TIAGO ZENKER GIRELI

MODELAÇÃO FÍSICA EM CANAL DA GERAÇÃO DE ONDAS
REGULARES E IRREGULARES PARA ESTUDO DE QUEBRA-MAR DE
ENROCAMENTO

São Paulo
2008

TIAGO ZENKER GIRELI

MODELAÇÃO FÍSICA EM CANAL DA GERAÇÃO DE ONDAS
REGULARES E IRREGULARES PARA ESTUDO DE QUEBRA-MAR DE
ENROCAMENTO

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

São Paulo
2008

TIAGO ZENKER GIRELI

MODELAÇÃO FÍSICA EM CANAL DA GERAÇÃO DE ONDAS
REGULARES E IRREGULARES PARA ESTUDO DE QUEBRA-MAR DE
ENROCAMENTO

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica e Sanitária

Orientador:
Prof. Livre-Docente Paolo Alfredini

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de janeiro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Gireli, Tiago Zenker

Modelação física em canal da geração de ondas regulares e irregulares para estudo de quebra-mar de enrocamento / T.Z. Gireli. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

267 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1. Modelação física 2. Geração de ondas 3. Engenharia costeira 4. Engenharia portuária I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II. t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antonio Amadeu Pascale
Gireli e Regina Aparecida Zenker Gireli
pela criação, pelo incentivo e pelo amor

À Luciana Alves pelo amor, carinho,
dedicação, compreensão e apoio

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paolo Alfredini pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP – que concedeu a bolsa de Doutorado Direto para desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica pelo apoio, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

À AQUAMODELO pelo fornecimento do projeto do quebra-mar de Saquarema que foi de suma importância na realização do estudo de caso.

Aos Doutores Rogério Fernando do Amaral e Patrícia Dalsoglio Garcia pelas importantes colaborações prestadas a este trabalho e pela amizade desde a graduação.

Aos Técnicos de modelo Sérgio Oliveira Leite, Junior Clebson Moura dos Santos, Adriano dos Santos e Anderson Hipólito por toda ajuda intelectual e braçal despendida ao longo da pesquisa, ajuda essa, que foi primordial à realização dos ensaios físicos.

Às bolsistas de Iniciação Científica Juliana Serra Costa Lopes e Adriana Capelo Rodrigues que auxiliaram diretamente na pesquisa com empenho e dedicação ímpares.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

Tendo em vista a importância das obras portuárias e costeiras no desenvolvimento do país e a complexidade dos fenômenos que regem os Processos Litorâneos, torna-se relevante a utilização de modelos físicos, como os canais de ondas, para otimização destes projetos. Neste sentido, os principais objetivos desta Tese são o desenvolvimento de um sistema de controle para o gerador de ondas do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LHEPUSP, capaz de gerar ondas irregulares, baseadas em espectros de energia da agitação, bem como, a partir de um estudo com caso de um molhe de berma, avaliar do ponto de vista técnico o procedimento de dimensionamento de quebra-mares com base no ensaio da estrutura frente a ondas regulares com as características da onda significativa de projeto.

Uma das contribuições desta Tese é o novo sistema de controle da geração de ondas do LHEPUSP, que é capaz de gerar ondas regulares, irregulares e randômicas.

A outra contribuição, referente ao estudo de caso, permitiu concluir que o emprego de ondas regulares na otimização em modelo físico de projetos de quebra-mares pode levar a dimensionamentos conservadores, e portanto de custo mais alto, principalmente no dimensionamento de obras dispostas em profundidades inferiores aos 10 m, onde foram encontradas diferenças para mais no recuo da estrutura, comparativamente com a ação de ondas irregulares de mesma altura significativa.

Palavras-Chave: Modelação Física. Geração de Ondas. Engenharia Costeira, Engenharia Portuária

ABSTRACT

Considering the harbour and coastal structures significance for the Country development and the complex Littoral Processes phenomena, is an important requirement the physical models use, like wave flumes, to improve these designs. Following this context, the Thesis main purposes are to develop a wave maker control system for the Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LHEPUSP wave flume able to generate irregular waves, based on wave energy spectra, and also, from a berm jetty case study, evaluate, from the technical point of view, the breakwater design procedure based on structure tests with design significative regular waves.

One of the Thesis contribution is the new wave maker control system for the LHEPUSP wave flume able to generate regular, irregular and randomic waves.

The other contribution, about the case study, showed as conclusion that the regular waves use for breakwaters design physical model improvement may suggest conservative results, inducing high cost structures, mainly for those ones in depths lower than 10 m, being observed larger structural backward response differences, comparing with irregular waves action with the same significative height.

Key-words: Physical modelling. Wave Generation. Coastal Engineering. Harbour Engineering

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dano no molhe em Praia Mole – ES após ressaca.....	21
Figura 2 – Vista do canal de ondas do LHEPUSP	24
Figura 3 – Vista lateral do canal de ondas do LHEPUSP	24
Figura 4 – Esquema geral do canal de ondas do LHEPUSP	25
Figura 5 – Vista do sistema gerador de ondas	25
Figura 6 – Envoltória de alturas em função do comprimento de onda para o canal do LHEPUSP (Martins, 2001).....	26
Figura 7 – Envoltória teórica de alturas de onda em função do comprimento que o gerador do canal do LHEPUSP seria capaz de reproduzir após o reaparelhamento (Martins, 2001)	26
Figura 8 – Servo motor que controla o gerador de ondas.....	27
Figura 9 – Sensor potenciométrico acoplado ao gerador de ondas	27
Figura 10 – Ponta capacitiva que mede a variação do nível d’água no interior do canal.....	28
Figura 11 – Filtros metálicos posicionados à frente do gerador de ondas.....	28
Figura 12 – Estruturas absorvedoras das extremidades do canal	28
Figura 13 – Vista da tubulação de compensação de nível.....	29
Figura 14 – Cabine de instrumentação do canal de ondas.....	29
Figura 15 – Definição de parâmetros a partir do zero ascendente.....	33
Figura 16 – Distribuição de Rayleigh.....	34
Figura 17 – Probabilidade de Excedência para a Distribuição de Rayleigh.....	35
Figura 18 – Exemplo de Espectro de Energia de Pierson-Moskowitz	39
Figura 19 – Exemplo de Espectro de Bretschneider.....	40
Figura 20 – Exemplo de Espectro de JONSWAP	41
Figura 21 – Registro feito pelo Ondógrafo da Plataforma P3 da PETROBRAS, ao Largo da Foz do Rio Doce às 15h00min do dia 06/03/1973, Durante Uma Tempestade	43
Figura 22 – Espectro de Amplitudes de Ondas Elementares.....	43
Figura 23 – Espectro de Fases de Ondas Elementares	44
Figura 24 – Espectro de Energia Calculado a partir do Registro de Ondas do Rio Doce	45
Figura 25 – Adimensionais na Geração de Ondas Monocromáticas.....	48
Figura 26 – Adimensionais na geração de ondas randômicas	49
Figura 27 – Curvas de probabilidade.....	50
Figura 28 – Recessão da berma e profundidade de interseção	55

Figura 29 – Esquema de funcionamento da malha interna do sistema de controle.....	57
Figura 30 – Esquema conceitual do sistema de geração de ondas na geração de ondas regulares	59
Figura 31 – Esquema conceitual do sistema de geração de ondas na geração de ondas irregulares	59
Figura 32 – Placa A/D instalada no microcomputador.....	60
Figura 33 – Caixa de conexões para aquisição de dados externos	61
Figura 34 – Esquema de funcionamento do sensor potenciométrico	62
Figura 35 – Esquema do sensor potenciométrico com o circuito acoplado	62
Figura 36 – Estabilizador de tensão instalado	63
Figura 37 – Circuito de tomadas instalado ao longo do canal.....	63
Figura 38 – Painel “Dados de Entrada” do software de controle da geração de ondas.....	64
Figura 39 –Painel “Geração” do software de controle da geração de ondas	65
Figura 40 – Painel “Dados Internos” do software de controle da geração de ondas	65
Figura 41 – Espectros de referência e medido antes da primeira iteração da malha externa de controle	71
Figura 42 – Espectros de referência e medido após a primeira iteração da malha externa de controle	71
Figura 43 – Espectros de referência e medido após a segunda iteração da malha externa de controle	72
Figura 44 – Espectros de referência e medido após a terceira iteração da malha externa de controle	72
Figura 45 – Espectros de referência e medido após a quarta iteração da malha externa de controle	72
Figura 46 – Espectros de referência e medido após a quinta iteração da malha externa de controle	73
Figura 47 – Espectros de referência e medido após a sexta iteração da malha externa de controle	73
Figura 48 – Espectros de referência e medido após a sétima iteração da malha externa de controle	73
Figura 49 – Trem de ondas gerado antes da primeira iteração da malha externa de controle..	74
Figura 50 – Trem de ondas gerado após a sétima iteração da malha externa de controle.....	74
Figura 51 – Trem de ondas regulares com $T_m = 2,0s$ e $A_m = 80mm$	75

Figura 52 – Espectro de amplitudes de trem de ondas regulares com $T_m = 2,0s$, $A_m = 80mm$ e $\Delta f_m = 0,01Hz$	76
Figura 53 – Espectro de amplitude obtido no teste com ondas regulares.....	76
Figura 54 – Efeito dos harmônicos múltiplos na forma de onda propagada pelo canal.....	77
Figura 55 – Espectro de energia de Bretschneider com $H_z = 5,7m$ e $T_z = 9,0s$	78
Figura 56 – Espectro de amplitudes com $H_z = 100mm$ e $T_z = 2,0s$	79
Figura 57 – Forma de onda obtida a partir do espectro de Bretschneider.....	79
Figura 58 – Espectro de amplitudes obtido no teste com o espectro de Bretschneider.....	80
Figura 59 – Espectro de energia obtido no teste com o espectro de Bretschneider	80
Figura 60 – Espectro de amplitudes obtido no teste com o espectro real.....	82
Figura 61 – Espectro de energia obtido no teste com o espectro real	82
Figura 62 – Ensaio de verificação do sistema de geração de ondas na presença de um quebra-mar.....	83
Figura 63 – Modelo de grade empregado no modelo BW	88
Figura 64 – Exemplo de elevação da superfície de uma série temporal.....	90
Figura 65 – Vista do quebra-mar de berma de Saquarema – RJ	94
Figura 66 – Planta esquemática do quebra-mar de Saquarema	95
Figura 67 – Eixo de construção do molhe e suas seções	96
Figura 68 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – SE (AQUAMODELO, 2003).....	99
Figura 69 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – Sul (AQUAMODELO, 2003).....	99
Figura 70 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – SW (AQUAMODELO, 2003).....	100
Figura 71 – Resultado da simulação de onda de Sudeste – $T_p = 10,5s$ (AQUAMODELO, 2003).....	101
Figura 72 – Resultado da simulação de onda de Sul – $T_p = 11,9s$ (AQUAMODELO, 2003)	101
Figura 73 – Resultado da simulação de onda de Sul – $T_p = 13,3s$ (AQUAMODELO, 2003)	102
Figura 74 – Resultado da simulação de onda de Sudoeste – $T_p = 11,9s$ (AQUAMODELO, 2003).....	102

Figura 75 – Resultado da simulação de onda de Sudoeste – $T_p = 13,3$ s (AQUAMODELO, 2003).....	103
Figura 76 – Perfil da seção 4 com suas dimensões principais em centímetros	105
Figura 77 – Perfil da seção do cabeço com suas dimensões principais em centímetros	105
Figura 78 – Ressaca enfrentada durante a construção da estrutura	106
Figura 79 – Monte para seleção das britas nas faixas granulométricas determinadas	108
Figura 80 – Moinho utilizado para redução do tamanho dos blocos após seleção.....	109
Figura 81 – Rolagem dos blocos na betoneira para remoção de pontas e ângulos agudos em sua geometria.....	109
Figura 82 – Pesagem dos blocos	110
Figura 83 – Pintura das britas de acordo com as faixas granulométricas.....	110
Figura 84 – Plataforma original construída no canal de ondas.....	111
Figura 85 – Instalação dos gabaritos de madeira.....	112
Figura 86 – Preenchimento da plataforma com areia	112
Figura 87 – Regularização após compactação da areia	113
Figura 88 – Revestimento da plataforma com argamassa	113
Figura 89 – Prolongamento da plataforma do canal de ondas.....	114
Figura 90 – Peças de madeira para a montagem da seção 4.....	115
Figura 91 – Núcleo da seção montado.....	115
Figura 92 – Blocos pré-misturados para a montagem da seção 4	116
Figura 93 – Caçamba construída para simular o rolamento dos blocos durante a construção do quebra-mar.....	116
Figura 94 – Vista do quebra-mar durante a montagem da estrutura	117
Figura 95 – Detalhe da montagem da seção 4 do quebra-mar.....	117
Figura 96 – Vista lateral do teste preliminar com a seção 4.....	119
Figura 97 – Vista frontal do teste preliminar com a seção 4	119
Figura 98 – Esquema da concepção final da plataforma	120
Figura 99 – Distribuição granulométrica empregada na seção do cabeço	123
Figura 100 – Estúdio fotográfico montado na lateral do canal.....	126
Figura 101 – Câmera digital conectada a um computador para a aquisição das fotos durante o ensaio	126
Figura 102 – Quadriculado utilizado para definir os pontos de levantamento.....	127
Figura 103 – Mira empregada na leitura dos pontos	127
Figura 104 – Levantamento das cotas da seção do cabeço.....	128

Figura 105 – Comparação entre os espectros de amplitude obtidos durante a calibração e os ensaios	128
Figura 106 – Comparação entre os espectros de energia obtidos durante a calibração e os ensaios	129
Figura 107– Comparação entre os espectros de amplitude obtidos durante a calibração e os ensaios – Ampliação	129
Figura 108– Comparação entre os espectros de energia obtidos durante a calibração e os ensaios – Ampliação	130
Figura 109 – Configuração do quebra-mar antes do 1º ensaio	130
Figura 110– Configuração do quebra-mar após o 1º ensaio	130
Figura 111– Configuração do quebra-mar após o 2º ensaio	131
Figura 112 – Evolução dos perfil médio durante os ensaios	131
Figura 113 – Modelo digital da seção do cabeço após o 2º ensaio	132
Figura 114 – Comparação da seção M1 para a alternativa 2	136
Figura 115 – Comparação da seção M2 para a alternativa 2	137
Figura 116 – Comparação da seção M1 para a alternativa 3	139
Figura 117 – Comparação da seção M2 para a alternativa 3	140
Figura 118 – Comparação da seção 6S (recoo máximo) para a alternativa 3	141
Figura 119 – Distribuição granulométrica empregada na alternativa 4	142
Figura 120 – Comparação da seção M1 para a alternativa 4	144
Figura 121 – Comparação da seção M2 para a alternativa 4	145
Figura 122 – Comparação da seção 6S (recoo máximo) para a alternativa 4	145
Figura 123 – Comparação da seção M1 para a alternativa 5	147
Figura 124 – Comparação da seção M2 para a alternativa 5	147
Figura 125 – Comparação da seção 9S (recoo máximo) para a alternativa 5	148
Figura 126 – Distribuição granulométrica empregada na alternativa 7	149
Figura 127 – Comparação da seção M1 para a alternativa 6	151
Figura 128 – Comparação da seção M2 para a alternativa 6	152
Figura 129 – Comparação da seção 8S (recoo máximo) para a alternativa 6	152
Figura 130 – Comparação da seção M1 para a alternativa 7	154
Figura 131 – Comparação da seção M2 para a alternativa 7	154
Figura 132 – Comparação da seção 9S (recoo máximo) para a alternativa 7	155
Figura 133 – Comparação da seção M1 para a alternativa 8	157
Figura 134 – Comparação da seção M2 para a alternativa 8	157

Figura 135 – Comparação da seção 7S (recuo máximo) para a alternativa 8	158
Figura 136 – Comparação das formas de onda para o nível de baixamar	160
Figura 137 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de baixa-mar	160
Figura 138 – Comparação dos espectros de energia para o nível de baixa-mar.....	161
Figura 139 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de baixamar – Ampliação	161
Figura 140 – Comparação dos espectros de energia para o nível de baixamar – Ampliação	162
Figura 141 – Comparação das formas de onda para o nível de meia maré	162
Figura 142 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de meia maré.....	163
Figura 143 – Comparação dos espectros de energia para o nível de meia maré	163
Figura 144 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de meia maré – Ampliação	164
Figura 145 – Comparação dos espectros de energia para o nível de meia maré – Ampliação	164
Figura 146 – Comparação das formas de onda para o nível de preamar.....	165
Figura 147 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de preamar.....	165
Figura 148 – Comparação dos espectros de energia para o nível preamar.....	166
Figura 149 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de preamar – Ampliação	166
Figura 150 – Comparação dos espectros de energia para o nível de preamar – Ampliação ..	167
Figura 151 – Forma de onda aquisitadas pelas duas pontas capacitivas	168
Figura 152 – Espectros de amplitude calculados a partir das duas pontas capacitivas	169
Figura 153 – Espectros de energia calculados a partir das duas pontas capacitivas	169
Figura 154 – Configuração final da plataforma do canal de ondas	171
Figura 155 – Distribuição dos tempos dos ensaios para simulação do efeito da variação da maré	172
Figura 156 – Curva granulométrica empregada nos ensaios comparativos entre ondas regulares e irregulares.....	173
Figura 157 – Carta batimétrica n° 70 da região do projeto digitalizada	174
Figura 158 – Carta batimétrica n° 80 da região do projeto digitalizada	175
Figura 159 – Carta batimétrica n° 1500 da região do projeto digitalizada	175
Figura 160 – Batimetria completa da região obtida pela união das cartas batimétricas previamente digitalizadas	176
Figura 161 – Limites da área de modelação para o módulo BW do MIKE 21	177

Figura 162 – Grade batimétrica de entrada do módulo BW do MIKE 21.....	178
Figura 163 – Camada esponja de entrada do módulo BW do MIKE 21	179
Figura 164 – Exemplo adaptado de arquivo de teste confeccionado para o nível de preamar e altura de onda $H=220$ mm no modelo	181
Figura 165 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de preamar e altura de onda $H=220$ mm no modelo	182
Figura 166 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de meia maré e altura de onda $H=200$ mm no modelo	182
Figura 167 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de baixa mare altura de onda $H=200$ mm no modelo	183
Figura 168 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de preamar da Alternativa R1	185
Figura 169 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de meia maré da Alternativa R1	185
Figura 170 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o ensaio de baixa mar da Alternativa R1	185
Figura 171 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de meia maré da Alternativa R1	186
Figura 172 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de preamar da Alternativa R1	186
Figura 173 – Perfil da estrutura indeformada - Alternativa R1	189
Figura 174 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de preamar - Alternativa R1	189
Figura 175 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de meia maré - Alternativa R1	189
Figura 176 – Perfil da estrutura após o ensaio de baixa mar - Alternativa R1	190
Figura 177 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de meia maré - Alternativa R1	190
Figura 178 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de preamar - Alternativa R1	190
Figura 179 – Comparação da seção M1 - Alternativa R1	191
Figura 180 – Comparação da seção M2 - Alternativa R1	191
Figura 181 – Comparação da seção 4S - Alternativa R1	192
Figura 182 – Comparação da seção M1 - Alternativa R2	195
Figura 183 – Comparação da seção M2 - Alternativa R2	195
Figura 184 – Comparação da seção 5S - Alternativa R2	196
Figura 185 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de preamar	197

Figura 186 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de meia maré.....	198
Figura 187 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de baixa mar.....	198
Figura 188 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de preamar.....	199
Figura 189 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de meia maré.....	199
Figura 190 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de baixa mar.....	200
Figura 191 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Preamar.....	201
Figura 192 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Meia maré.....	202
Figura 193 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Baixa mar.....	202
Figura 194 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado - Preamar.....	203
Figura 195 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado - Meia maré.....	203
Figura 196 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado – Baixa mar.....	204
Figura 197 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de preamar.....	205
Figura 198 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de meia maré.....	205
Figura 199 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de baixa mar.....	206
Figura 200 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de preamar da Alternativa II.....	208
Figura 201 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de meia maré da Alternativa II.....	208
Figura 202 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o ensaio de baixa mar da Alternativa II.....	208

Figura 203 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de meia maré da Alternativa I1	209
Figura 204 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de preamar da Alternativa I1	209
Figura 205 – Perfil da estrutura indeformada - Alternativa I1	211
Figura 206 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de preamar - Alternativa I1	212
Figura 207 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de meia maré - Alternativa I1	212
Figura 208 – Perfil da estrutura após o ensaio de baixa mar - Alternativa I1	212
Figura 209 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de meia maré - Alternativa I1	213
Figura 210 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de preamar - Alternativa I1	213
Figura 211 – Comparação da seção M1 - Alternativa I1	214
Figura 212 – Comparação da seção M2 - Alternativa I1	214
Figura 213 – Comparação da seção 6S - Alternativa I1	215
Figura 214 – Comparação da seção M1 - Alternativa I2	218
Figura 215 – Comparação da seção M2 - Alternativa I2	218
Figura 216 – Comparação da seção 3S - Alternativa I2	219
Figura 217 – Comparação da seção M1 - Alternativa PR1	223
Figura 218 – Comparação da seção M2 - Alternativa PR1	223
Figura 219 – Comparação da seção 9S - Alternativa PR1	224
Figura 220 – Comparação da seção M1 - Alternativa PR2	227
Figura 221 – Comparação da seção M2 - Alternativa PR2	228
Figura 222 – Comparação da seção 3S - Alternativa PR2	228
Figura 223 – Comparação da seção M1 - Alternativa PI1	232
Figura 224 – Comparação da seção M2 - Alternativa PI1	232
Figura 225 – Comparação da seção 8S - Alternativa PI1	233
Figura 226 – Comparação da seção M1 - Alternativa PI2	236
Figura 227 – Comparação da seção M2 - Alternativa PI2	236
Figura 228 – Comparação da seção 3S - Alternativa PI2	237

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de mobilidade de um quebra-mar de berma	54
Tabela 2 – Ocorrência de ondas- quadrante de SE.....	97
Tabela 3 – Ocorrência de onda- quadrante Sul.....	97
Tabela 4 – Ocorrência de onda- quadrante SW	97
Tabela 5 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sudeste (AQUAMODELO, 2003).....	98
Tabela 6 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sul (AQUAMODELO, 2003).....	98
Tabela 7 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sudoeste (AQUAMODELO, 2003).....	98
Tabela 8 – Coordenadas dos pontos próximos ao guia-correntes (AQUAMODELO, 2003)	103
Tabela 9 – Alturas de onda obtidas pela simulação sem considerar arrebentação da onda (AQUAMODELO, 2003).....	103
Tabela 10 – Alturas de onda de projeto limitadas pela arrebentação da onda.....	104
Tabela 11 – Pesos de Pedras e recuos das seções do quebra-mar de berma.....	105
Tabela 12 – Faixas granulométricas - protótipo	106
Tabela 13 – Faixas granulométricas - modelo.....	107
Tabela 14 – Distribuição dos pesos dos blocos por cores	107
Tabela 15 – Divisão das faixas granulométricas em função das cores dos blocos.....	108
Tabela 16 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para a seção 4 - Protótipo.....	118
Tabela 17 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para a seção 4 - Modelo	118
Tabela 18 – Coeficientes de calibração para a seção do cabeço	121
Tabela 19 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para o cabeço - Protótipo	123
Tabela 20 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para o cabeço - Modelo.....	123
Tabela 21 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC	134
Tabela 22 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC	143
Tabela 23 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC	149
Tabela 24 – Diferenças percentuais entre os valores de pico do espectro de amplitudes	167
Tabela 25 – Profundidades junto à obra e de calibração dos trens de ondas.....	171
Tabela 26 – Durações dos ensaios na escala 1:25	172
Tabela 27 – Coeficientes de calibração dos trens de ondas regulares – Ensaio Comparativo	180

Tabela 28 – Ficha de ensaio da Alternativa R1	184
Tabela 29 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa R1	187
Tabela 30 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC	188
Tabela 31 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R1	192
Tabela 32 – Ficha de ensaio da Alternativa R2	193
Tabela 33 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa R2	194
Tabela 34 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R2	196
Tabela 35 – Análise estatística dos trens de ondas obtidos a partir do módulo BW do MIKE 21	200
Tabela 36 – Ficha de ensaio da Alternativa I1	207
Tabela 37 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa I1	210
Tabela 38 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC	211
Tabela 39 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa I1	215
Tabela 40 – Ficha de ensaio da Alternativa I2	216
Tabela 41 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa I2	217
Tabela 42 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R2	219
Tabela 43 – Profundidade junto à obra e de calibração dos trens de ondas – Quebra-mar profundo	220
Tabela 44 – Ficha de ensaio da Alternativa PR1	221
Tabela 45 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PR1	222
Tabela 46 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR1	224
Tabela 47 – Ficha de ensaio da Alternativa PR2	225
Tabela 48 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PR2	226
Tabela 49 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR2	229
Tabela 50 – Ficha de ensaio da Alternativa PI1	230
Tabela 51 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PI1	231
Tabela 52 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR1	233
Tabela 53 – Ficha de ensaio da Alternativa PI2	234
Tabela 54 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PI2	235
Tabela 55 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PI2	237
Tabela 56 – Quadro resumo dos resultados dos ensaios na escala 1:25	239
Tabela 57 – Quadro comparativo dos resultados dos ensaios nas escalas 1:20 e 1:25	240

LISTA DE SÍMBOLOS

t	tempo
$\eta(t)$	elevação da superfície sobre o nível médio do mar como função do tempo
H	Altura de onda
T	Período de onda
$H_{máx}$	Altura da maior onda de um grupo
$T_{máx}$	Período da onda de maior altura de um grupo
$H_{1/10}$	Média das alturas do décimo superior das ondas de um grupo
$T_{1/10}$	Média dos períodos do décimo superior das ondas de um grupo
H_s	Altura de onda significativa: média das alturas do terço superior das ondas de um grupo
T_s	Período de onda significativa: média dos períodos do terço superior das ondas de um grupo
H_z	Altura média: Média das alturas de todas as ondas de um grupo
T_z	Período médio: média dos períodos de todas as ondas de um grupo
H_{RMS}	Altura RMS: raiz quadrada da soma de todas as alturas de ondas ao quadrado
$p(H)$	Função densidade de probabilidade de altura de ondas da distribuição de Rayleigh
$P(H)$	Probabilidade de excedência pela distribuição de Rayleigh
N	Número de ondas de um grupo
$p(T)$	Função densidade de probabilidade de período de ondas da distribuição de Rayleigh
$\eta(x, y, t)$	elevação da superfície sobre o nível médio do mar como função do espaço e do tempo
k_n	número de onda da onda elementar
θ	ângulo elementar de propagação medido a partir do eixo x
ω_n	Velocidade angular da onda elementar

$f_n ; f_m$	freqüência de uma onda elementar
$\varepsilon_n ; \varphi_m$	diferença de fase de uma onda elementar - $(0,2\pi)$
$a_n ; A_m$	amplitude de uma onda elementar
$E(k, \theta)$	Espectro de energia da onda como função do número de onda e da gama de direções de onda
$E(k)$	Espectro de energia da onda como função apenas do número de onda
$E(f)$	Espectro de energia da onda como função da freqüência
g	Aceleração gravitacional
U	Velocidade do vento 19,5m acima do nível médio do mar – Pierson Moskowitz
α	Constante de Phillips
γ	Relação entre as máximas energias espectrais de JONSWAP e Pierson Moskowitz
Δf_m	Discretização de freqüências da Fast Fourier Transform
Φ	Potencial de velocidades
X	Deslocamento das partículas na direção x
Y	Deslocamento das partículas na direção y
a	Amplitude da onda
$\xi(\alpha)$	Função de correlação entre o movimento do gerador e a amplitude da onda
L	Comprimento da onda
h	Profundidade em relação ao nível médio
e	Excursão do batedor
$M_0^{1/2}$	Raiz do valor quadrático médio da elevação da superfície da água
ε	Largura espectral
$\xi_{máx}$	Maior altura de onda em um grupo
M_1	Deslocamento da placa do gerador
M_2	Velocidade da placa do gerador
M_3	Aceleração da placa do gerador
$N_s ; H_o$	Parâmetro de estabilidade de quebra-mares de berma
$H_o T_o$	Parâmetro de estabilidade em relação ao período da onda

Δ	Relação de massas específicas
ρ_s	Massa específica dos blocos
ρ_w	Massa específica da água
D_{50}	Dimensão característica média dos blocos do enrocamento
W_{50}	Peso médio dos blocos do enrocamento
$N_s^* ; N_s^{**}$	Parâmetros modificados de estabilidade
H_k	Altura da onda característica (média das 1/50 maiores ondas)
C_k	Relação entre a altura característica e a altura significativa de onda
L_o	Comprimento da onda em águas profundas
S_{mo}	Esbeltez da onda em águas profundas
S_{mk}	Esbeltez da onda característica
β_o	Ângulo entre a o rumo médio das ondas e a perpendicular ao eixo longitudinal do quebra-mar
rec	Recessão ou recuo da berma
h_f	Profundidade de interseção entre os perfis inicial e final da estrutura
f_g	Fator de gradação da curva granulométrica
f_d	Fator de profundidade
d	Profundidade em frente ao quebra-mar
S_{mo}	Esbeltez da onda em águas profundas
S_{mk}	Esbeltez da onda característica
β_o	Ângulo entre a o rumo médio das ondas e a perpendicular ao eixo longitudinal do quebra-mar
ξ	Elevação da superfície d'água acima do datum (modelo BW)
P	Fluxo de densidade de energia na direção x (modelo BW)
Q	Fluxo de densidade de energia na direção y (modelo BW)
B	Fator de dispersão de Boussinesq (modelo BW)
n	Porosidade (modelo BW)
C	Coefficiente de Chézy (modelo BW)
α	Coefficiente de atrito para fluxo laminar nos poros (modelo BW)
β	Coefficiente de atrito para fluxo turbulento nos poros (modelo BW)
Ω	Parâmetro de Coriolis (modelo BW)
K_{rr}	Coefficiente de intertravamento

α	Ângulo de inclinação do talude da estrutura em relação à horizontal
γ_s	Peso específico do bloco
T_p	Período de pico do espectro de energia

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	1
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	12
SUMÁRIO.....	16
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 HISTÓRICO.....	23
3 OBJETIVO	31
4 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA	32
4.1 Ondas Oceânicas	32
4.1.1 <i>Introdução</i>	32
4.1.2 <i>Parâmetros Estatísticos das Ondas</i>	33
4.1.3 <i>Distribuição das Alturas de Ondas</i>	34
4.1.4 <i>Distribuição dos Períodos de Ondas</i>	36
4.1.5 <i>Espectro de Energia de Ondas Oceânicas</i>	36
4.2 Geração de Ondas em Canais.....	45
4.3 Quebra-Mares de Berma	51
5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS	56
5.1 Premissas.....	56
5.2 Desenvolvimento Conceitual do Sistema.....	57
5.3 Aquisição e Desenvolvimento dos Hardwares Necessários.....	60
5.4 Software de Controle da Geração de Ondas	64
5.4.1 <i>Interface com o Usuário</i>	64
5.4.2 <i>Diagrama de Blocos</i>	68
5.5 Testes de Verificação do Sistema de Controle da Geração de Ondas.....	70
5.5.1 <i>Teste Inicial com Espectro de Energia com Baixa Discretização</i>	70
5.5.2 <i>Teste com Trem de Ondas Regular</i>	75
5.5.3 <i>Teste com espectro de energia parametrizado</i>	78

5.5.4	<i>Teste com espectro de energia real</i>	81
5.5.5	<i>Teste na presença de um quebra-mar</i>	83
6	OBTENÇÃO DE ESPECTROS DE ENERGIA DE ÁGUAS RASAS	85
6.1	Introdução	85
6.2	Módulo de Boussinesq (BW) do MIKE 21	86
6.2.1	<i>Descrição do Método</i>	86
6.2.2	<i>Parâmetros básicos do modelo</i>	88
6.2.3	<i>Ferramenta Random Wave Generation do MIKE 21-BW</i>	92
6.3	Discussão	92
7	ESTUDO DE CASO	94
7.1	Introdução	94
7.2	Projeto	95
7.3	Escala de Modelação	106
7.4	Atividades Preliminares	107
7.4.1	<i>Separação dos blocos para o estudo de caso</i>	107
7.4.2	<i>Construção da primeira plataforma no canal de ondas</i>	110
7.4.3	<i>Ampliação da plataforma do canal de ondas</i>	113
7.4.4	<i>Testes preliminares na presença de quebra-mar</i>	114
7.4.5	<i>Nova ampliação da plataforma</i>	120
7.5	Ensaio com Ondas Regulares na Escala 1:20	120
7.5.1	<i>Calibração das Ondas</i>	120
7.5.2	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 1</i>	122
7.5.3	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 2</i>	133
7.5.4	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 3</i>	138
7.5.5	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 4</i>	142
7.5.6	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 5</i>	146
7.5.7	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 6</i>	149
7.5.8	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 7</i>	153
7.5.9	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 8</i>	156
7.5.10	<i>Verificação da reflexão de ondas durante os ensaios na escala 1:20</i>	159
7.6	Ensaio Comparativos Entre Ondas Regulares e Irregulares – Quebra-mar	
	AQUAMODELO	170
7.6.1	<i>Aspectos gerais</i>	170

7.6.2	<i>Preparo dos dados de entrada para o módulo BW do MIKE 21 .....</i>	174
7.6.3	<i>Calibração das alturas de ondas regulares .....</i>	180
7.6.4	<i>Confecção dos arquivos contendo os trens de ondas regulares para entrada no software de controle da geração de ondas .....</i>	181
7.6.5	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa R1 .....</i>	183
7.6.6	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa R2 .....</i>	193
7.6.7	<i>Obtenção do trem de ondas irregulares na profundidade da Ponta 3, a partir do módulo BW do MIKE 21 .....</i>	197
7.6.8	<i>Calibração dos trens de ondas irregulares .....</i>	201
7.6.9	<i>Confecção dos arquivos contendo os trens de ondas irregulares para entrada no software de controle da geração de ondas .....</i>	204
7.6.10	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas irregulares – Alternativa I1 .....</i>	206
7.6.11	<i>Ensaio da seção do cabeço com ondas irregulares – Alternativa I2 .....</i>	216
7.7	<i>Ensaio Comparativos Entre Ondas Regulares e Irregulares – Quebra-mar profundo .....</i>	220
7.7.1	<i>Aspectos gerais .....</i>	220
7.7.2	<i>Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas regulares – Alternativa PR1 .....</i>	221
7.7.3	<i>Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas regulares – Alternativa PR2 .....</i>	225
7.7.4	<i>Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas irregulares – Alternativa PI1 .....</i>	229
7.7.5	<i>Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas irregulares – Alternativa PI2 .....</i>	234
7.8	<i>Discussão .....</i>	238
8	CONCLUSÕES	242
9	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	244
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	245
	APÊNDICE A – ENTRADA DE DADOS PARA O SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS NO MODO CALIBRAÇÃO	248
	APÊNDICE B – ENTRADA DE DADOS PARA O SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS NO MODO ENSAIO	252

APÊNDICE C – ARQUIVOS DE SAÍDA GERADOS PELO SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS	254
APÊNDICE D –PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO E ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	255
APÊNDICE E –DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS.....	264
APÊNDICE F - VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE GERAÇÃO DE ONDAS DESENVOLVIDO À BACIA DE ONDAS DO LHEPUSP	265

1 INTRODUÇÃO

Obras costeiras e portuárias têm notável importância no desenvolvimento econômico e turístico do Brasil, visto que a maioria absoluta das cargas que são movimentadas compondo a balança comercial utiliza o transporte marítimo. Da mesma forma, obras costeiras como o engordamento das praias, ou a construção de espigões para a defesa dos litorais, garantem a manutenção da linha de costa, propiciando que o grande potencial turístico do litoral brasileiro possa ser cada vez mais explorado.

As obras costeiras são, via de regra, de grande vulto e custo associado. Estas estruturas estão inseridas em um sistema complexo, que é a região costeira, regida por agentes de alta energia, como ondas e correntes. Assim, uma falha no projeto pode ocasionar desde a perda dos investimentos com a obra, altos custos de manutenção, até o gasto de quantias muito superiores na minimização de impactos causados pela modificação do equilíbrio ambiental da região.

Um exemplo é o Porto de Mucuripe, em Fortaleza, onde a construção de um enrocamento para abrigar o porto da ação de ondas ocasionou uma interrupção no transporte longitudinal de sedimentos ao longo das praias da região, implicando em uma erosão acentuada das praias a oeste do porto e o acúmulo de sedimentos junto à face oeste da estrutura de abrigo. Ao mesmo tempo, a diminuição das correntes atrás do enrocamento, fez com que se criasse condição para deposição de sedimentos finos naquela região, diminuindo a profundidade e dificultando a atracação de navios maiores.

Outro exemplo é o Porto de Suape, em Pernambuco, aonde a destruição de um trecho dos arrecifes para a passagem das embarcações fez com que a cunha salina (água salgada), que antes era barrada pela presença dos arrecifes, invadissem o estuário, alcançando as tomadas d'água das indústrias do pólo industrial, fazendo com que estas tivessem que construir novas tomadas d'água quilômetros a montante do rio, onde a água salgada não alcançasse.

Um exemplo mais recente são os danos severos que a ressaca ocorrida em 05 de Junho de 2006 ocasionou no molhe de carregamento de barcas na Praia Mole (ES), danificando-o significativamente, bem como o cais (Figura 1).

Figura 1 – Dano no molhe em Praia Mole – ES após ressaca

Exemplos como estes mostram como projetar estruturas costeiras somente baseando-se em conhecimentos teóricos é insuficiente para garantir a otimização dos custos e a minimização dos impactos causados por obras deste porte.

Neste sentido, para evitar os problemas citados anteriormente lança-se mão de ferramentas como modelos físicos, onde, em escala reduzida, são recriadas em laboratório as mesmas condições encontradas no real e onde são ensaiados os projetos de obras marítimas, visando otimizar suas concepções e avaliar os possíveis impactos causados à região na qual serão implantadas.

Uma destas ferramentas é o canal de ondas, que é um modelo bidimensional onde são estudadas seções de estruturas costeiras sujeitas à ação de ondas, empregando escalas bem maiores do que aquelas que poderiam ser empregadas em modelos tridimensionais.

Poucos laboratórios e institutos de hidráulica existentes no mundo possuem canais de ondas para otimização de projetos de estruturas costeiras sujeitas à ação da agitação.

Os canais de ondas são dotados de sistemas de geração de ondas classificados em dois tipos:

- Sistemas de geração de ondas regulares;
- Sistemas de geração de ondas irregulares.

Os geradores de ondas regulares são os mais simples, sendo capazes de gerar apenas formas de onda senoidais de período e altura constantes.

Já os geradores irregulares são capazes de gerar formas de onda mais complexas (até mesmo aleatórias), permitindo uma representação mais fiel da característica ondulatória real.

Apesar da maioria dos laboratórios internacionais, há décadas, possuírem seus próprios sistemas de geração de ondas irregulares, no Brasil, os poucos laboratórios que se tem conhecimento, que detém sistemas deste tipo, os adquiriram no exterior.

Os sistemas de geração de ondas adquiridos de laboratórios como o Danish Hydraulic Institute, por exemplo, são de código fechado, ou seja, não permitem acesso ao código fonte, impossibilitando qualquer modificação ou aprimoramento.

Neste sentido, o desenvolvimento de um sistema de geração de ondas irregulares de tecnologia nacional seria inédito, e elevaria o Brasil ao conjunto dos países que possuem tecnologia na geração de ondas deste tipo.

2 HISTÓRICO

O Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP - é o pioneiro no Estado de São Paulo na utilização de sistemas geradores de ondas monocromáticas visando aplicações à Engenharia Costeira e Portuária. Em meados dos anos sessenta a Área de Hidráulica Marítima passou a dispor de canal e bacia de ondas, utilizando o princípio de placa acionada por sistema mecânico de biela-manivela. Em meados dos anos setenta foi instalado no Laboratório Didático de Hidráulica Geral um novo canal de ondas. Nestas duas décadas iniciais foram desenvolvidos dois grandes estudos que capacitaram a Área de Hidráulica Marítima do LHEPUSP na geração de agitação monocromática:

- Melhoramento da Barra de Cananéia (SP);
- Estudo do Arranjo Geral das obras de abrigo do Porto de Praia Mole (ES).

Em 1992 foi construído no Grande Hall de modelos do LHEPUSP o novo Canal de Ondas em estrutura metálica, seguindo projeto adaptado de sistema similar que opera na Osaka City University (Japão), que substituiu o canal de ondas anterior do laboratório. Entretanto este canal apresentava uma série de não funcionalidades na forma como foi implantado, que não permitiam sua operação apropriada.

Um exemplo de não funcionalidade era o gerador de ondas implementado, que empregava um motor de corrente contínua e dispositivos de fim de curso que invertiam duas das fases do motor, fazendo com que ele passasse a girar no sentido oposto. Este sistema, por não controlar a velocidade de translação da placa, fazia com que a forma dos trens de ondas gerados se assemelhassem a dentes de serra, e não a ondas gravitacionais reais.

O Canal de Ondas (Figura 2) é prismático e tem dimensões internas de 50 m de comprimento, 1,42 m de altura e 1,00 m de largura, estando provido numa lateral de visor em cristal laminado com 2 cm de espessura para visualização da agitação e das obras estudadas numa extensão de 20 m (Figura 3). A extensão terminal do canal, a sotamar do visor, é de 10 m e a extensão a barlar do visor, onde está instalado o gerador de ondas, é de 20 m (Figura 4).

Figura 2 – Vista do canal de ondas do LHEPUSP

Figura 3 – Vista lateral do canal de ondas do LHEPUSP

Figura 4 – Esquema geral do canal de ondas do LHEPUSP

O Gerador de Ondas (Figura 5) consiste de uma placa acoplada superiormente a um carrinho, que translada em duas guias cilíndricas sob o acionamento de duas hastes que utilizam o princípio mecânico de movimentação de um fuso e porca roletada.

Figura 5 – Vista do sistema gerador de ondas

Em 2000, com assessoramento de consultoria técnica especializada de técnicos e professores do Departamento de Engenharia Naval da EPUSP, foi realizado um estudo com o intuito de verificar o potencial do canal de ondas do LHEPUSP.

Martins (2001), a partir de dados de registros de ondógrafos disponíveis, e considerando as escalas de modelagem de 1:20 e 1:30, obteve a seguinte envoltória para os parâmetros de ondas cujo canal deveria ser capaz de reproduzir (Figura 6).

Figura 6 – Envoltória de alturas em função do comprimento de onda para o canal do LHEPUSP (Martins, 2001)

Além disso, foi feito um cálculo teórico dos espectros que o sistema seria capaz de reproduzir após o reaparelhamento (Figura 7).

Figura 7 – Envoltória teórica de alturas de onda em função do comprimento que o gerador do canal do LHEPUSP seria capaz de reproduzir após o reaparelhamento (Martins, 2001)

Verificada a potencialidade do canal, decidiu-se corrigir as inadequações do sistema e implementar um novo, capaz de gerar ondas irregulares a partir de registros de ondógrafos e espectros de energia da agitação.

Assim, o sistema foi dotado de um servo motor de corrente alternada para acionar a placa (Figura 8), um sensor potenciométrico de 100cm para promover a realimentação do sistema com relação à posição do carrinho no tempo (Figura 9), três pontas capacitivas para medição do nível d'água ao longo do canal (Figura 10), filtros metálicos para minimizar os efeitos de harmônicos parasitas oriundos do processo de geração de ondas (Figura 11), estruturas absorvedoras em ambas as extremidades do canal para minimizar a reflexão das ondas (Figura 12), uma tubulação de 500mm ligando as extremidades de barlar e sotamar do canal para promover a compensação do nível d'água (Figura 13) e uma cabine de instrumentação posicionada junto ao canal, de onde é possível visualizar toda a sua extensão (Figura 14).

Figura 8 – Servo motor que controla o gerador de ondas

Figura 9 – Sensor potenciométrico acoplado ao gerador de ondas

Figura 10 – Ponta capacitiva que mede a variação do nível d'água no interior do canal

Figura 11 – Filtros metálicos posicionados à frente do gerador de ondas

Figura 12 – Estruturas absorvedoras das extremidades do canal

Figura 13 – Vista da tubulação de compensação de nível

Figura 14 – Cabine de instrumentação do canal de ondas

No intuito de acompanhar o reaparelhamento do canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da EPUSP – LHEPUSP e estabelecer a lei de transferência, entre o movimento da placa do gerador e a forma do trem de ondas gerado para o canal de ondas, tanto para ondas regulares quanto irregulares, foi concluído pelo autor um projeto de Iniciação Científica intitulado: “Aprimoramento da Geração de Ondas no Canal do Laboratório de Hidráulica da EPUSP visando a modelação do Espectro de Energia da Agitação aplicada à Engenharia Costeira e Portuária”, no período: setembro de 2001 a dezembro de 2002, junto à FAPESP.

Neste estudo verificou-se que a concepção de um sistema integrado que fosse capaz de, a partir de registros de ondógrafos, ou ainda de espectros de energia da agitação, gerar trens de ondas irregulares era uma tarefa complexa e multidisciplinar, envolvendo conhecimentos de Controle e Servo Mecanismos e Automação Industrial, além daqueles

envolvidos na temática de ondas gravitacionais e seu processo de geração. Assim, foi demasiadamente complexa a conclusão completa do projeto para o nível de estudo proposto.

Entretanto, durante o projeto foi desenvolvido um circuito analógico, de malha aberta, capaz de gerar um sinal de referência para o inversor que controla o servo motor, fazendo com que o gerador se movimentasse de forma senoidal, com período e amplitude ajustáveis.

O inconveniente deste sistema era que ele só permitia o ajuste da amplitude em função de um percentual de tensão, e não em função da excursão do gerador, dificultando assim, o levantamento da função de transferência.

Mesmo assim, foi realizado um estudo de caso para sistematização do levantamento da função de transferência entre o movimento da placa e o trem de ondas gerado, empregando ondas regulares propagando-se em uma profundidade de um metro.

Este estudo inicial permitiu constatar o grande potencial oferecido pelo canal de ondas para estudos de Obras Costeiras e Portuárias e a necessidade de se dar continuidade a esta pesquisa e preencher, assim, uma lacuna do LHEPUSP no que diz respeito aos estudos físicos com ondas gravitacionais reais (irregulares) voltados à Engenharia Costeira e Portuária.

3 OBJETIVO

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema digital de controle para o Canal de Ondas, capaz de gerar ondas regulares e irregulares a partir de um espectro de referência, de forma que o LHEPUSP detenha um sistema condizente com o estado da arte em geração de ondas irregulares no mundo.

Outro intuito desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para obtenção do espectro de energia da agitação na profundidade onde se localiza a obra hidráulica que se pretende estudar, a partir do espectro medido (ou adotado) em águas profundas, na região de estudo.

Pretende-se ainda analisar, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico, o quão adequado é o procedimento de dimensionamento de quebra-mares de talude levando-se em conta apenas a onda significativa.

Para tanto será realizado um estudo de caso utilizando os dados de um quebra-mar de berma, empregando tanto ondas regulares quanto ondas irregulares, de forma a permitir uma comparação direta entre a metodologia de otimização do dimensionamento de quebra-mares que emprega apenas a altura significativa de onda e aquela que emprega o espectro de energia da agitação.

Por fim, almeja-se a verificação da adequação do sistema proposto para o canal de ondas à bacia de ondas de Santos existente no laboratório.

4 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

4.1 Ondas Oceânicas

4.1.1 Introdução

A ação do vento por um certo tempo e em uma determinada área da superfície do oceano é a responsável pela geração das ondas que vemos arrebentar nas praias. Desta forma, pode-se dizer que o vento transfere parte da sua energia para a água, que a transporta na forma de ondas.

Em águas profundas, essas ondas praticamente não perdem energia, podendo se propagar na forma de trens de ondas por milhares de quilômetros até encontrar um obstáculo, como uma praia, onde sua energia é dissipada.

Na zona de geração, ou seja, onde o vento está soprando, a superfície do mar se apresenta de forma muito caótica, desta forma a variação da superfície do mar não se parece em nada com formas de onda regulares.

Quando as ondas formadas atingem regiões onde o vento já não atua, os trens de ondas formados podem ser identificados, mas, mesmo assim, existe uma certa variabilidade nas alturas, períodos e rumos das ondas que é intrínseca ao seu processo de geração.

O fato de o vento soprar em rajadas, ou seja, da sua intensidade variar ao longo do tempo, e da sua direção também não ser constante é o que explica as variabilidades observadas nas ondas.

Além disso, as ondas que atingem as regiões costeiras em um determinado instante podem ter sido originadas em duas ou mais zonas de geração diferentes, por ventos de intensidade e duração diferentes, de forma que quando elas se encontram passa a haver uma superposição das suas características.

Portanto, as ondas oceânicas geradas pelo vento são muito irregulares, não sendo adequado o seu tratamento de forma determinística, ao invés disso, duas outras formas de tratamento devem ser consideradas:

- O Tratamento estatístico, através de características representativas destas ondas;
- O Método Espectral, através do cálculo do espectro de energia da agitação.

4.1.2 Parâmetros Estatísticos das Ondas

Para a análise estatística das ondas é necessário definir a altura da onda e seu período a partir de séries de registros de ondas. Para tanto, segundo Horikawa (1978) é comumente adotado o método do cruzamento do zero ascendente, caracterizado por utilizar o ponto onde a superfície do perfil da onda cruza o nível médio no sentido ascendente.

A altura de uma onda é definida pela diferença entre os níveis máximo e mínimo ocorridos entre dois pontos de zero ascendente, e o correspondente período é definido pelo intervalo de tempo decorrido entre dois pontos de zero ascendente consecutivos. A Figura 15 ilustra o método do cruzamento do zero ascendente.

Figura 15 – Definição de parâmetros a partir do zero ascendente

Definida a metodologia de análise, são definidos alguns valores estatísticos sobre as ondas, tais como:

- A onda máxima ($H_{m\acute{a}x}$, $T_{m\acute{a}x}$), que corresponde à maior altura para um dado grupo de ondas;
- A onda um décimo ($H_{1/10}$, $T_{1/10}$), que corresponde à média das alturas e períodos do décimo superior das ondas de um grupo;
- A onda significativa (H_s , T_s), que corresponde à média das alturas e períodos do terço superior das ondas de um grupo;
- A onda média (H_z , T_z), que corresponde à média das alturas e períodos de todas as ondas de um grupo.
- A altura RMS (H_{RMS}), que corresponde à raiz do valor quadrático médio;

Entre as características acima descritas a onda significativa é das mais utilizada em Engenharia Costeira, pois corresponde, em média, à maior onda observável num trem de ondas. Por outro lado H_{RMS} apresenta proporcionalidade com o conteúdo energético do trem de ondas (Horikawa 1978).

4.1.3 Distribuição das Alturas de Ondas

Longuet-Higgins (1963) mostrou que a distribuição estatística das alturas de ondas segue a curva de distribuição de Rayleigh (Figura 16), contanto que as frequências sejam relativamente próximas. Portanto, a função densidade de probabilidade da altura de onda $p(H)$ é dada pela Equação (1):

$$p(H)dH = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H_z^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_z} \right)^2} dH \quad (1)$$

Onde:

H_z : é altura da onda média, ou seja, a média das alturas de onda.

Figura 16 – Distribuição de Rayleigh

Sendo assim, a probabilidade de ocorrência de uma onda com amplitude maior que um certo H (Figura 17) é dada por:

$$P(H)dH = 1 - \int_0^H p(H)dH = e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H_z}\right)^2} \quad (2)$$

Figura 17 – Probabilidade de Excedência para a Distribuição de Rayleigh

Além disso, a enésima altura de onda superior, ou seja, a altura de onda que só é superada em n% dos casos é dada por:

$$H_{1/n} = \frac{\int_{H_n}^{\infty} H \cdot p(H)dH}{P(H_n)} = n \cdot \int_{H_n}^{\infty} H \cdot p(H)dH \quad (3)$$

De onde se obtém:

$$H_{1/3} \approx 1,60H_z, \quad H_z = 0,625H_{1/3}$$

$$H_{1/10} \approx 2,03H_z \approx 1,27H_{1/3}$$

É importante salientar que por se tratar de uma distribuição estatística, não se pode obter de maneira determinística um valor para a altura máxima de onda, entretanto, a partir da equação anterior, pode-se calcular uma altura de onda cuja probabilidade de que ela seja superada seja tão pequena quanto se queira. Pode-se obter, ainda, uma relação entre a altura máxima e a altura significativa para um determinado número de ondas N , como sendo:

$$\frac{H_{max}}{H_{1/3}} \approx \frac{1}{1,416} \cdot \left[(\ln N)^{1/2} + \frac{\gamma}{2} (\ln N)^{-1/2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{H_{max}}{H_{1/3}} \approx 1,07 \sqrt{\log_{10} N} \quad (\text{para } N \text{ grande}) \quad (5)$$

Sendo $\gamma = 0,5772$

Usualmente utiliza-se para o cálculo da onda máxima $N = 1000$ ondas, que seria equivalente a um período de agitação de aproximadamente 2 horas para períodos de ondas em torno de 7 segundos. Neste caso a relação entre a altura máxima e a altura significativa resulta em:

$$\frac{H_{máx}}{H_{1/3}} = 1,86 \quad (N = 1000 \text{ ondas}) \quad (6)$$

4.1.4 Distribuição dos Períodos de Ondas

A distribuição do período das ondas difere, dependendo do estágio de desenvolvimento da mesma, entretanto para ondas plenamente desenvolvidas a distribuição do período das ondas pode ser dada por:

$$p(T)dT = 2,7 \cdot \frac{T^3}{T_z^4} \cdot e^{-0,675\left(\frac{T}{T_z}\right)^4} dT \quad (7)$$

Sendo $p(T)$ a função densidade de probabilidade do período das ondas. A relação acima mostra que essa distribuição de T^2 é proporcional ao comprimento da onda, sendo expressa por uma curva de distribuição de Rayleigh.

Observações feitas no Porto de Nagoya (Japão) mostraram que estatisticamente, pode-se assumir o seguinte:

$$T_{1/10}/T_{1/3} = 0,99 \pm 0,06 \Rightarrow T_{1/10} \approx T_{1/3} \quad (8)$$

$$T_{1/3}/T_z = 1,07 \pm 0,08 \Rightarrow T_{1/3} \approx 1,1 \cdot T_z \quad (9)$$

4.1.5 Espectro de Energia de Ondas Oceânicas

Considerando que a forma da onda pode ser bem descrita por uma soma de senóides de diferentes frequências, amplitudes e fases, o termo espectro de energia de onda pode ser definido. Os espectros de energia de onda podem ser classificados em espectros de frequência

e espectro de número de onda, que expressam a distribuição de densidade de energia da onda como função da frequência de onda ou do número de onda, respectivamente.

As superfícies de água do perfil das ondas oceânicas reais variam amplamente no tempo, assim como no espaço, sendo a elevação da superfície sobre o nível médio do mar η dada por:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(xk_n \cos \theta_n + yk_n \sin \theta_n - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (10)$$

Onde:

k_n : é número de onda da onda elementar;

θ : é o ângulo elementar de propagação medido a partir do eixo x;

$\omega_n = 2\pi f_n$;

f_n : é a frequência de uma onda elementar;

ε_n : é adiferença de fase de uma onda elementar, sendo esta distribuída aleatoriamente no intervalo $(0; 2\pi)$;

a_n : é a amplitude de uma onda elementar.

Qualquer uma das seguintes equações pode ser usada para definir o espectro de energia direcional $E(k, \theta)$, que é a densidade da energia da onda em função do número de onda e da gama de direções de onda $(k, k + \delta k; \theta, \theta + \delta \theta)$:

$$\sum_k \sum_{\theta} \frac{1}{2} a_n^2 = E(k, \theta) \partial k \partial \theta \quad (11)$$

$$\overline{\eta^2} = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{\theta=0}^{2\pi} \frac{1}{2} a_n^2 = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(k, \theta) dk d\theta \quad (12)$$

Agora pode-se definir uma nova variável:

$$E(k) = \int_0^{2\pi} E(k, \theta) d\theta \quad (13)$$

Onde, $E(k)$: é o espectro em função do número de onda.

Na condição de águas profundas, tem-se:

$$\omega_n^2 = 4\pi^2 f_n^2 = gk_n \quad (14)$$

$$E(k) = \int_0^{2\pi} E(k, \theta) d\theta \quad (15)$$

Onde, a função acima descrita é uma relação de dispersão. A partir das expressões acima, pode-se perceber que número de onda (k_n) e a frequência (f_n) estão relacionados, permitindo a introdução de uma nova variável:

$$\overline{\eta}^2 = \int_0^{\infty} E(k) dk = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (16)$$

Onde:

$E(f)$: é o Espectro em função da frequência.

Considerando-se o caso de ondas se propagando em uma única direção, a superfície de elevação medida em um ponto fixo é expressa por:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (17)$$

E a seguinte equação pode ser obtida:

$$\sum_f^{f+\delta f} \frac{1}{2} a_n^2 = E(f) \delta f \quad (18)$$

Para facilitar o emprego desta teoria em aplicações práticas, alguns autores desenvolveram teorias espectrais a partir de parâmetros estatísticos das ondas.

Os itens 4.1.5.1 a 4.1.5.3 descrevem três dos espectros parametrizados mais empregados em aplicações práticas.

4.1.5.1 Espectro de Pierson e Moskowitz

Baseados em dados empíricos, em 1964 Pierson e Moskowitz propuseram uma formulação espectral dependente apenas da velocidade do vento, é o chamado espectro de um parâmetro e é dado pela equação (19):

$$E(f) = \frac{8,10 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} \cdot e^{-0,74 \left(\frac{g}{2\pi U \cdot f} \right)^4} [m^2 \cdot s] \quad (19)$$

Onde U é a velocidade do vento em m/s para uma elevação de 19,5m acima do nível médio do mar. A Figura 18 apresenta um exemplo deste espectro para $U = 20 m/s$.

Figura 18 – Exemplo de Espectro de Energia de Pierson-Moskowitz

Neste caso considera-se um mar totalmente desenvolvido devido a um vento constante de duração suficiente. Nesta condição o mar já absorveu toda a energia que aquele vento é capaz de transferir, alcançando, assim, o estado de equilíbrio plenamente estabelecido.

O espectro de Pierson - Moskowitz se aplica estritamente a águas profundas, mas tem-se assumido que o espectro pode ser imposto para água de qualquer profundidade. Esta suposição deve falhar quando a água se tornar muito rasa, mas não é possível definir um valor limite para a profundidade. Entretanto, a suposição não será certamente válida quando a altura da crista da onda for igual à profundidade.

4.1.5.2. Espectro de Bretschneider

No intuito de representar o mar gerado pelo vento também em seu estado de desenvolvimento, ou o mar que não pode atingir o desenvolvimento total por limitação de pista, ou ainda pela limitação da duração do vento, Bretschneider, em 1959, deduziu um espectro que considera como variáveis a altura significativa e a frequência modal, sendo chamado por isso de espectro de dois parâmetros. A equação (20) e a Figura 19 apresentam a

formulação obtida por Bretschneider e um exemplo de espectro obtido para $H_z = 12,5$ m e $T_z = 15$ s.

$$E(f) = 0,430 \left(\frac{H_z}{g T_z^2} \right)^2 \cdot \frac{g^2}{f^5} \cdot e^{-0,675 \left(\frac{1}{T_z \cdot f} \right)^4} \quad [m^2 \cdot s] \quad (20)$$

Onde:

$H_z \approx 0,625 H_{1/3}$: altura média de onda;

$T_z \approx 0,9 T_{1/3}$: período médio de onda.

Figura 19 – Exemplo de Espectro de Bretschneider

Este espectro é útil para estimar o espectro da onda quando a altura e o período da mesma, definidos estatisticamente, são conhecidos.

4.1.5.3. Espectro de JONSWAP

O modelo JONSWAP – Joint North Sea Wave Project foi formulado em 1973 por Hasselmann et al, baseado em um experimento realizado no Mar do Norte entre 1968 e 1969, no qual uma considerável quantidade de dados de onda foram obtidos.

Este experimento foi feito na costa da Dinamarca, medindo-se ondas ao longo de um perfil perpendicular à costa, produzidas por um vento também perpendicular à costa, soprando da terra para o mar. A partir deste estudo foi proposto o seguinte espectro:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^4} \cdot \gamma^e \frac{(f-f_m)^2}{2\lambda^2 f_m^2} \left[m^2 \cdot s \right] \quad (21)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_a = 0,07, & f \leq f_m \\ \lambda_b = 0,09, & f > f_m \end{cases} \quad (22)$$

Onde:

$\alpha = 0,0080$: constante de Phillips;

γ : é a razão entre a máxima energia espectral do JONSWAP pela sua correspondente no espectro de Pierson e Moskowitz.

f_m : é a frequência de pico que pode ser calculada por:

$$f_m = (2\pi)^{-1} \cdot \left(4 \cdot \frac{0,74}{5} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot g \cdot U_{19,5}^{-1} \quad (23)$$

A Figura 20 apresenta um exemplo do espectro de JONSWAP para $U = 20 m/s$.

Figura 20 – Exemplo de Espectro de JONSWAP

Este espectro se baseia no modelo de Pierson Moskowitz (PM) introduzindo fatores de forma, de modo a considerar as limitações de pista, sendo assim constitui-se em um modelo para mares em desenvolvimento com pista limitada.

4.1.5.4 Fast Fourier Transform- FFT

Fourier propôs uma formulação pela qual qualquer forma de onda periódica pode ser transformada em uma série com a seguinte equação:

$$f(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[c_n \cos(2\pi f_n t) + d_n \sin(2\pi f_n t) \right] \quad (24)$$

Comparando a equação(24) com a equação (17) percebe-se que se trata exatamente da série de Fourier para formas de onda com valor médio nulo ($c_0 = 0$).

Para transformar uma expressão na outra basta perceber as seguintes relações trigonométricas:

$$a_n = \sqrt{c_n^2 + d_n^2}$$

$$\varepsilon_n = \arctan\left(\frac{d_n}{c_n}\right)$$

Já a Fast Fourier Transform, dada pela equação (25), se constitui em um algoritmo numérico que aproxima a transformada de Fourier de qualquer forma de onda periódica, ou aproximadamente periódica, se constituindo em uma ferramenta muito útil para o equacionamento de trens de ondas irregulares.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) \quad (25)$$

Onde:

A_m : é a amplitude de cada onda elementar que compõe a forma de onda complexa;

f_m : é a frequência de cada onda elementar;

φ_m : é a fase de cada onda elementar.

Para um melhor entendimento deste equacionamento, passar-se-á a um exemplo prático.

A Figura 21 mostra um registro de ondas real, obtido pelo ondógrafo da plataforma P3 da PETROBRAS instalada ao largo da foz do rio Doce durante uma tempestade. Neste registro é possível observar a complexidade da forma de onda.

Figura 21 – Registro feito pelo Ondógrafo da Plataforma P3 da PETROBRAS, ao Largo da Foz do Rio Doce às 15h00min do dia 06/03/1973, Durante Uma Tempestade

Aplicando a equação (25), a mesma forma de onda pode ser representada no domínio da frequência, discretizada de 0,00117 Hz e cortada em 0,4 Hz como mostram as Figuras 22 e 23:

Figura 22 – Espectro de Amplitudes de Ondas Elementares

Figura 23 – Espectro de Fases de Ondas Elementares

É importante salientar que quanto menores as raías de frequência, ou seja, quanto menor o valor do Δf_m e quanto mais alto o valor do corte de frequências, mais fiel ao registro original será a forma de onda obtida a partir dos espectros calculados.

Para transformar os espectros de amplitude em espectros de energia, basta empregar a equação (26), o que resulta, para este caso particular, no espectro de energia apresentado na Figura 24:

$$A_m = \sqrt{2 \cdot E(f_m) \cdot \Delta f_m} \quad (26)$$

Onde: $E(f_m)$ é a densidade espectral do espectro de energia real daquele registro de onda.

Figura 24 – Espectro de Energia Calculado a partir do Registro de Ondas do Rio Doce

Esta técnica possibilita implementação computacional, permitindo a transformação entre o domínio da frequência e o domínio do tempo em tempo real, não necessitando de uma alta capacidade de processamento. Esta característica torna esta metodologia própria para o emprego na geração de ondas em canais.

4.2 Geração de Ondas em Canais

O estudo de estruturas costeiras em modelo de escala reduzida é uma ferramenta muito importante na otimização de projetos e avaliação dos impactos decorrentes da implantação destas obras em ambientes regidos por fenômenos tão complexos, como é o caso das regiões costeiras.

Particularmente, os canais de ondas permitem avaliar a resposta das estruturas projetadas frente à ação de ondas em escalas de até 1:10, se constituindo em uma ferramenta importantíssima para a otimização dos pesos dos blocos de quebra-mares, por exemplo.

Para tanto, é necessário que se consiga reproduzir no canal os fenômenos ondulatórios com a maior fidelidade possível ao que ocorre na natureza.

Uma das técnicas mais simples, e por isso uma das mais empregadas, é a reprodução de ondas regulares com a altura e o período significativos (H_s, T_s) da onda de projeto.

Neste sentido, passou a ser necessário relacionar qual a excursão de movimento do gerador seria necessária para produzir uma determinada altura de onda dada uma certa lâmina d'água no canal.

Em 1952 Biéssel e Suquet publicaram uma análise do movimento da placa para geração de ondas regulares em canal e que será tratada resumidamente a seguir.

Segundo Biéssel e Suquet Batedores Tipo Pistão constituem-se num dos mais simples aparelhos geradores de ondas, fundamentado no movimento de translação horizontal de uma placa, geralmente na direção paralela à da água em repouso. Deste fato resulta que este tipo de gerador dá melhores resultados para ondas de grandes comprimentos de onda em relação à profundidade visto que, nestes casos, mesmo partículas muito próximas ao fundo tem amplitude de movimentação considerável quando da passagem da onda. Sendo assim, este tipo de gerador é ideal para estudos de obras costeiras, onde invariavelmente a relação comprimento de onda pela profundidade é grande.

Biéssel e Suquet chegaram aos seguintes resultados gerais para o potencial de velocidades Φ , os deslocamentos das partículas X, Y e a amplitude da onda a :

$$\Phi = -\frac{\omega}{k} \cdot c \cdot \cosh(ky) \cdot \text{sen}(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \frac{\omega}{k_n} \cdot \cos(k_n y) \cdot e^{-k_n x} \cdot \cos(\omega t) \quad (27)$$

$$X = c \cdot \cosh(ky) \cdot \text{sen}(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(k_n y) \cdot e^{-k_n x} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (28)$$

$$Y = c \cdot \sinh(ky) \cdot \cos(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \text{sen}(k_n y) \cdot e^{-k_n x} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (29)$$

$$a = c \cdot \sinh(kh) \quad (30)$$

Onde:

$$c = 2 \cdot k \cdot \frac{\int_0^h \xi(\alpha) \cdot \cosh(k\alpha) d\alpha}{\sinh(kh) \cdot \cosh(kh) + kh};$$

k : é a solução da equação: $\omega^2 = k \cdot g \cdot \tanh(kh)$;

ω : é a frequência angular da onda: $\omega = 2\pi/T$.

O termo da somatória tende a zero quando se afasta da placa pelo menos três vezes a profundidade.

No caso do batedor pistão, considerando-se um afastamento maior ou igual a três vezes a profundidade, a função $\xi(y)$ tem a forma muito simples: $\xi(y) = e$, onde e é a excursão da placa, sendo assim, pode-se calcular a amplitude da onda como:

$$a = K \cdot e \quad (31)$$

Onde:
$$K = \frac{2\sinh^2(kh)}{\sinh(kh) \cdot \cosh(kh) + kh}$$

Sendo que K varia com a relação comprimento de onda pela profundidade L/h . Este fato dificulta a aplicação desta teoria, visto que o comprimento de onda é mais difícil de medir do que o período, por exemplo.

Para solucionar este problema Gilbert, Thompson e Brewer publicaram em 1977 uma análise empregando adimensionais que dependem diretamente do período T , ao invés do comprimento de onda, apresentando seus resultados graficamente.

Os três adimensionais abaixo puderam ser definidos:

$$\eta = \frac{h}{g \cdot T^2} \quad (32)$$

$$\frac{h}{L} = G_1(\eta) \quad (33)$$

$$\frac{a}{e} = G_2(\eta) \quad (34)$$

Onde:

h : é a profundidade junto ao batedor;

L : é o comprimento de onda;

a : é a amplitude da onda;

e : é a amplitude de excursão do batedor.

Para um dado período T e uma profundidade h , η pode ser calculado pela equação (32) e G_1 e G_2 a partir da Figura 25. Das equações (33) e (34) resultam o comprimento de onda L e a amplitude e do movimento do batedor necessário para gerar uma onda de amplitude a .

Figura 25 – Adimensionais na Geração de Ondas Monocromáticas

Outra técnica empregada em canais de onda para ensaios de obras costeiras é a reprodução de ondas irregulares baseando-se em espectros de energia da agitação.

Esta técnica apresenta uma maior complexidade na sua implementação, entretanto, as ondas irregulares baseadas em espectros de energia são muito mais próximas das condições reais de agitação, às quais as estruturas estudadas estarão sujeitas, do que as ondas regulares com altura e período significativos.

Novamente, é necessário relacionar o movimento da placa geradora com a forma do trem de ondas gerado, para que seja possível o controle da geração de ondas irregulares em canais.

Para tanto, Gilbert, Thompson e Brewer mostraram que as propriedades estatísticas das ondas dependem da raiz do valor quadrático médio da elevação da superfície da água $M_0^{1/2}$ e do parâmetro de largura espectral ε , ambos podendo ser calculados a partir do espectro.

Deste modo o valor de M_0 pode ser calculado a partir da Figura 26, considerando $M_0^{1/2} = hH_0^{1/2}$. A partir da Figura 27 pode-se obter o valor de ξ_{max} , a maior altura de onda em

função de N , o número de ondas consecutivas de interesse. N é determinado pelo número de ondas de um experimento. É necessário supor um valor para $\xi_{máx}$ tal que haja uma probabilidade de que $\xi_{máx}$ venha a ser excedido somente em um experimento a cada cem, em média.

O valor médio quadrático para o deslocamento da placa, M_1 , a velocidade da placa, M_2 , a aceleração da placa, M_3 , podem ser obtidos voltando à Figura 26 e são dados por:

$$M_1 = h^2 H_1 \quad (35)$$

$$M_2 = ghH_2 \quad (36)$$

$$M_3 = g^2 H_3 \quad (37)$$

Figura 26 – Adimensionais na geração de ondas randômicas

Figura 27 – Curvas de probabilidade

Frente ao que foi apresentado, percebe-se que as teorias apresentadas para relacionar o movimento da placa do gerador e as variações no nível d'água são muito complexas e de difícil implementação. Entretanto, utilizando um sensor de variação de nível, como uma ponta capacitiva, por exemplo, é possível obter um determinado espectro de energia em um ponto prefixado do canal de maneira iterativa.

Neste caso, não é necessário modelar matematicamente o problema, ao invés disso basta conceber um algoritmo computacional que, por tentativas, vá modificando o sinal de referência do gerador de ondas até que as variações de nível d'água observadas no sensor fiquem tão próximas quanto se queira daquela desejada.

Mesmo para um software seria muito complicado trabalhar com estas formas de onda no domínio do tempo, e é neste ponto que o emprego da teoria de Fourier passa a ser essencial para a simplificação do problema.

Lançando mão da Fast Fourier Transformer com uma discretização de frequências adequada, pode-se decompor uma forma de onda que, no domínio do tempo se apresenta muito complexa, em dois vetores, um de amplitudes elementares e outro de fases elementares.

Desta forma, pode-se comparar duas formas de onda e decidir quais parâmetros devem ser alterados para que elas se aproximem, basta comparar elemento a elemento dos vetores de referência com aqueles obtidos pelo sensor que se encontra no canal.

A partir desta comparação, é possível estimar as correções que devem ser feitas às amplitudes e fases do sinal a ser aplicado ao gerador de ondas para que o sinal medido pelo sensor se aproxime do de referência.

Feito isso, basta empregar a equação (25) para transformar a forma de onda do domínio da frequência, novamente para o domínio do tempo para dar continuidade ao processo iterativo.

Considera-se que esta metodologia iterativa é a que melhor se adapta ao sistema proposto para o canal de ondas do LHEPUSP, sendo a adotada para o desenvolvimento da pesquisa.

4.3 Quebra-Mares de Berma

Para que se possa entender a idéia da concepção de um quebra-mar de berma é necessário que se compreenda a diferença entre este e um quebra-mar de talude convencional.

Um quebra-mar de enrocamento convencional tem os pesos de seus parâmetros calculados de forma que ele se apresente praticamente estático frente às condições de onda estipuladas em projeto. Já um quebra-mar de berma é concebido de forma que ele possa sofrer deformações até chegar a um perfil estável estática ou dinamicamente.

Segundo PIANC (2003), os quebra-mares de berma podem ser classificados em três tipos:

- Estaticamente estáveis e sem deformação: onde poucos blocos devem movimentar-se, semelhante ao que acontece com os quebra-mares de talude convencionais;
- Estaticamente estáveis e com deformação: onde o perfil da estrutura sofre modificações pela ação das ondas até atingir uma configuração estável, onde cada bloco, individualmente, também se estabiliza;

- Dinamicamente estáveis e com deformação: onde o perfil da estrutura sofre modificações pela ação das ondas até atingir uma configuração estável, mas, neste caso, os blocos ainda podem se movimentar, para cima e para baixo, no talude externo.

Outra característica dos quebra-mares de berma é a alta porosidade, podendo chegar a 45%, o que permite que as ondas sejam absorvidas ao longo da estrutura, o que aumenta a velocidade do fluxo no interior da estrutura, mas, em contrapartida, diminui o “run-up”, permitindo adotar uma menor cota de coroamento.

Em muitos casos, a armadura necessária para quebra-mares de enrocamento tradicional requer blocos superiores a 10 toneladas, o que torna seu processo de extração e transporte extremamente caro.

Uma alternativa para estes casos é o emprego de blocos de concreto, como tetrápodos, por exemplo. Entretanto, para viabilizar esta solução é necessário montar um canteiro de obra com uma central de produção de concreto, o que nem sempre é possível, dadas as localidades onde estas obras são realizadas.

Outra alternativa é a adoção do quebra-mar de berma, que, às custas de uma largura de crista maior, e portanto um maior volume de enrocamento, requer blocos menores que a solução com enrocamento tradicional, mesmo na concepção de equilíbrio estático sem deformação.

Tem-se que quebra-mares dinamicamente estáveis são os que possuem menor custo de implantação, entretanto, quanto maior a deformabilidade da estrutura, maiores as probabilidades de blocos serem quebrados, devido aos impactos, ou de sofrerem abrasão excessiva.

Neste sentido, há uma tendência natural dos projetistas em migrarem para as soluções estaticamente estáveis e sem deformação do perfil, apesar de registros de inúmeros quebra-mares antigos que se deformaram e continuam funcionando bem, sem perda excessiva de pedras.

Desta maneira, a decisão de construir um quebra-mar deformável ou não depende da qualidade das pedras utilizadas e da sua capacidade de resistir às solicitações. Assim, esta decisão somente deve basear-se no custo, se as características técnicas e funcionais forem atendidas.

Muitos aspectos devem ser considerados para o projeto de um quebra-mar de berma:

- Condições do meio;
- Projeto preliminar;
- Disponibilidade de pedras;

- Resistência das pedras;
- Projeto final levando em consideração:

Deformações;

Transporte lateral de sedimentos;

Onda máxima;

Abrasão e proteção à abrasão;

Estabilidade do solo;

Métodos construtivos;

Orçamento.

A degradação sofrida por um quebra-mar de berma depende da superação das condições de projeto, pois assim, a base do quebra-mar dificilmente permanecerá intacta e medidas corretivas deverão ser tomadas para repor a armadura acima da linha de água. Mesmo assim, a manutenção de um quebra-mar de berma é considerada mais barata do que medidas de correção para quebra-mares convencionais, já que, quando necessários, os reparos normalmente restringem-se a um simples descarregamento adicional de blocos de enrocamento.

A publicação da PIANC (2003), que traz uma compilação dos resultados de monitoramento de diversos quebra-mares de berma construídos ao redor do mundo, propõe uma formulação que será descrita a seguir, para determinar estabilidade de um quebra-mar de berma em função das características hidrodinâmicas da região e dos blocos empregados no enrocamento.

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \quad (38)$$

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z \quad (39)$$

Onde:

$N_s = H_o$: é o parâmetro de estabilidade;

$H_o T_o$: é o parâmetro de estabilidade em relação ao período da onda;

H_s : é a altura de onda significativa;

Δ : é a relação de massas específicas, que é dado por: $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$;

ρ_s : é a massa específica dos blocos;

ρ_w : é a massa específica da água;

D_{50} : é a dimensão característica média dos blocos do enrocamento, que é dado por:

$$D_{50} = \left(\frac{W_{50}}{\rho_s} \right)^{1/3};$$

W_{50} : é o peso médio dos blocos;

g : é a aceleração gravitacional;

T_z : é o período médio das ondas.

Existem ainda, modificações apresentadas nesses parâmetros para que se leve em consideração outros fatores que podem influenciar na resposta da estrutura. Estes parâmetros modificados são apresentados a seguir.

$$N_s^* = \frac{(H_s^2 L_o)^{1/3}}{\Delta D_{50}} \quad (40)$$

$$N_s^{**} = \frac{H_k}{C_k \Delta D_{50}} \left(\frac{S_{mo}}{S_{mk}} \right)^{-(1/5)} (\cos \beta_o)^{2/5} \approx \frac{0,89 H_k}{C_k \Delta D_{50}} \quad (41)$$

Onde:

H_k é a altura da onda característica, sendo a médio das 1/50 maiores ondas;

C_k é a relação entre a altura característica e a altura significativa de onda, sendo $H_k/H_s = 1,55$ para águas profundas e alturas de onda seguindo a distribuição de Rayleigh;

L_o é o comprimento de onda em águas profundas, considerando T_z , que é dado por: $L_o = \frac{g T_z^2}{2\pi}$;

S_{mo} é a esbeltez da onda em águas profundas, que é dada por: $S_{mo} = \frac{H_s}{L_o}$;

S_{mk} é a esbeltez da onda característica, sendo: $S_{mk} = 0,03$;

β_o é o ângulo entre a o rumo médio das ondas e a perpendicular ao eixo longitudinal do quebra-mar.

Desta forma pode-se verificar a mobilidade de um quebra-mar de berma a partir da Tabela 1:

Tabela 1 – Critério de mobilidade de um quebra-mar de berma

Regime	$N_s = H_o$ ou N_s^{**}	$H_o T_o$	N_s^*
Pouco movimento	< 1,5 – 2	< 20 – 40	< 3,4 – 5,4
Movimento limitado durante deformação para um perfil estável estaticamente	1,5 – 2,7	40 – 70	5,4 – 7,8
Movimento relevante, dinamicamente estável.	> 2,7	> 70	> 7,8

Outros dois parâmetros importantes no cálculo de quebra-mares de berma são a recessão da berma rec e a profundidade de interseção entre os perfis inicial e final da estrutura h_f . Estes parâmetros podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28 – Recessão da berma e profundidade de interseção

As Equações (42) e (43), foram calibradas por PIANC (2003) a partir de diversos ensaios em modelos físicos Dinamarqueses e Noruegueses e permitem o cálculo dos parâmetros rec e h_f respectivamente.

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^2 + 0,11 (H_o T_o) - (-9,9 f_g^2 + 23,9 f_g - 10,5) - f_d \quad (42)$$

$$\frac{h_f}{D_{50}} = 0,2 \frac{d}{D_{50}} + 0,5 \quad (43)$$

Onde:

f_g : é o fator de gradação, que é dado por: $f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}}$;

f_d : é o fator de profundidade, que é dado por: $f_d = -0,16 \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 4,0$;

d : é a profundidade em frente ao quebra-mar.

Segundo os autores, as condições para a validade destas equações são:

$$1,3 < f_g < 1,8 \quad \text{e} \quad 12,5 < \frac{d}{D_{50}} < 25.$$

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS

5.1 Premissas

Para nortear o desenvolvimento do sistema de controle da geração de ondas para o canal do LHEPUSP foram adotadas algumas premissas, são elas:

- 1) O sistema deve ser digital e empregar a linguagem LabVIEW, que é voltada à programação para instrumentação virtual, da qual o LHEPUSP possui uma licença acadêmica, para facilitar futuras melhorias;
- 2) O sistema deve ser capaz de se comunicar com o inversor de frequência, com o sensor potenciométrico e com as pontas capacitivas existentes no Laboratório;
- 3) O sistema deve ser capaz de gerar trens de ondas regulares e irregulares a partir de sinais de referência, com precisão adequada a aplicações de engenharia;
- 4) Atuando na geração de ondas regulares, o sistema deve empregar o método do zero ascendente para calcular a altura e o período médios das ondas geradas e compará-los com os correspondentes parâmetros das ondas de referência;
- 5) Atuando na geração de ondas irregulares, o sistema deve empregar o espectro de energia da agitação calculado a partir da FFT para compará-lo com o correspondente espectro do trem de ondas de referência;
- 6) O sistema deve lançar mão de uma etapa de calibração para ajustar o trem de ondas gerado, em relação ao de referência;
- 7) O sistema deve possuir uma interface amigável com o usuário.

5.2 Desenvolvimento Conceitual do Sistema

Para que se possa entender o princípio de funcionamento do sistema de controle que foi desenvolvido, é necessário compreender como funciona o inversor de frequência que controla o motor.

Em linhas gerais, a função do inversor é a de variar a frequência da corrente que atravessa a bobina do motor para que ele gire com diferentes frequências angulares, mantendo o torque constante, ou seja, mantendo a capacidade de transferir potência para o restante do sistema de geração.

Para que se possa controlar a velocidade de rotação do motor, o inversor possui uma entrada de sinal que pode variar de -10 a 10 volts, sendo que, se for introduzido -10 volts o motor passará a girar no limite de sua velocidade em um sentido, se for introduzido 0 volts o motor parará de girar, já se for introduzido 10 volts, o motor passará a girar no seu limite de velocidade no sentido oposto. Desta forma, para valores intermediários de tensão, o motor assumirá velocidades intermediárias de rotação.

Desta maneira, desenvolveu-se a malha interna de controle como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Esquema de funcionamento da malha interna do sistema de controle

Esta parte do sistema parte de um sinal de referência para o movimento da placa, já no domínio do tempo, sendo que este, para cada instante, é subtraído da posição em que se encontra o gerador, dando origem a um valor que representa quão longe da posição desejada se encontra o batedor.

Esta diferença passa por um controlador PID (proporcional, integrativo e derivativo), cujos parâmetros foram ajustados experimentalmente, de forma que, na sua saída, o sinal esteja condicionado, entre -10 e 10 volts e imponha uma certa rotação ao motor que seja tanto maior, quanto maior a distância entre a posição desejada e aquela ocupada pelo gerador.

Desta maneira, se fosse ajustado um valor de referência constante, após alguns instantes de tempo, o gerador passaria a ocupar a posição determinada, sendo que, neste instante, a diferença entre a referência e a posição ocupada pelo gerador passaria a ser nula, de forma que a tensão de saída do controlador passaria a ser de 0 volts, fazendo com que o motor parasse de girar.

Mas, como na geração de ondas o valor da referência varia a cada instante de tempo, tem-se que o gerador irá acompanhar este sinal com um atraso tanto menor, quanto melhor ajustados estiverem os parâmetros do PID.

Com este sistema pode-se garantir que a placa do gerador irá se mover de acordo com o sinal de referência, entretanto, como foi possível verificar a partir da conceituação teórica sobre os princípios de geração de ondas em canais, o movimento do gerador não é transferido integralmente para a superfície d'água adjacente ao batedor, ainda mais se considerarmos uma forma de onda irregular.

Seria ideal, se fosse possível criar um sistema de controle realimentado diretamente por uma ponta capacitiva, entretanto, para controlar o motor satisfatoriamente é necessário que os intervalos de tempo sejam de décimos a centésimos de segundo, sendo que a onda gerada leva da ordem de dezenas de segundos para se propagar pelo canal até a posição onde se deseja obter a onda calibrada, inviabilizando esta solução.

Desta forma, foi necessário criar uma malha de realimentação externa à primeira, para fazer com que fosse efetivamente transferida para a superfície líquida, a referência desejada, fosse ela, um trem de ondas com uma determinada altura e período (ondas regulares), ou um determinado espectro de energia (ondas irregulares).

Neste sentido, foi desenvolvida a segunda malha de realimentação que, a partir dos dados da variação da superfície líquida, coletados durante um determinado tempo por uma ponta capacitiva, calcula os parâmetros do trem de onda lido e os compara com os de referência.

Mais especificamente, esta segunda malha compara as alturas e períodos médios do trem de ondas gerado com os de referência, no caso da geração de ondas regulares, e o espectro de energia gerado com o de referência, no caso da geração de ondas irregulares.

Como resultado dessa comparação, as diferenças entre os parâmetros são aplicadas a um outro controlador, que atua como se fosse um equalizador, modificando o sinal de referência para o movimento da placa de forma que, os parâmetros medidos na água se aproximem mais dos de referência a cada iteração.

As Figuras 30 e 31 apresentam o esquema completo de funcionamento do sistema de geração de ondas desenvolvido para a geração de ondas regulares e irregulares respectivamente.

Figura 30 – Esquema conceitual do sistema de geração de ondas na geração de ondas regulares

Figura 31 – Esquema conceitual do sistema de geração de ondas na geração de ondas irregulares

5.3 Aquisição e Desenvolvimento dos Hardwares Necessários

Para que se pudesse desenvolver o sistema digital de controle da geração de ondas, foi necessária a aquisição de alguns hardwares e o desenvolvimento de outros, para que se tornasse possível a comunicação entre o microcomputador e os demais componentes do sistema, que são:

- O inversor de frequência do motor;
- O sensor potenciométrico que realimenta o sistema em relação à posição do batedor ao longo do tempo;
- As pontas capacitivas que realimentam o sistema em relação ao nível d'água ao longo do tempo.

Neste sentido adquiriu-se junto a National Instruments uma placa de aquisição A/D (analógico digital), cuja função é a de transformar um sinal contínuo em tensão em uma seqüência de bytes que podem ser lidos pelo software que se pretende desenvolver e vice-versa, ou seja, transformar uma seqüência de bytes enviados pelo software em um sinal analógico contínuo.

O modelo da placa é NI-DAQ-693, e ela possui dezesseis canais de entrada (inputs) analógicos no modo comum, ou oito no modo diferencial, mais oito canais de saída (outputs), com a vantagem que esta placa se comunica diretamente com o software LabVIEW onde se pretende desenvolver o sistema de controle. A Figura 32 mostra a placa A/D instalada no microcomputador.

Figura 32 – Placa A/D instalada no microcomputador

Como as entradas e saídas desta placa se concentram em um único conector de cem pinos, foi necessário adquirir um cabo específico e confeccionar uma caixa de conexões para que fosse possível transferir os sinais oriundos dos diversos equipamentos conectados ao sistema à placa A/D. A Figura 33 mostra a caixa de conexões ligada ao microcomputador.

Figura 33 – Caixa de conexões para aquisição de dados externos

No que diz respeito às pontas capacitivas, não foi necessário criar nenhum tipo de acessório para conectá-las ao sistema, visto que o nível de tensão enviado por elas já se encontrava dentro da faixa de tensão de trabalho da placa A/D ($\pm 10V$). Entretanto, o sensor potenciométrico possuía uma faixa de tensão de saída de 0 a 15V, sendo necessária a confecção de um circuito que ajustasse o sinal, dentro da faixa de trabalho do A/D.

Para um melhor entendimento do circuito confeccionado, se faz necessário entender como funciona o sensor potenciométrico (Figura 9), que nada mais é do que um resistor linear de 1 metro de comprimento, com um terminal intermediário fixado ao carrinho que movimenta a placa, onde, aplicando-se uma tensão nas suas extremidades e extraindo-se a tensão entre um de seus terminais extremos, e aquele intermediário, obtém-se uma tensão proporcional à posição ocupada pelo batedor de ondas naquele instante. A Figura 34 apresenta um esquema de funcionamento do sensor potenciométrico.

Figura 34 – Esquema de funcionamento do sensor potenciométrico

Entendido isto, deve-se salientar que a alimentação das extremidades do sensor é feita a partir de uma fonte de tensão interna ao inversor de frequência (15 VC), pois esta é própria para esta finalidade, sendo para tanto muito estável, pois, caso contrário, qualquer variação da tensão poderia ser interpretada como uma movimentação do batedor.

Neste sentido, optou-se por instalar dois resistores ajustáveis conectados às extremidades do sensor, de modo que pudessem ser regulados de forma que, com o batedor posicionado junto ao fim de curso de barlar, o valor da tensão fosse praticamente nulo, já quando o batedor estivesse junto ao fim de curso de sotamar, a tensão ficasse o mais próximo possível dos 10 volts (Figura 35).

Figura 35 – Esquema do sensor potenciométrico com o circuito acoplado

Outro equipamento adquirido foi um estabilizador de tensão de 1,5 kVA, que foi conectado a um circuito de tomadas instalado na sala de instrumentação e ao longo do canal de ondas, para minimizar os problemas de variações de tensão na alimentação do computador

e das pontas capacitivas que estavam gerando ruídos nos sinais transferidos ao computador. As Figuras 36 e 37 mostram o estabilizador e o circuito de tomadas instalados.

Figura 36 – Estabilizador de tensão instalado

Figura 37 – Circuito de tomadas instalado ao longo do canal

5.4 Software de Controle da Geração de Ondas

Baseando-se no sistema conceitual concebido, foram desenvolvidas, ao longo da pesquisa, cerca de 50 versões para o software de controle da geração de ondas, sendo cada uma delas, um aprimoramento da anterior.

Neste item, será apresentada a versão final do software desenvolvido, bem como será detalhado o seu funcionamento.

5.4.1 Interface com o Usuário

As Figuras 38, 39 e 40 mostram cada um dos painéis da interface com o usuário do software desenvolvido.

Figura 38 – Painel “Dados de Entrada” do software de controle da geração de ondas

Figura 39 – Painel “Geração” do software de controle da geração de ondas

Figura 40 – Painel “Dados Internos” do software de controle da geração de ondas

No painel “Dados de entrada” o usuário pode optar pelo modo de operação que ele desejar, são eles:

- Calibração: Modo onde o software permite a atuação da malha externa de controle de forma a variar os coeficientes de calibração para ajustar a forma do trem de ondas lido no ponto de interesse.

- Ensaio: Modo onde o software atua somente a malha interna para a geração de ondas cujos coeficientes já tenham sido previamente calibrados.

Para o modo “Calibração” o usuário pode optar ainda pela convergência do trem de ondas a partir das alturas de ondas (apropriado para geração de ondas regulares) ou a partir do espectro de energia da agitação (apropriado para a geração de ondas irregulares).

Para cada tipo de convergência está associado um formato de entrada de dados, sendo que, para a geração de ondas regulares a entrada de dados é feita através da digitação dos parâmetros na própria tela, já para a geração de ondas irregulares, a partir de um arquivo no formato “txt”, cujo detalhamento constitui o APÊNDICE A deste trabalho.

No caso da entrada de dados a partir do arquivo texto, o software mostra ao usuário os dados que foram carregados, bem como, em todos os casos, um gráfico com a forma de onda de referência.

No modo “Ensaio” a entrada de dados é feita de maneira análoga àquela realizada no modo “Calibração”, estando detalhada no APÊNDICE B deste trabalho.

Em ambos os tipos de convergência o usuário deve escolher o caminho e o nome do ensaio, nome este que passa a ser a base dos nomes dos quatro arquivos de saída gerados pelo software, no modo calibração, ou do único arquivo de saída gerado no modo ensaio. O detalhamento dos arquivos de saída gerados pelo sistema constituem o APÊNDICE C deste trabalho.

Neste painel ainda deve ser informado o arquivo que contém os parâmetros de calibração dos sensores que fazem a leitura da posição da placa (sensor potenciométrico) e do nível d’água (pontas capacitivas), bem como em qual canal se encontra o sensor que informa a posição da placa e qual das pontas deverá ser utilizada para a calibração da onda.

O detalhamento do modo como deve ser montado o arquivo de calibração dos sensores, bem como a descrição do procedimento adotado para calibração dos mesmos compõem o APÊNDICE D deste trabalho.

Existe ainda uma última opção que é a de filtrar os sinais dos sensores. Caso esta opção seja selecionada é passado um filtro do tipo passa baixa nos sinais dos sensores de

modo a eliminar todas as frequências superiores a 5 Hertz, visto que o sistema só responde a frequências de até cerca de 2 Hertz.

Quanto ao painel “Ensaio”, este permite entre outras coisas, que o usuário inicie e finalize o processo de geração de ondas propriamente dito, interrompa a geração caso ocorra algum problema com o sistema e encerre o programa.

Vale salientar que, quando acionado o botão de finalizar o ensaio, o sistema continua o processo até que termine a iteração atual da malha interna de controle, encerrando em seguida. Ao contrário da opção interromper a geração, onde a atuação é imediata.

Este painel possui ainda um mostrador gráfico em tempo real das formas de onda envolvidas no processo geração, são eles:

- Forma de onda de referência;
- Sinal de referência para a placa do gerador;
- Movimento executado pelo gerador;
- Níveis d’água lidos por até quatro pontas capacitivas.

Existem ainda outros dois mostradores gráficos que funcionam apenas na opção calibração com modo espectral de convergência. Nestes gráficos são apresentados os espectros de energia e de amplitudes da forma de onda de referência e da ponta escolhida para a calibração do sistema.

Estes dois gráficos são atualizados a cada passagem do sistema pela malha externa de realimentação.

Por fim, existem dois mostradores numéricos e um de barras que indicam o tempo de geração de onda já transcorrido na passagem atual pela malha interna e o tempo restante de atuação da malha interna antes da próxima passagem pela malha externa.

Já o painel “Dados Internos” traz os principais parâmetros e variáveis envolvidas no processo de geração de ondas, bem como seus valores “default”. Assim, um usuário mais experiente tem a opção de poder variar alguns desses parâmetros de forma a melhorar a eficiência do processo de geração de ondas para o seu sistema e entrada de dados.

5.4.2 Diagrama de Blocos

Na linguagem LabVIEW, o desenvolvimento do software não é feito em linhas de programação, mas sim, a partir do encadeamento de blocos com funções específicas.

O APÊNDICE E mostra o diagrama de blocos desenvolvido para o software integrado de controle da geração de ondas.

Na região mais à esquerda da imagem (frame inicial), as variáveis de interesse tem seus valores pré-ajustados.

Em seguida existe uma malha inicial com as seguintes funções:

- Permitir que o usuário ligue o conjunto motor-inversor, mantendo a placa no centro de sua excursão;
- Aquisitar os dados de entrada feitos pelo usuário;
- Transformar os parâmetros de referência inseridos pelo usuário no um trem de ondas de referência.

No frame seguinte encontram-se as duas malhas de controle, que serão detalhadas a seguir, seguindo a seqüência cronológica em que aparecem.

Primeiro, existe uma malha pertencente à malha externa de controle, com as seguintes funções:

-(Software no modo Calibração): Calcular o sinal de referência a ser aplicado ao movimento da placa em função dos parâmetros de referência e dos coeficientes de calibração iniciais, caso seja a primeira vez que a malha está sendo executada ou daqueles gerados pela própria malha externa na iteração anterior

-(Software no modo Ensaio): Simplesmente retransmitir o sinal de controle da placa carregado pelo usuário (detalhes ver APÊNDICE B).

Na seqüência, encontra-se a malha interna de controle, cujas funções são:

- Fazer a leitura em tensão de todos os sinais oriundos da placa A/D, incluindo a posição da placa do gerador, dada pelo sensor potenciométrico e os níveis d'água medidos pelas pontas a cada intervalo de tempo Δt ;
- Transformar, a partir dos dados de calibração dos sensores (ver APÊNDICE D) os valores lidos em tensão em milímetros no modelo;
- Verificar se a posição ocupada pelo batedor está dentro dos limites permitidos. Se sim, continuar, se não, interromper a geração (fim de curso digital);
- Filtrar os valores lidos, caso esta opção esteja selecionada;

- Comparar a posição dada pelo sinal de referência para o movimento da placa com aquela ocupada pelo batedor;
- Inserir a diferença calculada anteriormente no controlador PID para que ele calcule o valor da tensão que deve ser aplicada no inversor;
- Enviar a tensão calculada para o canal de saída da placa A/D que está conectado à entrada do inversor;
- Inserir no gráfico do painel “Geração” da interface com o usuário, a cada intervalo de tempo Δt , os valores instantâneos do trem de ondas de referência, do sinal de referência para o movimento da placa, do sensor potenciométrico e das pontas capacitivas;
- Gravar no arquivo “forma de onda” os mesmos valores inseridos no gráfico;
- Calcular e enviar aos respectivos mostradores, o tempo transcorrido e o tempo restante de operação da malha interna.

Ainda na seqüência, existe a malha que exerce a função do bloco que, no projeto conceitual do sistema, foi chamado de equalizador.

Esta malha atua após cada iteração da malha interna de controle, apenas quando o software está no modo “Calibração”, sendo que as funções desta malha são:

- Ler o trem de ondas inteiro gerado durante a atuação da malha interna de controle;
- Separar o trecho do trem de ondas a ser analisado;
- (Software com o tipo de convergência ajustado para Altura de Onda):
Calcular a média das alturas de onda geradas;
- (Software com o tipo de convergência ajustado para Altura de Onda):
Comparar a média das alturas de onda geradas com a de referência;
- (Software com o tipo de convergência ajustado para Espectro de Energia):
Calcular o espectro de energia das ondas geradas, a partir da FFT;
- (Software com o tipo de convergência ajustado para Espectro de Energia):
Mostrar graficamente os espectros de energia e amplitude dos trens de onda de referência e gerado
- (Software com o tipo de convergência ajustado para Espectro de Energia):
Comparar, frequência a frequência, o espectro de energia gerado com o de referência;
- Calcular os novos coeficientes de calibração, de forma que, da aplicação desses coeficientes aos parâmetros de referência, resulte o sinal de referência para o movimento da placa para a próxima iteração da malha interna de controle;

- Verificar se algum dos coeficientes de calibração calculados está acima do coeficiente máximo e, em caso positivo, limitá-lo.

Por fim, existe uma última malha, que passa a atuar quando a geração de ondas cessa, seja porque o ensaio terminou, seja porque a geração foi interrompida pelo usuário ou por ativação do fim de curso digital.

As funções da malha final são:

- Retornar e manter a placa do gerador no centro de sua excursão até que o usuário desligue a conjunto motor-inversor;
- Mostrar as informações finais do ensaio para o usuário;
- Fazer a gravação dos seguintes arquivos de saída (ver APÊNDICE C):
  - Espectro de Energia;
  - Coeficientes de calibração;
  - Range.

5.5 Testes de Verificação do Sistema de Controle da Geração de Ondas

Nos itens 5.5.1 a 5.5.5 estão apresentados os testes de verificação do funcionamento do software de controle da geração de ondas desenvolvido ao longo de seu desenvolvimento.

5.5.1 Teste Inicial com Espectro de Energia com Baixa Discretização

5.5.1.1 Finalidade do teste

Este teste foi realizado no sistema, ainda na sua versão inicial, com o intuito de verificar se o sistema de convergência da malha externa que estava sendo desenvolvido estava funcionando adequadamente.

5.5.1.2 Procedimento adotado

Foi inserido um espectro de energia de amplitudes aleatórias com $\Delta f = 0,1\text{Hz}$ e cerca de 15 raias espectrais, que foi simulado durante seis iterações da malha de controle

5.5.1.3 Resultados e discussão

As Figuras 41 a 48 mostram o processo de convergência do espectro de energia ensaiado, sendo que a curva branca traduz o espectro de referência e a vermelha o espectro lido a partir da ponta capacitiva.

Figura 41 – Espectros de referência e medido antes da primeira iteração da malha externa de controle

Figura 42 – Espectros de referência e medido após a primeira iteração da malha externa de controle

Figura 43 – Espectros de referência e medido após a segunda iteração da malha externa de controle

Figura 44 – Espectros de referência e medido após a terceira iteração da malha externa de controle

Figura 45 – Espectros de referência e medido após a quarta iteração da malha externa de controle

Figura 46 – Espectros de referência e medido após a quinta iteração da malha externa de controle

Figura 47 – Espectros de referência e medido após a sexta iteração da malha externa de controle

Figura 48 – Espectros de referência e medido após a sétima iteração da malha externa de controle

As Figuras 49 e 50 mostram os trens de ondas de referência e gerado, antes da primeira e após a última iteração da malha externa do software de geração desenvolvido.

Figura 49 – Trem de ondas gerado antes da primeira iteração da malha externa de controle

Figura 50 – Trem de ondas gerado após a sétima iteração da malha externa de controle

Deve-se ressaltar que, no domínio do tempo, dois trens de onda com o mesmo espectro de energia apresentam diferentes formas em diferentes pontos do canal, pois as diversas frequências, cuja somatória compõe o espectro de energia da agitação se propagam com diferentes celeridades pelo canal, o que faz com que seus ângulos de fase se modifiquem ao longo do espaço.

Apesar do espectro de energia gerado não ter se igualado ao de referência, nota-se que a atuação da malha interna de controle, do modo como foi implementada, faz com que os espectros se aproximem a cada iteração.

5.5.2 Teste com Trem de Ondas Regular

5.5.2.1 Finalidade do teste

Este teste foi realizado com o intuito de verificar o funcionamento do sistema de convergência espectral, na geração de um trem de ondas regulares, visto que onda regular é, em princípio um caso particular das irregulares onde, toda a energia se concentra em uma única frequência.

5.5.2.2 Procedimento adotado

Para o teste, foi empregado um trem de ondas de período $T_m = 2,0s$ e amplitude $A_m = 80mm$. Considerando-se uma escala de 1:20 resulta em uma onda com $T_p = 8,9s$ e $A_p = 1,6m$. A Figura 51 representa o trem de ondas resultante.

Figura 51 – Trem de ondas regulares com $T_m = 2,0s$ e $A_m = 80mm$

Este trem de ondas regulares pode ser entendido como um caso particular de uma onda irregular cujo espectro de amplitudes é dado pela Figura 52.

Figura 52 – Espectro de amplitudes de trem de ondas regulares com $T_m = 2,0 s$, $A_m = 80 mm$ e $\Delta f_m = 0,01 Hz$

5.5.2.3 Resultados e discussão

A Figura 53 apresenta o espectro de amplitudes obtido para o teste realizado com ondas regulares.

Figura 53 – Espectro de amplitude obtido no teste com ondas regulares

É possível observar que rapidamente o espectro medido converge para o de referência, entretanto pode-se observar a existência de picos nas frequências múltiplas daquela gerada.

Estes múltiplos refletem o fato de que as ondas estão se propagando em águas rasas, pois seu efeito é o de estreitar as cristas e alargar os cavados das ondas, que adquirem um aspecto cnoidal.

A Figura 54 mostra o efeito da introdução dos harmônicos múltiplos na forma de onda propagada pelo canal.

Figura 54 – Efeito dos harmônicos múltiplos na forma de onda propagada pelo canal

Este resultado reflete dois aspectos importantes a saber:

O primeiro, de que não existem ondas regulares em água rasa, se considerarmos a sua definição espectral.

E o segundo, de que quando uma onda regular é calibrada pelo método espectral do software desenvolvido, apenas seu harmônico fundamental é calibrado, de forma que seus múltiplos continuam a existir. Sendo assim, se medirmos sua altura pelo método do zero ascendente, ela será, certamente diferente da altura de referência. Além disso, se considerarmos a energia total do trem de ondas como sendo a integral do espectro de energia, ter-se-á, pelo mesmo motivo, que a energia do trem de ondas gerado também será superior à de referência.

Neste sentido, para viabilizar a execução de ensaios com ondas regulares, com alturas e períodos determinados, verifica-se realmente, a necessidade de fazer sua convergência a partir dos parâmetros H_z e T_z .

5.5.3 Teste com espectro de energia parametrizado

5.5.3.1 Finalidade do teste

Este teste foi realizado com o intuito de verificar o funcionamento do sistema de convergência espectral, na geração de um trem de ondas irregulares, baseado em um espectro de energia parametrizado.

5.5.3.2 Procedimento adotado

Neste teste foi adotado como referência um trem de ondas gerado a partir de um espectro de energia de Bretschneider com os parâmetros de protótipo $H_z = 5,7m$ e $T_z = 9,0s$. Com estes dados pôde-se montar o espectro de energia representado pela Figura 55.

Figura 55 – Espectro de energia de Bretschneider com $H_z = 5,7m$ e $T_z = 9,0s$

Empregando-se uma escala de 1:20 e um $\Delta f_m = 0,01Hz$ e um espectro de fases aleatórias obteve-se o espectro de amplitudes no modelo e a forma do trem de ondas no domínio do tempo representados respectivamente pelas Figuras 56 e 57.

Figura 56 – Espectro de amplitudes com $H_z = 100\text{mm}$ e $T_z = 2,0\text{s}$

Figura 57 – Forma de onda obtida a partir do espectro de Bretschneider

5.5.3.3 Resultados e discussão

A Figura 58 apresenta o espectro de amplitudes obtido para o teste realizado com o espectro de Bretschneider.

Figura 58 – Espectro de amplitudes obtido no teste com o espectro de Bretschneider

Já a Figura 59 apresenta o espectro de energia na escala do protótipo obtido para o teste realizado com o espectro de Bretschneider.

Figura 59 – Espectro de energia obtido no teste com o espectro de Bretschneider

Assim como para ondas regulares, o sistema não consegue convergir nas frequências mais altas do espectro de Bretschneider, provavelmente os múltiplos, cujos harmônicos fundamentais se encontram nas diversas faixas de frequência mais baixas começam a se somar, fazendo com que o espectro tenha uma maior densidade de energia para as frequências mais altas.

De fato, o espectro de Bretschneider é válido para águas profundas, o que nos leva a refletir até que ponto as maiores amplitudes obtidas nas frequências mais altas são efeito de

distorções na modelagem do espectro, ou até que ponto são efeitos da propagação do espectro por águas rasas.

De qualquer forma, pode-se dizer que o sistema converge bem em relação à faixa mais energética do espectro.

5.5.4 Teste com espectro de energia real

5.5.4.1 Finalidade do teste

Este teste foi realizado no intuito de verificar o funcionamento do sistema de convergência espectral, na geração de um trem de ondas irregulares, baseado em um espectro de energia real.

5.5.4.2 Procedimento adotado

Para este teste foi empregado o espectro de energia de água profunda, calculado a partir do registro de uma tempestade feito ao largo da foz do rio Doce na escala 1:30. O registro no domínio do tempo e os espectros de amplitude, de fase e de energia, foram apresentados anteriormente nas Figuras 21, 22, 23 e 24.

4.5.4.3 Resultados e discussão

A Figura 60 apresenta o espectro de amplitudes obtido para o teste realizado com o espectro real calculado a partir do registro feito ao largo da foz do Rio Doce.

Figura 60 – Espectro de amplitudes obtido no teste com o espectro real

Já a Figura 61 apresenta o espectro de energia na escala real obtido para o teste realizado com o espectro real calculado a partir do registro feito ao largo da foz do Rio Doce.

Figura 61 – Espectro de energia obtido no teste com o espectro real

Tendo em vista a irregularidade característica do espectro real, o sistema conseguiu convergir muito bem, até nas frequências mais altas, restando apenas alguns harmônicos múltiplos que não puderam ser eliminados.

Este resultado demonstra ser necessário obter o espectro de energia na profundidade em que se encontra a obra que será estudada.

5.5.5 Teste na presença de um quebra-mar

5.5.5.1 Finalidade do teste

Este teste foi realizado no intuito de verificar o funcionamento do sistema de convergência espectral, na presença de uma estrutura reflexiva.

5.5.5.2 Procedimento adotado

Para este teste, foi montado um quebra-mar fictício, sobre a praia absorvedora de sotamar (Figura 62).

Na sequência, foram simulados, com o software no modo calibração, dois espectros de energia, um de ondas regulares e outro de ondas irregulares na presença deste quebra-mar.

Figura 62 – Ensaio de verificação do sistema de geração de ondas na presença de um quebra-mar

5.5.5.3 Resultados e discussão

Na ocasião do ensaio não houve registro dos trens de ondas ensaiados, entretanto, pode-se perceber que a introdução da obra aumenta sobremaneira a reflexão das ondas no canal, o que já era esperado, entretanto o sistema de controle da geração de ondas não possui meios de distinguir a onda que está indo de encontro à estrutura estudada daquela que está voltando por reflexão.

De fato, no real esta reflexão também ocorrerá, porém na natureza as ondas refletidas vão para mar aberto, enquanto no canal elas podem atingir a placa do gerador de ondas e refletir novamente na direção da estrutura que está sendo estudada.

O que pode ser verificado, na prática, é que o sistema de geração de ondas até consegue iniciar um processo de convergência, entretanto o espectro que o sistema tenta fazer convergir para o de referência é, na verdade, a soma dos espectros de onda incidente e refletida, o que faz com que o sistema de geração tenda a modificar a energia da onda que ele está gerando para compensar a parcela de energia que está voltando em direção ao gerador.

Com isso, percebe-se que a presença dos filtros metálicos é muito importante para filtrar as ondas refletidas, de forma a diminuir a probabilidade dessas ondas sofrerem re-reflexão.

Outro fato importante é que a malha de realimentação externa não deve atuar durante o ensaio, desta forma os parâmetros do espectro da onda que se deseja ensaiar devem ser obtidos antes da instalação do quebra-mar, de forma que uma vez que o espectro gerado já tenha convergido suficientemente bem para os valores de referência, os coeficientes de calibração devem ser salvos, a estrutura deve ser montada e, durante os ensaios, a malha de realimentação externa do sistema não deve atuar.

Obviamente, em função das reflexões na estrutura a forma de onda observada durante o ensaio vai ser diferente daquela que foi calibrada na condição de mínima reflexão possível, entretanto, desde que se possa considerar que as ondas refletidas são amortecidas pela passagem pelo filtro de forma que apenas uma parcela pouco significativa da energia delas consiga refletir novamente na placa, passar novamente pelos filtros e atingir novamente o quebra-mar, pode-se dizer que a onda que realmente está incidindo na estrutura sob estudo é aquela que foi obtida na condição sem reflexão.

6 OBTENÇÃO DE ESPECTROS DE ENERGIA DE ÁGUAS RASAS.

6.1 Introdução

Para a modelação física em canal de trens de ondas propagando-se em águas rasas, é necessário que o espectro de energia de referência, fornecido ao sistema de controle da geração de ondas seja compatível com a profundidade do estudo. Caso contrário, a presença do fundo, causará distorções no espectro modelado, que não conseguem ser compensadas pelo sistema. Isto fica evidenciado nos testes de validação realizados com o sistema de geração.

Como todos os espectros teóricos ou paramétricos estudados são válidos apenas para águas profundas, passa a ser necessário desenvolver uma metodologia para obtenção de espectros de energia da agitação no local de implantação da obra a partir de espectros de águas profundas.

Vale salientar que a obtenção de espectros reais em águas rasas a partir da instalação de ondógrafos é plenamente factível, entretanto, para o dimensionamento de um quebra-mar de enrocamento, seria necessário, no mínimo, um ano de coleta de dados de onda na região de interesse, mesmo assim, os métodos existentes de extrapolação de dados de ondas para o períodos de retorno adequados ao projeto de quebra-mares não permitiriam seu uso, pois são todos paramétricos (baseados em parâmetros como H_s e T_s).

Para a finalidade proposta, decidiu-se empregar o software de modelação numérica MIKE 21, do DHI (Danish Hydraulic Institute), cujo LHEPUSP possui uma licença educacional.

Este software possui dois módulos de irradiação de ondas, o NSW – Near Shore Wave e o Boussinesq, entretanto, apenas o módulo de Boussinesq permite o emprego de ondas irregulares, fazendo com que este fosse escolhido.

6.2 Módulo de Boussinesq (BW) do MIKE 21

Silva (2003) fez uma descrição completa do modelo BW do MIKE 21, que será resumida a seguir.

6.2.1 Descrição do Método

O módulo BW, do MIKE 21 é baseado em um aprimoramento das equações de Boussinesq. Sendo um modelo bidimensional (que considera o efeito da onda integrado na coluna líquida), ele é capaz de reproduzir os efeitos combinados da maioria dos fenômenos de onda de interesse da Engenharia Costeira e Portuária, como:

- Empolamento;
- Refração;
- Difração;
- Reflexão parcial e transmissão;
- Interação entre as ondas não lineares;
- Espalhamento da frequência;
- Espalhamento direcional;

As equações da continuidade e de quantidade de movimento nas duas dimensões horizontais solucionadas pelo módulo BW são:

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (44)$$

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} - \Omega Q + n\Psi_1 = 0 \quad (45)$$

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} - \Omega P + n\Psi_2 = 0 \quad (46)$$

Onde os termos de dispersão Ψ_1 e Ψ_2 são definidos como:

$$\Psi_1 = -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(P_{xt} + Q_{yt}) - nBg d^3(\xi_{xxx} - \xi_{xyy}) - dd_x\left(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + nBg d(2\xi_{xx} - \xi_{yy})\right) - dd_y\left(\frac{1}{6}Q_{xt} + nBg d\xi_{xy}\right) \quad (47)$$

$$\Psi_2 = -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(Q_{xt} + P_{yt}) - nBg d^3(\xi_{xxx} - \xi_{xyy}) - dd_y\left(\frac{1}{3}Q_{yt} + \frac{1}{6}P_{xt} + nBg d(2\xi_{yy} - \xi_{xx})\right) - dd_x\left(\frac{1}{6}P_{yt} + nBg d\xi_{xy}\right) \quad (48)$$

Sendo:

P: fluxo de densidade na direção x, m³/m/s

Q: fluxo de densidade na direção y, m³/m/s

B: fator de dispersão de Boussinesq

h: profundidade total (=d + ξ), m

n: porosidade

g: aceleração da gravidade (=9.81 m/s²)

C: coeficiente de Chezy, m^{1/2}/s

α: coeficiente de atrito para fluxo laminar nos poros

β: coeficiente de atrito para fluxo turbulento nos poros

ξ: elevação da superfície d'água acima do datum, m

Ω: parâmetro de Coriolis

Os índices x,y e t denotam as derivadas parciais em relação às variáveis de espaço e ao tempo, respectivamente.

No método numérico empregado, denominado SYSTEM 21, as equações diferenciais são espacialmente discretizadas numa grade retangular (Figura 63), onde valores escalares, tais como a elevação de superfície, são definidos na metade do segmento entre dois nós de grade, enquanto que as componentes dos fluxos são definidas no segmento entre dois nós das grades adjacentes nas respectivas direções.

Figura 63 – Modelo de grade empregado no modelo BW

6.2.2 Parâmetros básicos do modelo

6.2.2.1 Espaçamento da grade

O espaçamento entre os nós da grade deve ser escolhido de tal forma a prover uma resolução adequada das principais características das ondas consideradas, sendo que, para a maioria das aplicações práticas, de 7 a 10 pontos da grade por comprimento de onda é suficiente.

6.2.2.2 Período de onda mínimo

O período de onda mínimo que pode ser calculado na simulação depende da máxima profundidade no modelo e se os termos de água profunda estão incluídos. Se os termos de água profunda estão excluídos da análise, o período de onda mínima pode ser calculado a partir da relação $h_{máx}/L_0 = 0,22$, onde $h_{máx}$ é a profundidade máxima e L_0 é o comprimento de onda em água profunda ($L_0 = 1,56T^2$). Incluindo os termos de água profunda, tem-se aumenta para $h_{máx}/L_0 = 0,5$.

6.2.2.3 Número de Courant

O número de Courant descreve o número de pontos da grade que a onda propagará em um passo de tempo, sendo definido como:

$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (49)$$

Onde c é a velocidade de propagação da onda, Δt é o passo de tempo, e Δx é o espaçamento da grade. O número de Courant deverá ser menor ou igual a unidade.

6.2.2.4 Intervalo do passo de tempo

Caso os termos de água profunda sejam excluídos, bastam valores entre 8 a 10 passos de tempo por período. Já, se os termos de água profunda forem incluídos, o período de onda mínimo deverá estar entre 25 a 35 passos de tempo, para evitar instabilidade e atenuação da energia da onda.

6.2.2.5 Termos de água profunda

Os termos de água profunda são correções nas relações de dispersão do equacionamento original de Boussinesq, para melhorar os resultados da propagação de ondas em maiores profundidades, permitindo que a relação $h_{\text{máx}}/L_0$ passe de 0,22 para 0,5.

6.2.2.6 Bordas do modelo

Com relação à modelagem das ondas, é importante observar que um contorno aberto é completamente reflexivo. Esta é a razão pela qual a geração das ondas internas é freqüentemente usada, ao invés da geração de ondas nos contornos abertos.

As elevações da superfície nas bordas fechadas, também não podem ser simuladas, de forma que um contorno fechado não permite que o fluxo o atravesse. Assim, para que não haja a reflexão das ondas num contorno fechado, deve-se lançar mão de fronteiras absorvedoras.

6.2.2.6 Número de passos de tempo

O número de passos de tempo é o tempo total de simulação dividido pelo intervalo do passo de tempo.

O tempo total de simulação deve permitir que as ondas alcancem toda a área modelada e a partir deste tempo (período inicial) a simulação deve continuar pelo menos 12 a 20 minutos para calcular os parâmetros estatísticos tais como a altura da onda significativa, H_s .

Se o estudo for com ondas de período longo (por exemplo ressonância em portos) o tempo de simulação deverá ser maior.

A Figura 64 mostra as elevações de superfície obtidas em uma área portuária calculada pelo módulo MIKE 21-BW. O Intervalo de tempo onde não há variação da superfície está relacionado com o tempo de propagação da onda entre a geração e a bacia portuária, devendo ser descartado dos cálculos dos parâmetros estatísticos das ondas.

Figura 64 – Exemplo de elevação da superfície de uma série temporal

6.2.2.7 Cálculo do distúrbio de onda

O coeficiente de distúrbio de onda é o quociente da altura de onda em qualquer ponto do modelo e a altura de onda significativa que entra no modelo, sendo a altura da onda significativa H_s dada por:

$$H_s = 4\sigma = 4\sqrt{\frac{\sum \zeta^2 - (\sum \zeta)^2 / N}{N-1}} \quad (50)$$

Onde ζ é a elevação da superfície, e N é o número de passos de tempo. σ denota o desvio padrão da elevação superfície.

6.2.2.8 Atrito de fundo

Os efeitos do atrito de fundo só são percebidos nos casos onde as ondas têm alturas apreciáveis e/ou estão se propagando em águas muito rasas, caso contrário, a resistência de fundo pode ser desprezada.

No BW, a modelação do atrito de fundo é feita a partir da lei de atrito de fundo de Chézy, sendo os parâmetros de entrada, o número de Chézy, ou o número de Manning.

6.2.2.9 Camada esponja

Camada esponja (ou absorvente) é usada para absorver as ondas numéricas próximo aos contornos da modelação, visto que não é possível entrar com a elevação da superfície nesta região.

A camada esponja deve ser incluída a partir de uma matriz, com o mesmo tamanho e espaçamento da matriz de batimetria, de forma que os coeficientes da camada esponja nos pontos da grade correspondentes a água devem ser sempre fixados iguais à unidade e crescerem em direção os contornos seguindo a seguinte expressão:

$$C_{esponja} = a^{[r^{N-i}]} \quad (51)$$

Onde:

N é o número de linhas da camada esponja a partir do contorno fechado;

$i = 1$;

a e r são constantes determinadas.

6.2.2.10 Camada de porosidade

Os valores de porosidade devem ser usados em estruturas parcialmente reflexivas, contidas no modelo, sendo que, se os valores de porosidade atrás de pontos de terra, será considerada reflexão parcial, caso contrário, tem-se uma transmissão parcial.

Assim como na camada esponja, os valores de porosidade em pontos da grade em mar aberto devem ser fixados com valores iguais à unidade, devendo ser, neste caso, menores ou iguais a unidade, ao longo de estruturas onde se deseja incluir efeitos de dissipação dos fluxos nos poros.

Desta forma, a reflexão da onda em estruturas, ou em praias, pode ser modificada aplicando-se diferentes valores de porosidade nos correspondentes pontos de grade, sendo que, se os valores de porosidade não são especificados, a reflexão será de 100% nos pontos em terra.

Se os valores de porosidade não estão atrás dos valores em terra, as camadas de porosidade resultarão em reflexão e transmissão através das camadas que representam por exemplo um quebra-mar permeável.

6.2.3 Ferramenta Random Wave Generation do MIKE 21-BW

Para a entrada dos dados de onda no módulo BW do MIKE 21 é necessário informar ao programa, além da elevação da superfície, sua declividade, curvatura e o fluxo que atravessa a perpendicular do ponto (ou linha de geração) ao longo do tempo.

Para tanto, pode-se lançar mão da ferramenta Random Wave Generation existente no pacote do MIKE21. Esta ferramenta é capaz de gerar trens de ondas randômicos, baseados em espectros parametrizados como o de Pierson Moskowitz, ou JONSWAP, por exemplo, que podem ser lidos diretamente pelo módulo BW.

Na opção de geração do trem de ondas a partir do espectro de JONSWAP (empregado no estudo de caso), pode-se optar por fornecer os parâmetros de entrada de duas maneiras distintas, são elas:

- Velocidade do vento U e pista (fetch);
- Altura significativa H_s e período de pico T_p .

Na sequência, deve-se optar pelo tipo de ondas desejado, podendo ser:

- Unidimensional, onde só o tempo varia;
- Unidirecional, onde a onda possui uma frente única de propagação (não necessariamente alinhada com a grade do programa);
- Direcional, onde mais de uma frente de ondas pode ser simulada.

Além disso, devem ser informados a profundidade e o menor período desejado na série, o número de passos de tempo e o intervalo do passo de tempo. Além dos parâmetros γ , λ_a e λ_b .

6.3 Discussão

A partir do que foi explanado, percebe-se que é possível, empregando o modelo de Boussinesq do software MIKE 21, obter um trem de ondas irregular, e conseqüentemente, seu

espectro de energia em águas rasas, a partir da definição dos parâmetros H_s e T_p da onda de projeto em águas profundas.

Para tanto, deve-se seguir, em linhas gerais, os seguintes passos:

- Empregando o Random Wave Generation do MIKE 21, gerar um trem de ondas randômico que possua os parâmetros H_s e T_p ;
- Modelar a batimetria da região de estudo;
- Escolher um espaçamento de grade adequado, em função do mínimo período do trem de ondas que se deseja reproduzir;
- Gerar a malha de pontos para entrada no BW;
- Criar uma camada de esponja para evitar reflexão nas bordas fechadas;
- Simular o modelo BW;
- Extrair o trem de ondas na profundidade desejada (em frente a obra, ou em outra profundidade existente no canal.
- Calcular o espectro de energia correspondente ao trem de ondas obtido.

Evidentemente existem detalhes da aplicação deste procedimento que não foram mencionados, como por exemplo, o tempo de duração que deve ter o trem de ondas gerado, etc.

Estes pontos encontram-se melhor explicados nos itens referentes ao estudo de caso realizado.

7 ESTUDO DE CASO.

7.1 Introdução

Para analisar o quão adequado é o procedimento de dimensionamento de quebra-mares levando-se em conta apenas a onda significativa, além de validar o sistema de controle da geração de ondas e a metodologia para obtenção de espectros de energia em águas rasas, foi realizado um estudo de caso utilizando os dados de um quebra-mar de berma.

Neste estudo, foi empregando tanto ondas regulares quanto ondas irregulares, de forma a permitir uma comparação direta entre a metodologia de otimização do dimensionamento de quebra-mares que emprega apenas a altura significativa de onda e aquela que emprega espectro de energia da agitação.

No início da pesquisa se havia decidido por desenvolver o estudo de caso para um quebra-mar convencional. Entretanto, a partir de um convênio formal firmado entre a EPUSP e empresa AQUAMODELO Consultoria e Engenharia surgiu a possibilidade de se conduzir o estudo empregando um quebra-mar de talude em berma.

Dentre os projetos desenvolvidos pela AQUAMODELO decidiu-se empregar no estudo de caso, aquele construído em 2003 para estabilizar a barra da lagoa de Saquarema, no Estado do Rio de Janeiro (Figura 65).

Figura 65 – Vista do quebra-mar de berma de Saquarema – RJ

Vale salientar que a opção por quebra-mares de berma, além de conferir mais um desafio à pesquisa, por não terem seus aspectos teóricos totalmente fundamentados, possuem uma vantagem indiscutível no aspecto de comparação de duas metodologias distintas de

ensaio, pois, ao contrário dos quebra-mares convencionais, eles são projetados para se deformarem frente às solicitações às quais são impostos, o que torna muito mais evidente as diferenças existentes entre os ensaios com ondas regulares e irregulares.

7.2 Projeto

O guia corrente projetado é constituído de quatro trechos curvos, perfazendo um comprimento total de 343 m. A Figura 66 apresenta um esquema do enrocamento. Já a Figura 67 mostra o eixo de construção do molhe, bem como as seções nas quais a estrutura foi subdividida.

Figura 66 – Planta esquemática do quebra-mar de Saquarema

Figura 67 – Eixo de construção do molhe e suas seções

Para a estimativa da onda de projeto, na ausência de dados de ondas na região, a AQUAMODELO empregou dados da Global Waves Statistics para estimar o clima de ondas ao largo da região de estudo, e um modelo de difração e refração de ondas para obter os parâmetros característicos da onda de projeto.

Os dados apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4 foram obtidos pela AQUAMODELO para as direções SE, S e SW (direções possíveis de atingir o molhe a ser dimensionado).

Tabela 2 – Ocorrência de ondas- quadrante de SE

Hs (m)	Tz (s)											soma
	< 4	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	> 13	
9 a 10												0
8 a 9												0
7 a 8												0
6 a 7					1	1						2
5 a 6				1	2	2	1					6
4 a 5			2	7	9	6	3	1				28
3 a 4		1	13	28	29	18	9	1				99
2 a 3		9	49	86	70	34	12	3	1			264
1 a 2	2	39	128	142	78	27	7	3	1			427
0 a 1	9	47	66	36	12	3						173
soma	11	96	258	300	201	91	32	8	2	0	0	999

Tabela 3 – Ocorrência de onda- quadrante Sul

Hs (m)	Tz (s)											soma
	< 4	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	> 13	
9 a 10												0
8 a 9												0
7 a 8												0
6 a 7					1	1	1	1				4
5 a 6				1	2	3	3	1	1			11
4 a 5			1	5	10	11	7	4	1	1		40
3 a 4			5	22	34	30	17	7	3	1		119
2 a 3		2	24	68	85	59	27	9	3	1		278
1 a 2		12	72	128	106	52	18	5	1			394
0 a 1	3	23	52	46	21	6	1					152
soma	3	37	154	270	259	162	74	27	9	3	0	998

Tabela 4 – Ocorrência de onda- quadrante SW

Hs (m)	Tz (s)											soma
	< 4	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	> 13	
9 a 10												0
8 a 9						1	1					2
7 a 8					1	1	1	1				4
6 a 7				1	2	3	2	1	1			10
5 a 6			1	3	6	7	5	3	1			26
4 a 5			1	8	15	18	10	5	2	1		60
3 a 4			5	21	36	33	19	8	3	1		126
2 a 3		1	16	54	74	54	26	9	3	1		238
1 a 2		6	48	105	102	54	20	5	1			341
0 a 1	2	21	58	63	34	11	3	1				193
soma	2	28	129	255	270	182	87	33	11	3	0	1000

A partir da compilação destes dados, a AQUAMODELO obteve as Tabelas 5, 6 e 7, cujos correspondentes gráficos são apresentados nas Figuras 68, 69 e 70.

Tabela 5 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sudeste (AQUAMODELO, 2003)

Hs (m)	Ocorrência por altura	Ocorrência de alturas iguais ou superiores
9-10	0%	0%
8-9	0%	0%
7-8	0%	0%
6-7	0%	0%
5-6	1%	1%
4-5	3%	4%
3-4	10%	14%
2-3	26%	40%
1-2	43%	83%
0-1	17%	100%

Tabela 6 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sul (AQUAMODELO, 2003)

Hs (m)	Ocorrência por altura	Ocorrência de alturas iguais ou superiores
9-10	0%	0%
8-9	0%	0%
7-8	0%	0%
6-7	0%	0%
5-6	1%	2%
4-5	4%	6%
3-4	12%	17%
2-3	28%	45%
1-2	39%	85%
0-1	15%	100%

Tabela 7 – Ocorrência de observações de Alturas Significativas de Sudoeste (AQUAMODELO, 2003)

Hs (m)	Ocorrência por altura	Ocorrência de alturas iguais ou superiores
9-10	0%	0%
8-9	0%	0%
7-8	0%	0%
6-7	0%	0%
5-6	1%	1%
4-5	3%	4%
3-4	10%	14%
2-3	26%	40%
1-2	43%	83%
0-1	17%	100%

Figura 68 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – SE (AQUAMODELO, 2003)

Figura 69 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – Sul (AQUAMODELO, 2003)

Figura 70 – Gráfico de distribuição de observações de Alturas de Onda – SW (AQUAMODELO, 2003)

A projetista adotou a altura significativa de onda ao largo que tivesse menos de 2% ocorrência para cada direção como onda de projeto, sendo assim, a altura significativa ao largo escolhida para a direção Sudeste foi 4,89 m, para Sul foi 5,25 m e para Sudoeste foi 6,27 m. Os períodos de zero ascendente (T_z) associados às estas alturas foram retirados das Tabelas 2 à 4, resultando em 7,5 s para SE; de 8,5 a 9,5 s para Sul e SW.

Estas ondas, foram propagadas para águas rasas, obtendo-se os resultados apresentados nas Figuras 71, 72, 73, 74 e 75 com relação ao fator de amplificação da altura de onda.

Figura 71 – Resultado da simulação de onda de Sudeste – $T_p = 10,5$ s (AQUAMODELO, 2003)

Figura 72 – Resultado da simulação de onda de Sul – $T_p = 11,9$ s (AQUAMODELO, 2003)

Figura 73 – Resultado da simulação de onda de Sul – $T_p = 13,3$ s (AQUAMODELO, 2003)

Figura 74 – Resultado da simulação de onda de Sudoeste – $T_p = 11,9$ s (AQUAMODELO, 2003)

Figura 75 – Resultado da simulação de onda de Sudoeste – $T_p = 13,3$ s (AQUAMODELO, 2003)

Extraindo-se as características das ondas em pontos próximos ao quebra-mar, cujas coordenadas encontram-se apresentadas na Tabela 8, foram obtidos pela AQUAMODELO os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 – Coordenadas dos pontos próximos ao guia-correntes (AQUAMODELO, 2003)

Ponto	Coordenadas UTM	
	Leste (m)	Norte (m)
6	757000	7461000
7	757100	7461000
8	757200	7461000
9	757300	7461000
10	757400	7461000

Tabela 9 – Alturas de onda obtidas pela simulação sem considerar arrebenção da onda (AQUAMODELO, 2003)

Direção	T_p (s)	H_s ao largo (m)	Alturas de onda de projeto nos pontos				
			6 (m)	7 (m)	8 (m)	9 (m)	10 (m)
SE	10.5	4.89	2.9	2.4	2.4	2.9	3.9
S	11.9	5.25	7.4	7.9	7.4	6.8	6.3
S	13.3	5.25	8.4	8.4	7.4	6.8	6.3
SW	11.9	6.27	6.3	6.3	5.6	5.0	5.6
SW	13.3	6.27	7.5	7.5	7.5	7.5	8.2

Portanto, sem considerar a arrebentação, foram obtidas as seguintes características para a onda de projeto: $H_s=8,2$ m e $T_p=13,3$ s.

Entretanto, por se tratar de um quebra-mar construído em profundidades muito pequenas, faltava ainda verificar se a onda de projeto não arrebentaria antes de atingir a estrutura. Assim, adotando-se um índice de arrebentação $\gamma=0,78$, uma amplitude de maré astronômica de 1,2 m e um efeito de maré meteorológica de 0,3 m foram obtidas as alturas de ondas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Alturas de onda de projeto limitadas pela arrebentação da onda					
Seção	prof. DHN (m)	Maré Astron. (m)	Maré Meteorol. (m)	Lâm. D'água (m)	H_b (m)
Cabeço	7,2	1,2	0,3	8,7	6,8
4	5,2	1,2	0,3	6,7	5,2

Para o dimensionamento dos blocos da estrutura, a projetista empregou a fórmula de Hudson e Jackson, apresentada.

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_{rr} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot g \alpha} \quad (52)$$

Onde:

W_{50} : o peso mediano dos blocos (em kgf)

K_{rr} : o coeficiente de intertravamento

$\cot g \alpha$: o talude da estrutura (em m/m)

γ_s : o peso específico do bloco (2.650 kgf/m³)

ρ_s : a massa específica do bloco (2.650 kg/m³)

ρ_w : a massa específica da água do mar (1.025 kg/m³)

Devido ao rearranjo do talude da estrutura, a projetista adotou $K_{rr}=7$, além disso, foi considerado que a estrutura se acomodaria com a relação vertical/horizontal de 1:3,3, resultando na Tabela 11.

Tabela 11 – Pesos de Pedras e recuos das seções do quebra-mar de berma

Seção	Prof.	NA _m	Lâmina	H _b	Cota	K _d	W ₅₀	W _{min}	W _{max}	Recuo
			d'água							
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		(ton)	(ton)	(ton)	(m)
5	6.7	1.5	8.7	6.8	7.0	7.0	7.5	7.0	8.0	12.4
4	5.2	1.5	6.7	5.2	6.0	7.0	4.1	2.7	6.2	10.1

As seções escolhidas como sendo de interesse para o estudo foram as seções 4 (Figura 76), que é a seção mais profunda do corpo do quebra-mar e a seção do Cabeço (Figura 77) por serem as seções submetidas às piores solicitações.

Figura 76 – Perfil da seção 4 com suas dimensões principais em centímetros

Figura 77 – Perfil da seção do cabeço com suas dimensões principais em centímetros

Para essas seções, a projetista propôs a granulometria descrita na Tabela 12.

Tabela 12 – Faixas granulométricas - protótipo

Faixa granulométrica	Peso dos blocos (t)	Condições
Tipo A (núcleo)	$0,05 < W < 0,5$	Máx. 20% < 0,2 t
Tipo C (seção 4)	$1,0 < W < 6,0$	Máx. 50% < 4,1 t
Tipo D (cabeço)	$7,0 < W < 8,0$ a 10,0	Máx. 50% < 7,5 a 8,0 t

Sendo que para a faixa granulométrica D, o aumento do peso dos blocos para 10 t foi necessário durante a construção pois, segundo comentado pelo responsável pelo projeto, as condições de tempo enfrentadas durante a execução da obra não estavam permitindo que a estrutura avançasse com os tamanhos de blocos projetados originalmente (Figura 78). Isto porque os blocos eram arrastados pelas ondas no instante do lançamento.

Figura 78 – Ressaca enfrentada durante a construção da estrutura

7.3 Escala de Modelação

A escala geométrica de modelação adotada inicialmente foi de 1:20, tendo sido escolhida pelas razões apresentadas a seguir.

- Maior escala cuja onda de projeto possui uma altura que, em teoria o sistema de geração consegue alcançar;
- Compatibilidade entre o peso dos blocos existentes no LHEPUSP e os requeridos para modelação.

7.4 Atividades Preliminares

7.4.1 Separação dos blocos para o estudo de caso

Como a escala de pesos é o cubo da escala geométrica, tem-se: $\lambda_w = \frac{1}{8000}$

Sendo assim, foram calculadas as faixas granulométricas na escala do modelo, estando estas apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Faixas granulométricas - modelo

Faixa granulométrica	Peso dos blocos (gr)	Condições
Tipo A (núcleo)	$6,25 < W < 62,5$	Máx. 20% < 25 gr
Tipo C (seção 4)	$125 < W < 750$	Máx. 50% < 512,5 gr
Tipo D (cabeço)	$875 < W < 1000$ a 1250	Máx. 50% < 937,5 a 1000 gr

Para que fosse possível montar as diferentes faixas granulométricas requeridas por este estudo e, pensando ainda que estudos futuros poderiam aproveitar estes mesmos blocos, decidiu-se separar as pedras, seguindo as faixas apresentadas na Tabela 14, sendo que a cada faixa foi associada uma cor.

Tabela 14 – Distribuição dos pesos dos blocos por cores

Cor	Peso mínimo (gr)	Peso máximo (gr)
Preta	125	250
Branca	250	500
Roxa	500	700
Verde	700	1000
Vermelha	1000	1200

Sendo que para o núcleo decidiu-se empregar uma mistura de brita 2 e 3.

Desta forma, a subdivisão das faixas granulométricas projetadas para as seções estudadas foram feitas como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 – Divisão das faixas granulométricas em função das cores dos blocos		
Faixa granulométrica	Cores - (% em massa)	Volume (m³)
Tipo A (núcleo)	Brita 2 – 50,0	0,195* / 0,27**
	Brita 3 – 50,0	0,195* / 0,27**
Tipo C (seção 4)	Preta - 16,7	0,113
	Branca - 33,3	0,227
	Roxa - 40,0	0,272
	Verde - 10,0	0,068
Tipo D (cabeço)	Verde - 50,0	0,555
	Vermelha - 50,0	0,555

* Volume requerido para a seção 4

** Volume requerido para o cabeço

Definidas as faixas e os volumes necessários iniciou-se o processo de obtenção das britas com as características desejadas.

As pedras foram retiradas de um monte armazenado no LHEPUSP (Figura 47). Foram separadas, uma a uma, as britas não lamelares próximas das faixas granulométricas pré-estabelecidas.

Figura 79 – Monte para seleção das britas nas faixas granulométricas determinadas

Como a variedade de tamanhos de blocos disponível não era grande, foi necessário reduzir o peso de pedras maiores, uma a uma, em um moinho (Figura 80), até que chegassem ao peso especificado.

Figura 80 – Moinho utilizado para redução do tamanho dos blocos após seleção

Após a redução de volume no moinho, verificou-se que as pedras se apresentavam muito rugosas e angulares, sendo assim, decidiu-se rolá-las em uma betoneira (Figura 81) de forma que suas arestas fossem aparadas o que torna os resultados de estabilidade, em princípio, mais conservativos, pois os blocos lamelares têm maior atrito interno (embricamento).

Figura 81 – Rolagem dos blocos na betoneira para remoção de pontas e ângulos agudos em sua geometria

Depois de aparadas as arestas, as britas foram lavadas e, quando secas, pesadas individualmente e classificadas em função das faixas pré-definidas (Figura 82).

Figura 82 – Pesagem dos blocos

Após a classificação, as britas foram pintadas com tinta spray (Figura 83) e armazenadas em baías em frente ao Canal de Ondas.

Figura 83 – Pintura das britas de acordo com as faixas granulométricas

7.4.2 Construção da primeira plataforma no canal de ondas

Relacionando as estatísticas do clima de ondas da região sob estudo, com a profundidade na qual a obra foi implantada, fica evidente, e a própria projetista salienta, que as maiores ondas que podem alcançar a região da obra irão arrebentar antes de atingir o corpo da estrutura.

Assim, como é apresentado em (CEM, 2002), após a arrebentação, as ondas dissipam boa parte da sua energia, reforçando a tese de que, para este estudo em específico, as ondas críticas não são as maiores da região, e sim, as maiores que arrebentam sob a estrutura.

Desta forma, considerando que o canal é prismático, mesmo que apenas com a lâmina d'água junto à obra, ele fosse capaz de gerar a altura de onda requerida pelo estudo, esta nunca conseguiria atravessar todo o canal (no limite da profundidade de arrebentação) para vir a quebrar apenas sobre a estrutura.

Além disso, verificou-se que com o nível de projeto, a lâmina d'água junto à placa era insuficiente para gerar as alturas de ondas necessárias.

Sendo assim, decidiu-se criar uma plataforma no fundo do canal para altear a estrutura e, com isso, aumentar a lâmina d'água junto ao gerador e propiciar às ondas que a profundidade de quebra fosse atingida apenas junto à obra.

A plataforma foi originalmente projetada com 7m de comprimento, com altura máxima de 30 cm e com rampas em seu início e fim (Figura 84). A rampa da extremidade de barlamar possuía 40cm de comprimento e inclinação de 35° , a plataforma também possuía uma pequena inclinação de $0,18^\circ$, que é a inclinação do fundo do mar na região próxima às seções sob estudo, obtida a partir das cartas batimétricas e a rampa de sotamar possuía uma inclinação de 45° somente devido a aspectos construtivos.

Figura 84 – Plataforma original construída no canal de ondas

Para a execução da plataforma foram confeccionados dois gabaritos de madeira com a forma da estrutura em vista lateral. Na sequência eles foram cobertos com lona, para proteger as paredes laterais do canal, e instalados junto a elas (Figura 85). Feito isso, o interior do gabarito foi preenchido com areia (Figura 86). Esta foi compactada por macadame hidráulico, regularizada (Figura 87) e os três centímetros finais foram preenchidos com uma camada de argamassa para fixá-la e impermeabilizá-la (Figura 88).

Figura 85 – Instalação dos gabaritos de madeira

Figura 86 – Preenchimento da plataforma com areia

Figura 87 – Regularização após compactação da areia

Figura 88 – Revestimento da plataforma com argamassa

7.4.3 Ampliação da plataforma do canal de ondas

Finalizada a rampa original, colocou-se água no canal e, já no primeiro teste, percebeu-se que as ondas sofriam uma deformação muito intensa na passagem pela rampa de barlar, isto porque a profundidade se reduzia praticamente à metade, em uma distância muito inferior a um comprimento de onda.

Sendo assim, optou-se por fazer uma ampliação da plataforma no sentido de suavizar a rampa de barlar.

Com a mesma metodologia empregada na construção da plataforma original, prolongou-se a rampa, aumentando seu comprimento de 40 cm para 4,00 m, deixando a plataforma com 11 m de comprimento em sua base (Figura 89).

Dessa maneira, as ondas que incidiriam na obra não seriam tão deformadas pela plataforma, pois a profundidade variaria mais suavemente em relação ao comprimento de onda.

Figura 89 – Prolongamento da plataforma do canal de ondas

7.4.4 Testes preliminares na presença de quebra-mar

Testes preliminares foram realizados com ondas regulares para permitir uma melhor avaliação das dificuldades que teriam que ser superadas nas etapas de montagem da estrutura, ensaios propriamente ditos, aquisição da forma de onda, acompanhamento da evolução do perfil da estrutura e análise dos resultados.

Para tanto, optou-se por construir a seção 4, por ser a de menor volume. Foi feito o traçado de um quadriculado de 10 x 10 cm nos vidros do canal utilizando canetas de retro-projetor para orientar a montagem do quebra-mar e para auxiliar na análise visual do rolamento dos blocos durante os ensaios. Foi feito também, o desenho do perfil da seção 4 no quadriculado.

Para a construção do núcleo foram cortadas duas peças de madeira nas dimensões do núcleo e foram posicionadas no Canal (Figura 90).

Figura 90 – Peças de madeira para a montagem da seção 4

O material de preenchimento do núcleo foi separado conforme a Tabela 5, sendo que as peças madeira serviram como molde para o enchimento.

Após a colocação do material foi aplicada uma camada superficial de nata de cimento com a finalidade de fixar as pedras e de diminuir a permeabilidade da estrutura para intensificar a ação das ondas sobre os blocos da berma (Figura 91).

Figura 91 – Núcleo da seção montado

A montagem da berma foi feita a partir da mistura homogênea das proporções das faixas granulométricas apresentadas na Tabela 5. O material misturado foi colocado em uma caixa de 0,5 m³ de madeira e o peso total da mistura foi de 500 kg (Figura 92).

Figura 92 – Blocos pré-misturados para a montagem da seção 4

Para simular o lançamento das britas pelo caminhão durante a montagem do quebra-mar real, foi construída uma caçamba na mesma escala do projeto (Figura 93).

Figura 93 – Caçamba construída para simular o rolamento dos blocos durante a construção do quebra-mar

Com o nível d'água na posição de meia maré, foi realizada primeiramente a montagem do tardo da seção 4. As britas foram escolhidas aleatoriamente da caixa onde estava a mistura e lançadas pela caçamba. Decidiu-se fazer a montagem com essa metodologia para assegurar que a rolagem das britas fosse semelhante ao que acontece no protótipo, sendo desnecessária a ativação de ondas pois o lado interno da estrutura é abrigado.

Para montar a parte frontal, utilizou-se a mesma metodologia, porém, decidiu-se por trabalhar com o gerador de ondas ativado para que as britas, ao rolarem, acomodassem-se também sob a influência das ondas (Figuras 94 e 95).

Figura 94 – Vista do quebra-mar durante a montagem da estrutura

Figura 95 – Detalhe da montagem da seção 4 do quebra-mar

As ondas aplicadas sobre a estrutura durante a montagem possuíam 10 cm de altura no modelo, que corresponde a 2,00 m no protótipo. De acordo com os dados estatísticos fornecidos pela AQUAMODELO essa altura de onda é superada em 65% do tempo no protótipo.

Para a definição da onda de projeto, para a seção 4, partiu-se de dados retirados do relatório da AQUAMODELO (Tabela 10), onde percebe-se que a projetista considerou o parâmetro de arrebentação $\gamma = \frac{H_b}{h_b} = 0,78$, ou seja, que a onda arrebenta quando sua altura alcança 78% da profundidade local, porém, sabe-se que este parâmetro pode variar em função

das características hidrodinâmicas e da conformação do fundo marinho no intervalo $0,4 < \gamma < 1,2$.

Outro ponto importante, foi observado analisando dados da Marinha, onde percebeu-se que a amplitude da maré meteorológica igual a 0,3 m não é adequada para a região e que age contra a segurança do projeto. Assim, decidiu-se aumentá-la para 0,5m.

Dessa forma, encontram-se apresentados nas Tabelas 16 e 17 os dados de lâmina d'água e altura de onda corrigidos para a Seção 4, na escala do protótipo e do modelo, respectivamente.

Tabela 16 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para a seção 4 - Protótipo

Seção	prof. DHN (m)	Maré Astron. (m)	Maré Meteorol. (m)	Lâm. D'água (m)	H_b $\gamma = 0,4$ (m)	H_b $\gamma = 0,78$ (m)	H_b $\gamma = 1,2$ (m)
4	5,2	1,2	0,5	6,9	2,8	5,4	8,3

Tabela 17 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para a seção 4 - Modelo

Seção	prof. DHN (cm)	Maré Astron. (cm)	Maré Meteorol. (cm)	Lâm. D'água (cm)	H_b $\gamma = 0,4$ (cm)	H_b $\gamma = 0,78$ (cm)	H_b $\gamma = 1,2$ (cm)
4	26,0	6,0	2,5	34,5 / 64,5*	11,4	27,0	41,5

* Lâmina d'água junto à placa de geração de onda, ou seja, lâmina d'água somada a altura da plataforma

Quanto ao período da onda de projeto, a partir dos dados estatísticos apresentados pela projetista adotou-se como período significativo $T_s \cong 10$ s no protótipo, o que resulta numa frequência $f = 0,45$ Hz na escala do modelo.

Definidos os parâmetros de ensaio, procedeu-se o teste somente para verificar, mais uma vez, o comportamento do sistema de geração diante de uma obra reflexiva e também para avaliar o comportamento da estrutura frente à ação das ondas.

Durante o teste, foram geradas ondas com alturas crescentes (de 0,5 em 0,5 metro no protótipo), até que se obtivesse aquela que arrebenta antes de atingir a estrutura. Encontrada esta altura, procedeu-se o teste durante aproximadamente uma hora, empregando um trem de ondas com altura imediatamente inferior àquela obtida na etapa de teste.

As Figuras 96 e 97 mostram a ação das ondas sobre a seção 4 da estrutura do quebra-mar estudado.

Figura 96 – Vista lateral do teste preliminar com a seção 4

Figura 97 – Vista frontal do teste preliminar com a seção 4

Durante estes testes pode-se perceber que, mesmo com o alteamento de 30 cm da estrutura pela introdução da plataforma, ainda assim o sistema de geração não se mostrou capaz de produzir ondas com altura superior a aproximadamente 21 cm (onda esta que já arrebentava antes de atingir a estrutura).

Sendo assim, a relação entre a altura da onda e a profundidade de quebra obtida durante os testes foi $\gamma \approx 0,60$, que, apesar de se encontrar dentro da faixa de valores encontrados na literatura, ficou no seu limite inferior. Esta arrebentação prematura das ondas pode ser atribuída a deformações impostas pela rampa, mesmo após sua extensão para 4,0 m.

7.4.5 Nova ampliação da plataforma

Com base nas constatações verificadas durante o teste descrito no item 7.4.4, decidiu-se ampliar mais uma vez a plataforma, alteando-a para 50 cm de altura e estendendo sua rampa de barlamar de forma que a plataforma ficasse como um comprimento final 20,50 m (Figura 98).

Figura 98 – Esquema da concepção final da plataforma

Para esta nova ampliação foi empregado o mesmo procedimento de construção da plataforma original, a menos de que desta vez, ao invés de embrulhar o gabarito em lona, optou-se por pintá-las de preto.

7.5 Ensaios com Ondas Regulares na Escala 1:20

7.5.1 Calibração das Ondas

Devido ao fato da onda de projeto ser limitada pela arrebentação, cujo índice γ pode variar, decidiu-se posicionar uma ponta capacitiva a frente de onde seria posteriormente implantada a obra, calibrando-se ondas com alturas a partir de 2,75 m no protótipo, de 25 em 25 cm, até que se encontrasse a altura de onda que arrebentasse antes de atingir a ponta capacitiva.

Vale salientar que o nível d'água adotado foi o de preamar, por ser o mais crítico na medida em que permite que ondas maiores arrebentem sobre a estrutura sob estudo e o período de onda adotado foi $T = 10s$, definido em função do projeto da AQUAMODELO.

Para avaliar o efeito da re-reflexão das ondas, posicionou-se uma das pontas capacitivas a barlar dos filtros metálicos, de forma que, se a hipótese considerada for verificada, as ondas obtidas durante a calibração seriam, para esta posição, iguais às aquelas obtidas durante o ensaio.

Desta forma, para cada altura de onda, deixou-se o sistema de geração iteragir até que a altura da onda medida pela ponta capacitiva posicionada a frente de onde seria instalada a obra se igualasse à altura de onda de referência, sendo este último coeficiente aquele a ser utilizado durante o ensaio na presença da obra.

A Tabela 18 apresenta os coeficientes finais obtidos durante a calibração das ondas com o nível $h = 94,5$ cm (nível máximo para a seção do cabeço) junto ao gerador.

Tabela 18 – Coeficientes de calibração para a seção do cabeço

Altura no protótipo (m)	Altura no Modelo (cm)	Coeficiente de Calibração - C_C
7,00	35,00	Onda arrebentou
6,75	33,80	Onda arrebentou
6,50	32,50	Onda arrebentou
6,25	31,30	Onda arrebentou
6,00	30,00	0,772
5,75	28,80	0,782
5,50	27,50	0,838
5,25	26,30	0,861
5,00	25,00	0,839
4,75	23,80	0,853
4,50	22,50	0,846
4,25	21,30	0,830
4,00	20,00	0,830
3,75	18,80	0,832
3,50	17,50	0,870
3,25	16,30	0,910
3,00	15,00	0,947
2,75	13,80	0,787

7.5.2 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 1

7.5.2.1 Descrição do ensaio

Para este primeiro ensaio com a seção do cabeço decidiu-se empregar a mesma distribuição granulométrica utilizada para a seção 4, ao invés daquela sugerida pela projetista. Os motivos que levaram a esta modificação encontram-se descritos a seguir.

Durante os testes preliminares com a seção 4 percebeu-se que poucos blocos foram realmente mobilizados, não sendo visível a formação de uma berma.

Realmente, considerando que a maior altura de onda que arrebentou sobre a seção 4, durante os testes preliminares possuía $H = 21,0\text{ cm}$ no modelo, ou seja, $H = 4,2\text{ m}$ no protótipo e empregando-se as Equações (38) e (39), obtém-se os seguintes parâmetros de estabilidade e de estabilidade com relação ao período:

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} = \frac{4,2}{\left(\frac{2,65}{1,025} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}}} = 2,3$$

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} \sqrt{\frac{g}{W_{50}}} T_z = \frac{4,2}{\left(\frac{2,65}{1,025} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}}} \sqrt{\frac{9,806}{4,0}} \frac{10,0}{1,1} = 61,4$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que ambos os parâmetros classificam o quebra-mar como estaticamente estável com deformações. Entretanto o que se verificou durante os ensaios foi uma mínima acomodação do talude.

Desta forma, levando em consideração que o peso médio dos blocos do cabeço é o dobro dos da seção 4, fica fácil intuir que o seu comportamento, apesar das condições hidrodinâmicas serem um pouco mais severas, tenderia a ser mais estático.

Na realidade, a própria PIANC recomenda que os cabeços das estruturas devam ser projetados para se comportar estaticamente pois, caso contrário, devido à concentração de energia de onda que ocorre nessa região, a formação da berma poderia invadir os limites do canal que está sendo abrigado pela estrutura, o que seria indesejado.

Além disso, esta concentração de energia que ocorre no cabeço da estrutura não se consegue reproduzir em modelos bidimensionais.

Por fim, como a idéia desta pesquisa é a de traçar um paralelo entre a metodologia que emprega ondas regulares com altura e período significativos e a metodologia que será

proposta, que lança mão de ondas irregulares, o emprego de estruturas estáticas não é desejado, visto que, se com ambas as metodologias a estrutura não se alterar não haverá como diferenciar a aplicação de ondas regulares das irregulares, ao passo que se a estrutura for deformável, espera-se que estas diferenças se tornem visíveis.

Quanto à caracterização hidrodinâmica para este ensaio, foram feitas as mesmas considerações dos testes preliminares, a menos da inclusão do $\gamma = 0,70$ (valor obtido durante os testes de calibração das ondas), resultando nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para o cabeço - Protótipo

Seção	prof. DHN (m)	Maré Astron. (m)	Maré Meteorol. (m)	Lâm. D'água (m)	H _b $\gamma = 0,4$ (m)	H _b $\gamma = 0,70$ (m)	H _b $\gamma = 0,78$ (m)	H _b $\gamma = 1,2$ (m)
Cabeço	7,2	1,2	0,5	8,9	3,6	6,3	7,0	10,7

Tabela 20 – Lâmina d'água e altura de onda corrigidos para o cabeço - Modelo

Seção	prof. DHN (cm)	Maré Astron. (cm)	Maré Meteorol. (cm)	Lâm. D'água (cm)	H _b $\gamma = 0,4$ (cm)	H _b $\gamma = 0,70$ (cm)	H _b $\gamma = 0,78$ (cm)	H _b $\gamma = 1,2$ (cm)
Cabeço	36,0	6,0	2,5	44,5 / 94,5*	17,8	30,3	34,7	53,4

* Lâmina d'água junto à placa de geração de onda, ou seja, lâmina d'água somada a altura da plataforma

Considerando o valor de γ obtido nos testes de calibração, e a discretização de alturas de onda utilizada, a maior onda que arrebenta na estrutura possui $H = 6,0$ m.

E ainda, considerando a distribuição granulométrica da seção 4 (Figura 99) e empregando o equacionamento proposto pela PIANC, tem-se:

Figura 99 – Distribuição granulométrica empregada na seção do cabeço

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} = \frac{6,0}{\left(\frac{2,65}{1,025} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}}} = 3,3$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} \sqrt{\frac{g}{\sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}}} T_z = \frac{6,0}{\left(\frac{2,65}{1,025} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}}} \sqrt{\frac{9,806}{\sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}}}} \frac{10,0}{1,1} = 87,7$$

Da distribuição granulométrica:

$$D_{15} = \sqrt[3]{\frac{W_{15}}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{1,9}{2,65}} = 0,89 \text{ m}$$

$$D_{50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{4,0}{2,65}} = 1,15 \text{ m}$$

$$D_{85} = \sqrt[3]{\frac{W_{85}}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{5,4}{2,65}} = 1,27 \text{ m}$$

$$f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}} = \frac{1,27}{0,89} = 1,42$$

$$1,3 < f_g = 1,42 < 1,8 \Rightarrow ok$$

$$f_d = -0,16 \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 4,0 = -0,16 \left(\frac{8,9}{1,15} \right) + 4,0 = 2,76$$

$$\frac{d}{D_{50}} = 7,7 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

Da Equação 42:

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^2 + 0,11 (H_o T_o) - (-9,9 f_g^2 + 23,9 f_g - 10,5) - f_d$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (87,7)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (87,7)^2 + 0,11 (87,7) - (-9,9 \cdot 1,42^2 + 23,9 \cdot 1,42 - 10,5) - 2,76$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 1,82 + 0,07 + 9,65 - (-19,96 + 33,94 - 10,5) - 2,76$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 5,30$$

$$\therefore rec = 5,30 D_{50} = 5,30 \cdot 1,15 = 6,10 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$\frac{h_f}{D_{50}} = 0,2 \frac{d}{D_{50}} + 0,5 = 0,2 \frac{8,9}{1,15} + 0,5 = 2,05$$

$$\therefore h_f = 2,05 D_{50} = 2,05 \cdot 1,15 = 2,36 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que ambos os parâmetros de estabilidade classificam o quebra-mar como dinamicamente estável, o que indica que deve haver uma acomodação intensa dos blocos e a formação de uma berma bem evidenciada.

Definidos os parâmetros de ensaio, decidiu-se fazer a montagem da estrutura seguindo o mesmo procedimento empregado nos testes preliminares, a menos da geração de ondas que permaneceu desligada durante toda a montagem para fazer com que os blocos fossem mobilizados apenas durante o ensaio propriamente dito.

Em seguida, o nível foi ajustado para $h = 94,5 \text{ cm}$ e foram instaladas as pontas capacitivas nas mesmas posições adotadas na etapa de calibração das ondas para permitir uma comparação direta entre as leituras.

7.5.2.2 Procedimento

Para permitir que a estrutura fosse se ajustando ao clima de ondas e também para descobrir qual seria a máxima altura de ondas que arrebentaria na estrutura, foram geradas, em ordem crescente, todas as alturas de onda calibradas, com duração de 5 min. cada.

Caso se percebesse que alguma altura de onda estava arrebentando antes de atingir a estrutura, adotar-se-ia a altura de onda imediatamente inferior a esta como a onda de ensaio. Na sequência, com a onda de projeto, foi simulada uma tempestade de 6 horas de duração no protótipo ou 80 min. no modelo.

Esta duração de tempestade foi adotada por extrapolação dos dados obtidos pela NUCLEBRAS (1983) na região da Juréia, onde consta que o tempo de duração da incidência das ondas mais severas registradas durante a campanha foi de 6 horas, sendo a altura destas ondas da mesma ordem de grandeza da onda de projeto da estrutura sob estudo.

Para a documentação do ensaio, foi montando um estúdio fotográfico na lateral do Canal (Figura 100), para evitar que a reflexão da luz nos vidros atrapalhasse a captura dos dados. Uma câmera digital foi posicionada em frente ao quebra-mar e conectada a um computador (Figura 101). Através de um programa de captura de fotos, foi registrada a

evolução do perfil durante o ensaio com uma foto no início e outra no fim de cada ensaio da etapa de obtenção da onda de projeto e uma seqüência de fotos batidas a cada minuto durante a simulação da tempestade.

Figura 100 – Estúdio fotográfico montado na lateral do canal

Figura 101 – Câmera digital conectada a um computador para a aquisição das fotos durante o ensaio

Para simular o efeito da variação do nível d'água devido à maré no protótipo, decidiu-se simular uma nova tempestade, de mesma duração, só que com o nível d'água referente a uma baixa-mar de sizígia e sem considerar maré meteorológica. Desta forma, o nível d'água no modelo foi baixado de $h_1 = 94,5$ cm para $h_2 = 86,0$ cm.

Como este segundo ensaio não havia sido previsto a priori, não se havia calibrado ondas com este nível d'água. Sendo assim, decidiu-se adotar o coeficiente de calibração -

$C_c = 0,8$ para todas as alturas de ondas ensaiadas com este nível, de forma que somente na análise do ensaio seria possível inferir qual a real altura de onda que foi ensaiada.

De qualquer forma, como a estrutura já estava adaptada ao clima de ondas, iniciou-se o segundo ensaio com a mesma altura de onda de projeto empregada no ensaio anterior e uma duração de 5 min.. Caso esta onda não arrebesse antes de atingir a estrutura, ela seria novamente empregada como onda de projeto, caso contrário tentar-se-ia aplicar uma onda com altura imediatamente inferior a esta, até que se encontrasse a máxima onda que só arrebesse sobre a estrutura.

Após a conclusão do segundo ensaio, para se obter uma melhor representação da deformação sofrida pela estrutura, foi realizado um levantamento topográfico do perfil final da seção. Para tanto, foi construída uma malha de cordões dividida em quadriculas de 10x10 cm (Figura 102) e utilizando uma mira (Figura 103) e uma régua, foram levantadas as cotas de pontos (Figura 104).

Figura 102 – Quadriculado utilizado para definir os pontos de levantamento

Figura 103 – Mira empregada na leitura dos pontos

Figura 104 – Levantamento das cotas da seção do cabeço

7.5.2.3 Resultados e discussão

As Figuras 105 e 106 mostram uma comparação entre os espectros de amplitude e de energia obtidos durante a calibração da onda de altura $H = 30,0$ cm e aqueles obtidos durante os ensaios na presença da estrutura.

Figura 105 – Comparação entre os espectros de amplitude obtidos durante a calibração e os ensaios

Figura 106 – Comparação entre os espectros de energia obtidos durante a calibração e os ensaios

Nas Figuras 107 e 108 podem ser vistas ampliações nos gráficos anteriores para melhor visualização das diferenças observadas.

Figura 107– Comparação entre os espectros de amplitude obtidos durante a calibração e os ensaios – Ampliação

Figura 108– Comparação entre os espectros de energia obtidos durante a calibração e os ensaios – Ampliação

As Figuras 109, 110 e 111 mostram o perfil transversal da seção do cabeço antes do primeiro ensaio, após o primeiro ensaio e após o segundo ensaio respectivamente.

Figura 109 – Configuração do quebra-mar antes do 1º ensaio

Figura 110– Configuração do quebra-mar após o 1º ensaio

Figura 111– Configuração do quebra-mar após o 2º ensaio

Através das fotografias dos ensaios, levantou-se o perfil médio da estrutura após cada ensaio, como mostra a Figura 112.

* Média dos níveis dos dois ensaios

Figura 112 – Evolução dos perfil médio durante os ensaios

Como a estrutura não se deformou homogeneamente, decidiu-se fazer um levantamento topográfico da seção após o segundo ensaio, a partir do qual foi construído em AutoCAD® um modelo digital da seção deformada (Figura 113).

Figura 113 – Modelo digital da seção do cabeço após o 2º ensaio

A partir das Figuras 107 e 108 pode-se perceber que no primeiro ensaio houve uma diminuição da energia da onda incidente com a presença da obra. Este fato pode ser devido a ocorrência de uma oposição de fases entre a onda incidente e a refletida no canal.

Vale salientar que na presença da estrutura provavelmente poder-se-ia introduzir uma onda com altura superior a 30 cm sem que ela arrebentasse antes de alcançar a estrutura. Entretanto, como ondas superiores a esta arrebentavam sobre a plataforma durante os ensaios de calibração, não puderam ser calibradas, e por isso a tempestade foi simulada com $H = 30,0$ cm.

Já o segundo ensaio foi realizado sem calibração de coeficientes, pois só se decidiu por fazê-lo depois de encerrado o primeiro ensaio.

Durante o segundo ensaio as ondas com $H = 30,0$ cm e $C_c = 0,8$ (estimado) arrebataram antes de atingir a estrutura, o que era esperado, devido ao menor nível d'água, sendo a simulação de tempestade realizada com $H = 28,8$ cm.

Considerando que o coeficiente era estimado, para se obter a real altura de onda simulada comparou-se o espectro obtido com os de calibração e verificou-se que ele se aproximou mais ao de $H = 30,0$ cm, como mostram as Figuras 107 e 108.

Isso vem a reforçar a afirmação de que a altura empregada no primeiro ensaio estava bem abaixo da de projeto, visto que o nível d'água no canal diminuiu em 20% e, ainda assim, ondas de 30 cm não arrebatavam antes de atingir a estrutura.

Vale salientar que para este segundo ensaio a razão entre a altura de onda e a profundidade foi $\gamma = 0,83$.

Quanto ao perfil obtido após o primeiro ensaio (Figura 110) pode-se perceber que apenas a porção superior da seção foi remobilizada, sendo pequena a berma formada.

Já após o segundo ensaio (Figura 111), uma quantidade maior de blocos migrou para a base do quebra-mar, aumentando a estabilidade da seção, sendo que nos últimos 20 min. de ensaio praticamente não foi possível observar modificações na seção.

A partir da Figura 112 foi possível estimar a recessão da berma $rec = 5,7$ m e a profundidade de interseção entre os perfis inicial e final da estrutura $h_f = 2,4$ m.

Estes valores encontram-se muito próximos dos calculados a partir da metodologia proposta pela PIANC, que resultaram em $rec = 6,10$ m e $h_f = 2,36$ m, o que indica que a estrutura praticamente alcançou sua condição de equilíbrio para as alturas de onda consideradas.

7.5.3 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 2

7.5.3.1 Descrição do ensaio

Como se havia percebido durante os ensaios da alternativa 1, a onda de $H = 30,0$ cm, que fora a maior onda obtida durante os ensaios de calibração, devido à reflexão imposta pela presença da estrutura, deixara de ser. Sendo assim, como o critério de projeto é o de

arrebenção, verificou-se a necessidade de aumentar a altura da onda de ensaio, mesmo sem tê-la calibrado.

Além disso, outras duas modificações foram testadas nessa alternativa em relação à anterior:

- A primeira foi a retirada da camada de nata de cimento na superfície externa do núcleo da estrutura. Esta camada havia sido colocada no intuito de impermeabilizar o núcleo, potencializando, assim, a ação das ondas sobre os blocos da armadura da estrutura. Entretanto, verificou-se que, mesmo com uma grande quantidade de nata de cimento, o núcleo permanecia permeável, e, além disso, durante a aplicação da nata as paredes e o vidro do canal acabavam sendo sujos, tendo que ser limpos antes da execução dos ensaios, sendo estes os motivos para a sua retirada.
- A segunda foi uma modificação na maneira como os blocos eram lançados. Nos ensaios da primeira alternativa foi empregada uma caçamba, como descrito no item 4.3.5. Entretanto, o lançamento com a caçamba era muito trabalhoso, o que levou a se testar nesta alternativa um lançamento por rolagem manual dos blocos.

Para a simulação de onda com altura superior à calibrada, decidiu-se manter o coeficiente de calibração obtido para a onda de $H=30,0$ cm, visto que os coeficientes oscilavam em torno de uma média, não apresentando uma tendência bem definida.

Sendo assim, mantendo-se a curva granulométrica apresentada na Figura 99 e aumentando a altura de onda para $H=7,0$ m, e considerando os dados da Tabela 21, obtêm-se os seguintes parâmetros com o emprego da metodologia proposta pela PIANC.

Tabela 21 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC

ρ_s	ρ_w	H_s	W_{50}	D_{50}	T_z	g	D_{15}	D_{85}	d
t/m ³	t/m ³	m	t	m	s	m/s ²	m	m	m
2,85	1,02	7,00	4,00	1,12	9,00	9,81	0,87	1,24	8,90

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3 \sqrt{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} = 3,48$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = 92,82$$

Da distribuição granulométrica:

$$f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}} = 1,42 \quad 1,3 < f_g = 1,42 < 1,8 \Rightarrow ok$$

$$f_d = -0,16 \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 4,0 = 2,73 \quad \frac{d}{D_{50}} = 8 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} ok$$

Da Equação 42:

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^2 + 0,11 (H_o T_o) - (-9,9 f_g^2 + 23,9 f_g - 10,5) - f_d$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 5,56$$

$$\therefore rec = 5,56 D_{50} = 6,23 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$\frac{h_f}{D_{50}} = 0,2 \frac{d}{D_{50}} + 0,5 = 2,09$$

$$\therefore h_f = 2,09 D_{50} = 2,34 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que, assim como na alternativa 1, o quebra-mar é classificado como dinamicamente estável, o que indica que deve haver uma acomodação intensa dos blocos e a formação de uma berma bem evidenciada.

7.5.3.2 Procedimento

Como procedimento de ensaio, foram seguidos os mesmos passos adotados para a alternativa 1, porém com as modificações descritas a seguir:

Antes de iniciar o ensaio propriamente dito, foi realizado um levantamento topobatimétrico do perfil indeformado da estrutura, para que se pudesse fazer uma medição mais precisa do recuo e da profundidade de interseção experimentais.

Durante os ensaios não se limitou a maior altura de onda à máxima calibrada, e sim à maior altura de onda que não arrebentasse antes de atingir a obra.

Para a obtenção do recuo e da profundidade de interseção experimentais, baseando-se nos levantamentos topo-batimétricos que totalizavam onze seções de medição, foram calculados, para cada levantamento realizado, dois perfis médios. O primeiro (M1) excluindo as seções 1, 2, 10 e 11, que por serem as mais próximas das extremidades, sofriam interferência das paredes do canal. E o segundo (M2) excluindo as seções 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10 e 11, para que se pudesse ter uma idéia do comportamento da parte mais central da estrutura.

Feito isso, foram traçados gráficos comparando as seções M1 e M2 de referência com as obtidas após os ensaios, e, a partir deles, medidos o recuo e a profundidade de interseção experimentais.

7.5.3.3 Resultados e discussão

As Figuras 114 e 115 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios de preamar e baixa-mar.

Figura 114 – Comparação da seção M1 para a alternativa 2

Figura 115 – Comparação da seção M2 para a alternativa 2

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2:

$$rec_{EXP(M1)} = 2,52 \text{ m}$$

$$rec_{EXR(M2)} = 2,73 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 1,95 \text{ m}$$

$$h_{fEXR(M2)} = 2,24 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 6,23 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,34 \text{ m}$ percebe-se que apesar da profundidade de interseção ter ficado relativamente próxima ao esperado, o mesmo não ocorreu com o recuo, que ficou bem abaixo do calculado pelo método da PIANC, ficando menor, inclusive, que o recuo obtido durante os ensaios da alternativa 1, cujas ondas eram um metro menores que as empregadas nesse ensaio.

Este resultado mostra claramente que a rolagem dos blocos com as mãos aumenta substancialmente o embricamento entre os mesmos, resultando na diminuição do recuo da estrutura como se pode perceber pelos resultados desta alternativa.

Outro ponto observado é que sem a camada de nata de cimento, os blocos do núcleo não suportavam a rolagem dos blocos da armadura e acabavam rolando junto e abatendo o

talude entre eles. Por esse motivo também ficou decidido voltar a aplicar nata de cimento nas alternativas posteriores.

7.5.4 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 3

7.5.4.1 Descrição do ensaio

No ensaio da alternativa 3 foi mantida a mesma granulometria das alternativas anteriores, voltando-se a aplicar nata de cimento na camada do núcleo e a lançar os blocos utilizando a caçamba.

7.5.4.2 Procedimento

Com relação ao procedimento adotado nesse ensaio, devido à pequena quantidade de blocos movimentada em cada um dos primeiros ensaios (preamar e baixamar), decidiu-se dar continuidade aos mesmos até que a estrutura alcançasse uma condição de equilíbrio, onde já não houvesse alterações relevantes no perfil.

Além disso, decidiu-se introduzir um novo nível de ensaio com a meia maré. Isto foi feito para balancear melhor o efeito da maré, fazendo com que a estrutura sofresse o ataque das ondas em mais um nível de atuação. No nível médio a profundidade da lâmina d'água junto ao gerador de ondas é de $h = 90,25$ cm.

Ao todo foram realizados quatorze ensaios, variando os níveis entre preamar, meia maré e baixamar, sendo realizado levantamento topográfico entre cada um dos ensaios, desde que tivesse havido movimentação de blocos.

Novamente foram traçados os gráficos comparativos para as seções M1 e M2 e, a partir deles, medidos os recuos e as profundidades de interseção experimentais.

Além disso, para essa alternativa procurou-se identificar qual seção sofreu a maior retração, sendo que o mesmo procedimento adotado para as seções médias foi realizado com ela.

7.5.4.3 Resultados e discussão

As Figuras 116 e 117 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 116 – Comparação da seção M1 para a alternativa 3

Figura 117 – Comparação da seção M2 para a alternativa 3

A seção 6S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 118 mostra a progressão do perfil da seção 6 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 118 – Comparação da seção 6S (recuo máximo) para a alternativa 3

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 6S:

$$rec_{EXP(M1)} = 5,86 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(M2)} = 5,65 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(6S)} = 6,46 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 2,06 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 3,02 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(6S)} = 3,19 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 6,23 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,34 \text{ m}$ percebe-se que, assim como na alternativa 1, os valores ficaram bem próximos aos esperados pelo método proposto pela PIANC.

Com relação aos recuos, as médias resultaram um pouco inferiores ao valor teórico, entretanto este foi superado na seção onde o recuo foi máximo. Na realidade, a publicação da PIANC não deixa claro se o recuo calculado é médio ou máximo, mas, de qualquer forma, os resultados experimentais foram condizentes com a teoria proposta.

Comparando a alternativa 1 com a alternativa 3, observa-se que, apesar desta última ter levado um número bem maior de ensaios para se estabilizar, os resultados estão coerentes, visto que o recuo dela ficou um pouco superior ao alcançado pela primeira, cuja onda de projeto era um metro inferior.

Já com relação às profundidades de interseção, os valores experimentais também cercaram o valor teórico, tendo ficado, de maneira geral, ligeiramente superiores a este.

De maneira geral, a coerência entre os resultados das alternativas 1 e 3 mostram que existe uma repetibilidade nos resultados experimentais para essa granulometria.

7.5.5 Ensaio da seção do cabeça com ondas regulares – Alternativa 4

7.5.5.1 Descrição do ensaio

Dando sequência aos ensaios com ondas regulares, decidiu-se ensaiar a granulometria proposta pela projetista para a seção do cabeça.

De acordo com o projeto foram separados 500 kg de britas verdes e 300 kg de britas vermelhas, cuja curva granulométrica resultante encontra-se na Figura 119.

Figura 119 – Distribuição granulométrica empregada na alternativa 4

Considerando a distribuição granulométrica proposta e os dados da Tabela 22, obtêm-se os seguintes parâmetros com o emprego da metodologia proposta pela PIANC.

Tabela 22 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC

ρ_s	ρ_w	Hs	W_{50}	D_{50}	Tz	g	D_{15}	D_{85}	d
t/m ³	t/m ³	m	t	m	S	m/s ²	m	m	m
2,85	1,02	7,00	7,55	1,38	9,00	9,81	1,29	1,46	8,90

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} = 2,82$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = 67,56$$

Da distribuição granulométrica:

$$f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}} = 1,13$$

$$f_g = 1,13 < 1,3 < 1,8 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

$$f_d = -0,16 \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 4,0 = 2,97$$

$$\frac{d}{D_{50}} = 6,4 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

Da Equação 42:

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^2 + 0,11 (H_o T_o) - (-9,9 f_g^2 + 23,9 f_g - 10,5) - f_d$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 1,06$$

$$\therefore rec = 1,06 D_{50} = 1,47 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$\frac{h_f}{D_{50}} = 0,2 \frac{d}{D_{50}} + 0,5 = 1,79$$

$$\therefore h_f = 1,79 D_{50} = 2,47 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que, para essa distribuição granulométrica, o quebramar é classificado como estaticamente estável, o que indica que deve haver uma pequena acomodação dos blocos e a formação de uma berma pouco evidenciada.

7.5.5.2 Procedimento

Como procedimento para essa alternativa, foi decidido que seriam realizados cinco ensaios, na seguinte ordem: preamar, meia maré, baixa-mar, meia-maré e preamar.

Os demais procedimentos foram realizados seguindo os mesmos passos adotados para a alternativa 3.

7.5.5.3 Resultados e discussão

As Figuras 120 e 121 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 120 – Comparação da seção M1 para a alternativa 4

Figura 121 – Comparação da seção M2 para a alternativa 4

A seção 6S foi identificada como sendo a de maior recuo também para esta alternativa. A Figura 122 mostra a progressão do perfil da seção 6 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 122 – Comparação da seção 6S (recuo máximo) para a alternativa 4

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 6S:

$$rec_{EXP(M1)} = 1,56 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(M2)} = 2,38 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(6S)} = 3,86 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 2,30 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 2,29 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(6S)} = -0,23 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 1,47 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,47 \text{ m}$ percebe-se que, pelo menos para a média M1, que envolve a maioria das seções, o valor do recuo ficou bem próximo ao esperado, tendo sido ligeiramente superior.

Com relação às profundidades de interseção, apesar da seção 6 ter apresentado um resultado anômalo, considerando as seções médias, se aproximaram bastante aos calculados a partir da metodologia proposta.

7.5.6 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 5

7.5.6.1 Descrição do ensaio

Esta alternativa foi realizada no intuito de verificar a repetibilidade dos resultados experimentais, tendo portanto, a mesma descrição da alternativa 4.

7.5.6.2 Procedimento

Os procedimentos adotados nesta alternativa também são os mesmos da alternativa 4.

7.5.6.3 Resultados e Discussão

As Figuras 123 e 124 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 123 – Comparação da seção M1 para a alternativa 5

Figura 124 – Comparação da seção M2 para a alternativa 5

A seção 9S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 125 mostra a progressão do perfil da seção 9 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 125 – Comparação da seção 9S (recuo máximo) para a alternativa 5

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 9S:

$$rec_{EXP(M1)} = 1,71 \text{ m}$$

$$rec_{EXR(M2)} = 1,65 \text{ m}$$

$$rec_{EXR(9S)} = 2,76 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 2,27 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 1,74 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(9S)} = 4,56 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 1,47 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,47 \text{ m}$, além dos obtidos na alternativa anterior, é possível afirmar que além de muito próximos dos esperados a partir da metodologia da PIANC, estão coerentes entre si, visto que houve repetibilidade nos resultados.

7.5.7 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 6

7.5.7.1 Descrição do ensaio

Para aumentar o número de fontes de comparação, foi proposta mais uma distribuição granulométrica intermediária às anteriores.

Assim, foram separados 300 kg de britas brancas, 300 kg de britas roxas e 300 kg de britas vermelhas, cuja curva granulométrica resultante encontra-se na Figura 126.

Figura 126 – Distribuição granulométrica empregada na alternativa 7

Considerando a distribuição granulométrica proposta e os dados da Tabela 23, obtêm-se os seguintes parâmetros com o emprego da metodologia proposta pela PIANC.

Tabela 23 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC

ρ_s	ρ_w	Hs	W_{50}	D_{50}	Tz	g	D_{15}	D_{85}	d
t/m ³	t/m ³	m	t	m	S	m/s ²	m	m	m
2,85	1,02	7,00	4,87	1,20	9,00	9,81	1,01	1,38	8,90

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} = 3,26$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \sqrt{\frac{g}{D_{50}}} T_z = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} \sqrt{\frac{g}{\frac{W_{50}}{\rho_s}}} T_z = 84,15$$

Da distribuição granulométrica:

$$f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}} = 1,37 \qquad 1,3 < f_g = 1,37 < 1,8 \Rightarrow ok$$

$$f_d = -0,16 \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 4,0 = 2,81 \qquad \frac{d}{D_{50}} = 7,4 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} ok$$

Da Equação 42:

$$\frac{rec}{D_{50}} = 2,7 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^3 + 9 \cdot 10^{-6} (H_o T_o)^2 + 0,11 (H_o T_o) - (-9,9 f_g^2 + 23,9 f_g - 10,5) - f_d$$

$$\frac{rec}{D_{50}} = 3,72$$

$$\therefore rec = 3,72 D_{50} = 4,46 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$\frac{h_f}{D_{50}} = 0,2 \frac{d}{D_{50}} + 0,5 = 1,98$$

$$\therefore h_f = 1,98 D_{50} = 2,38 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que, para essa distribuição granulométrica, o quebramar é classificado como dinamicamente estável, o que indica que deve haver uma acomodação intensa dos blocos e a formação de uma berma bem evidenciada.

7.5.7.2 Procedimento

Como procedimento para essa alternativa, manteve-se a decisão de realizar cinco ensaios, na seguinte ordem: preamar, meia-maré, baixa-mar, meia-maré e preamar. Entretanto, decidiu-se pela redução do tempo de cada ensaio, que passou de seis horas no protótipo para cerca de duas horas e meia (trinta e três minutos na escala do modelo) pois, dessa forma, a somatória dos tempos dos cinco ensaios resulta em um período de maré. Além disso, percebeu-se que as movimentações mais intensas da estrutura ocorriam no início de cada ensaio, fato que também contribuiu para essa alteração na duração dos ensaios.

Os demais procedimentos foram realizados seguindo os mesmos passos adotados para a alternativa 4.

7.5.7.3 Resultados e discussão

As Figuras 127 e 128 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 127 – Comparação da seção M1 para a alternativa 6

A seção 8S foi identificada como sendo a de maior recuo também para esta alternativa. A Figura 129 mostra a progressão do perfil da seção 8 ao longo dos ensaios realizados.

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 8S:

$$rec_{EXP(M1)} = 3,83 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(M2)} = 4,14 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(8S)} = 5,25 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 2,41 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 2,31 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(8S)} = 2,92 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 4,46 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,38 \text{ m}$ percebe-se que, nesta alternativa, os recuos experimentais médios encontrados se situaram um pouco abaixo do valor esperado. Entretanto, vale salientar que o recuo máximo ficou acima do calculado pelo método da PIANC.

Com relação às profundidades de interseção, considerando as seções médias, os resultados experimentais praticamente se igualaram aos calculados a partir da metodologia proposta.

7.5.8 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 7

7.5.8.1 Descrição do ensaio

Esta alternativa foi realizada no intuito de verificar a repetibilidade dos resultados experimentais, tendo portanto, a mesma descrição da alternativa 6.

7.5.8.2 Procedimento

Os procedimentos adotados nesta alternativa também são os mesmos da alternativa 6.

7.5.8.3 Resultados e Discussão

As Figuras 130 e 131 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 130 – Comparação da seção M1 para a alternativa 7

Figura 131 – Comparação da seção M2 para a alternativa 7

A seção 9S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 132 mostra a progressão do perfil da seção 9 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 132 – Comparação da seção 9S (recuo máximo) para a alternativa 7

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 9S:

$$rec_{EXP(M1)} = 2,22 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(M2)} = 2,09 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(9S)} = 4,57 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 3,55 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 1,70 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(9S)} = 3,50 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 4,46 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,38 \text{ m}$, percebe-se que, apesar da seção de recuo máximo ter apresentado seu recuo bem próximo ao esperado, nitidamente houve um erro grosseiro no levantamento topo batimétrico de

referência, visto que os perfis dos primeiros ensaios se mostraram mais avançados que o de referência para a maioria das seções, o que é fisicamente impossível.

Por isso, decidiu-se descartar esta alternativa e realizar uma nova com as mesmas características desta e da anterior.

7.5.9 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa 8

7.5.9.1 Descrição do ensaio

Devido às diferenças encontradas nos resultados experimentais, entre as alternativas 6 e 7, tendo portanto, a mesma descrição da alternativa 6.

7.5.9.2 Procedimento

Os procedimentos adotados nesta alternativa também são os mesmos da alternativa 6.

7.5.9.3 Resultados e Discussão

As Figuras 133 e 134 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após cada um dos ensaios realizados.

Figura 133 – Comparação da seção M1 para a alternativa 8

Figura 134 – Comparação da seção M2 para a alternativa 8

A seção 7S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 135 mostra a progressão do perfil da seção 7 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 135 – Comparação da seção 7S (recuo máximo) para a alternativa 8

A partir das figuras anteriores obtiveram-se os seguintes valores para os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 7S:

$$rec_{EXP(M1)} = 2,27 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(M2)} = 2,98 \text{ m}$$

$$rec_{EXP(7S)} = 4,48 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M1)} = 2,26 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(M2)} = 2,72 \text{ m}$$

$$h_{fEXP(7S)} = 3,46 \text{ m}$$

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 4,46 \text{ m}$ e $h_{fTEO} = 2,38 \text{ m}$, além dos obtidos na alternativa 6, tem-se que os resultados deste ensaio ficaram um pouco abaixo dos extraídos da alternativa 6, bem como dos resultados esperados pela metodologia proposta pela PIANC.

Estas variações são decorrentes da etapa de lançamento da estrutura, onde, apesar da mesma metodologia estar sendo empregada, é possível obter arranjos com diferentes embricamentos e, portanto, sujeitos a comportamentos diferentes frente à ação das ondas.

7.5.10 Verificação da reflexão de ondas durante os ensaios na escala 1:20

7.5.10.1 Descrição

Para considerar os ensaios válidos foi necessário verificar se as reflexões de ondas geradas pela presença do quebra-mar não eram capazes de refletir novamente na placa do gerador e voltar a atingir a estrutura (re-reflexão).

7.5.10.2 Procedimento

Para esta verificação, quebra-mar foi completamente desmontado, e foram feitos ensaios somente na presença da rampa, empregando os três níveis ensaiados e as respectivas alturas de onda, considerando os mesmos coeficientes de calibração utilizados nos ensaios.

De cada um desses ensaios, foi retirada uma amostra da forma de onda, contendo vinte ciclos completos para servir como base para a comparação.

A alternativa escolhida para esta análise foi a alternativa 4, sendo que, foram separados trechos contendo vinte ondas completas no início (~1 min. de ensaio), no meio (~40 min. de ensaio) e no final (~1 h. e 20 min. de ensaio), registradas pela ponta de barlamar, dos ensaios 3,4 e 5 desta alternativa.

Posteriormente, estas formas de onda, os espectros de amplitude e de energia foram graficamente comparados com os registrados apenas com a presença da rampa.

Além disso, foram calculados os erros percentuais entre os trechos do ensaio e a calibração para a frequência de pico para o espectro de amplitudes.

7.5.10.3 Resultados e Discussão

As Figuras 136, 137 e 138 mostram, respectivamente, a comparação entre as formas de onda, os espectros de amplitude e os espectros de energia do início, meio, fim do ensaio 3

da alternativa 4 com relação aos obtidos no ensaio de referência (apenas na presença da rampa).

Figura 136 – Comparação das formas de onda para o nível de baixamar

Figura 137 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de baixa-mar

Figura 138 – Comparação dos espectros de energia para o nível de baixa-mar

Já as Figuras 139 e 140 trazem uma ampliação dos gráficos de espectro de amplitude e de energia para que as diferenças possam ser melhor visualizadas.

Figura 139 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de baixamar – Ampliação

Figura 140 – Comparação dos espectros de energia para o nível de baixamar – Ampliação

As Figuras 141, 142 e 143 mostram respectivamente a comparação entre as formas de onda, os espectros de amplitude e os espectros de energia do início, meio, fim do ensaio 4 da alternativa 4 com relação aos obtidos no ensaio de referência (apenas na presença da rampa).

Figura 141 – Comparação das formas de onda para o nível de meia maré

Figura 142 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de meia maré

Figura 143 – Comparação dos espectros de energia para o nível de meia maré

Já as Figuras 144 e 145 trazem uma ampliação dos gráficos de espectro de amplitude e de energia para que as diferenças possam ser melhor visualizadas.

Figura 144 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de meia maré – Ampliação

Figura 145 – Comparação dos espectros de energia para o nível de meia maré – Ampliação

As Figuras 146, 147 e 148 mostram, respectivamente, a comparação entre as formas de onda, os espectros de amplitude e os espectros de energia do início, meio, fim do ensaio 5 da alternativa 4 com relação aos obtidos no ensaio de referência (apenas na presença da rampa).

Figura 146 – Comparação das formas de onda para o nível de preamar

Figura 147 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de preamar

Figura 148 – Comparação dos espectros de energia para o nível preamar

Já as Figuras 149 e 150 trazem uma ampliação dos gráficos de espectro de amplitude e de energia para que as diferenças possam ser melhor visualizadas.

Figura 149 – Comparação dos espectros de amplitude para o nível de preamar – Ampliação

Figura 150 – Comparação dos espectros de energia para o nível de preamar – Ampliação

A Tabela 24, mostra as diferenças percentuais entre os valores de pico do espectro de amplitudes para os espectros medidos.

Tabela 24 – Diferenças percentuais entre os valores de pico do espectro de amplitudes

	Início	Meio	Fim
Baixamar	-8.90	-5.68	-5.81
Meia maré	-12.37	-13.40	-13.15
Preamar	-19.10	-20.45	-21.35

Os resultados mostram que há sim uma mudança significativa na forma de onda adquirida pela ponta de barlamar quando se introduz a estrutura no interior do canal. Realmente, o fato da obra refletir uma grande parcela da onda incidente faz com que as características da onda resultante se alterem, mesmo antes da passagem pelo filtro metálico.

Tanto isso é verdade, que a maior onda que se conseguiu calibrar no nível máximo, possuía $H=300$ cm. Já na presença da obra foi possível gerar ondas de até $H=350$ cm (considerando que o coeficiente de calibração não se alterasse de maneira significativa) sem que a mesma arrebatasse antes de atingir a estrutura.

Entretanto, essa mudança na característica da onda é esperada no protótipo, visto que lá, também haverá reflexão.

Como já foi dito anteriormente, a preocupação em se tratando de um canal de ondas, é a de que a onda refletida sofresse re-reflexão e voltasse a incidir sobre a obra, gerando uma amplificação dos efeitos da reflexão.

Quanto a isso, os resultados mostram que em uma hora e vinte minutos de ensaio, as ondas aqisitadas variaram menos do que três por cento, o que demonstra que, apesar de existir um processo de amplificação de ondas, este pode ser desprezado.

Além disso, em função das diferenças de fases entre as ondas geradas e refletidas, nos pontos onde elas estão em fase, a altura da onda medida é máxima, já onde elas estão em antefase, a altura da onda medida é mínima.

Para exemplificar a explanação acima, foi realizado um ensaio cuja onda tinha altura $H=300$ cm, na presença da estrutura, no qual as pontas de barlar e sotamar foram posicionadas visualmente em ponto de fase e um de antefase sucessivos.

A Figura 151 mostra uma amostra de vinte períodos de onda das formas de onda aqisitadas pelas pontas durante o ensaio.

Figura 151 – Forma de onda aqisitadas pelas duas pontas capacitivas

Já as Figuras 152 e 153 mostram os espectros de amplitude e de energia calculados para ambas as formas de onda aqisitadas.

Figura 152 – Espectros de amplitude calculados a partir das duas pontas capacitivas

Figura 153 – Espectros de energia calculados a partir das duas pontas capacitivas

É possível visualizar que as diferenças nas amplitudes das ondas medidas nestes pontos pode chegar a quase quarenta por cento, como resultado da reflexão das ondas que incidem sobre a estrutura, entretanto, este efeito mostra apenas que existe reflexão no canal.

A partir da análise da Figura 150, pode-se dizer que, pelo fato da amplificação da altura das ondas não superar três por cento ao longo do ensaio, é desnecessário um

refinamento maior no software de controle da geração de ondas com o intuito de eliminar este efeito.

7.6 Ensaios Comparativos Entre Ondas Regulares e Irregulares – Quebra-mar AQUAMODELO

7.6.1 Aspectos gerais

Inicialmente havia se pensado em fazer a comparação entre as metodologias de ensaio de obras de enrocamento com ondas regulares e irregulares na escala 1:20, tanto que os ensaios apresentados no item anterior foram inicialmente realizados para este fim. Entretanto, verificou-se, logo após a realização dos ensaios que o gerador de ondas não era capaz de calibrar ondas irregulares nesta escala, considerando a lâmina d'água existente junto ao batedor.

Isto, porque devido à irregularidade das ondas obtidas a partir de espectros de energia, a altura máxima de onda chega, mesmo em águas rasas, a superar em 50% a altura de onda significativa, o que resulta em ondas acima de 50 cm, altura esta que o gerador não foi capaz de calibrar.

Além disso, o fato dos ensaios anteriores terem sido realizados sem uma calibração adequada das ondas também geraria problemas na comparação, visto que, só haviam sido calibradas ondas para o nível de preamar, e, mesmo para este nível, só foram calibradas ondas até 6,0 m no protótipo, tendo sido verificado posteriormente que a altura da onda de projeto era maior do que esta.

Alguns testes foram realizados no intuito de avaliar a possibilidade de elevar a altura da plataforma, mantendo a escala de modelação, entretanto verificou-se que seria necessário alteá-la em mais de 15 cm, o que faria com que a cota de coroamento da estrutura ficasse muito próxima da borda superior do canal.

Outro teste foi realizado para verificar se a redução da escala de 1:20 para 1:25, por si só era suficiente para permitir a modelação. Entretanto, verificou-se que a redução da altura das ondas modeladas não compensava a redução do nível d'água, devida a redução da escala.

Sendo assim, optou-se por altear a plataforma em dez centímetros e, ainda sim, reduzir a escala para 1: 25.

A Figura 154 mostra a configuração final da plataforma.

Figura 154 – Configuração final da plataforma do canal de ondas

Outra modificação adotada para estes ensaios foi a modificação da posição da ponta empregada na calibração das ondas, ao invés de posicioná-la a frente da posição onde a obra seria implantada, decidiu-se por colocá-la no pé da rampa existente no canal.

Desta forma, no caso da geração de ondas regulares, poder-se-ia calibrar ondas de alturas superiores àsquelas que arrebetam sobre a plataforma e, no caso da geração de ondas irregulares, evitar-se-ia calibrar o espectro em uma posição onde parte das ondas já teria arrebetado.

Deste fato decorre a suposição de que a deformação sofrida pelas ondas na rampa existente no modelo se assemelha àquela sofrida no protótipo.

A Tabela 25 apresenta as profundidades no modelo e no protótipo referentes à obra, e à posição de instalação da ponta de calibração dos trens de ondas.

	Profundidade obra		Profundidade Calibração	
	Modelo (cm)	Protótipo (m)	Modelo (cm)	Protótipo (m)
Preamar	35.6	8.9	95.6	23.9
Meia maré	32.2	8.1	92.2	23.1
Baixa mar	28.8	7.2	88.8	22.2

Com relação ao levantamento topo-batimétrico da estrutura, decidiu-se por fazer apenas um levantamento inicial (estrutura indeformada) e outro final (estrutura deformada) pois em alguns casos, o simples fato de encostar a ponta da régua no bloco, fazia com que ele se instabiliza-se, e fosse remobilizado no ensaio seguinte.

Quanto à duração do ensaio, decidiu-se por manter o tempo total de ensaio em um período de maré, visto que este foi suficiente para levar as estruturas ensaiadas ao equilíbrio. Entretanto, foi implementada uma modificação nos tempos de cada ensaio para que a maré fosse simulada de uma maneira mais fiel.

Assim, optou-se por reduzir o tempo de duração dos ensaios de preamar, de forma que a variação de maré fosse simulada como mostra a Figura 155, a seguir.

Figura 155 – Distribuição dos tempos dos ensaios para simulação do efeito da variação da maré

Considerando que o período da onda de maré é de 12 horas e 25 minutos, obtêm-se as relações de tempos apresentadas na Tabela 26, a seguir.

Tabela 26 – Durações dos ensaios na escala 1:25

	$T_{\text{maré}}$	Tempo ensaio PM	Tempo ensaio MM	Tempo ensaio BM
	(h)	(min.)	(min.)	(min.)
Protótipo	12.42	93.1	186.3	186.3
Modelo	2.48	18.6	37.3	37.3

Considerando a geração de ondas irregulares, caso se quisesse que as ondas fossem randômicas, ou seja, não houvesse nenhuma repetição ao longo do ensaio, ter-se ia uma etapa de calibração extremamente demorada, visto que cada iteração da malha externa de controle levaria duas vezes o tempo do ensaio para ocorrer.

Como isto não era mandatrio dentro da proposta de estudo, adotou-se como tempo de durao do trem de ondas irregular $T_i=6,2$ min.. De forma que no ensaio de preamar (PM) ter-se-ia trs repeties do trem de ondas calibrado, enquanto nos ensaios de meia mar (MM) e baixa mar (BM) seis repeties.

Disso resultou uma discretizao de frequncias $\Delta f_m = 0,0026846\text{Hz}$ que corresponde a um $\Delta f_p = 0,01\text{Hz}$.

A granulometria escolhida para este ensaio comparativo, foi uma intermediria entre a projetada para o cabeo e para a seo 4, visto que com a mudana de escala e a manuteno das faixas de cores dos blocos j no era possvel obter curvas idnticas s empregadas nos ensaios com a escala 1:20.

Para tanto, foi realizada uma mistura contendo 32% de blocos pretos e 68% de blocos brancos, resultando na distribuio granulomtrica apresentada na Figura 156.

Figura 156 – Curva granulomtrica empregada nos ensaios comparativos entre ondas regulares e irregulares

As quatro pontas capacitivas de que se dispunha para os ensaios foram dispostas da seguinte forma pelo canal:

- Ponta 1 – Presa placa do gerador de ondas;
- Ponta 2 – Entre a placa do gerador e os filtros metlicos;
- Ponta 3(ponta usada para a calibrao dos trens de onda) – No limite inferior da rampa da plataforma construda no canal;

- Ponta 4 – No limite superior da rampa da plataforma construída no canal (posição de instalação da obra) durante a calibração e na posição da rampa de cota 55,4 cm durante a execução dos ensaios para que os blocos não rolassem sobre a mesma.

7.6.2 Preparo dos dados de entrada para o módulo BW do MIKE 21

Inicialmente foi feita a digitalização das cartas batimétricas nº 70 (Figura 157), nº 80 (Figura 158) e nº 1500 (Figura 159), para que juntas, pudessem servir com dados de entrada para módulo BW (Figura 160).

Figura 157 – Carta batimétrica nº 70 da região do projeto digitalizada

Figura 158 – Carta batimétrica n° 80 da região do projeto digitalizada

Figura 159 – Carta batimétrica n° 1500 da região do projeto digitalizada

Figura 160 – Batimetria completa da região obtida pela união das cartas batimétricas previamente digitalizadas

Em função do período mínimo do espectro adotado (4s) e, levando-se em consideração a área mínima a ser reproduzida, foi escolhido um espaçamento de grade de 15 m.

Em função da grande densidade de pontos necessária, a região modelada teve que ser reduzida drasticamente, sendo modelada apenas uma região de 6x6 km (Figura 161).

Figura 161 – Limites da área de modelação para o módulo BW do MIKE 21

Na sequência, a grade batimétrica foi importada para o BW, onde foram feitas as alterações mostradas a seguir, de forma a deixá-la apta a ser utilizada pelo software (Figura 162).

- Elevação de todos os pontos de cota superior a -5,0 m para +10,0 m (Terra);
- Fechamento de todas as bordas abertas;
- Fixação em -30,0 m de todos os pontos com cotas inferiores a este limite

Figura 162 – Grade batimétrica de entrada do módulo BW do MIKE 21

A partir desta grade batimétrica foi criado o arquivo com a camada de esponja (Figura 163), de modo que não houvesse reflexão em nenhum dos pontos de terra da grade.

Figura 163 – Camada esponja de entrada do módulo BW do MIKE 21

Os demais parâmetros ajustados no módulo BW do MIKE 21 foram:

- Termos de água profunda excluídos por não ser possível utilizá-los dada a discretização da grade batimétrica adotada;
- Intervalo do passo de tempo: 0,1 s, que corresponde a 0,02 s no modelo (Δt adotado para o software de controle da geração de ondas);
- Número de passos de tempo: 37250, equivalente a duas vezes o T_i adotado para os ensaios, de forma a garantir que se teria um trem de ondas randômico com, no mínimo o tempo correspondente a T_i em todos os pontos de interesse da malha.
- Geração de ondas internas ajustada para a linha 38(primeira linha após a camada esponja);
- Atrito de fundo excluído por apresentar variações ínfimas nos resultados de propagação da onda.

Desta forma, bastaria fornecer o arquivo correspondente ao trem de ondas de entrada e simular o módulo para obter os trens de ondas equivalentes na profundidade referente à posição da ponta 3 do canal de ondas.

7.6.3 Calibração das alturas de ondas regulares

Para a calibração das ondas regulares foi adotado um período $T=10$ s e foram calibradas alturas de onda de meio em meio metro, desde $H=4,5$ m (180 mm no modelo) até $H=7,0$ m (280 mm no modelo), para cada um dos níveis de maré, lidas a partir da ponta 3. De forma a garantir que mesmo sem saber o efeito da rampa na passagem do trem de ondas, ter-se-á calibrado as alturas de onda de projeto para cada nível d'água.

A Tabela 27 apresenta os coeficientes obtidos no processo de calibração dos trens de ondas regulares.

Tabela 27 – Coeficientes de calibração dos trens de ondas regulares – Ensaio Comparativo

Condição de maré	Altura no protótipo (m)	Altura no Modelo (mm)	Coeficiente de Calibração - C_c
BM	4.50	180	1.078
BM	5.00	200	1.143
BM	5.50	220	1.164
BM	6.00	240	1.230
BM	6.50	260	1.281
BM	7.00	280	1.350
MM	4.50	180	1.250
MM	5.00	200	1.273
MM	5.50	220	1.276
MM	6.00	240	1.320
MM	6.50	260	1.370
MM	7.00	280	1.590
PM	4.50	180	1.220
PM	5.00	200	1.206
PM	5.50	220	1.200
PM	6.00	240	1.248
PM	6.50	260	1.280
PM	7.00	280	0.787

7.6.4 Confeccção dos arquivos contendo os trens de ondas regulares para entrada no software de controle da geração de ondas

A partir dos coeficientes obtidos na etapa de calibração, foram montados os arquivos de entrada para o software de controle da geração de ondas, tanto para a etapa de teste da altura da onda de projeto quanto para os ensaios propriamente ditos.

Conforme descrito no item 7.6.1, na etapa de teste, cada trem de ondas regulares atuaria por 3 min., tendo sido deixado ainda 30 s com a referência da placa parada no centro de excursão para permitir a gravação de todas as ondas que ainda estivessem se propagando pelo canal ao término da geração.

A Figura 164 apresenta um exemplo adaptado de arquivo de entrada para teste com ondas regulares confeccionado.

Descrição dos dados		Teste_PM_H220_C_1_200	
		Protótipo	Modelo
T (s)		10	2
H		5.5 (m)	220 (mm)
Coef		1.2	

Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)
0.00	0.00	0.00
0.02	6.91	8.29
0.04	13.79	16.54
0.06	20.61	24.73
0.08	27.36	32.83
0.10	33.99	40.79
⋮	⋮	⋮
179.90	-33.99	-40.79
179.92	-27.36	-32.83
179.94	-20.61	-24.73
179.96	-13.79	-16.54
179.98	-6.91	-8.29
180.00	0.00	0.00
180.02	0.00	0.00
180.04	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮
209.94	0.00	0.00
209.96	0.00	0.00
209.98	0.00	0.00

Figura 164 – Exemplo adaptado de arquivo de teste confeccionado para o nível de preamar e altura de onda $H=220$ mm no modelo

Analogamente, as Figuras 165, 166 e 167 mostram exemplos adaptados de arquivos confeccionados para o ensaio de preamar, meia maré e baixa mar, respectivamente.

Descrição dos dados		Ensaio_PM_H220_C_1_200	
		Protótipo	Modelo
T (s)	10	2	
H	5.5 (m)	220 (mm)	
Coef		1.2	

Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)
0.00	0.00	0.00
0.02	6.91	8.29
0.04	13.79	16.54
0.06	20.61	24.73
0.08	27.36	32.83
0.10	33.99	40.79
⋮	⋮	⋮
1117.90	-33.99	-40.79
1117.92	-27.36	-32.83
1117.94	-20.61	-24.73
1117.96	-13.79	-16.54
1117.98	-6.91	-8.29
1118.00	0.00	0.00
1118.02	0.00	0.00
1118.04	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮
1147.94	0.00	0.00
1147.96	0.00	0.00
1147.98	0.00	0.00

Figura 165 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de preamar e altura de onda $H=220$ mm no modelo

Descrição dos dados		Ensaio_MM_H200_C_1_273	
		Protótipo	Modelo
T (s)	10	2	
H	5.0 (m)	200 (mm)	
Coef		1.273	

Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)
0.00	0.00	0.00
0.02	6.28	7.99
0.04	12.53	15.95
0.06	18.74	23.85
0.08	24.87	31.66
0.10	30.90	39.34
⋮	⋮	⋮
2235.90	-30.90	-39.34
2235.92	-24.87	-31.66
2235.94	-18.74	-23.85
2235.96	-12.53	-15.95
2235.98	-6.28	-7.99
2236.00	0.00	0.00
2236.02	0.00	0.00
2236.04	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮
2265.94	0.00	0.00
2265.96	0.00	0.00
2265.98	0.00	0.00

Figura 166 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de meia maré e altura de onda $H=200$ mm no modelo

Descrição dos dados			
Ensaio_BM_H200_C_1_143			
		Protótipo	Modelo
T (s)		10	2
H		5.0 (m)	200 (mm)
Coef		1.143	
Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)	
0.00	0.00	0.00	
0.02	6.28	7.18	
0.04	12.53	14.33	
0.06	18.74	21.42	
0.08	24.87	28.43	
0.10	30.90	35.32	
⋮	⋮	⋮	
2235.90	-30.90	-35.32	
2235.92	-24.87	-28.43	
2235.94	-18.74	-21.42	
2235.96	-12.53	-14.33	
2235.98	-6.28	-7.18	
2236.00	0.00	0.00	
2236.02	0.00	0.00	
2236.04	0.00	0.00	
⋮	⋮	⋮	
2265.94	0.00	0.00	
2265.96	0.00	0.00	
2265.98	0.00	0.00	

Figura 167 – Exemplo adaptado de arquivo de ensaio confeccionado para o nível de baixa mare altura de onda $H=200$ mm no modelo

7.6.5 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa R1

7.6.5.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do cabeço da estrutura empregando ondas regulares, seguindo as definições apresentadas no item 7.6.1

7.6.5.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o seguinte procedimento:

- Montagem e impermeabilização do núcleo da estrutura;
- Rolagem dos blocos com emprego da caçamba, com água no nível de preamar e sem geração de ondas;
- Execução do levantamento topo-batimétrico da estrutura indeformada;
- Execução de ensaios teste, de três minutos de duração cada, e alturas de onda crescentes para descobrir a altura de onda de projeto para o nível de preamar;

- Execução do primeiro ensaio de preamar;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à meia maré;
- Execução de ensaios teste, de três minutos de duração cada, e alturas de onda crescentes para descobrir a altura de onda de projeto para o nível de meia maré;
- Execução do primeiro ensaio de meia maré;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à baixa mar;
- Execução de ensaios teste, de três minutos de duração cada, e alturas de onda crescentes para descobrir a altura de onda de projeto para o nível de baixa mar;
- Execução do ensaio de baixa mar;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à meia maré;
- Execução do segundo ensaio de meia maré;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à preamar;
- Execução do segundo ensaio de preamar;
- Execução do levantamento topo-batimétrico da estrutura deformada;
- Remoção dos blocos da armadura da estrutura.

7.6.5.3 Resultados e Discussão

A Tabela 28 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa R1.

Tabela 28 – Ficha de ensaio da Alternativa R1

Alternativa:		R1		
Data:		7/11/2007		
Nível d'água	Teste	Ensaio	H_{ponta3} (mm)	Observação:
PM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		220	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		240	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
PM		x	220	
MM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
MM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
MM	x		220	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
MM		x	200	
BM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
BM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
BM	x		220	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Observa-se que as ondas de projeto para os três níveis de maré em relação à ponta 3 tiveram alturas de 5,5 m para a preamar e 5,0 m para os demais níveis.

Entretanto, as alturas de onda junto ao quebra-mar medidas ao longo dos ensaios a partir da ponta 4, mostram que as alturas que atingem a obra são substancialmente superiores a estas (Figuras 168 à 172).

Figura 168 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de preamar da Alternativa R1

Figura 169 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de meia maré da Alternativa R1

Figura 170 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o ensaio de baixa mar da Alternativa R1

Figura 171 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de meia maré da Alternativa R1

Figura 172 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de preamar da Alternativa R1

A Tabela 29 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 29 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa R1

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{\text{máx}}$	Modelo (mm)	341	306	266	298	319
	Protótipo (m)	8.52	7.65	6.66	7.44	7.96
H_s	Modelo (mm)	322	286	235	276	294
	Protótipo (m)	8.05	7.15	5.88	6.89	7.35
H_z	Modelo (mm)	313	277	229	269	284
	Protótipo (m)	7.83	6.93	5.72	6.73	7.11
$H_{\text{máx}}/H_z$		1.09	1.10	1.16	1.11	1.12
H_s/H_z		1.03	1.03	1.03	1.02	1.03
$T_{\text{máx}}$	Modelo (s)	2.10	2.20	2.22	2.12	2.12
	Protótipo (s)	10.50	11.00	11.10	10.60	10.60
T_s	Modelo (s)	2.01	2.02	2.02	2.01	2.01
	Protótipo (s)	10.05	10.09	10.08	10.06	10.05
T_z	Modelo (s)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	Protótipo (s)	10.00	10.00	9.98	10.00	9.98
$T_{\text{máx}}/T_z$		1.05	1.10	1.11	1.06	1.06
T_s/T_z		1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
N_{ondas}		544	1102	1104	1102	545

Analisando isoladamente cada ensaio, percebe-se que há diferenças da ordem de 10% entre as alturas máximas e as médias dos trens de ondas. Entretanto, os gráficos mostram que as maiores ondas ocorrem no início dos ensaios e na última onda de cada registro, possivelmente por causa dos harmônicos gerados pela aceleração e frenagem brusca da placa do gerador no início e fim dos ensaios. Além do fato da reflexão levar um tempo para se estabilizar no canal.

Já se for considerada a relação entre as alturas significativas e as médias, as diferenças caem para menos de 3%, valor que pode ser considerado baixo quando se trata de modelação física.

Com relação aos períodos, tem-se que os maiores períodos também ocorrem no início e fim de cada registro, provavelmente pelas mesmas razões explanadas no parágrafo anterior. De modo que o período significativo e o médio diferem cerca de 1% apenas.

Analisando a sequência de ensaios, tem-se que as alturas de ondas diminuíram dos primeiros ensaios de cada nível para os últimos. Este fato deve estar atrelado à mudança na inclinação do talude ao longo dos ensaios (abatimento), que certamente ocasionou uma variação na taxa de reflexão da estrutura, que por sua vez deve ter ocasionado a diminuição das alturas medidas.

Se desprezarmos o efeito da reflexão no registro da ponta 4 e utilizarmos a média das alturas H_z obtidas nos dois ensaios de preamar, além dos demais parâmetros dados pela Tabela 30, os seguintes parâmetros são obtidos pela metodologia da PIANC:

Tabela 30 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC

ρ_s	ρ_w	Hs	W_{50}	D_{50}	Tz	g	D_{15}	D_{85}	d
t/m ³	t/m ³	m	t	m	s	m/s ²	m	m	m
2,85	1,02	7,47	4,92	1,12	9,00	9,81	1,00	1,28	8,90

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = 3,47$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = 89,29$$

Da distribuição granulométrica:

$$f_g = 1,28 \quad 1,3 < f_g = 1,28 < 1,8 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

$$f_d = 2,81 \quad \frac{d}{D_{50}} = 7,4 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

Da Equação 42:

$$rec = 5,13 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$h_f = 2,38 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que ambos os parâmetros de estabilidade classificam o quebra-mar como dinamicamente estável, o que indica que deve haver uma acomodação intensa dos blocos e a formação de uma berma em evidenciada.

As Figuras 173 à 178 trazem a evolução do perfil da estrutura, vista através de uma sequência fotográfica:

Figura 173 – Perfil da estrutura indeformada - Alternativa R1

Figura 174 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de preamar - Alternativa R1

Figura 175 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de meia maré - Alternativa R1

Figura 176 – Perfil da estrutura após o ensaio de baixa mar - Alternativa R1

Figura 177 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de meia maré - Alternativa R1

Figura 178 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de preamar - Alternativa R1

Já as Figuras 179 e 180 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 179 – Comparação da seção M1 - Alternativa R1

Figura 180 – Comparação da seção M2 - Alternativa R1

A seção 4S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 181 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 4 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 181 – Comparação da seção 4S - Alternativa R1

A Tabela 31 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 4S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 31 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R1

		M1	M2	seção 4
rec experimental	modelo (mm)	317	318	403
	protótipo (m)	7.91	7.94	10.07
h_f experimental	modelo (mm)	73	63	127
	protótipo (m)	1.83	1.57	3.16

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO}=5,13$ m e $h_{fTEO}=2,38$ m percebe-se que, nesta alternativa, os recuos experimentais obtidos se situaram bem acima do valor esperado pelo método da PIANC.

Com relação às profundidades de interseção, considerando as seções médias, os resultados experimentais se situaram um pouco abaixo dos calculados a partir da metodologia proposta. Entretanto vale salientar que na seção 4, a profundidade de interseção superou o valor calculado.

7.6.6 Ensaio da seção do cabeço com ondas regulares – Alternativa R2

7.6.5.1 Descrição do ensaio

Ensaio para verificar a repetibilidade dos resultados obtidos na Alternativa R1

7.6.5.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa R1:

7.6.5.3 Resultados e Discussão

A Tabela 32 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa R2.

Tabela 32 – Ficha de ensaio da Alternativa R2

Alternativa:		R2		
Data:		8/11/2007		
Nível d'água	Teste	Ensaio	H _{ponta3} (mm)	Observação:
PM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		220	Onda arrebenta sobre a estrutura
PM	x		240	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
PM		x	220	
MM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
MM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
MM	x		220	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
MM		x	200	
BM	x		180	Onda arrebenta sobre a estrutura
BM	x		200	Onda arrebenta sobre a estrutura
BM	x		220	Onda arrebenta antes de atingir a estrutura
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Já a Tabela 33 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 33 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa R2

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	343	325	279	317	333
	Protótipo (m)	8.58	8.12	6.98	7.92	8.32
H_s	Modelo (mm)	333	296	220	288	316
	Protótipo (m)	8.32	7.40	5.50	7.20	7.91
H_z	Modelo (mm)	322	285	217	278	299
	Protótipo (m)	8.04	7.12	5.42	6.95	7.48
$H_{m\acute{a}x}/H_z$		1.07	1.14	1.29	1.14	1.11
H_s/H_z		1.03	1.04	1.02	1.04	1.06
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	2.08	2.18	2.20	2.20	2.10
	Protótipo (s)	10.40	10.90	11.00	11.00	10.50
T_s	Modelo (s)	2.01	2.02	2.01	2.01	2.01
	Protótipo (s)	10.04	10.08	10.06	2.00	10.03
T_z	Modelo (s)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	Protótipo (s)	10.00	10.00	9.99	10.00	10.00
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		1.04	1.09	1.10	1.10	1.05
T_s/T_z		1.00	1.01	1.01	1.00	1.00
N_{ondas}		544	1102	1104	1102	545

Os resultados da análise realizada mostram que as alturas das ondas medidas em frente à obra sofreram pequenas alterações em relação às obtidas no ensaio anterior, considerando-se a média das alturas H_z obtidas em cada ensaio, a diferença fica em 4%. Esta variação pode ser devido a diferenças na refletividade da obra ao longo do ensaio.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa R1, tem-se:

$$rec = 5,75 \text{ m}$$

$$h_f = 2,38 \text{ m}$$

As Figuras 182 e 183 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 182 – Comparação da seção M1 - Alternativa R2

Figura 183 – Comparação da seção M2 - Alternativa R2

A seção 5S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 184 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 5 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 184 – Comparação da seção 5S - Alternativa R2

A Tabela 34 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 5S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 34 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R2

		M1	M2	seção 5
rec experimental	modelo (mm)	334	343	363
	protótipo (m)	8.35	8.56	9.08
h_r experimental	modelo (mm)	89	79	85
	protótipo (m)	2.22	1.97	2.13

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados. Entretanto, comparando esta alternativa com a anterior, percebe-se grande coerência nos resultados, uma vez que os recuos médios foram um pouco maiores do que os obtidos na Alternativa R1, o que é coerente com as alturas de ondas ligeiramente superiores que reinaram durante este ensaio. Já o recuo máximo ficou abaixo do obtido na alternativa anterior, fruto, possivelmente de variações no embricamento dos blocos obtidos em ambas as alternativas.

De maneira geral, pode-se dizer que houve repetibilidade nos resultados obtidos com emprego de ondas regulares.

7.6.7 Obtenção do trem de ondas irregulares na profundidade da Ponta 3, a partir do módulo BW do MIKE 21

Para tornar possível a comparação entre a metodologia de ensaio de quebra-mares que emprega a altura significativa de onda com aquela que lança mão de ondas irregulares, a partir do estudo de caso proposto, seria necessário obter trens de ondas irregulares com as mesmas alturas e períodos significativos obtidos para cada nível de maré nos ensaios com ondas regulares.

Este processo teve que ser feito de maneira iterativa, de forma que foram gerados, a partir da ferramenta Random Wave Generation, trens de onda com diferentes alturas significativas H_s e períodos de pico T_p ao largo.

Estes trens de ondas foram introduzidos módulo BW e simulados, um a um, até que se obtivesse um trem de ondas de saída nas profundidades possíveis para a ponta 3 em função dos níveis de maré ensaiados, com parâmetros significativos tão próximos quanto possível dos obtidos nos ensaios com ondas regulares.

As Figuras 185 à 187 apresentam os trens de onda obtidos para os três níveis de maré.

Figura 185 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de preamar

Figura 186 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de meia maré

Figura 187 – Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de baixa mar

Já as Figuras 188 à 190 apresentam os espectros de energia da agitação referentes a cada um dos trens de ondas obtidos.

Figura 188 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de preamar

Figura 189 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de meia maré

Figura 190 – Espectro de Energia calculado para o trem de ondas obtido para a profundidade da ponta 3 referente ao nível de baixa mar

A análise estatística dos trens de ondas obtidos está apresentada na Tabela 35, a seguir.

Tabela 35 – Análise estatística dos trens de ondas obtidos a partir do módulo BW do MIKE 21

		PM	MM	BM
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	318	300	306
	Protótipo (m)	7.95	7.50	7.65
H_s	Modelo (mm)	220	200	201
	Protótipo (m)	5.50	4.99	5.01
H_z	Modelo (mm)	140	140	132
	Protótipo (m)	3.50	3.50	3.30
$H_{m\acute{a}x}/H_s$		1.45	2.14	2.32
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	2.74	2.74	2.80
	Protótipo (s)	13.70	13.70	14.00
T_s	Modelo (s)	1.99	1.99	2.03
	Protótipo (s)	9.95	9.95	10.15
T_z	Modelo (s)	1.73	1.73	1.76
	Protótipo (s)	8.65	8.65	8.80
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		1.58	1.58	1.59
T_s/T_z		1.15	1.15	1.15
N_{ondas}		544	1102	1104

Pela análise realizada, pode-se perceber que os parâmetros Hs e Ts dos trens de ondas randômicos obtidos encontram-se bem próximos dos empregados no estudo com ondas regulares.

7.6.8 Calibração dos trens de ondas irregulares

Para calibração dos trens de onda irregulares no canal, foram montados os arquivos de entrada do sistema de controle de geração apresentados de forma compacta nas Figuras 191 à 193.

Descrição dos dados:		entrada de dados de preamar escala 1:25	Hmáx	317.88	7.95
ΔF (Hz)		0.002684564	Hs	219.97	5.50
Frequência de corte inferior (Hz)		0.351677865	Hz	139.93	3.50
Frequência de corte superior (Hz)		0.751677871	Hmax/Hs	1.45	1.45
Número de Ciclos		2	Tmáx	2.74	13.70
			Ts	1.99	9.95
			Tz	1.73	8.63
			Tmax/Ts	1.38	1.38

Frequência (Hz)	Espectro de Energia (mm ² *s)	Espectro de Amplitudes (mm)	Espectro de Fases (rad)	Coefficientes Iniciais	Range
0.351677865	127.6033173	0.827718854	0.364421457	1	0.5
0.354362428	76.71608734	0.641793132	3.083907127	1	0.5
0.357046992	2.941544294	0.125672296	3.010608673	1	0.5
0.359731555	56.21957779	0.549408853	-1.608708143	1	0.5
0.362416118	28.81582642	0.393339366	1.051998258	1	0.5
0.365100682	90.84409332	0.698393524	-0.966361225	1	0.5
0.367785245	4.805043221	0.160620332	-0.465521306	1	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.73557049	13.05354309	0.264737874	0.267843902	1	0.5
0.738255024	64.62523651	0.589051068	0.943003118	1	0.5
0.740939617	5.431125641	0.170764193	-0.007073934	1	0.5
0.743624151	1.033683062	0.074498162	-1.480309606	1	0.5
0.746308744	25.50057602	0.370021433	-2.13270092	1	0.5
0.748993278	12.51977539	0.259268731	-3.064685106	1	0.5
0.751677871	50.69421768	0.521712303	0.236995906	1	0.5

Figura 191 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Preamar

Descrição dos dados:		entrada de dados de meia maré escala 1:25	Hmáx	300.08	7.50
			Hs	199.53	4.99
			Hz	128.43	3.21
ΔF (Hz)		0.002684564			
Frequência de corte inferior (Hz)		0.351677865	Hmax/Hs	1.50	1.50
Frequência de corte superior (Hz)		0.751677871			
Número de Ciclos		2	Tmáx	2.72	13.60
			Ts	2.02	10.08
			Tz	1.75	8.75
			Tmax/Ts	1.35	1.35

Frequência (Hz)	Espectro de Energia (mm ² *s)	Espectro de Amplitudes (mm)	Espectro de Fases (rad)	Coefficientes Iniciais	Range
0.351677865	59.83007431	0.566776216	2.680751562	1	0.5
0.354362428	160.2316437	0.927525818	0.041682039	1	0.5
0.357046992	55.23268509	0.54456526	0.458423853	1	0.5
0.359731555	162.1655884	0.933106482	0.938594937	1	0.5
0.362416118	3.123868704	0.129508495	1.075797558	1	0.5
0.365100682	205.4608765	1.050307393	1.245385528	1	0.5
0.367785245	49.76306152	0.516898692	1.129547119	1	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.73557049	21.85578537	0.342558771	-1.256412983	1	0.5
0.738255024	58.86071014	0.562166035	-1.806902409	1	0.5
0.740939617	17.31937408	0.304942519	-0.341599375	1	0.5
0.743624151	53.8869133	0.537890077	-0.34661606	1	0.5
0.746308744	65.74842834	0.594147861	-0.373736739	1	0.5
0.748993278	64.38321686	0.587947011	-0.495936543	1	0.5
0.751677871	5.820902348	0.176785648	-2.426488161	1	0.5

Figura 192 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Meia maré

Descrição dos dados:		entrada de dados de baixa mar escala 1:25	Hmáx	305.74	7.64
			Hs	200.59	5.01
			Hz	131.90	3.30
ΔF (Hz)		0.002684564			
Frequência de corte inferior (Hz)		0.351677865	Hmax/Hs	1.52	1.52
Frequência de corte superior (Hz)		0.751677871			
Número de Ciclos		2	Tmáx	2.80	14.00
			Ts	2.03	10.17
			Tz	1.76	8.79
			Tmax/Ts	1.38	1.38

Frequência (Hz)	Espectro de Energia (mm ² *s)	Espectro de Amplitudes (mm)	Espectro de Fases (rad)	Coefficientes Iniciais	Range
0.351677865	110.0047226	0.76852417	0.420980483	1	0.5
0.354362428	268.5901184	1.200872421	2.483936548	1	0.5
0.357046992	79.91965485	0.655056357	2.311725855	1	0.5
0.359731555	65.47661591	0.592918456	-3.022110701	1	0.5
0.362416118	70.67610168	0.616010547	1.412592173	1	0.5
0.365100682	62.2670784	0.578204036	-2.573330402	1	0.5
0.367785245	18.04471588	0.311262548	1.999311566	1	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.73557049	19.88842392	0.326777428	1.001326323	1	0.5
0.738255024	77.98239136	0.647068322	-0.296611756	1	0.5
0.740939617	11.32501316	0.246587589	2.722737312	1	0.5
0.743624151	43.67700195	0.484259635	1.948703289	1	0.5
0.746308744	79.71520233	0.654217959	1.447595954	1	0.5
0.748993278	26.19813538	0.37504819	1.528989196	1	0.5
0.751677871	15.2103014	0.285772711	-1.089796901	1	0.5

Figura 193 – Arquivo de entrada criado para a calibração do trem de ondas irregular - Baixa mar

As Figuras 194 à 196 mostram a comparação entre os espectros de energia de referência e os obtidos após a etapa de calibração do sistema de controle da geração de ondas.

Figura 194 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado - Preamar

Figura 195 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado - Meia maré

Figura 196 – Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado – Baixa mar

As figuras anteriores mostram que os espectros calibrados ficaram extremamente próximos dos de referência, a ponto de ser muito difícil distingui-los graficamente.

7.6.9 Confeção dos arquivos contendo os trens de ondas irregulares para entrada no software de controle da geração de ondas

A partir dos coeficientes obtidos na etapa de calibração, foram montados os arquivos de entrada para o software de controle da geração de ondas. Conforme descrito no item 7.6.1, em função dos tempos de duração dos ensaios, o arquivo entrada de preamar teria 3 repetições do trem de ondas randômico calibrado, já os demais, 6 repetições.

As Figuras 197 à 199 apresentam, de forma adaptada, os arquivos de entrada confeccionados.

Descrição dos dados		Ensaio_Irregular_PM_H220	
Hmáx		317.88	7.95
Hs		219.97	5.5
Hz		139.93	3.5
Hmax/Hs		1.45	1.45
Tmáx		2.74	13.7
Ts		1.99	9.95
Tz		1.73	8.63
Tmax/Ts		1.38	1.38
Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)	
	0.00	1.25	-5.36
	0.02	6.37	-0.65
	0.04	11.47	4.08
	0.06	16.51	8.81
	0.08	21.46	13.50
	0.10	26.30	18.13
	⋮	⋮	⋮
	1117.40	-23.60	-27.56
	1117.42	-18.83	-23.39
	1117.44	-13.94	-19.06
	1117.46	-8.94	-14.59
	1117.48	-3.86	-10.01
	1117.50	0.00	0.00
	1117.52	0.00	0.00
	1117.54	0.00	0.00
	⋮	⋮	⋮
	1147.44	0.00	0.00
	1147.46	0.00	0.00
	1147.48	0.00	0.00

Figura 197 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de preamar

Descrição dos dados		Ensaio_Irregular_MM_H200	
Hmáx		300.08	7.5
Hs		199.53	4.99
Hz		128.43	3.21
Hmax/Hs		1.5	1.5
Tmáx		2.72	13.6
Ts		2.02	10.08
Tz		1.75	8.75
Tmax/Ts		1.35	1.35
Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)	
	0.00	0.38	-9.68
	0.02	4.49	-5.97
	0.04	8.54	-2.26
	0.06	12.49	1.42
	0.08	16.32	5.04
	0.10	20.00	8.58
	⋮	⋮	⋮
	2234.90	-20.12	-27.34
	2234.92	-16.12	-24.02
	2234.94	-12.04	-20.57
	2234.96	-7.91	-17.01
	2234.98	-3.76	-13.37
	2235.00	0.00	0.00
	2235.02	0.00	0.00
	2235.04	0.00	0.00
	⋮	⋮	⋮
	2264.94	0.00	0.00
	2264.96	0.00	0.00
	2264.98	0.00	0.00

Figura 198 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de meia maré

Ensaio_Irregular_BM_H200		
Descrição dos dados		
Hmáx	305.74	7.64
Hs	200.59	5.01
Hz	131.9	3.3
Hmax/Hs	1.52	1.52
Tmáx	2.8	14
Ts	2.03	10.17
Tz	1.76	8.79
Tmax/Ts	1.38	1.38
Tempo (s)	Trem de Ondas de Referência (mm)	Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm)
0.00	1.77	-0.18
0.02	3.50	0.67
0.04	5.14	1.45
0.06	6.69	2.15
0.08	8.14	2.78
0.10	9.48	3.32
⋮	⋮	⋮
2234.90	-7.74	-5.24
2234.92	-5.77	-4.14
2234.94	-3.82	-3.08
2234.96	-1.90	-2.06
2234.98	-0.04	-1.09
2235.00	0.00	0.00
2235.02	0.00	0.00
2235.04	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮
2264.94	0.00	0.00
2264.96	0.00	0.00
2264.98	0.00	0.00

Figura 199 – Arquivo adaptado de ensaio com ondas irregulares confeccionado para o nível de baixa mar

7.6.10 Ensaio da seção do cabeço com ondas irregulares – Alternativa I1

7.6.10.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do cabeço da estrutura empregando ondas irregulares, seguindo as definições apresentadas no item 7.6.1.

7.6.10.2 Procedimento

Para o ensaio do quebra-mar sob ação de ondas irregulares, foi seguido o seguinte procedimento:

- Montagem e impermeabilização do núcleo da estrutura;
- Rolagem dos blocos com emprego da caçamba, com água no nível de preamar e sem geração de ondas;
- Execução do levantamento topo-batimétrico da estrutura indeformada;
- Execução do primeiro ensaio de preamar;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à meia maré;
- Execução do primeiro ensaio de meia maré;

- Alteração do nível d'água para o correspondente à baixa mar;
- Execução do ensaio de baixa mar;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à meia maré;
- Execução do segundo ensaio de meia maré;
- Alteração do nível d'água para o correspondente à preamar;
- Execução do segundo ensaio de preamar;
- Execução do levantamento topo-batimétrico da estrutura deformada;
- Remoção dos blocos da armadura da estrutura.
- Repetição dos procedimentos anteriores para verificação da repetibilidade dos resultados obtidos.

7.6.10.3 Resultados e Discussão

A Tabela 36 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa I1.

Tabela 36 – Ficha de ensaio da Alternativa I1

Alternativa:		I1		
Data:		10/11/2007		
Nível d'água	Teste	Ensaio	H_s ponta3 (mm)	Observação:
PM		x	220	Diversas ondas arrebentam antes do QM
MM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
BM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
MM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
PM		x	220	Diversas ondas arrebentam antes do QM

Como mostra a ficha de ensaio, diversas ondas arrebentaram antes de atingir a estrutura. Este fato já era esperado, por se tratar de um quebra-mar raso, cuja onda de projeto é limitada pela arrebentação.

As Figuras 200 à 204 mostram os trens de ondas junto ao quebra-mar, medidas ao longo dos ensaios a partir da ponta 4.

Figura 200 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de preamar da Alternativa I1

Figura 201 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o primeiro ensaio de meia maré da Alternativa I1

Figura 202 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o ensaio de baixa mar da Alternativa I1

Figura 203 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de meia maré da Alternativa II

Figura 204 – Trem de ondas obtido a partir da ponta 4 para o segundo ensaio de preamar da Alternativa II

A Tabela 37 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 37 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa II

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{\max}$	Modelo (mm)	382	337	327	336	355
	Protótipo (m)	9.56	8.43	8.18	8.40	8.87
H_s	Modelo (mm)	258	218	235	215	240
	Protótipo (m)	6.45	5.45	5.88	5.39	5.99
H_z	Modelo (mm)	161	137	146	134	147
	Protótipo (m)	4.02	3.42	3.64	3.36	3.67
$H_{\max}/H_s$		1.48	1.55	1.39	1.56	1.48
$T_{\max}$	Modelo (s)	2.96	3.36	5.06	3.32	3.50
	Protótipo (s)	14.80	16.80	25.30	16.60	17.50
T_s	Modelo (s)	2.04	2.08	2.16	2.09	2.06
	Protótipo (s)	10.19	10.42	10.81	2.00	10.31
T_z	Modelo (s)	1.73	1.70	1.75	1.70	1.70
	Protótipo (s)	8.63	8.52	8.74	8.49	8.50
$T_{\max}/T_z$		1.71	1.97	2.89	1.96	2.06
T_s/T_z		1.18	1.22	1.24	1.23	1.21
N_{ondas}		629	1293	1265	1298	639

Analisando os ensaios, percebe-se que mesmo considerando a arrebentação no registro, as ondas que atingiam a estrutura eram superiores às calibradas em relação à ponta 3. Entretanto, comparando as alturas de ondas significativas com as obtidas nos ensaios com ondas regulares, tem-se que estas últimas são bem inferiores às primeiras.

Analisando a sequência de ensaios, tem-se que as alturas significativas de ondas diminuíram dos primeiros ensaios de cada nível para os últimos, assim como havia ocorrido nos ensaios com ondas regulares.

Se desprezarmos o efeito da reflexão e da arrebentação no registro da ponta 4 e utilizarmos a média das alturas H_s obtidas nos dois ensaios de preamar, além dos demais parâmetros dados pela Tabela 38, os seguintes parâmetros são obtidos pela metodologia da PIANC:

Tabela 38 – Parâmetros de entrada para o emprego da metodologia da PIANC

ρ_s	ρ_w	Hs	W_{50}	D_{50}	Tz	g	D_{15}	D_{85}	d
t/m ³	t/m ³	m	t	m	s	m/s ²	m	m	m
2,85	1,02	6.22	4,92	1,12	9,00	9,81	1,00	1,28	8,90

Da Equação 38:

$$N_s = H_o = 2,89$$

Da Equação 39:

$$H_o T_o = 74,35$$

Da distribuição granulométrica:

$$f_g = 1,28$$

$$1,3 < f_g = 1,28 < 1,8 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

$$f_d = 2,81$$

$$\frac{d}{D_{50}} = 7,4 < 12,5 < 25 \Rightarrow \tilde{n} \text{ ok}$$

Da Equação 42:

$$rec = 2,65 \text{ m}$$

Da Equação 43:

$$h_f = 2,38 \text{ m}$$

A partir da Tabela 1, percebe-se que ambos os parâmetros de estabilidade classificam o quebra-mar como dinamicamente estável, o que indica que deve haver uma acomodação intensa dos blocos e a formação de uma berma em evidenciada.

As Figuras 205 à 210 trazem a evolução do perfil da estrutura, vista através de uma sequência fotográfica:

Figura 205 – Perfil da estrutura indeformada - Alternativa I1

Figura 206 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de preamar - Alternativa I1

Figura 207 – Perfil da estrutura após o primeiro ensaio de meia maré - Alternativa I1

Figura 208 – Perfil da estrutura após o ensaio de baixa mar - Alternativa I1

Figura 209 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de meia maré - Alternativa I1

Figura 210 – Perfil da estrutura após o segundo ensaio de preamar - Alternativa I1

Já as Figuras 211 e 212 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 211 – Comparação da seção M1 - Alternativa II

Figura 212 – Comparação da seção M2 - Alternativa II

A seção 6S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 213 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 6 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 213 – Comparação da seção 6S - Alternativa II

A Tabela 39 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 6S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 39 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa II

		M1	M2	seção 6
rec experimental	modelo (mm)	215	212	234
	protótipo (m)	5.38	5.29	5.85
h_f experimental	modelo (mm)	90	80	89
	protótipo (m)	2.26	1.99	2.22

Considerando que os valores esperados eram $rec_{TEO} = 2,65$ m e $h_{fTEO} = 2,38$ m percebe-se que, nesta alternativa, os recuos experimentais obtidos se situaram bem acima do valor esperado pelo método da PIANC.

Com relação às profundidades de interseção, se situaram próximos calculados a partir da metodologia proposta.

7.6.11 Ensaio da seção do cabeço com ondas irregulares – Alternativa I2

7.6.11.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado para verificar a repetibilidade dos resultados obtidos na Alternativa I1

7.6.11.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa I1:

7.6.11.3 Resultados e Discussão

A Tabela 40 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa I2.

Tabela 40 – Ficha de ensaio da Alternativa I2				
Alternativa:	I2			
Data:	12/11/2007			
Nível d'água	Teste	Ensaio	H _{s ponta3} (mm)	Observação:
PM		x	220	Diversas ondas arrebentam antes do QM
MM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
BM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
MM		x	200	Diversas ondas arrebentam antes do QM
PM		x	220	Diversas ondas arrebentam antes do QM

Já a Tabela 41 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 41 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa I2

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	367	318	324	325	352
	Protótipo (m)	9.18	7.95	8.10	8.12	8.80
H_s	Modelo (mm)	254	215	232	214	237
	Protótipo (m)	6.36	5.37	5.80	5.34	5.93
H_z	Modelo (mm)	157	136	141	135	145
	Protótipo (m)	3.93	3.39	3.53	3.37	3.63
$H_{m\acute{a}x}/H_s$		1.44	1.48	1.40	1.52	1.49
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	3.50	3.36	4.96	3.26	3.44
	Protótipo (s)	17.50	16.80	24.80	16.30	17.20
T_s	Modelo (s)	2.08	2.11	2.12	2.12	2.11
	Protótipo (s)	10.42	10.55	10.62	2.00	10.53
T_z	Modelo (s)	1.75	1.72	1.70	1.73	1.72
	Protótipo (s)	8.73	8.60	8.48	8.66	8.58
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		2.00	1.95	2.92	1.88	2.01
T_s/T_z		1.19	1.23	1.25	1.22	1.23
N_{ondas}		622	1281	1299	1272	633

Os resultados da análise realizada mostram que as alturas das ondas medidas em frente à obra sofreram pequenas alterações em relação às obtidas no ensaio anterior, considerando-se a média das alturas H_s obtidas em cada ensaio, a diferença fica em 1%. Esta variação pode ser devido a diferenças refletividade da obra ao longo do ensaio.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa I1, tem-se:

$$rec = 2,50 \text{ m}$$

$$h_f = 2,38 \text{ m}$$

As Figuras 214 e 215 mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 214 – Comparação da seção M1 - Alternativa I2

Figura 215 – Comparação da seção M2 - Alternativa I2

A seção 3S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 216 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 3 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 216 – Comparação da seção 3S - Alternativa I2

A Tabela 42 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 3S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 42 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa R2

		M1	M2	seção 4
rec experimental	modelo (mm)	182	190	231
	protótipo (m)	4.54	4.74	5.77
h_f experimental	modelo (mm)	110	96	119
	protótipo (m)	2.74	2.41	2.98

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados. Entretanto, comparando esta alternativa com a anterior, percebe-se grande coerência nos resultados, uma vez que os recuos médios foram um pouco menores do que os obtidos na Alternativa I1, o que é coerente com as alturas de ondas ligeiramente inferiores que reinaram durante este ensaio. Já o recuo máximo ficou muito próximo do obtido na alternativa anterior.

De maneira geral, pode-se dizer que houve repetibilidade nos resultados obtidos com emprego de ondas irregulares.

7.7 Ensaios Comparativos Entre Ondas Regulares e Irregulares – Quebra-mar profundo

7.7.1 Aspectos gerais

Devido ao fato do quebra-mar estudado se encontrar numa profundidade rasa, uma parte da energia das ondas irregulares se dissipava na forma de arrebentação, antes de atingir o talude. Sendo assim, as conclusões da análise comparativa entre as metodologias de ensaio seriam válidas apenas nessa condição.

Pensando em generalizar essas conclusões, decidiu-se pela montagem de um quebra-mar de características idênticas ao projetado pela AQUAMODELO para Saquarema, mas disposto em uma profundidade maior, de forma que todas as ondas ensaiadas arrebentassem apenas sobre a estrutura.

A Tabela 43 apresenta as profundidades junto à este quebra-mar mais profundo e de calibração.

Tabela 43 – Profundidade junto à obra e de calibração dos trens de ondas – Quebra-mar profundo

	Profundidade obra		Profundidade calibração	
	Modelo (cm)	Protótipo (m)	Modelo (cm)	Protótipo (m)
Preamar	60.6	15.15	95.6	23.9
Meia maré	57.4	14.35	92.2	23.05
Baixa mar	53.8	13.45	88.8	22.2

Todos os demais parâmetros de ensaio, como granulometria da estrutura, ondas de projeto e metodologia de montagem da estrutura, por exemplo, foram mantidos em relação ao quebra-mar raso para permitir uma comparação direta entre os resultados.

7.7.2 Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas regulares – Alternativa PR1

7.7.2.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do quebra-mar profundo empregando ondas regulares, seguindo as definições apresentadas no item 6.7.1.

7.7.2.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa R1 (item 7.6.5.2)

7.7.2.3 Resultados e Discussão

A Tabela 44 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa PR1.

Tabela 44 – Ficha de ensaio da Alternativa PR1				
Alternativa:	PR1			
Data:	14/11/2007			
Nível d'água	Teste	Ensaio	H_{ponta3} (mm)	Observação:
PM		x	220	
MM		x	200	
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Já a Tabela 45 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 45 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PR1

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	310	275	231	274	291
	Protótipo (m)	7.75	6.87	5.78	6.86	7.27
H_s	Modelo (mm)	288	253	217	251	279
	Protótipo (m)	7.19	6.33	5.43	6.26	6.96
H_z	Modelo (mm)	278	246	212	243	268
	Protótipo (m)	6.94	6.15	5.31	6.07	6.70
$H_{m\acute{a}x}/H_z$		1.12	1.12	1.09	1.13	1.09
H_s/H_z		1.04	1.03	1.02	1.03	1.04
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	2.10	2.10	2.12	2.10	2.08
	Protótipo (s)	10.50	10.50	10.60	10.50	10.40
T_s	Modelo (s)	2.02	2.02	2.02	2.02	2.03
	Protótipo (s)	10.12	10.10	10.09	10.09	10.13
T_z	Modelo (s)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	Protótipo (s)	9.99	10.00	10.00	10.00	9.99
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		1.05	1.05	1.06	1.05	1.04
T_s/T_z		1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
N_{ondas}		544	1103	1103	1103	544

A partir da análise realizada, percebe-se que esta alternativa teve um comportamento muito parecido com a Alternativa R1. Entretanto as alturas de onda junto à obra foram cerca de 9% menores do que as obtidas pra o quebra-mar raso.

Esta diferença deve-se fundamentalmente à um menor efeito do empolamento neste caso.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa R1, tem-se:

$$rec = 4,64 \text{ m}$$

$$h_f = 3,63 \text{ m}$$

As Figuras 217 e 218 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 217 – Comparação da seção M1 - Alternativa PR1

Figura 218 – Comparação da seção M2 - Alternativa PR1

A seção 9S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 219 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 9 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 219 – Comparação da seção 9S - Alternativa PR1

A Tabela 46 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 9S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 46 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR1

		M1	M2	seção 9
rec experimental	modelo (mm)	364	374	384
	protótipo (m)	9.09	9.36	9.59
h_f experimental	modelo (mm)	142	156	113
	protótipo (m)	3.54	3.91	2.83

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados. Entretanto, comparando esta alternativa com a Alternativa R1, tem-se que, apesar dos recuos médios desta alternativa terem sido superiores,

o mesmo não ocorreu para o recuo máximo. Estes resultados estão coerentes, pois existem dois efeitos que se contrapõem entre estas alternativas. O primeiro é a altura de onda que diminuiu, o que levaria a recuos menores. Já o segundo é a altura do quebra mar, que aumentou, fazendo com que fosse necessário um recuo maior da estrutura para obter o mesmo ângulo final do talude.

Com relação às profundidades de interseção, os resultados obtidos ficaram bem próximos dos calculados pela metodologia da PIANC.

7.7.3 Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas regulares – Alternativa PR2

7.7.3.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do quebra-mar profundo empregando ondas regulares, seguindo as definições apresentadas no item 7.7.1 no intuito de verificar a repetibilidade dos resultados obtidos para a Alternativa PR1

7.7.3.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa PR1 (item 7.7.2.2)

7.7.3.3 Resultados e Discussão

A Tabela 47 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa PR2.

Tabela 47 – Ficha de ensaio da Alternativa PR2

Alternativa:		PR2		
Data:		19/11/2007		
Nível d'água	Teste	Ensaio	H _{ponta3} (mm)	Observação:
PM		x	220	
MM		x	200	
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Já a Tabela 48 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 48 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaio da Alternativa PR2

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
H_{máx}	Modelo (mm)	304	256	229	261	283
	Protótipo (m)	7.60	6.40	5.72	6.53	7.06
H_s	Modelo (mm)	281	241	203	240	262
	Protótipo (m)	7.03	6.02	5.07	6.01	6.54
H_z	Modelo (mm)	269	235	197	235	252
	Protótipo (m)	6.73	5.87	4.94	5.87	6.30
H_{máx}/H_z		1.13	1.09	1.16	1.11	1.12
H_s/H_z		1.04	1.03	1.03	1.02	1.04
T_{máx}	Modelo (s)	2.06	2.04	2.08	2.10	2.08
	Protótipo (s)	10.30	10.20	10.40	10.50	10.40
T_s	Modelo (s)	2.02	2.02	2.01	2.02	2.02
	Protótipo (s)	10.10	10.08	10.07	10.12	10.11
T_z	Modelo (s)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	Protótipo (s)	9.99	10.00	10.00	10.00	9.99
T_{máx}/T_z		1.03	1.02	1.04	1.05	1.04
T_s/T_z		1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
N_{ondas}		544	1103	1103	1103	544

Os resultados da análise realizada mostram que as alturas das ondas medidas em frente à obra sofreram pequenas alterações em relação às obtidas na Alternativa PR1, considerando-se a média das alturas H_z obtidas em cada ensaio, a diferença fica em 4%. Esta variação pode ser devido a diferenças na refletividade da obra ao longo do ensaio.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa R1, tem-se:

$$rec = 4,03 \text{ m}$$

$$h_f = 3,63 \text{ m}$$

As Figuras 220 e 221 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 220 – Comparação da seção M1 - Alternativa PR2

Figura 221 – Comparação da seção M2 - Alternativa PR2

A seção 3S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 222 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 3 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 222 – Comparação da seção 3S - Alternativa PR2

A Tabela 49 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 3S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 49 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR2

		M1	M2	seção 9
rec experimental	modelo (mm)	344	356	368
	protótipo (m)	8.61	8.89	9.21
h_f experimental	modelo (mm)	126	152	137
	protótipo (m)	3.15	3.79	3.42

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados. Entretanto, comparando esta alternativa com a anterior, tem-se que, apesar dos recuos desta alternativa terem sido um pouco inferiores, ainda sim estão próximos dos obtidos na Alternativa PR1.

Com relação às profundidades de interseção, os resultados obtidos ficaram bem próximos dos calculados pela metodologia da PIANC e dos obtidos na alternativa anterior.

De maneira geral, pode-se dizer que houve repetibilidade nos resultados obtidos com ondas regulares para o quebra-mar profundo.

7.7.4 Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas irregulares – Alternativa PI1

7.7.2.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do quebra-mar profundo empregando ondas irregulares, seguindo as definições apresentadas no item 7.7.1.

7.7.2.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa I1 (item 7.6.10.2)

7.7.2.3 Resultados e Discussão

A Tabela 50 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa PI1.

Tabela 50 – Ficha de ensaio da Alternativa PI1				
Alternativa:	PI1			
Data:	14/11/2007			
Nível d'água	Teste	Ensaio	H _s ponta3 (mm)	Observação:
PM		x	220	
MM		x	200	
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Já a Tabela 51 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 51 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PI1

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	431	343	295	337	406
	Protótipo (m)	10.77	8.58	7.38	8.43	10.14
H_s	Modelo (mm)	223	189	186	188	209
	Protótipo (m)	5.58	4.73	4.64	4.70	5.23
H_z	Modelo (mm)	139	119	117	117	130
	Protótipo (m)	3.47	2.99	2.92	2.93	3.25
$H_{m\acute{a}x}/H_s$		1.93	1.81	1.59	1.79	1.94
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	3.46	4.68	3.40	4.66	3.12
	Protótipo (s)	17.30	23.40	17.00	23.30	15.60
T_s	Modelo (s)	2.08	2.11	2.08	2.10	2.12
	Protótipo (s)	10.41	10.56	10.39	2.00	10.62
T_z	Modelo (s)	1.74	1.75	1.71	1.72	1.73
	Protótipo (s)	8.69	8.74	8.56	8.58	8.67
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		1.99	2.68	1.99	2.72	1.80
T_s/T_z		1.20	1.21	1.21	1.23	1.22
N_{ondas}		625	1261	1287	1285	627

A partir da análise realizada, percebe-se que houve um aumento significativo na altura da onda máxima, em contrapartida houve uma redução da altura significativa quando comparado à Alternativa II. O aumento do $H_{m\acute{a}x}$ pode ser explicado pelo fato das maiores ondas arrebitarem antes de atingir o quebra-mar na sua versão mais rasa, o que não ocorreu neste caso. Já a diminuição do H_s deve-se ao menor efeito de empolamento da onda neste caso.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa II, tem-se:

$$rec = 2.01 \text{ m}$$

$$h_f = 3,63 \text{ m}$$

As Figuras 223 e 224 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 223 – Comparação da seção M1 - Alternativa PI1

Figura 224 – Comparação da seção M2 - Alternativa PI1

A seção 8S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 225 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 8 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 225 – Comparação da seção 8S - Alternativa PI1

A Tabela 52 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 8S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 52 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PR1

		M1	M2	seção 8
rec experimental	modelo (mm)	268	267	330
	protótipo (m)	6.70	6.67	8.24
h_f experimental	modelo (mm)	136	146	156
	protótipo (m)	3.40	3.65	3.89

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados.

Comparando esta alternativa com a Alternativa I1, tem-se que, os recuos desta foram superiores, mostrando que o aumento da onda máxima, aliado a maior profundidade do quebra-mar foram preponderantes em relação à diminuição da altura de onda significativa.

Com relação às profundidades de interseção, os resultados obtidos ficaram bem próximos dos calculados pela metodologia da PIANC.

7.7.5 Ensaio da seção do quebra-mar profundo com ondas irregulares – Alternativa PI2

7.7.5.1 Descrição do ensaio

Ensaio realizado com a seção do quebra-mar profundo empregando ondas irregulares, seguindo as definições apresentadas no item 7.7.1 com o intuito de verificar a repetibilidade dos resultados obtidos para a Alternativa PI1

7.7.5.2 Procedimento

Para este ensaio foi adotado o mesmo procedimento empregado na Alternativa PI1 (item 7.7.4.2)

7.7.5.3 Resultados e Discussão

A Tabela 53 apresenta a ficha de ensaio obtida para a Alternativa PI2.

Tabela 53 – Ficha de ensaio da Alternativa PI2

Alternativa:		PI2		
Data:		21/11/2007		
Nível d'água	Teste	Ensaio	H_s ponta3 (mm)	Observação:
PM		x	220	
MM		x	200	
BM		x	200	
MM		x	200	
PM		x	220	

Já a Tabela 54 apresenta a análise estatística das alturas e períodos realizadas para cada um dos trens de ondas obtidos a partir da ponta 4, excluindo-se os 30 primeiros e os 30 últimos segundos de cada registro.

Tabela 54 – Análise estatística dos trens de ondas dos Ensaios da Alternativa PI2

		PM 1	MM 1	BM	MM 2	PM 2
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	414	333	296	333	393
	Protótipo (m)	10.34	8.33	7.40	8.32	9.83
H_s	Modelo (mm)	215	188	185	185	204
	Protótipo (m)	5.38	4.69	4.63	4.62	5.10
H_z	Modelo (mm)	133	118	116	117	129
	Protótipo (m)	3.33	2.95	2.91	2.92	3.22
$H_{m\acute{a}x}/H_s$		1.92	1.78	1.60	1.80	1.93
$T_{m\acute{a}x}$	Modelo (s)	3.12	4.66	3.34	4.66	3.16
	Protótipo (s)	15.60	23.30	16.70	23.30	15.80
T_s	Modelo (s)	2.07	2.08	2.07	2.10	2.14
	Protótipo (s)	10.34	10.42	10.36	2.00	10.71
T_z	Modelo (s)	1.71	1.72	1.72	1.74	1.76
	Protótipo (s)	8.54	8.60	8.60	8.69	8.79
$T_{m\acute{a}x}/T_z$		1.83	2.71	1.94	2.68	1.80
T_s/T_z		1.21	1.21	1.20	1.21	1.22
N_{ondas}		636	1281	1282	1268	618

Os resultados da análise realizada mostram que as alturas das ondas medidas em frente à obra sofreram alterações ínfimas em relação às obtidas na Alternativa PI1, considerando-se a média das alturas H_z obtidas em cada ensaio, a diferença fica em 3%. Esta variação pode ser devido a diferenças na refletividade da obra ao longo do ensaio.

Empregando a metodologia da PIANC, analogamente ao que foi feito para a Alternativa I1, tem-se:

$$rec = 1,73 \text{ m}$$

$$h_f = 3,63 \text{ m}$$

As Figuras 226 e 227 a seguir mostram uma comparação entre os perfis M1 e M2 da estrutura indeformada e após os ensaios realizados.

Figura 226 – Comparação da seção M1 - Alternativa PI2

Figura 227 – Comparação da seção M2 - Alternativa PI2

A seção 3S foi identificada como sendo a de maior recuo para esta alternativa. A Figura 228 a seguir mostra a progressão do perfil da seção 3 ao longo dos ensaios realizados.

Figura 228 – Comparação da seção 3S - Alternativa PI2

A Tabela 55 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e 3S obtidos a partir das figuras anteriores.

Tabela 55 – Recuos e profundidades de interseção – Alternativa PI2

		M1	M2	seção 3
rec experimental	modelo (mm)	278	284	343
	protótipo (m)	6.96	7.09	8.57
h_f experimental	modelo (mm)	150	141	162
	protótipo (m)	3.75	3.52	4.04

Considerando os valores da PIANC, tem-se que esta alternativa também apresentou recuos bem superiores aos esperados. Entretanto, comparando esta alternativa com a anterior,

tem-se que, apesar dos recuos desta alternativa terem sido um pouco superiores, ainda sim estão próximos dos obtidos na Alternativa PII.

Com relação às profundidades de interseção, os resultados obtidos ficaram bem próximos dos calculados pela metodologia da PIANC e dos obtidos na alternativa anterior.

De maneira geral, pode-se dizer que houve repetibilidade nos resultados obtidos com ondas irregulares para o quebra-mar profundo.

7.8 *Discussão*

Como o enfoque deste trabalho é na comparação entre a metodologia de ensaio que utiliza apenas os parâmetros significativos da onda com aquela que emprega o espectro de energia da agitação, serão discutidos neste item apenas os resultados dos estudos realizados na escala 1:25.

Para facilitar a discussão dos resultados obtidos, a Tabela 56 apresenta um quadro resumo dos ensaios realizados considerando as alturas de onda consideradas para os cálculos pela metodologia da PIANC, bem como os recuos e profundidades de interseção obtidos experimentalmente e calculados.

Tabela 56 – Quadro resumo dos resultados dos ensaios na escala 1:25

		(i;j)	Ensaio							
			R1	R2	I1	I2	PR1	PR2	PI1	PI2
			1	2	3	4	5	6	7	8
Parâmetro	H (adotado)	1	7.47	7.76	6.22	6.14	6.82	6.51	5.40	5.24
	M1	2	7.91	8.35	5.38	4.54	9.09	8.61	6.70	6.96
	<i>rec</i> experimental	M2	3	7.94	8.56	5.29	4.74	9.36	8.89	6.67
	Máx	4	10.07	9.08	5.85	5.77	9.59	9.21	8.24	8.57
	<i>rec</i> PIANC	5	5.13	5.75	2.65	2.50	4.64	4.03	2.01	1.73
	M1	6	1.83	2.22	2.26	2.74	3.54	3.15	3.40	3.75
	<i>h_f</i> experimental	M2	7	1.57	1.97	1.99	2.41	3.91	3.79	3.65
	Máx	8	3.16	2.13	2.22	2.98	2.83	3.42	3.89	4.04
	<i>h_f</i> PIANC	9	2.38	2.38	2.38	2.38	3.63	3.63	3.63	3.63

Antes de fazer a comparação entre as metodologias de ensaio propriamente ditas, passar-se-á a discussão entre os resultados obtidos nos ensaios e aqueles calculados pelo método da PIANC.

De maneira geral, todos os resultados obtidos no modelo foram, em termos do recuo da estrutura, substancialmente superiores aos calculados pelo método da PIANC. Entretanto, deve se levar em consideração dois fatores que podem diferir dos adotados para o cálculo, e portanto, justificar as diferenças.

O primeiro diz respeito ao parâmetro ρ_s do granito, que foi adotado como sendo 2,85 t/m³. Caso a massa específica real dos blocos seja 2,65 t/m³, por exemplo, o parâmetro (5;5) da Tabela 56 passaria para 5,73, ou seja, uma variação de quase 24% no recuo, para uma variação de 7,5% na massa específica.

Já o segundo, diz respeito às curvas granulométricas consideradas. Para o cálculo dos diâmetros característicos das distribuições, fez-se a suposição de que os pesos dos blocos se distribuíam linearmente dentro de cada faixa de peso separada. Isto é uma abstração da realidade, feita por ausência de informação mais detalhada. Sendo assim, é possível que as curvas granulométricas tivessem viés tanto com relação à média, quanto com relação aos desvios padrão.

Fica difícil simular uma variação nos resultados fruto deste efeito, posto que três parâmetros das equações se alterariam (D_{50} , D_{15} e D_{85}). Entretanto, analisando-se a Equação (42) percebe-se a grande influência dos parâmetros citados.

Vale salientar que esta deve ser a causa da grande diferença entre os resultados dos ensaios realizados na escala 1:20 e 1:25, resumidos na Tabela 57.

Tabela 57 – Quadro comparativo dos resultados dos ensaios nas escalas 1:20 e 1:25

		(i;j)	Ensaio			
			7	8	R1	R2
			1	2	3	4
Parâmetro	H (adotado)	1	7.00	7.00	7.47	7.76
	rec experimental	M1	2.22	2.27	7.91	8.35
		M2	2.09	2.98	7.94	8.56
		Máx	4.57	4.48	10.07	9.08
	rec PIANC		4.46	4.46	5.13	5.75
		M1	3.55	2.26	1.83	2.22
		M2	1.70	2.72	1.57	1.97
		Máx	3.50	3.46	3.16	2.13
	h _f PIANC	9	2.38	2.38	2.38	2.38

Claramente, os fatores elencados mereceriam uma investigação mais profunda, entretanto, como este não era o foco deste trabalho, uma vez que conhecer os reais parâmetros não alteraria em nada as conclusões a respeito da comparação entre as metodologias de ensaio (uma vez que os mesmos blocos foram utilizados nos ensaios com ondas regulares e irregulares), isto não foi realizado.

Analisando as alturas de onda dos ensaios consideradas (média dos H_z de preamar para os ensaios com ondas regulares e média dos H_s de preamar para os ensaios com ondas irregulares), percebe-se nitidamente que apesar de todos possuírem a mesma altura significativa na profundidade de 23 m (ponta 3), por efeito de empolamento e reflexão, as alturas de onda junto à obra não foram as mesmas.

Desta forma, as alturas de onda em frente à obra foram substancialmente diferentes entre os ensaios com ondas regulares e irregulares realizados.

Assim, percebe-se a importância de representar adequadamente a declividade de fundo na proximidade da obra sob estudo.

A comparação do efeito do empolamento nas ondas regulares e irregulares fica prejudicada para o quebra-mar raso, visto que as maiores ondas do espectro irregular arrebentavam antes de atingir a estrutura. Entretanto, para a estrutura mais profunda, percebe-se que o efeito do empolamento afeta mais as ondas regulares do que as irregulares. Isto pode ser verificado comparando (1;5) e (1;7) na Tabela 56, por exemplo.

De qualquer maneira, os parâmetros significativos dos trens de onda regulares e irregulares ao largo eram os mesmos, assim como a declividade de fundo, de forma que as variações nas características junto à obra obtidas são fruto da iteração dos trens de ondas estudados com a estrutura, além do fundo.

Nesse sentido, para comparar as metodologias de ensaio, é lícito comparar diretamente seus efeitos na estrutura.

Analisando primeiramente o quebra-mar raso, comparando (2;1) e (2;3) percebe-se que o recuo apresentado pela estrutura sob ação de ondas regulares foi muito superior ao da daquela que estava sob a ação de ondas irregulares com mesmo H_s .

Isto mostra que ensaiar em modelo reduzido, empregando ondas regulares, estruturas para as quais a onda de projeto é definida pela arrebentação, induz a um dimensionamento demasiadamente conservador, visto que além de se empregar uma energia total muito superior a que realmente atinge o quebra-mar, despreza-se o fato dos trens de ondas reais possuírem alturas de ondas que arrebentariam antes de atingir a estrutura.

Já, com relação ao quebra-mar mais profundo, comparando-se (2;6) e (2;8), percebe-se que ainda sim, em termos médios a obra sob ação de ondas regulares teve um recuo 24% superior àquela sob ação de ondas irregulares. Entretanto, analisando (4;6) e (4;8), nota-se que a diferença cai para apenas 7,5%.

Neste caso, apesar do emprego de ondas regulares no estudo em modelo reduzido levar, aparentemente a resultados mais conservadores, os ensaios realizados mostram que essa diferença, em termos do recuo máximo da estrutura não se mostrou tão significativa.

8 CONCLUSÕES

Quanto ao software de controle da geração de ondas, pode-se dizer que seu desenvolvimento foi concluído com êxito, levando-se em consideração as premissas propostas.

Como mostram as Figuras 194, 195 e 196, o sistema foi capaz de calibrar com exatidão, trens de ondas baseados em espectros de energia próprios para a profundidade existente no canal. Isto mostra que as diferenças entre os espectros de referência e os calibrados no item 4.5 eram decorrência do espectro de entrada não ser próprio para as profundidades testadas, e não de falhas no processo de controle.

Vale salientar, que o sistema desenvolvido, além de permitir a geração de ondas irregulares, da forma como foi concebido, torna possível a geração de ondas randômicas também, tendo como único senão, o aumento do tempo gasto na calibração do trem de ondas.

Fica como sugestão para trabalhos futuros uma avaliação mais aprofundada, deste tema, chegando, se possível, na criação de filtros ativos (digitais) para o canal do LHEPUSP.

Com relação à metodologia para obtenção de espectros de energia em águas rasas, feita com o emprego do módulo de Boussinesq (BW) do software MIKE 21 do Danish Hydraulic Institute, acoplado à sua ferramenta de geração de trens ondas randômicas, baseadas em espectros de energia da agitação (Random Wave Generation), pode-se dizer que foi bem sucedida, visto que permitiu a obtenção dos espectros de energia da agitação empregados no estudo de caso.

O único problema desta metodologia está relacionada aos modelos de Boussinesq necessitarem uma resolução espacial muito grande, principalmente se forem considerados os termos de água profunda. Ocorre, que para modelar águas profundas (desejável), passa a ser necessário aumentar o tamanho da grade, fazendo com que seja necessária uma capacidade de processamento muito alta.

Para se ter uma idéia, mesmo limitando a profundidade máxima da batimetria para 30 m e excluindo os parâmetros de água profunda, o tempo médio de simulação do software para os trens de onda testados foi de 3 horas e os arquivos gerados possuíam cerca de 25GB.

Apesar disto, os espectros obtidos foram de extrema importância, visto que o sistema de controle conseguiu calibrá-los perfeitamente, o que conferiu maior confiabilidade aos resultados da comparação entre as metodologias de ensaio.

Já quanto à análise de quão adequado é o procedimento de dimensionamento de quebra-mares de talude levando-se em conta apenas a onda significativa, pode-se dizer que os resultados do estudo de caso do quebra-mar de berma, realizado a partir dos dados fornecidos pela AQUAMODELO, empregando ondas regulares e irregulares em canal de ondas mostrou que, de uma maneira geral, o emprego de trens de ondas com altura e período significativos em modelos reduzidos leva a um dimensionamento conservador da estrutura, o que do ponto de vista econômico resulta em obras de custo mais elevado.

Esta afirmação ganha mais sustentabilidade quando o quebra-mar se encontra em profundidades muito pequenas, principalmente nos casos onde a onda de projeto é definida pela arrebentação, onde os ensaios mostraram diferenças de no mínimo 25% no recuo observado para a obra estudada.

Com relação à transferência e verificação da adequação do sistema proposto para o canal de ondas à bacia de ondas de Santos, foi realizado um único teste piloto, que compõe o ANEXO F deste trabalho. Os resultados deste teste mostraram ser, não só possível, como simples a adaptação, bastando um ajuste dos parâmetros do PID do software proposto.

9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto ao software de controle da geração de ondas, o único ponto, não totalmente explorado neste trabalho, até por não ser parte do escopo principal, foi a questão da reflexão das ondas na placa do gerador, na presença de uma estrutura reflexiva.

Para a validação dos ensaios do estudo de caso realizado, foi verificado apenas se havia a presença de fenômenos de ressonância no canal, avaliado pela ocorrência de modificações (amplificações) nos espectros de energia lidos no início e fim de cada ensaio para as pontas dispostas a barlamar dos filtros metálicos.

Fica como recomendação para trabalhos futuros uma avaliação mais aprofundada, deste tema, chegando, se possível, na criação de filtros ativos (digitais) para o canal do LHEPUSP.

Quanto à análise de quão adequado é o procedimento de dimensionamento de quebra-mares de talude levando-se em conta apenas a onda significativa, como neste estudo os ensaios foram realizados empregando apenas uma distribuição granulométrica e um único T_s , fica como recomendação para trabalhos futuros uma diversificação dos estudos realizados para outras distribuições e trens de ondas com outros parâmetros característicos, no intuito de confirmar os resultados e validar as conclusões obtidas neste trabalho.

Por fim, vale ressaltar que, passados sete anos de estudo, o LHEPUSP possui um sistema capaz de gerar trens de ondas irregulares em modelos bidimensionais, após décadas de atraso, em relação aos principais laboratórios do mundo. Neste sentido, para fechar de vez essa lacuna, passa a ser importantíssimo dar continuidade à transferência do sistema desenvolvido para a bacia de ondas, com a instrumentação de outras placas, e desenvolvimento de instrumentos de medição e controle que tornem possível a reprodução de mares tridimensionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUAMODELO – “Projeto de estabilização da barra do Canal de Sernambetiba”. Rio de Janeiro, 2005.
- BIÉSEL, F., SUQUET, F. – “Les appareils générateurs de houle en laboratoire”. La Houille Blanche, sd.
- BRETSCHNEIDER, C. L. – “Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves”. Tech. Memo No. 118, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, 1959.
- CTH – CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA / LHEPUSP – LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – “Estudo em modelo reduzido do Porto de Praia Mole - modelo bidimensional – Relatório parcial n° 1: Estudo da estabilidade do quebra-mar trechos C e B”. São Paulo, 1976.
- CTH – CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA / LHEPUSP – LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – “Estudo em modelo reduzido do Porto de Praia Mole - modelo bidimensional – Relatório parcial n° 2: Estudo da estabilidade do quebra-mar trecho B – Ensaios complementares”. São Paulo, 1976.
- CTH – CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA / LHEPUSP – LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – “Estudo em modelo reduzido do Porto de Praia Mole - modelo bidimensional – Relatório parcial n° 3: Estudo da estabilidade do quebra-mar trecho A”. São Paulo, 1977.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE SOFTWARES – Módulos do software MIKE 21.
- GILBERT, G., THOMPSON, D. M., BREWER, A. J. – “Design curves for regular and random wave generators”. HRS, Wallingford, England, 1977.
- HORIKAWA, K. – “Coastal Engineering/An Introduction to Ocean Engineering”. Halsted Press Book/John Wiley & Sons, Tokyo, 1978.
- HASSELMANN, K., BARNET, T. P., BOUWS, E., CARLSON, H., CARTWRIGHT, D. E., ENKE, K., EWING, S. A., GIENAPP, H., HASSELMANN, D. E.,

- KRUSEMAN, P., MEERBURG, A., MÜLLER, P., OLBERS, D. J., RICHTER, K., SELL, W., WALDEN, H. – “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)”. Dtsch. Hydrogr. Z., Ergänzungsheft Reihe A. 1973.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. – “The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves ”. J. Fluid Mech., 1963.
  - MARTINS, J. A. A. – “Aquisição de um sistema eletromecânico servo controlado para gerador de ondas hidráulicas”. Relatório Interno, São Paulo, 2001.
  - MARTINS, J. A. A. – “Diagnóstico e indicação de soluções para modificações no canal de ondas do LHEPUSP”. Relatório Interno, São Paulo, 2001.
  - NATIONAL INSTRUMENTS – Manual do Software LabView.
  - OGATA, K. – “Engenharia de controle moderno”. Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1998.
  - OSAKA CITY UNIVERSITY, HYDRAULIC LABORATORY – “Wave generator project”. Osaka, Japan, sd.
  - PIANC – “State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters”, 2003.
  - PIERSON, W. J. & MOSKOWITZ, L. – “A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii”. J. Geophys. Res., 1964.
  - PORTOBRÁS – EMPRESA DE PORTOS DO BRASIL/INPH – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS/ DIVISÃO DE APOIO TÉCNICO E CIENTÍFICO/DIATEC – “Relatório de medições de ondas – Praia Mole/ES”. Rio de Janeiro, 1982.
  - RITA, M. A. B. M. – “On the behaviour of moored ships in harbours – theory, practice and model tests”. Tese apresentada para a obtenção do grau de Pesquisador Oficial no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1984.
  - SARPKAYA, T. & ISAACSON, M. – “Mechanics of wave forces on offshore structures”. Van Nostrand Reinhold Co., 1981.
  - SILVA, G. C. - “Análise comparativa de metodologias de modelagem numérica da propagação de ondas aplicada à engenharia costeira e portuária”, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

- SOUZA, M. H. S. – “Clima de ondas ao norte do Estado do Rio de Janeiro”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.
- U. S. ARMY/COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER – “Coastal Engineering Manual”. 2002.

APÊNDICE A – ENTRADA DE DADOS PARA O SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS NO MODO CALIBRAÇÃO

Entrada de Dados com Convergência por Altura de Onda - Regular

Neste modo de convergência, a entrada de dados é feita na própria tela do painel “Dados de Entrada” do software, onde devem ser preenchidas as seguintes informações:

- Frequência (Hz): Inverso do período T (em segundos) do trem de ondas regulares que se deseja gerar;

- Altura (mm): Altura H (em milímetros) do trem de ondas regulares que se deseja gerar;

- Fase ($^{\circ}$): Fase inicial (em graus) do trem de ondas que se deseja gerar. Neste caso, como o trem de ondas é modelado como um cosseno, é aconselhável utilizar as fases 90° ou 270° , visto que o gerador sempre inicia o processo de geração no centro de sua excursão.

- Coef. Inicial: Coeficiente de calibração inicial que relaciona a altura de onda que se deseja gerar, com o comprimento de excursão e da placa do gerador de ondas. Este coeficiente é calculado pelo próprio software durante o processo de calibração, sendo que, se a onda que se deseja calibrar, nunca tenha sido testada, aconselha-se ajustar este parâmetro para 1 (um);

- No. de Ciclos: Número de períodos completos da onda (H,T) que devem ser gerados a cada passagem pela malha interna de controle. Este parâmetro deve ser maior ou igual ao número de ciclos sob análise e levar em consideração o tempo que o trem de ondas leva para se propagar do ponto de geração (batedor) até o ponto onde se encontra a ponta capacitiva analisada pela malha externa de controle;

- No. de ciclos sob análise: Número de períodos completos da onda (H,T) que devem ser analisados pela malha externa de controle a cada iteração da malha interna.

Esta planilha foi concebida de forma que o usuário deve preencher os seguintes dados:

- Descrição dos dados: texto inserido pelo usuário para identificar os dados e / ou o ensaio do qual pertencem os dados;
- ΔF : Discretização em Hertz do espectro que se deseja gerar;
- Frequência de Corte Inferior (Hz): Limite inferior (em Hertz) do espectro que se deseja gerar;
- Frequência de Corte Superior (Hz): Limite superior (em Hertz) do espectro de energia que se deseja gerar;
- Número de Ciclos: número de trens de ondas completos, cuja duração corresponde ao inverso do ΔF , que se deseja gerar entre cada atuação da malha externa de controle. Este número deve ser no mínimo dois, devido ao retardo hidráulico entre a geração da onda no batedor e sua passagem pela ponta capacitiva utilizada na convergência do espectro de energia;
- Vetor de Frequências (Hz): vetor contendo as frequências (em Hertz) discretizadas de ΔF , desde a frequência inferior de corte até a superior;
- Vetor Espectro de Energia ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}$): vetor contendo as componentes do espectro de energia (em milímetros quadrados vezes segundo);
- Vetor Espectro de Amplitudes (mm): vetor contendo as componentes do espectro de amplitudes (em milímetros);
- Vetor Espectro de Fases (rad): vetor contendo o espectro de fases (em radianos);
- Vetor Coeficientes iniciais de calibração: Coeficientes que transformam o espectro de energia de referência no respectivo espectro de referência para o movimento da placa do gerador de ondas. Estes coeficientes são fornecidos pelo software ao final do processo de calibração. Caso o trem de ondas nunca tenha sido calibrado, os coeficientes devem ser unitários.
- Vetor Range: vetor que aumenta ou diminui a intensidade de atuação da malha externa de convergência em função dos valores adotados. Quando esses valores se encontram perto da unidade o sistema consegue variar substancialmente cada componente do espectro de energia aplicado ao gerador, o que pode, por um lado, acelerar o processo de convergência, e por outro, gerar uma instabilidade no sistema. Já se o valor do range ajustado estiver próximo de zero, o sistema consegue variar

minimamente cada componente do espectro de energia a cada atuação da malha externa, o que pode aumentar o tempo necessário à calibração do trem de ondas. Vale salientar que, assim como os coeficientes de calibração, o range é alterado pelo software durante o processo de calibração das ondas.

Esta planilha foi concebida de forma que o usuário deve preencher os seguintes dados:

- Descrição dos dados: texto inserido pelo usuário para identificar os dados e / ou o ensaio do qual pertencem os dados;
- Tempo (s): Tempo (em segundos) discretizado com o mesmo Δt ajustado nos parâmetros internos do software de controle da geração de ondas;
- Trem de Ondas de Referência (mm): valor (em milímetros) da forma de onda de referência para o nível d'água durante o ensaio;
- Sinal de Referência Mvto. da Placa (mm): valor de referência (em milímetros) para o movimento da placa do gerador de ondas durante o ensaio.

Nesta planilha optou-se pela entrada de dados no domínio do tempo, pois, desta forma, o usuário ganha liberdade de criar seu próprio procedimento de ensaio.

Por exemplo, se desejar, o usuário pode colocar em uma seqüência, diversos trens de ondas de características diferentes, sejam eles regulares ou irregulares (desde que todos tenha sido calibrados anteriormente), podendo ainda manter o gerador parado pelo tempo que quiser, entre cada trem de ondas, ou ainda no final do ensaio, enquanto as últimas ondas do trem gerado se propagam pelo canal.

APÊNDICE C – ARQUIVOS DE SAÍDA GERADOS PELO SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS

O software de controle da geração de ondas gera, durante seu funcionamento, até quatro arquivos de saída do sistema, todos na forma de arquivos texto (*.txt) para que possam ser lidos por softwares de planilha como o Excel®, por exemplo.

O arquivo da forma de onda traz, na primeira coluna, os tempos em segundos, na segunda coluna, o trem de ondas de referência em milímetros, na terceira coluna, o sinal de referência para o movimento da placa do gerador, na quarta coluna, o movimento executado pela placa do gerador (lido a partir do sensor potenciométrico) e, nas colunas seguintes, os níveis d'água lidos ao longo do tempo pelas pontas capacitivas dispostas pelo canal.

O arquivo dos espectros traz na primeira coluna as frequências em Hertz, na segunda coluna o espectro de referência que se deseja obter no canal, e nas colunas seguintes os espectros obtidos em cada iteração do processo de convergência do sistema de geração, sendo desta forma possível acompanhar como se desenvolveu o processo de convergência a cada iteração realizada durante o processo de calibração.

Já o arquivo dos coeficientes traz na primeira coluna as frequências em Hertz, na segunda coluna, os coeficientes iniciais do processo de convergência, e nas colunas seguintes os coeficientes obtidos após cada iteração do processo de convergência do sistema de geração.

Por fim, o arquivo de range traz na primeira coluna, as frequências em Hertz, na segunda coluna, os ranges iniciais do processo de convergência e, nas colunas seguintes os ranges calculados pela malha externa de controle a cada iteração realizada durante o processo de calibração.

APÊNDICE D –PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO E ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

As informações transferidas pelos sensores externos, sejam eles de leitura de nível d'água (pontas capacitivas) ou de posição da placa do gerador (sensor potenciométrico) são de vital importância para o bom funcionamento do sistema de controle da geração de ondas. Desta forma, se faz necessário manter os sensores limpos e em bom estado, além de calibrá-los periodicamente.

Os itens a seguir, apresentam os procedimentos adotados para a calibração dos sensores utilizados no canal de ondas do LHEPUSP.

Calibração do Sensor Potenciométrico

Para a calibração do sensor, instalou-se uma ponta limnimétrica horizontalmente, fixada próxima a uma das extremidades do fuso do gerador, além de um anteparo vertical na guia móvel, de forma que se pudesse medir uma distância relativa entre o ponto onde foi fixada a ponta e a guia móvel do gerador. A Figura D1 ilustra o esquema montado.

Figura D1 – Aparato montado para a calibração do sensor potenciométrico

Em seguida, posicionou-se a guia do gerador junto a um dos fins de curso, medindo-se a distância relativa indicada na ponta limnimétrica e o valor de tensão lido pelo software, a partir da placa A/D.

Na sequência, variou-se a posição do gerador, aproximadamente de dois em dois centímetros, sendo que, para cada posição foi medido o par distância versus tensão, até que a guia do gerador atingiu o outro fim de curso.

De posse destes valores, foi calculada a média entre as distâncias lidas nas duas extremidades, sendo adotado este ponto, como a origem da escala de posição do gerador.

Por fim, plotou-se o gráfico da posição versus a tensão e extraiu-se a equação que traduz os valores lidos em tensão a partir da placa A/D em posição do gerador ao longo do tempo.

Como exemplo, são apresentadas, a Tabela D1 e a Figura D2 referentes a uma das calibrações do sensor potenciométrico realizadas durante a pesquisa:

Tabela D1 – Calibração do sensor potenciométrico

Tensão (v)	Distância Relativa (mm)	Posição (mm)
3,67	359,8	-300,7
3,93	380,0	-280,5
4,09	400,5	-260,0
4,26	420,4	-240,1
4,49	441,9	-218,6
4,69	465,0	-195,5
4,84	480,3	-180,2
5,04	501,1	-159,4
5,22	521,1	-139,4
5,42	540,4	-120,1
5,62	561,2	-99,3
5,81	580,8	-79,7
6,06	600,7	-59,8
6,20	621,1	-39,4
6,46	640,1	-20,4
6,60	661,1	0,6
6,84	681,2	20,7
7,04	702,0	41,5
7,23	722,3	61,8
7,42	740,9	80,4
7,61	760,0	99,5
7,81	780,3	119,8
7,96	801,0	140,5
8,15	821,2	160,7
8,32	842,0	181,5
8,56	860,8	200,3
8,77	881,5	221,0
8,96	900,9	240,4
9,14	922,1	261,6
9,32	943,2	282,7
9,46	961,2	300,7

Figura D2 – Curva de calibração do sensor potenciométrico

Neste caso, percebe-se que o comportamento deste sensor potenciométrico é linear, o que se verifica, pois o valor do coeficiente de correlação (R^2) da reta ajustada é muito próximo da unidade. Entretanto, vale salientar que este comportamento pode não ocorrer para outros sensores.

Calibração das Pontas Capacitivas

Para calibrar as pontas capacitivas, estas foram fixadas a pontas limnimétricas, e posicionadas de forma que a água do canal só tocasse sua extremidade inferior, sendo lido o valor de tensão e a leitura da ponta limnimétrica.

Em seguida, variou-se, de dois em dois centímetros, a posição da ponta capacitiva até que as hastes estivessem totalmente submersas, sendo anotado, para cada posição, o par distância versus tensão.

Para verificar o efeito da tensão superficial da água na leitura, repetiu-se o procedimento anterior, mas no sentido de emergir a ponta, onde foram anotados os pares distância versus tensão, para posições intermediárias àquelas lidas na primeira etapa.

De posse dos valores de distância relativa foi determinado o ponto médio de cada ponta capacitiva, sendo este adotado como a origem de uma nova escala de distâncias.

Por fim, plotou-se o gráfico da distância versus a tensão obtendo-se a equação que converte em nível d'água, os valores de tensão lidos a partir das pontas capacitivas.

Novamente, a título de exemplo, são apresentados nas Tabelas D2 e D3 e nas Figuras D3 e D4 os resultados da calibração de duas das pontas capacitivas empregadas no canal de ondas.

Tabela D2 – Calibração da ponta capacitiva PC-17

Submergindo a ponta			Emergindo a ponta		
Distância Relativa	Tensão	Nível d'água	Distância Relativa	Tensão	Nível d'água
(mm)	(V)	(mm)	(mm)	(V)	(mm)
997	-4.905	-339	990	-4.831	-332
980	-4.670	-322	970	-4.572	-312
960	-4.430	-302	950	-4.304	-292
940	-4.167	-282	930	-4.030	-272
920	-3.876	-262	910	-3.728	-252
900	-3.567	-242	890	-3.415	-232
880	-3.258	-222	870	-3.098	-212
860	-2.937	-202	850	-2.780	-192
840	-2.610	-182	830	-2.449	-172
820	-2.283	-162	810	-2.126	-152
800	-1.970	-142	790	-1.804	-132
780	-1.652	-122	770	-1.511	-112
760	-1.370	-102	750	-1.233	-92
740	-1.101	-82	730	-0.960	-72
720	-0.818	-62	710	-0.685	-52
700	-0.554	-42	690	-0.421	-32
680	-0.290	-22	670	-0.163	-12
660	-0.031	-2	658	0.000	0
658	0.000	0	650	0.100	8
640	0.231	18	630	0.369	28
620	0.510	38	610	0.652	48
600	0.798	58	590	0.960	68
580	1.111	78	570	1.281	88
560	1.447	98	550	1.599	108
540	1.750	118	530	1.916	128
520	2.073	138	510	2.236	148
500	2.390	158	490	2.555	168
480	2.712	178	470	2.858	188
460	3.000	198	450	3.147	208
440	3.279	218	430	3.419	228
420	3.546	238	410	3.684	248
400	3.811	258	390	3.936	268
380	4.070	278	370	4.260	288
360	4.338	298	350	4.480	308
340	4.606	318	330	4.753	328
320	4.890	338	-	-	-

Tabela D3 – Calibração da ponta capacitiva PC-20

Submergindo a ponta			Emergindo a ponta		
Distância Relativa	Tensão	Nível d'água	Distância Relativa	Tensão	Nível d'água
(mm)	(V)	(mm)	(mm)	(V)	(mm)
999	-4.988	-340	990	-4.851	-328
980	-4.719	-321	970	-4.558	-308
960	-4.412	-301	950	-4.250	-288
940	-4.114	-281	930	-3.938	-268
920	-3.796	-261	910	-3.621	-248
900	-3.469	-241	890	-3.289	-228
880	-3.147	-221	870	-2.976	-208
860	-2.825	-201	850	-2.669	-188
840	-2.537	-181	830	-2.375	-168
820	-2.244	-161	810	-2.092	-148
800	-1.970	-141	790	-1.824	-128
780	-1.697	-121	770	-1.560	-108
760	-1.428	-101	750	-1.282	-88
740	-1.160	-81	730	-1.013	-68
720	-0.891	-61	710	-0.730	-48
700	-0.608	-41	690	-0.432	-28
680	-0.300	-21	670	-0.134	-8
660	-0.017	-1	662	0.000	0
659	0.000	0	650	0.198	12
640	0.349	19	630	0.520	32
620	0.666	39	610	0.852	52
600	0.999	59	590	1.179	72
580	1.326	79	570	1.506	92
560	1.653	99	550	1.819	112
540	1.965	119	530	2.112	132
520	2.258	139	510	2.400	152
500	2.537	159	490	2.678	172
480	2.810	179	470	2.952	192
460	3.079	199	450	3.220	212
440	3.352	219	430	3.494	232
420	3.625	239	410	3.782	252
400	3.904	259	390	4.050	272
380	4.192	279	370	4.358	292
360	4.504	299	350	4.670	312
340	4.822	319	330	4.988	332
320	5.149	339	-	-	-

Figura D3 – Curva de calibração da ponta capacitiva PC- 17

Figura D4 – Curva de calibração da ponta capacitiva PC- 20

A partir das Figuras D3 e D4, percebe-se que o comportamento destas pontas capacitivas também pode ser considerado linear, visto que o valor do coeficiente de correlação (R^2) da reta ajustada se aproxima da unidade.

Arquivo de Calibração dos Sensores

O software desenvolvido permite a entrada de equações polinomiais de até quinto grau, para possibilitar o uso de sensores cuja resposta não é linear.

A entrada de dados deve ser feita por meio de um arquivo no formato texto (*.txt), onde cada linha contém a informação sobre o sensor conectado à entrada da placa A/D de mesmo número.

A primeira coluna de cada linha deve conter o termo independente da equação de calibração de cada sensor.

Nas colunas subsequentes, devem estar os que multiplicam cada potência de x em ordem crescente.

Por fim, na última coluna pode ser feita uma descrição com a identificação do sensor que está ocupando cada linha.

Para exemplificar o que foi explanado, a Figura D5, a seguir, mostra um arquivo de entrada de dados dos sensores empregados no Canal de Ondas do LHEPUSP.

-654.33503	103.99578	0	0	0	0	sensor potenciométrico
91.56575	67.82648	0	0	0	0	Pta 18
0	62.20784	0	0	0	0	Pta 19
0	67.16833	0	0	0	0	Pta 20
0	68.28757	0	0	0	0	Pta 17

Figura D5 – Exemplo de arquivo de entrada de dados de calibração dos sensores

APÊNDICE E –DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE DE CONTROLE DA GERAÇÃO DE ONDAS

Figura E1 – Diagrama de blocos do software de controle da geração de ondas

APÊNDICE F - VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE GERAÇÃO DE ONDAS DESENVOLVIDO À BACIA DE ONDAS DO LHEPUSP

Assim como o canal de ondas, a bacia se constitui em uma ferramenta de extrema importância para o estudo de obras costeiras e portuárias. Sendo assim, desde o início da pesquisa a idéia era a de desenvolver um sistema de controle da geração de ondas de uma maneira que ele pudesse ser adaptado ao modelo tridimensional.

Desta forma, foi adquirido junto à empresa KALATEC, um conjunto servo-motor, servo-conversor e mesa X (Figuras F1, F2 e F3) que foi adaptado a uma das placas da bacia de ondas.

Figura F1 – Montagem do sistema de geração de ondas adquirido para a bacia de ondas do LHEPUSP

Figura F2 – Vista do sistema de geração de ondas adquirido para a bacia de ondas do LHEPUSP

Figura F3 – Vista do conversor e computador do sistema de geração de ondas adquirido para a bacia de ondas do LHEPUSP

Após a montagem foi realizado um primeiro teste da adequação do sistema de controle da geração de ondas desenvolvido para o canal à bacia de ondas. Para tanto foi introduzido como referência de entrada um espectro fictício com $H_s=50$ mm e $T_s=0,9$ s.

A Figura F4 mostra imagem do sistema de geração desenvolvido controlando a geração de ondas na bacia de Santos.

Figura F4 – Sistema desenvolvido controlando a geração de ondas na bacia de Santos

Na ocasião do teste não houve registro das ondas geradas, entretanto pode-se perceber que, mesmo sem um ajuste mais refinado dos parâmetros do PID do software de controle desenvolvido, ele foi capaz de gerar um trem de ondas irregulares, chegando até a iniciar um processo de convergência.