir que o solo irá resistir a essas cargas, sem que haja recalques excessivos ou até rupturas. Recomenda-se a sondagem para: determinação da extensão, profundidade e espessura das camadas do subsolo até uma determinada profundidade; descrição do tipo de solo de cada camada;dados sobre propriedades mecânicas dos solos ou rochas: compressibilidade, resistência ao cisalhamento. Caso já tenho sido feito o estudo no projeto original, deve-se recuperar e atualizar os dados da investigação geotécnica para que sejam reavaliados dado as cargas geradas pela nova estrutura.

Também seria relevante a obtenção de dados do clima de ondas em águas profundas para um ponto mais próximo a região de interesse, através da simulação com o modelo de geração e previsão de ondas WaveWatch III®. Ou ainda poderia ser instalado um ondógrafo no ponto de interesse para medir os dados de onda ao largo, próximo a região da praia de Itaipu.

Finalmente, recomenda-se que seja feito em estudo de outras alternativas construtivas, como por exemplo, a opção de utilizar tubos geossintéticos na concepção do núcleo dos guia-correntes, sendo considerados os impactos ambientais das alternativas, comparação dos custos e facilidade de implantação.

9 Referências

BONALDO, R. R. 2010, "*Dimensionamento de Molhes para Retenção de Areia e Fixação da Foz do Rio Araranguá/SC – Estudo de Caso*". Projeto de Graduação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, Criciúma, SC, Brasil.

DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação. (2013). Acesso em Setembro de 2013, disponível em http://www.mar.mil.br

PALHA, A., FORTES, C., TEIXEIRA., P.R.F., "*Análise Comparativa da Aplicação dos Modelos REFDIF e REFDIF_S à zona Torres-Mostardas*". Acesso em Janeiro de 2014, disponível em: http://www.semengo.furg.br/2006/04.pdf

ROSMAN, P. C. C., EIGER, S., ALMEIDA, A. B. 1997, "*Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*"- COPPETEC/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C. 2004, "*Parecer Técnico sobre Aspectos do Estudo de Impacto Ambiental do Molhe de Retenção de Areias da Barra do Rio Camboriú, SC"* - Programa de Engenharia Naval e Oceânica, COPPETEC/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C. 2006, "*Projeto Básico para Melhoria da Embocadura do Estuário do Jacaraípe, ES – Relatório Final*", Departamento de Engenharia Ambiental/UFES, Vitória, ES, Brasil.

ROSMAN, P. C. C., VALENTINI, E. 2010, "*Apostila EEH604*" – Apostila de Aulas – Curso de Engenharia Fluvial e Costeira, AECO – Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P.C.C., 2012,*"Aspectos Morfológicos de Rios e Estabilidade de Canais de Maré."* Apostila de Aulas – Curso de Engenharia Fluvial e Costeira , AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica,COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C. 2013, "*Modelagem Ambiental para Planejamento de Obras nas Lagoas de Piratininga e Itaipu – RJ – Relatório Técnico*" – Programa de Engenharia Naval e Oceânica, COPPETEC/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P. C. C., 2013, *Referência Técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.

SILVA, R. A. G., "*Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama –RJ*" - Projeto de Graduação , Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SIQUEIRA, L. F. G., QUEIROZ, R. S. 2012, "*Estudo para Revitalização do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu com Auxílio da Modelagem Computacional*".Projeto de Graduação , Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

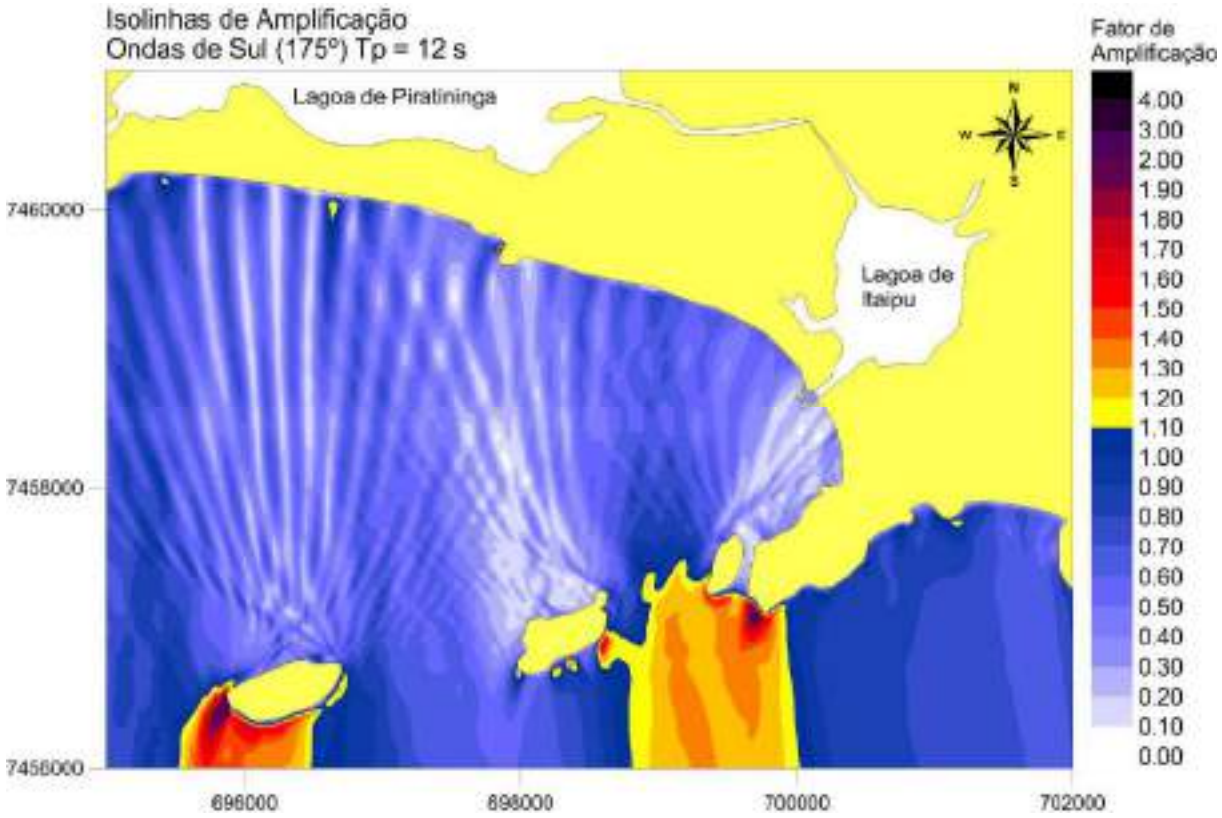
US ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER., 1984"*Shore Protection Manual*",2. 4.ed.,U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA.

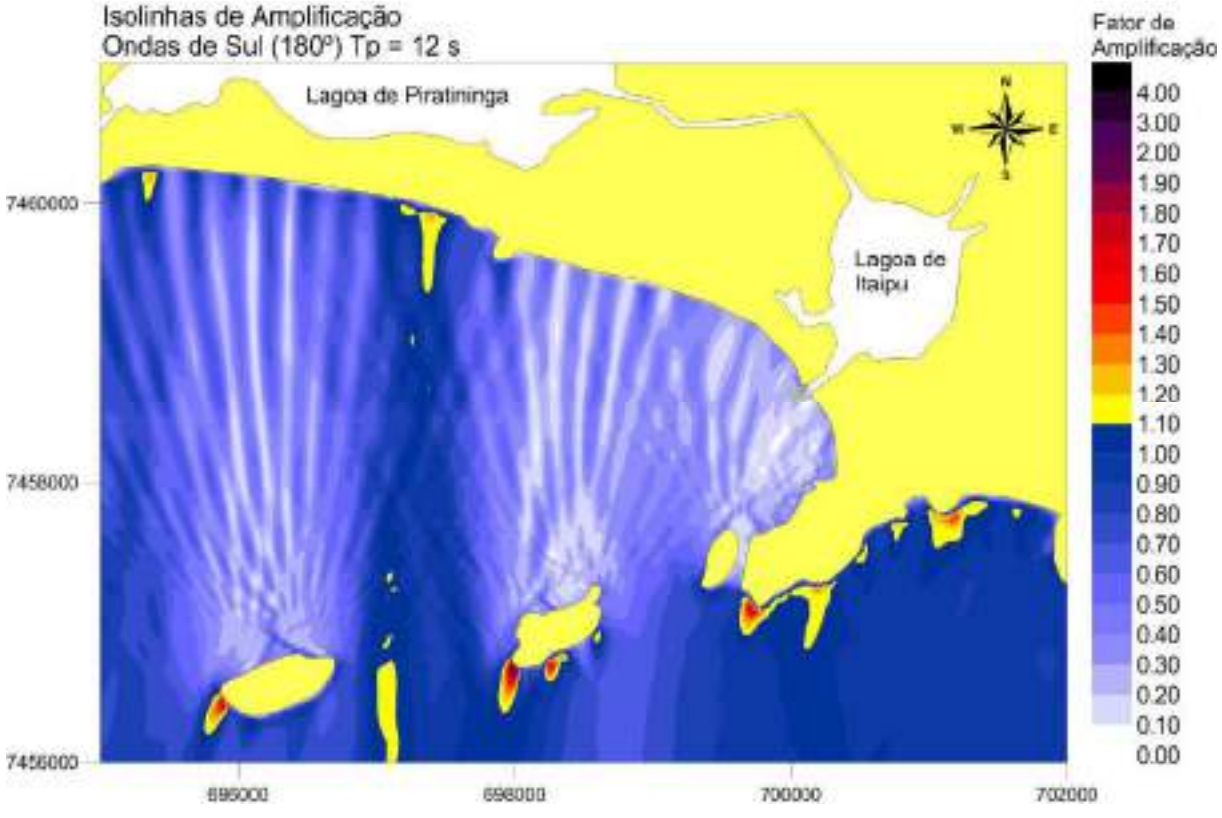
U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS., 2011. "*Coastal Engineering Manual*" Engineer Manual,(in 6 volumes), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA.

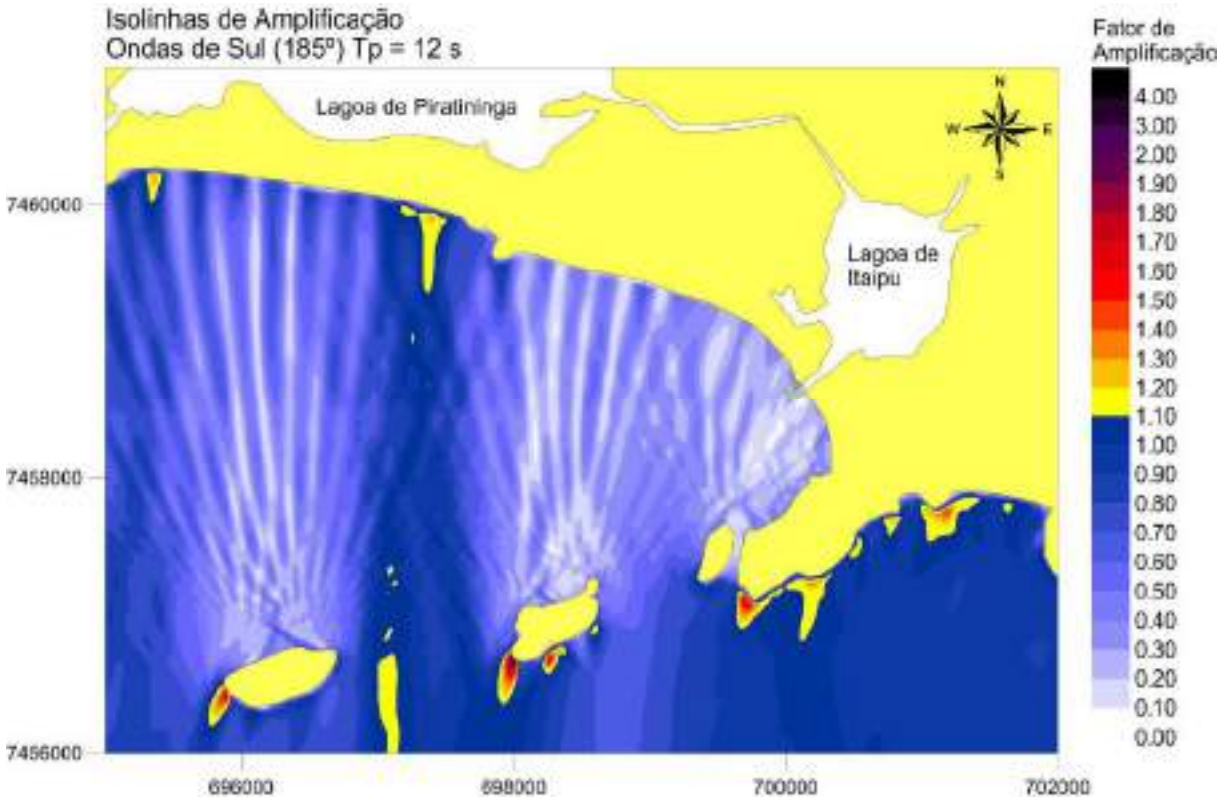
WANG, P., DAVIS, R.A., "*Profundidade de Fechamento e Perfil de Equilíbrio de Praia um Estudo de Caso, Florida*" – disponível na Mercator – Revista de geografia da UFC, ano 06, número 12, 2007. Acesso em Novembro de 2013, disponível em: http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/46/20

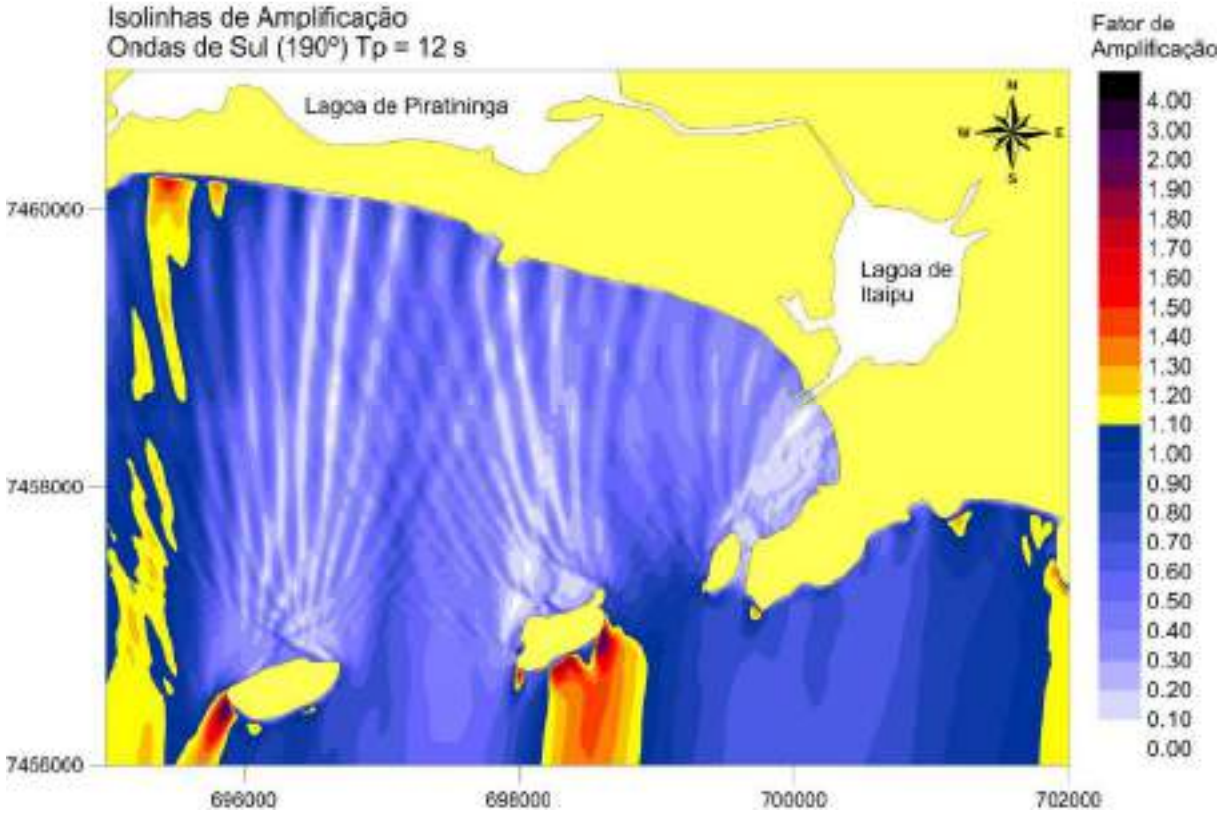
Anexo 1

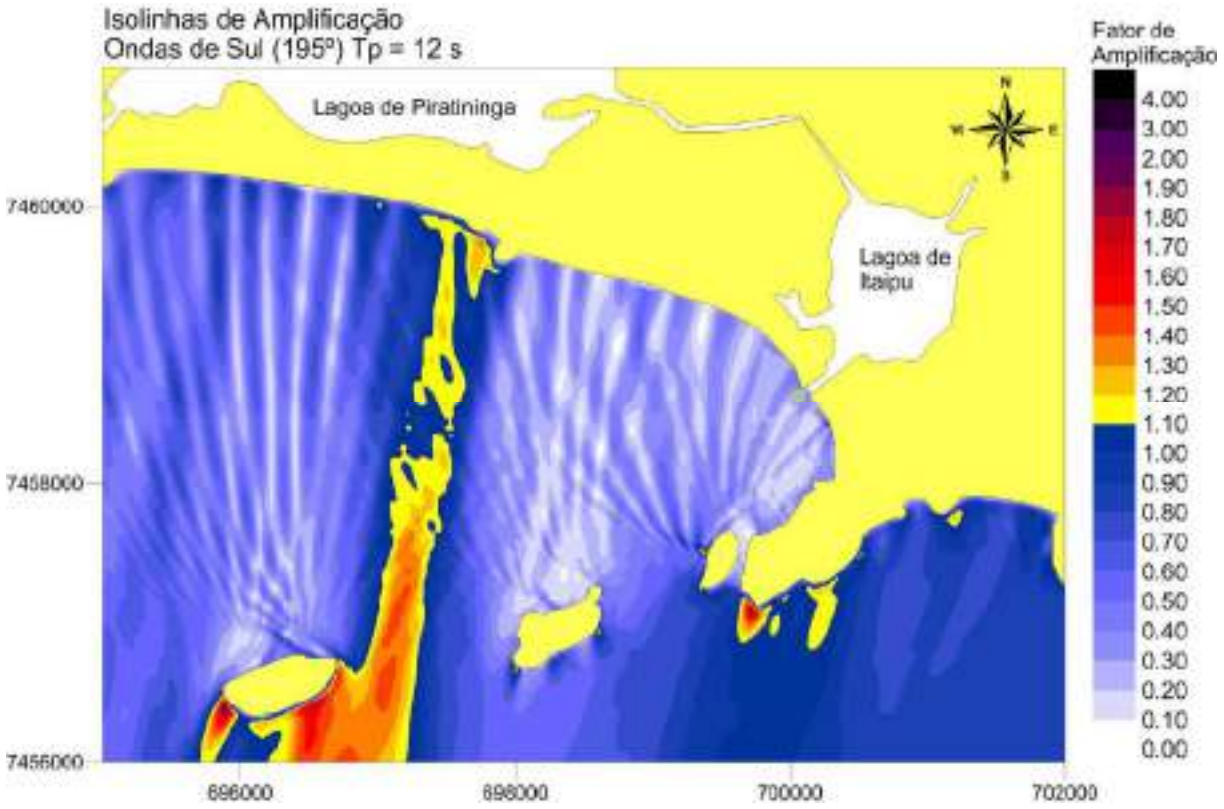
Resultados dos Modelos de Propagação de Ondas do software SisBaHiA®.

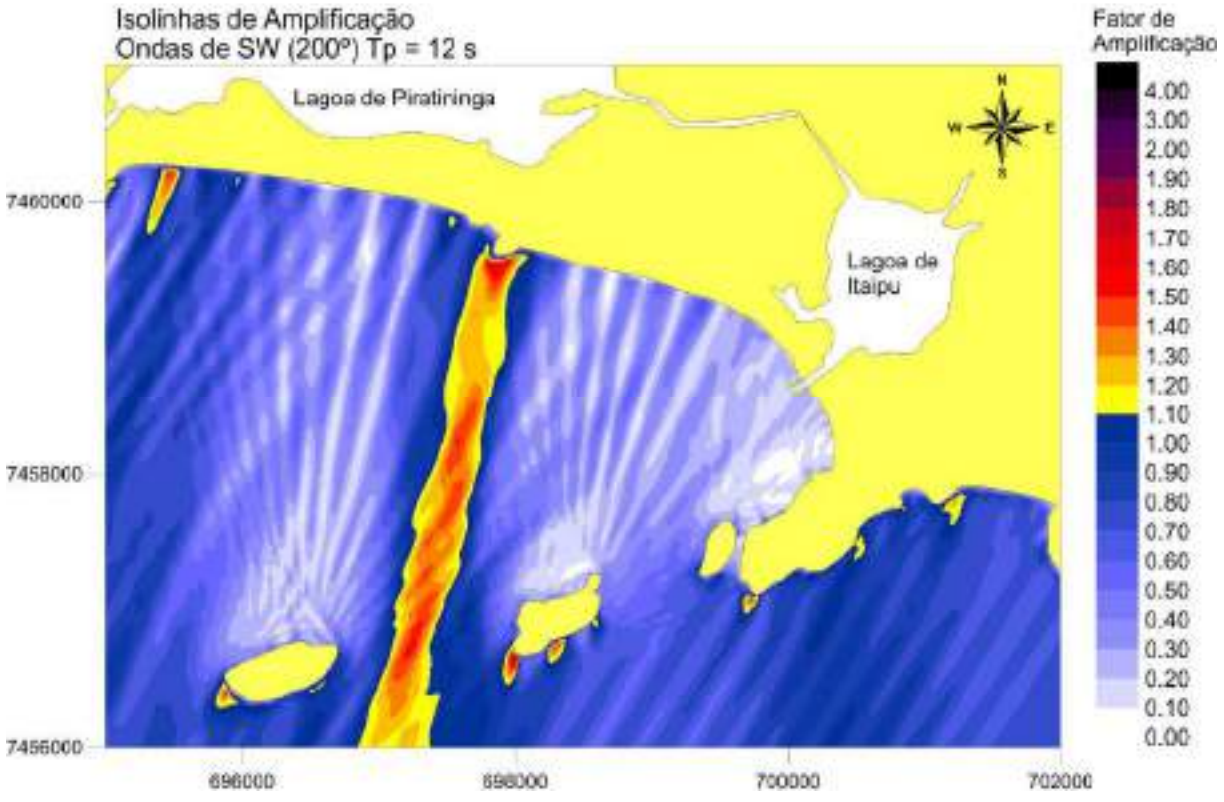


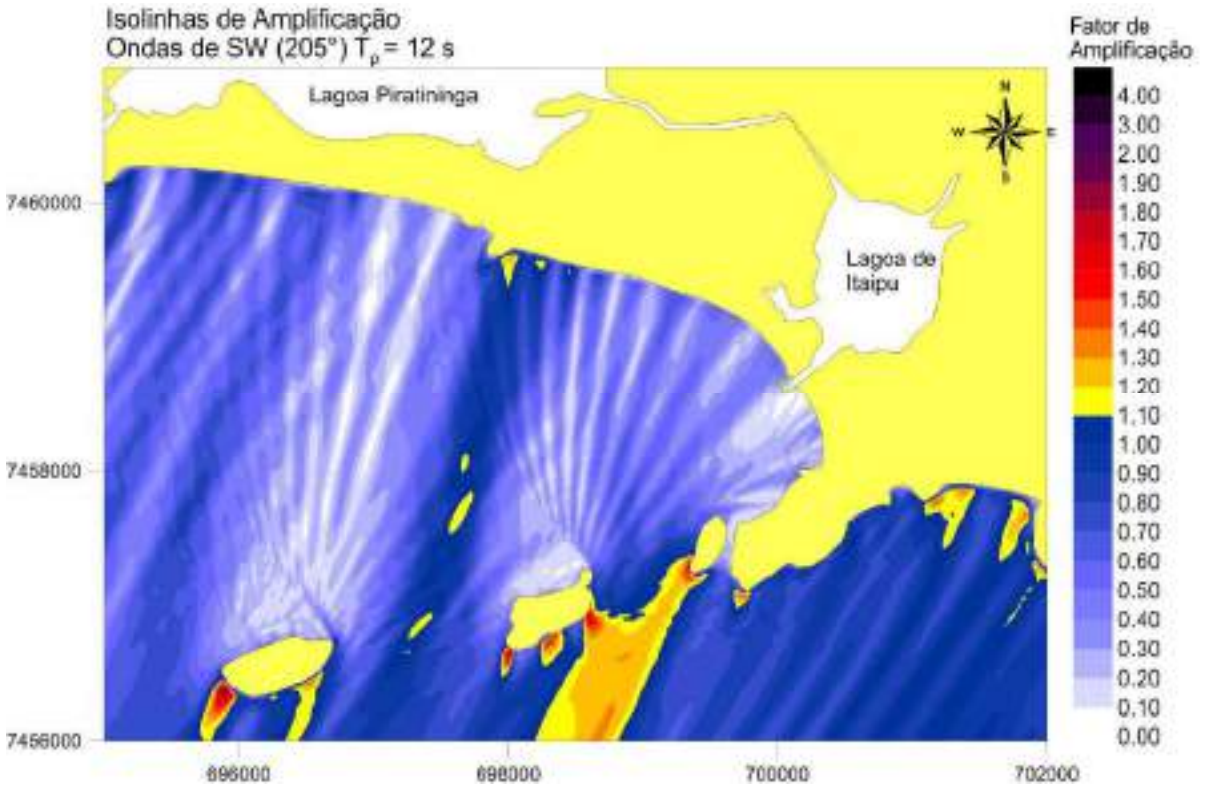


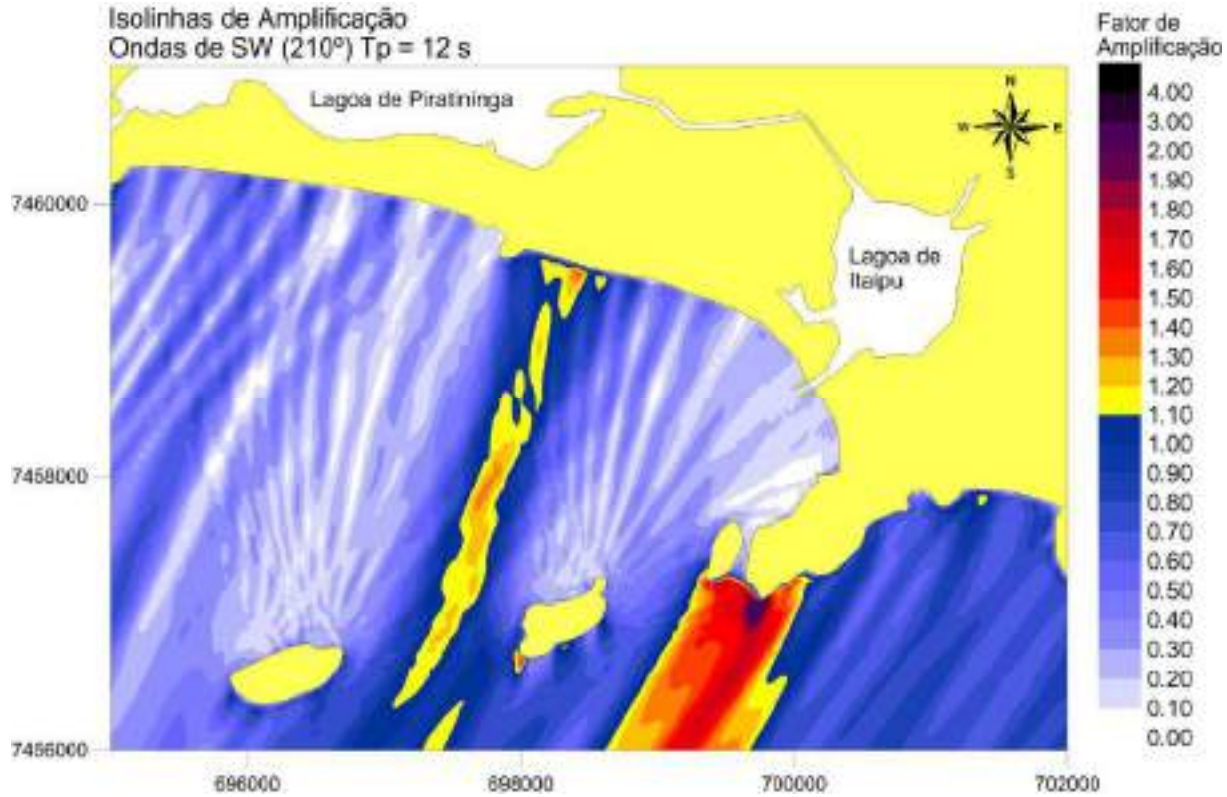

Isolinhas de Amplificação
Ondas de Sul (185º) Tp = 12 s
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

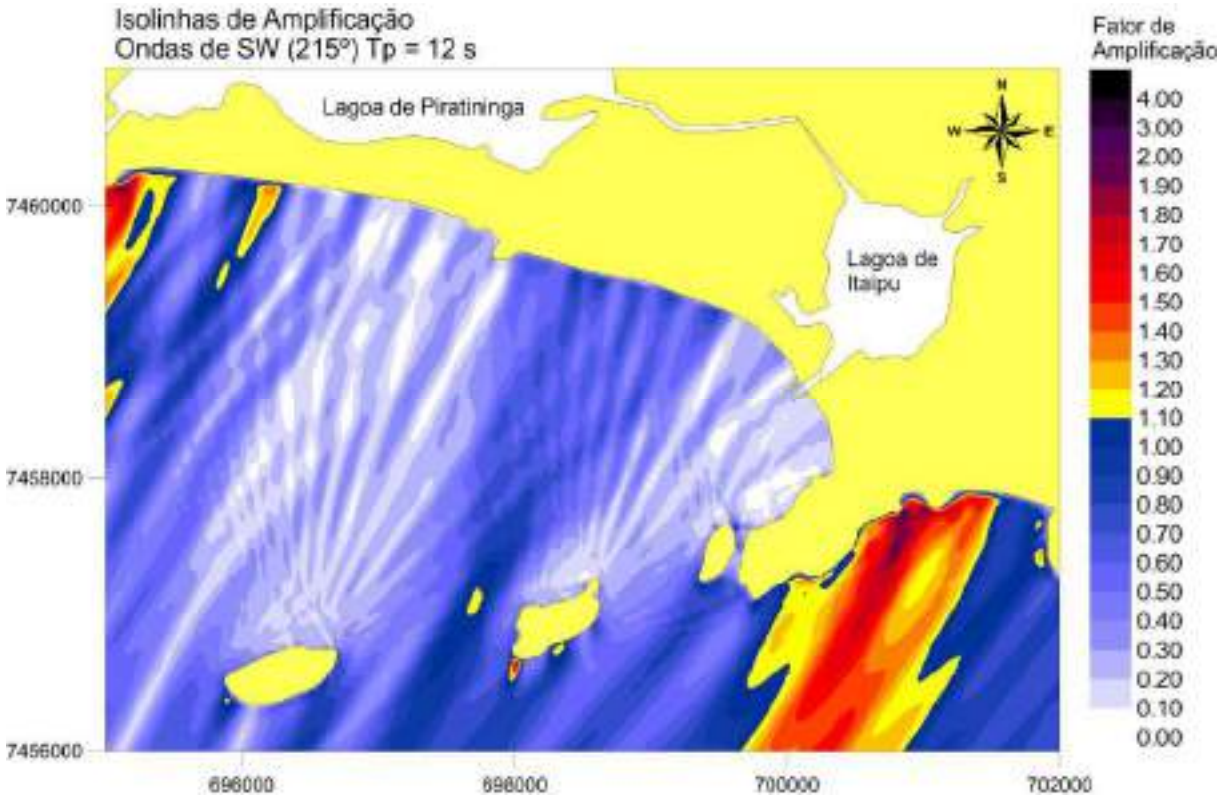

Isolinhas de Amplificação
Ondas de Sul (190°) Tp = 12 s
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

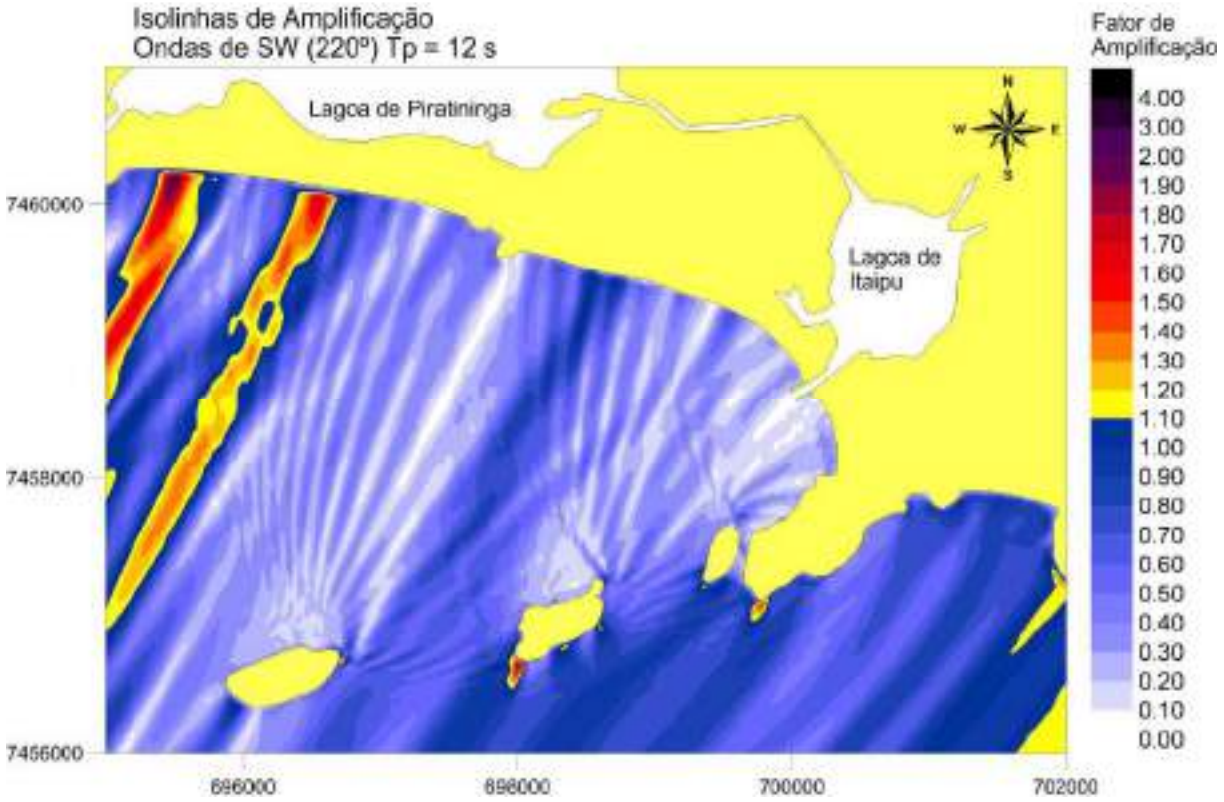

Isolinhas de Amplificação
Ondas de Sul (195°) Tp = 12 s
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

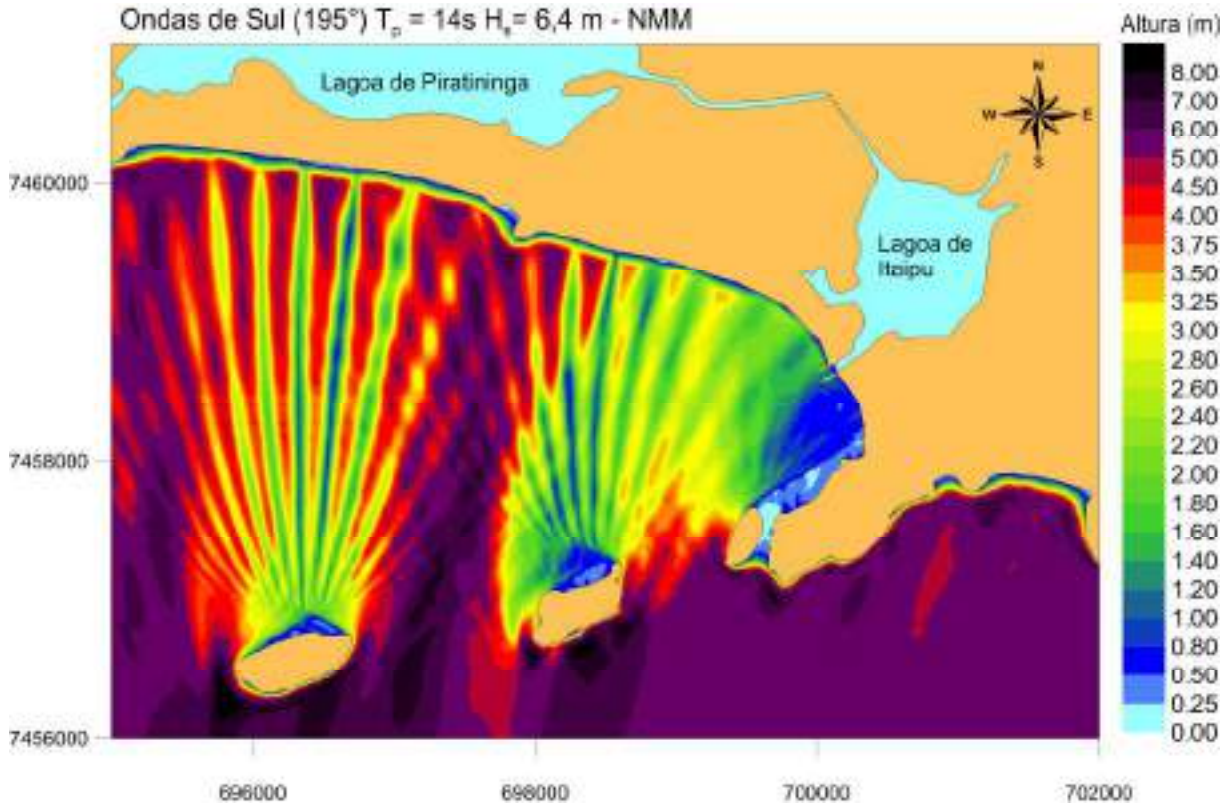

Isolinhas de Amplificação
Ondas de SW (200°) Tp = 12 s
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

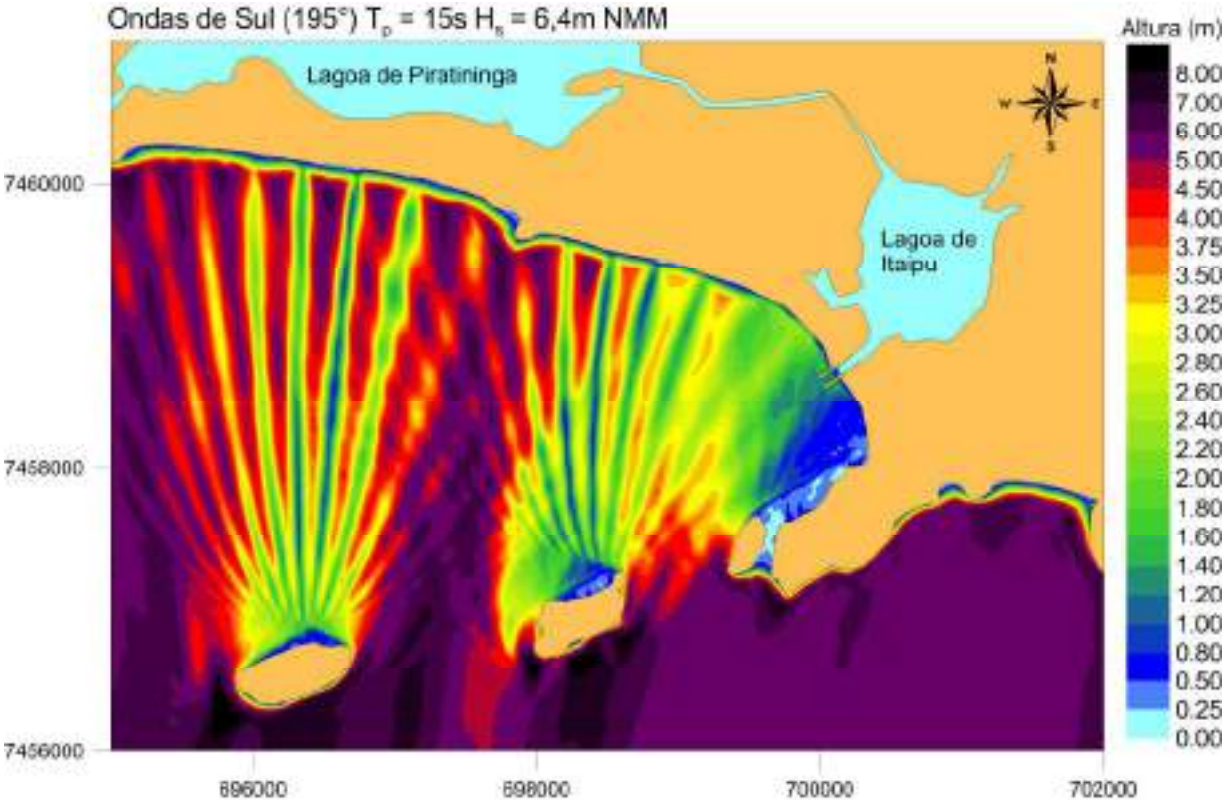

Isolinhas de Amplificação
Ondas de SW (205°) T_p = 12 s
Lagoa Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

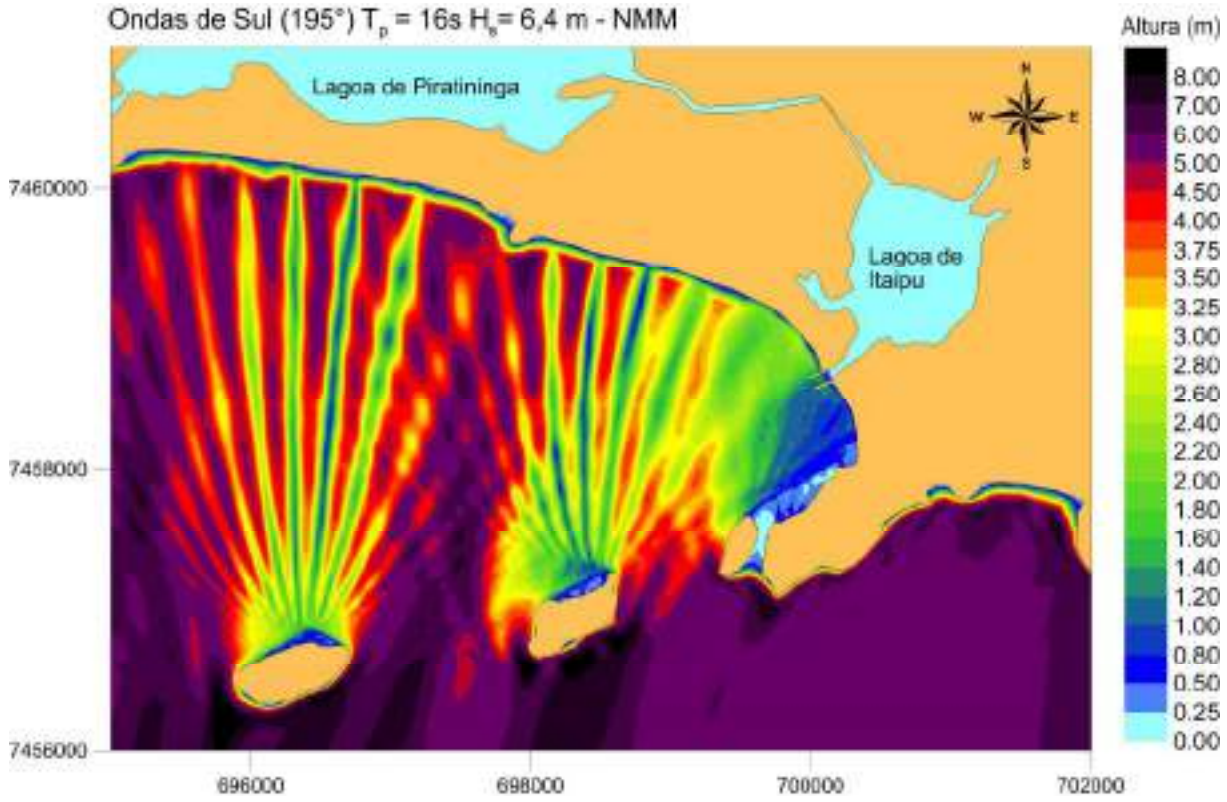

Isolinhas de Amplificação
Ondas de SW (210°) Tp = 12 s
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

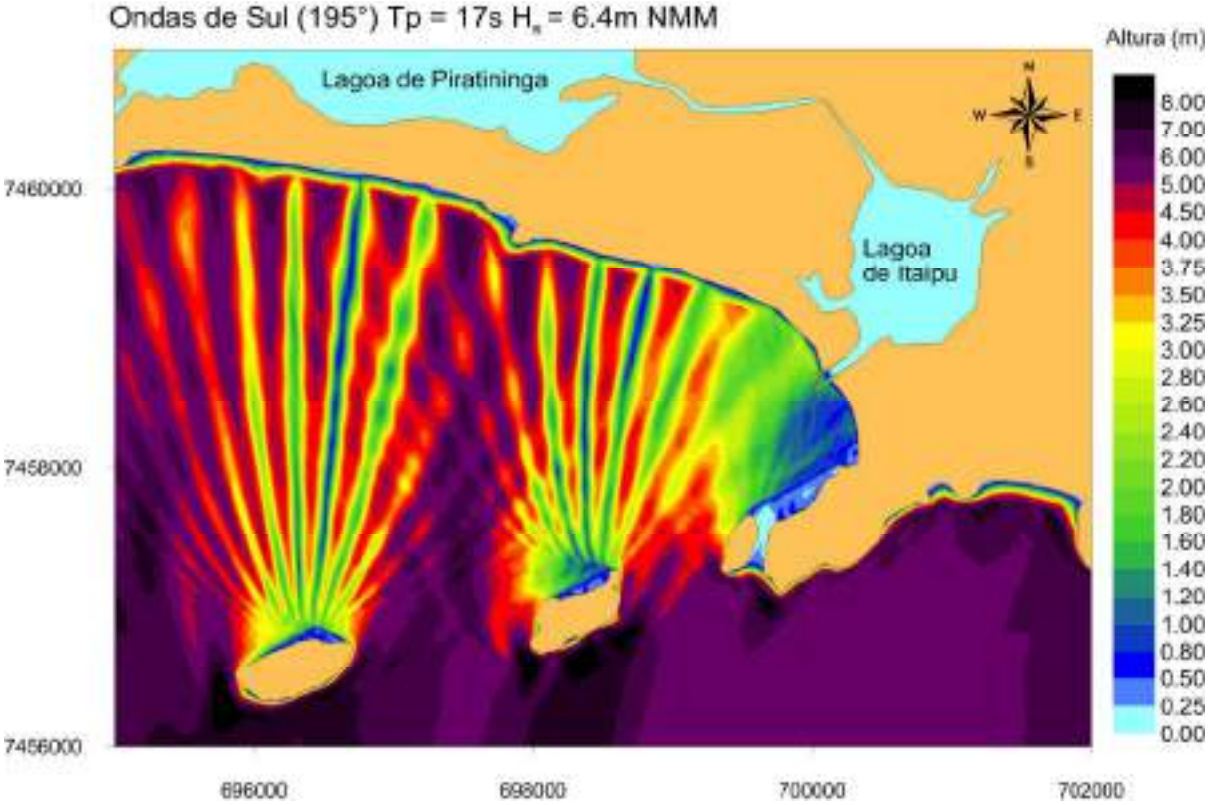

Isolinhas de Amplificação
Ondas de SW (215°) Tp = 12 s
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

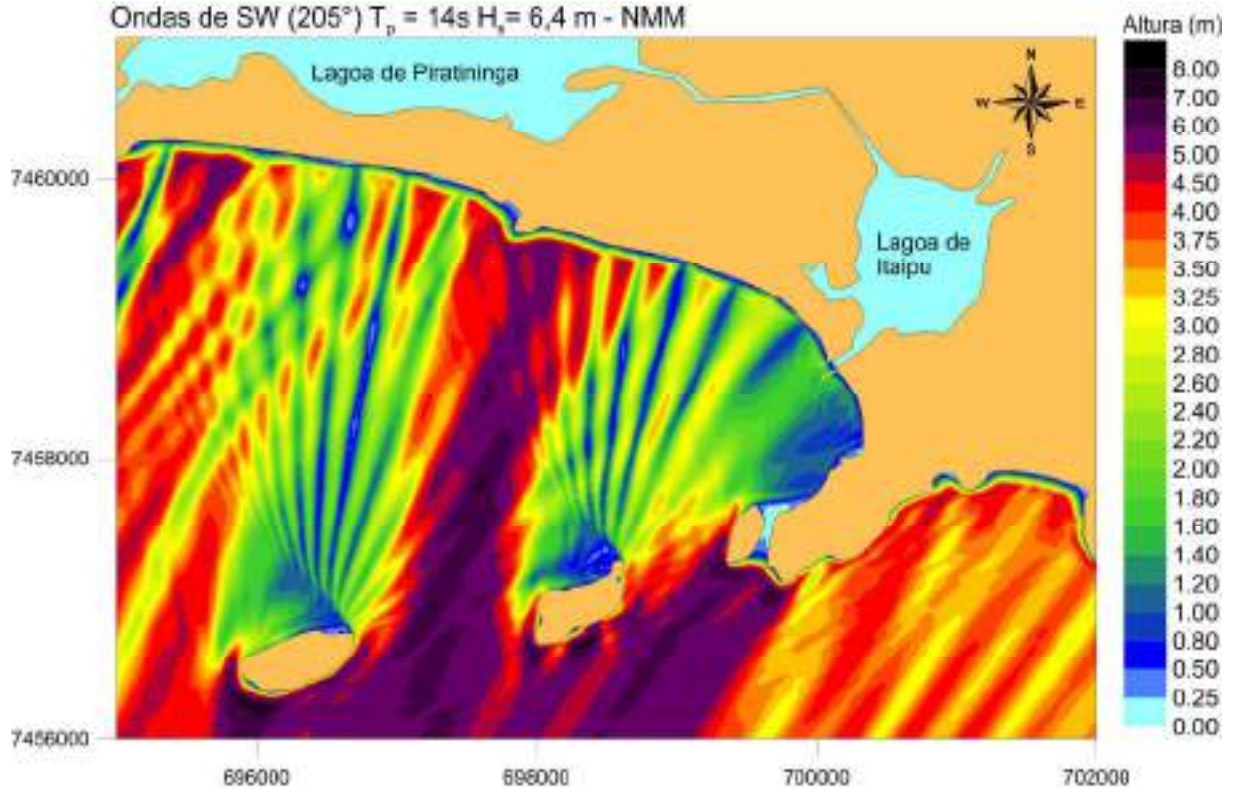

Isolinhas de Amplificação
Ondas de SW (220°) Tp = 12 s
Fator de Amplificação
4.00
3.00
2.00
1.90
1.80
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

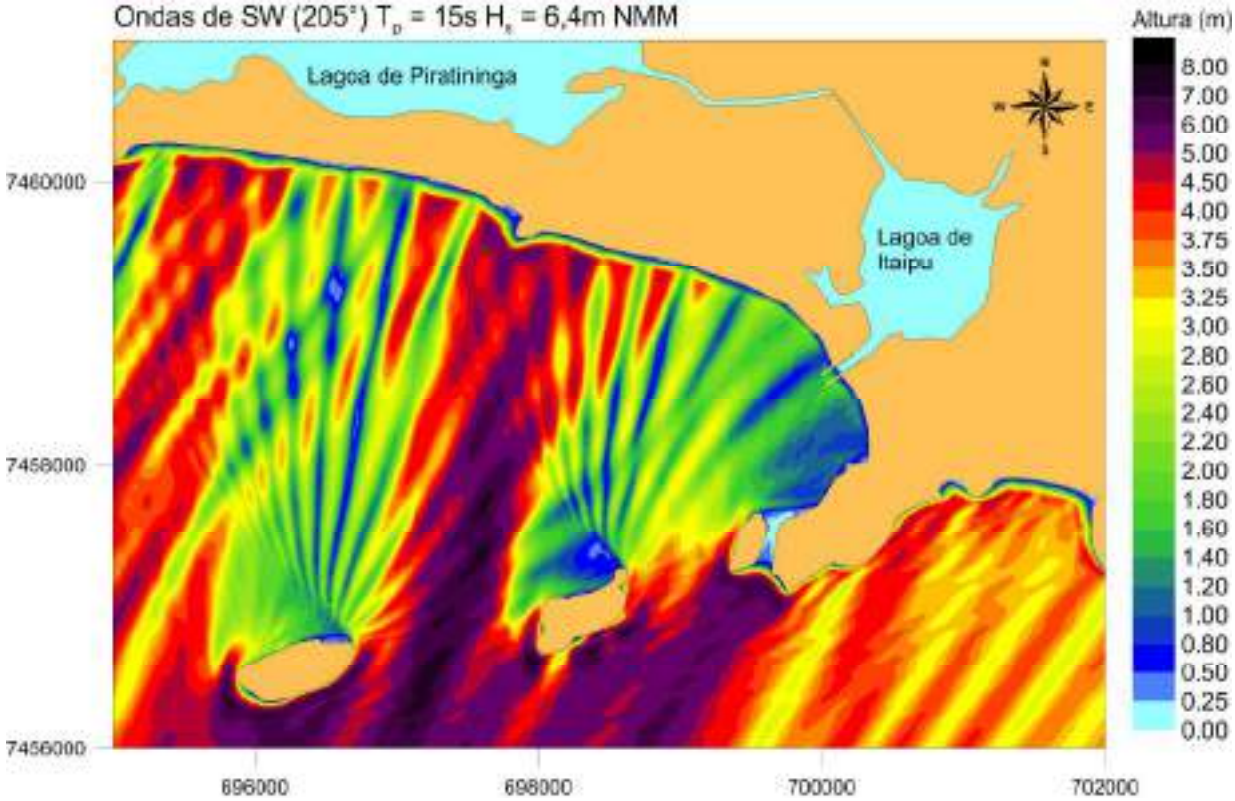

Ondas de Sul (195°) T_p = 14s H_s= 6,4 m - NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

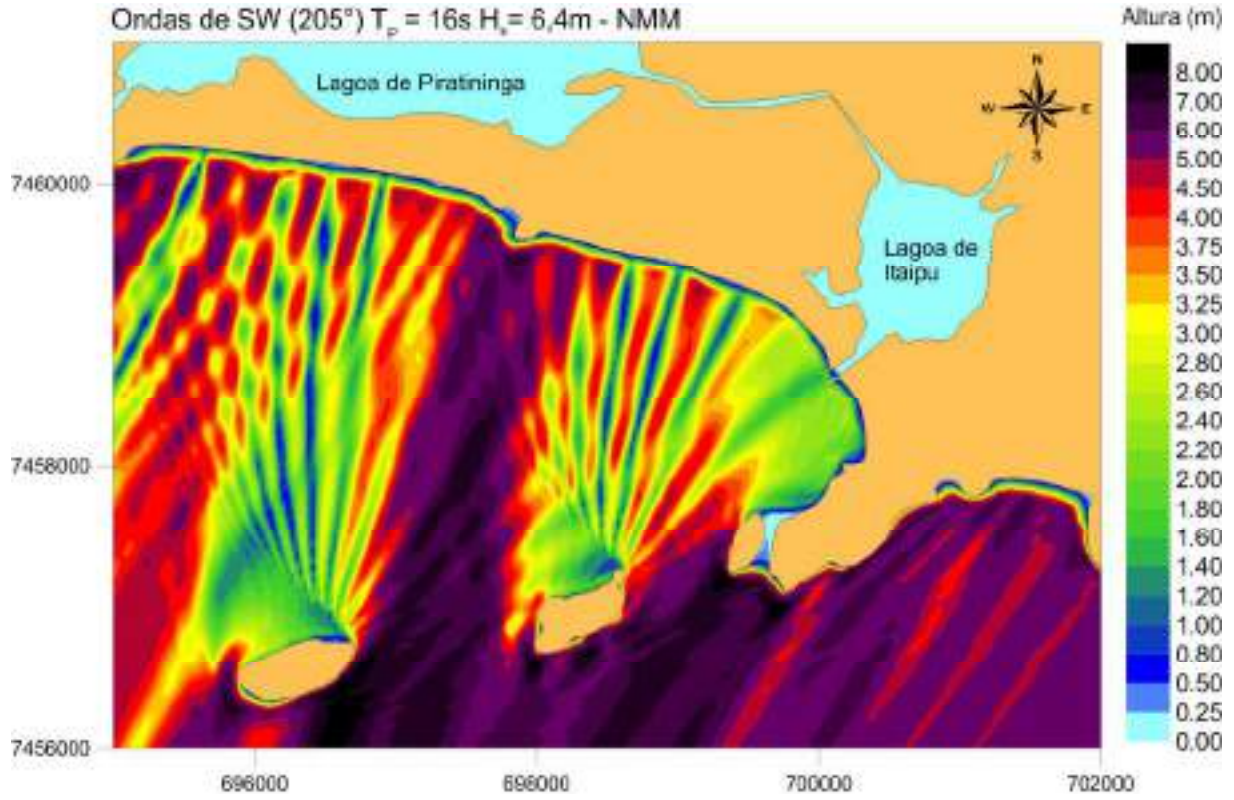

Ondas de Sul (195°) T_p = 15s H_s = 6,4m NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

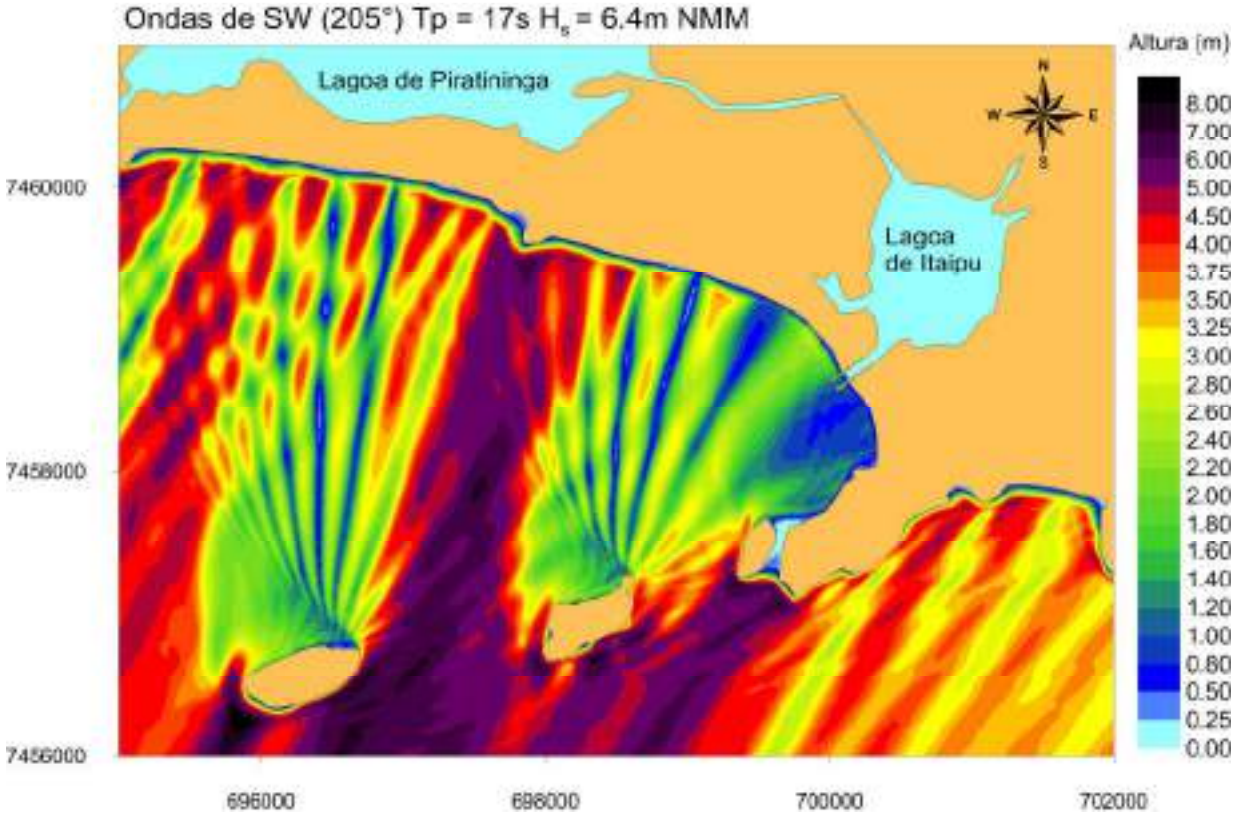

Ondas de Sul (195°) T_p = 16s H_s= 6,4 m - NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

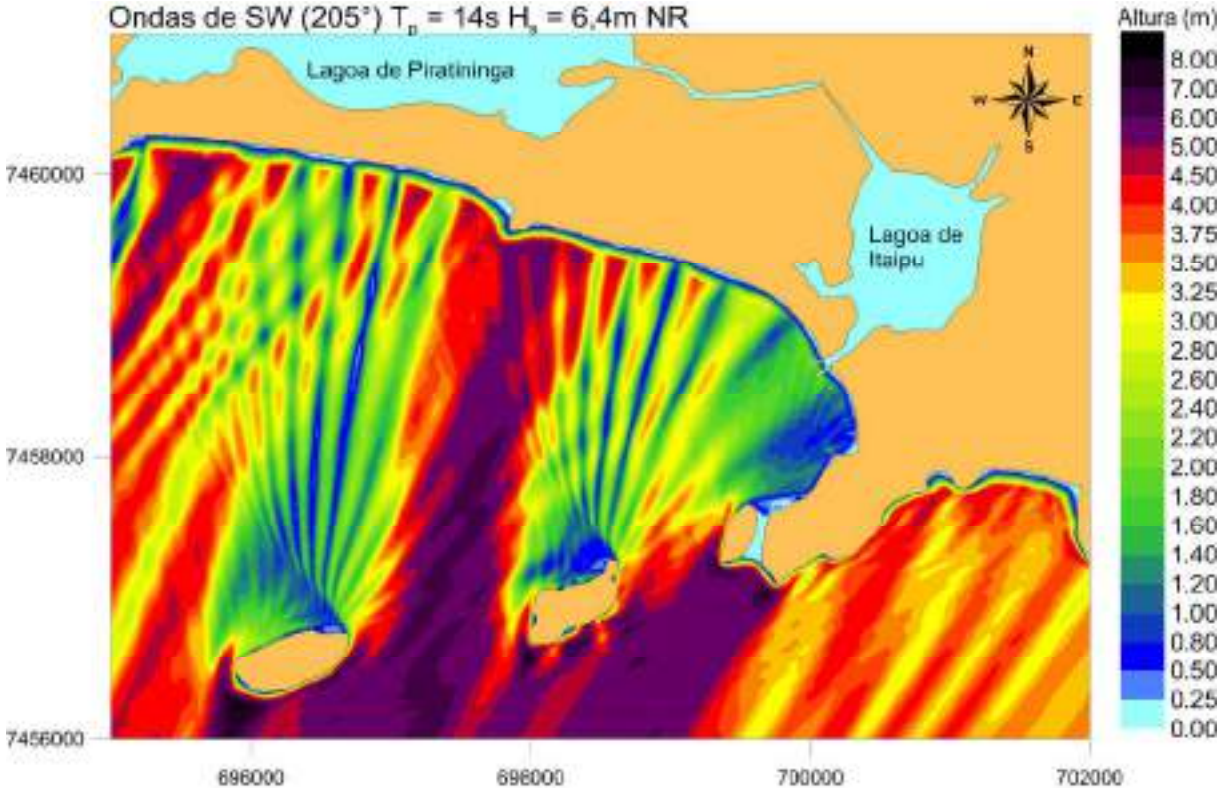

Ondas de Sul (195°) Tp = 17s H_s = 6.4m NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

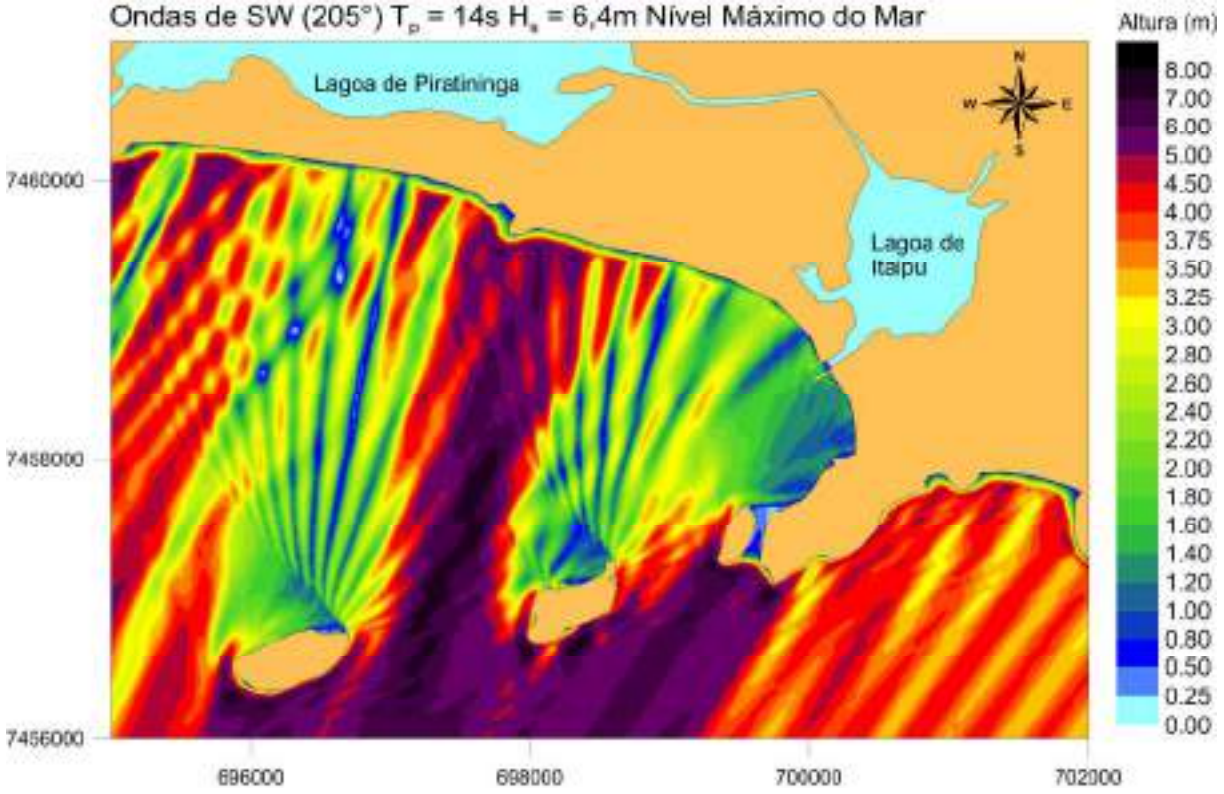

Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s= 6,4 m - NMM
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

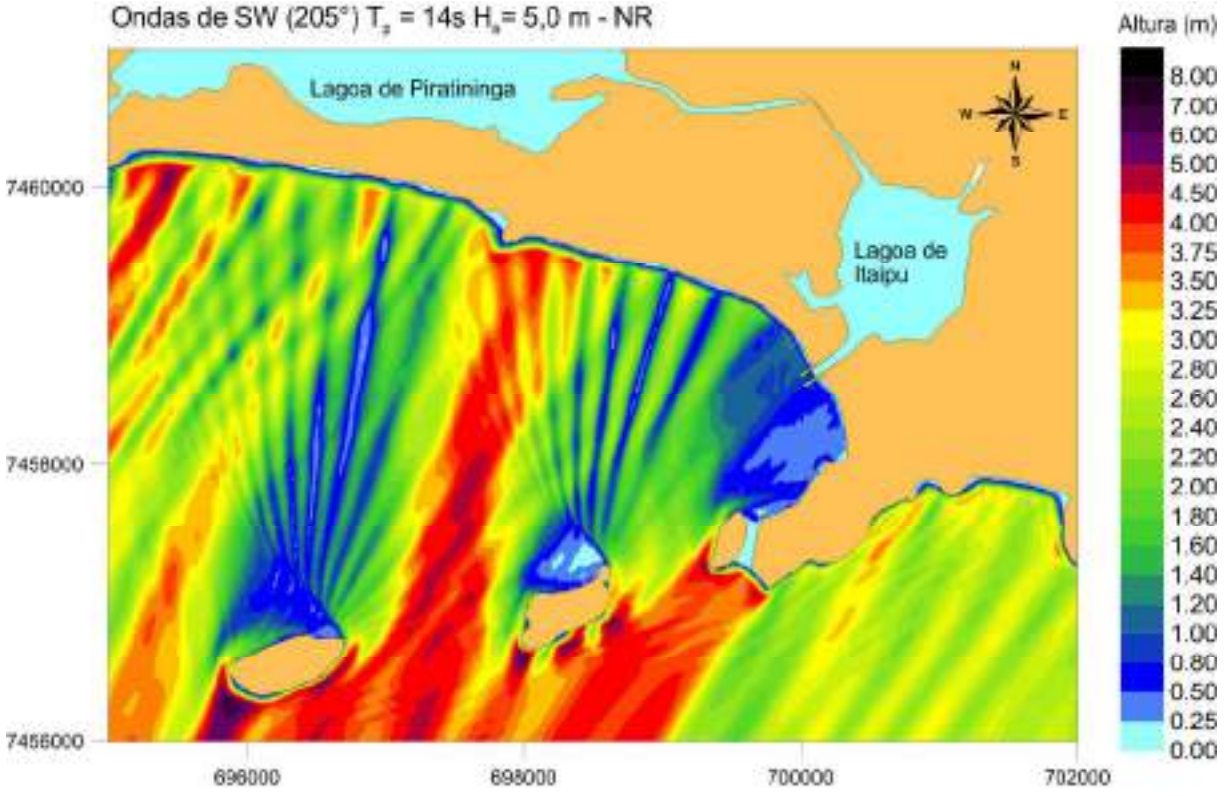

Ondas de SW (205°) T_p = 15s H_s = 6,4m NMM
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

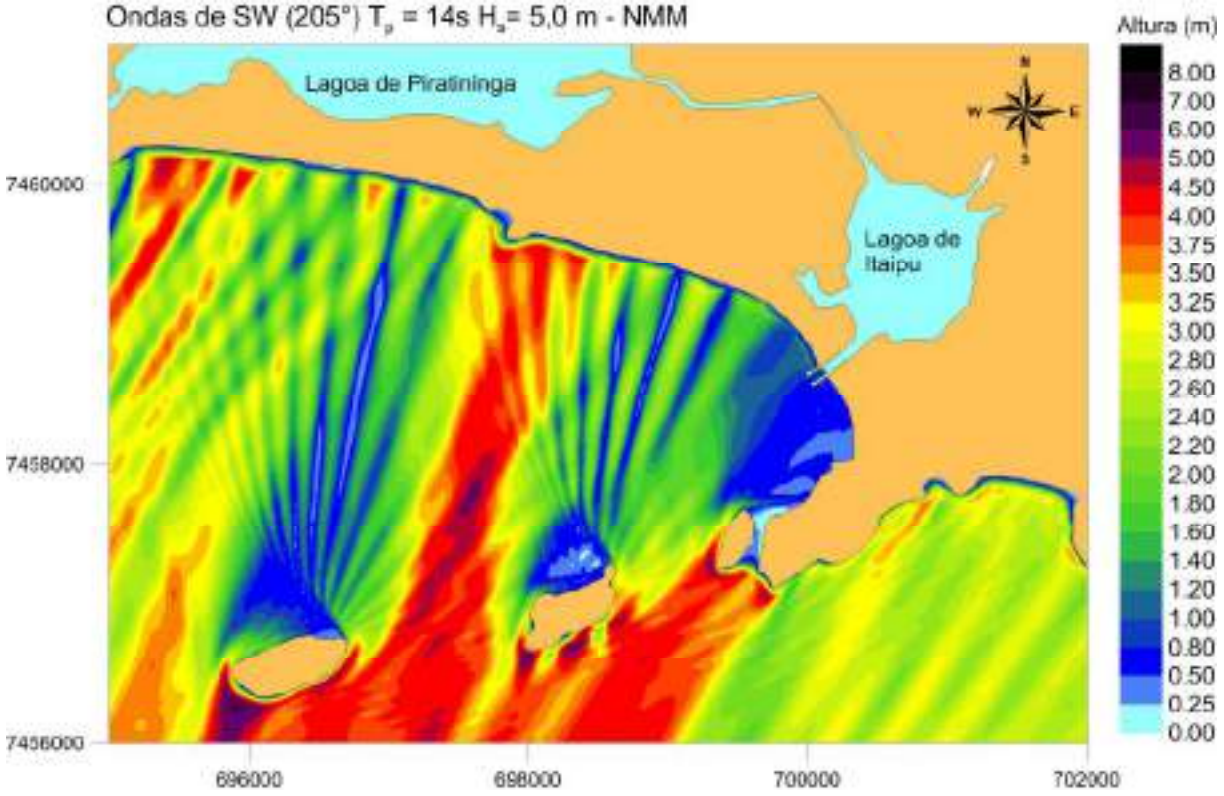

Ondas de SW (205°) T_p = 16s H_s= 6,4m - NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

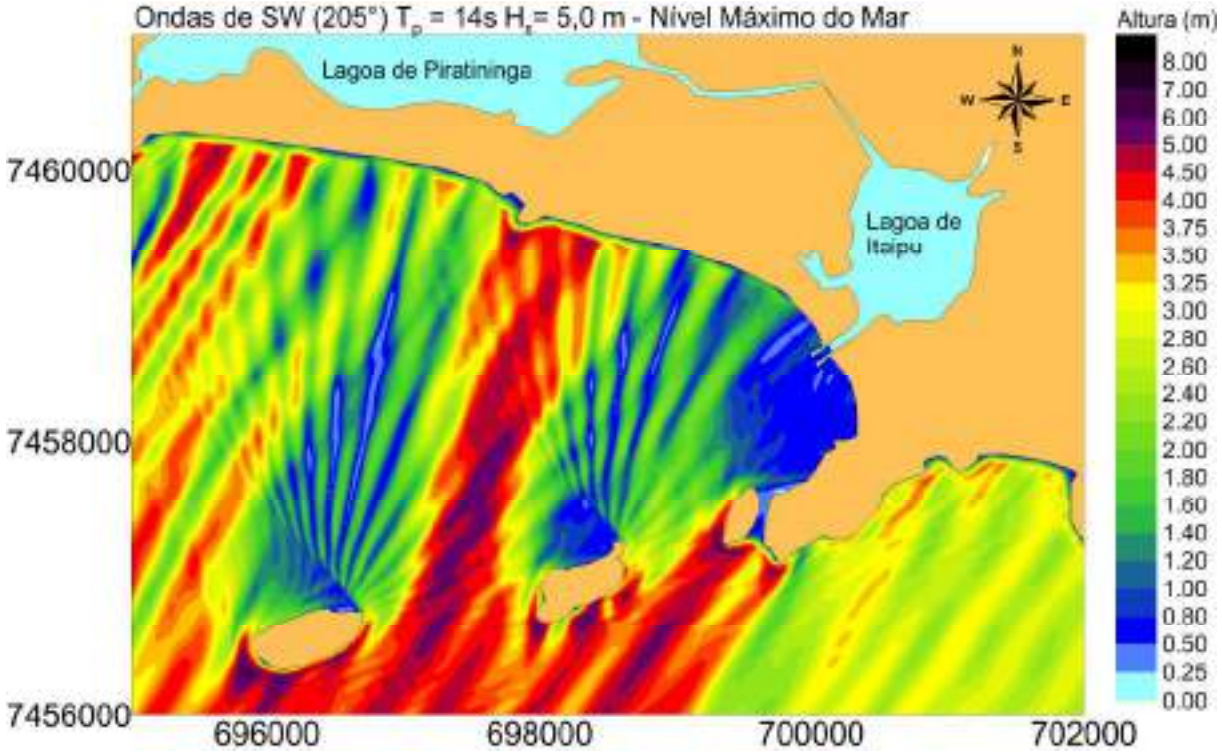

Ondas de SW (205°) Tp = 17s H_s = 6.4m NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000


Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s = 6,4m NR
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000


Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s = 6,4m Nível Máximo do Mar
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000


Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s= 5,0 m - NR
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000


Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s= 5,0 m - NMM
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000


Ondas de SW (205°) T_p = 14s H_s= 5,0 m - Nível Máximo do Mar
Lagoa de Piratininga
Lagoa de Itaipu
N
W
E
S
Altura (m)
8.00
7.00
6.00
5.00
4.50
4.00
3.75
3.50
3.25
3.00
2.80
2.60
2.40
2.20
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.50
0.25
0.00
7460000
7458000
7456000
696000
698000
700000
702000

Anexo 2

Maiores valores mensais em metros das alturas de onda retiradas do clima de ondas do WaveWatchIII®.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
JAN	4.24	3.72	4.14	3.57	4.85	3.77	4.86
FEV	3.51	4.11	4.82	3.69	4.48	4.33	4.77
MAR	3.82	3.83	3.59	3.61	3.14	3.41	4.31
ABR	3.61	3.48	2.93	4.08	2.98	3.74	3.13
MAI	3.71	2.84	2.59	3.85	3.16	3.42	3.15
JUN	4.5	3.56	3.04	3.4	3.4	2.86	2.9
JUL	3.14	4.35	3.32	4.75	4.59	4.46	4.28
AGO	3.96	5.43	4.85	4.04	4.26	5.39	4.59
SET	4.34	4.17	3.89	3.78	6.16	4.95	5.46
OUT	4.24	3.81	4.49	3.99	5.28	6.3	4.49
NOV	3.8	4.34	4.42	3.79	5.48	4.13	5.25
DEZ	4.95	4.37	4.18	3.87	5.62	5.4	4.69

Anexo 3

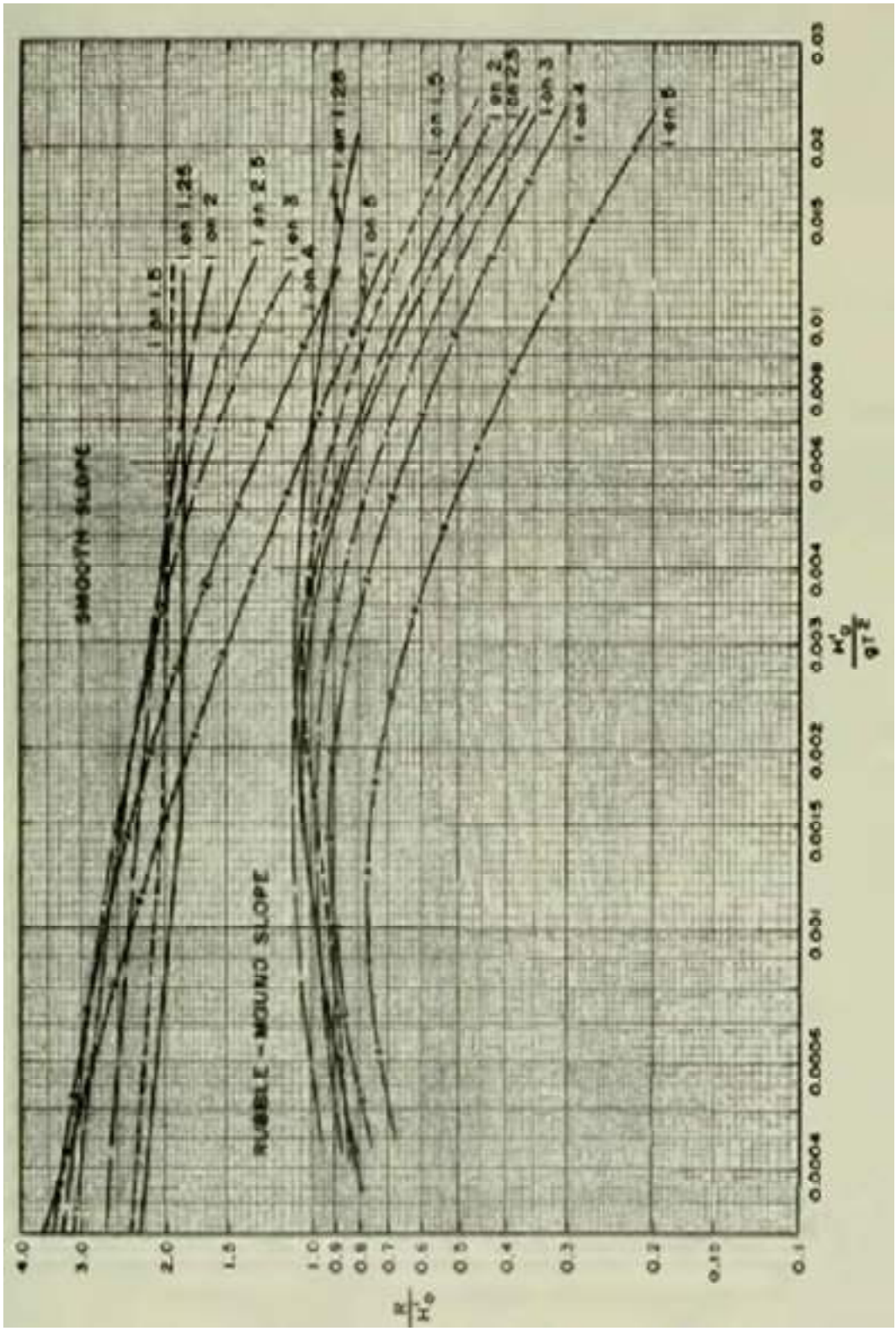
Coeficientes K_D do SPM 1984.

No-Damage Criteria and Minor Overtopping

Armor Units	n[3]	Placement	Structure Trunk K_D[2] Breaking Wave	Structure Trunk K_D[2] Nonbreaking Wave	Structure Head K_D Breaking Wave	Structure Head K_D Nonbreaking Wave	Slope Cot θ
Quarrystone							
Smooth rounded	2	Random	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 to 3.0 [5]
Smooth rounded	>3	Random [4]	1.6[4]	2.2	1.4[4]	2.3	[5]
Rough angular	1	Random		1.9		2.3	
Rough angular	2	Random	2.0	4.0	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.0
Rough angular	>3	Random [6]	2.2	4.5	2.1	4.2	[5]
Rough angular	2	Special [6]	5.8	7.0	5.3	6.4	[5]
Parallelepiped[7]	2	Special [6]	7.0 - 20.0	8.5 - 24.0	--	--	
Tetrapod and Quadripod	2	Random	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
					4.5	5.5	2.0
					3.5	4.0	3.0
Tribar	2	Random	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
					6.0	6.5	3.0
Dolos	2	Random	15.8[8]	31.8[8]	8.0	16.0	2.0[9]
					7.0	14.0	3.0
Modified cube	2	Random	6.5	7.5	-----	8.0	[5]
Hexapod	2	Random	8.0	9.5	5.0	7.0	[5]
Toskane	2	Random	11.0	22.0	--	--	[5]
Tribar	1	Uniform	12.0	15.0	7.5	9.5	[5]
Quarrystone (K_{RR}) Graded angular	-	Random	2.2	2.5	--	--	

Anexo 4

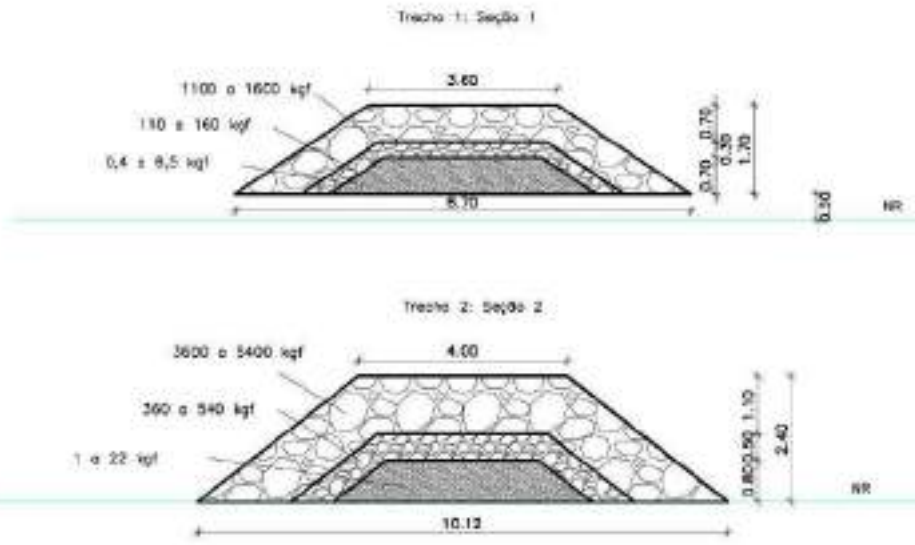
Ábaco7 – 20 do SPM 1984 para cálculo do galgamento.



Anexo 5

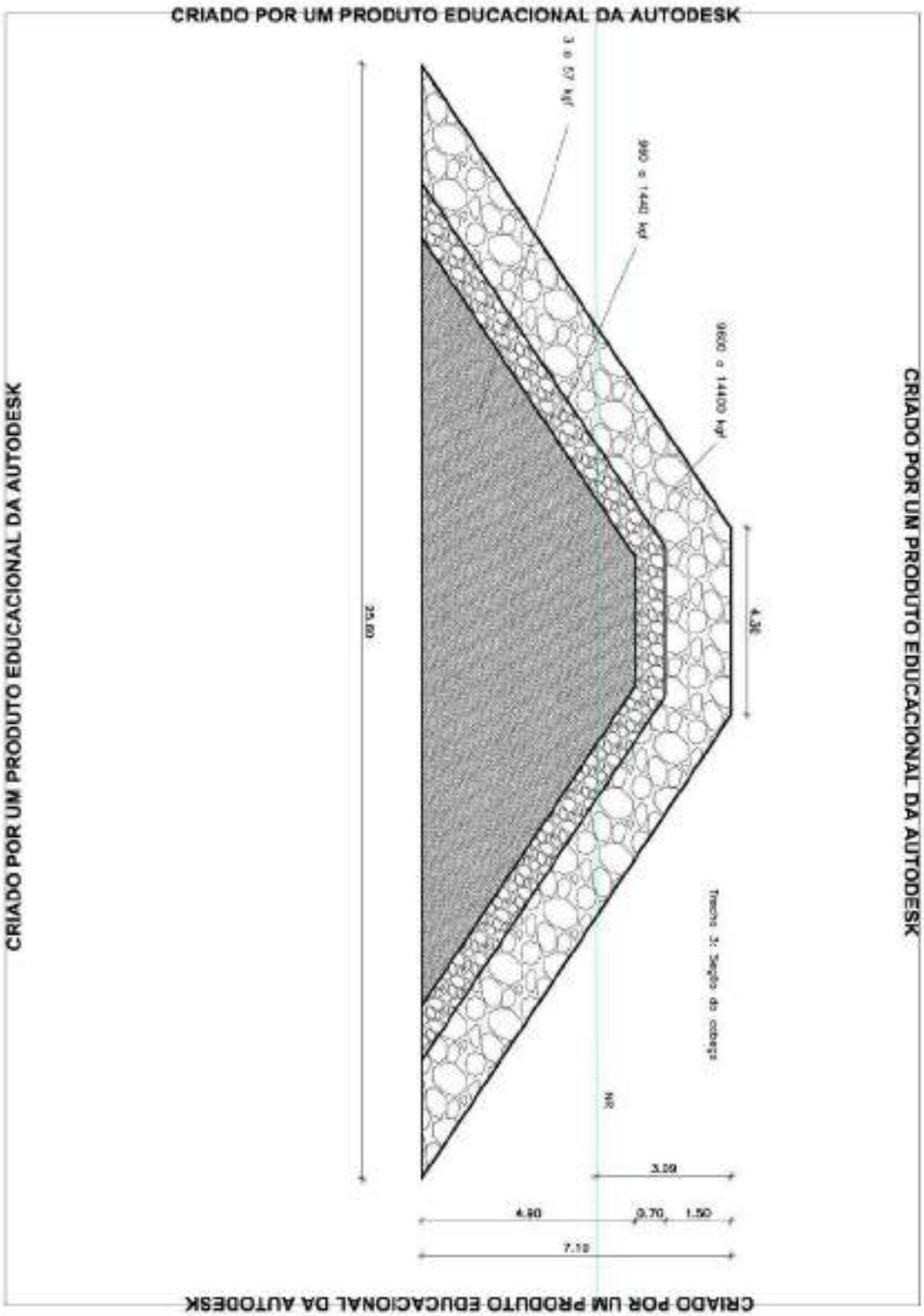
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK



CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK


CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK
3 a 57 kgf
990 a 1440 kgf
9600 a 14400 kgf
25.60
4.36
Trecho 3: Seção do cabeço
NR
3.09
4.90
0.70
1.50
7.10
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK