

# **BENEFÍCIOS DO EMPREGO DA MODELAGEM FÍSICA EM CANAL COM GERADOR DE ONDAS IRREGULARES NA OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS DE QUEBRA-MARES DE BERMA**

*Tiago Zenker Gireli<sup>1</sup> & Paolo Alfredini<sup>2</sup>*

**RESUMO** --- Dentro do contexto da sustentabilidade na gestão dos recursos naturais, tendo em vista a importância das obras portuárias e costeiras para o desenvolvimento do Brasil, a complexidade dos fenômenos que regem os processos litorâneos e as mudanças climáticas que vem sendo enfrentadas, torna-se fundamental a utilização de ferramentas cada vez mais refinadas na predição do comportamento de obras costeiras. Neste trabalho foi empregado o canal do LHEPUSP, cujo sistema de controle foi concebido de forma a ser capaz de gerar ondas irregulares, baseadas em espectros de energia da agitação, no intuito de avaliar tecnicamente, a partir de um estudo de caso de um molhe de berma, 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. Este estudo 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 à 10 m, onde foram encontradas diferenças significativas para mais no recuo da estrutura, comparativamente com a ação de ondas irregulares de mesma altura significativa.

**ABSTRACT** --- Considering the sustainable management of natural resources, the harbor and coastal structures significance for the Brazil development, the complex Littoral Processes phenomena and the climate change it is essential the use of State-of-the-Art tools for predicting the behavior of coastal structures. Following this context, the paper purpose was to evaluate, from the technical point of view, the breakwater design procedure based on structure tests with regular waves with the design significant wave, using the LHEPUSP wave flume. The wave maker control system was developed in a way to generate regular and irregular waves, based on wave energy spectra. This study, concluded that the physical model regular waves use for breakwaters design improvement may suggest conservative results, inducing high cost structures, mainly for those ones in depths shallower than 10 m, being observed larger structural backward response differences, comparing with irregular waves action with the same significant height.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelação Física, Engenharia Costeira, Quebra-mares de Berma

1) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP, Av. Albert Einstein, 951, 13083-852 Campinas - SP. E-mail: [zenker@fec.unicamp.br](mailto:zenker@fec.unicamp.br)

2) Professor Livre Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Engenheiro do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120, 05508-900 São Paulo – SP. E-mail: [paolo.alfredini@poli.usp.br](mailto:paolo.alfredini@poli.usp.br)

## 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 se inserem 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.

Outro fator importante a ser considerado são as variações climáticas globais que tem alterado substancialmente o regime de ondas, marés, ventos e o próprio nível médio do mar, fazendo com que as bases de dados coletadas ao longo do último século não sirvam como referência estatística para previsões futuras em diversas localidades do globo terrestre.

Exemplos como as ressacas ocorridas em abril de 2005 e junho de 2006, que ocasionaram uma série de danos ao longo da costa sul e sudeste brasileira (Figura 1), o Ciclone Tropical Catarina de março de 2004 que se constituiu no primeiro furacão de que se tem notícias no Atlântico Sul, alcançando a categoria 2, ou ainda as ondas gigantes de mais de 10 metros de altura que, por duas vezes em cerca de três meses atingiram a costa da Cantábria na Espanha, superando muito as estatísticas de ondas que apontavam para uma onda centenária de 9 metros de altura dão uma idéia de como as variações climáticas afetam o ambiente costeiro.



Figura 1.- Ressaca de abril de 2005 em Santos -SP (à esquerda) e dano ao molhe em Praia Mole -ES após ressaca de junho de 2006 (à direita)



Figura 2 – Furacão Catarina de março de 2004



Figura 3 – Mar da Cantábria em março de 2008

Exemplos como estes mostram que projetar estruturas costeiras somente baseando-se em conhecimentos teóricos é insuficiente para garantir a eficácia da obra, a otimização dos custos e a minimização dos impactos causados por estas em suas adjacências.

Neste sentido lançam-se mão de ferramentas como modelos físicos, onde, em escala reduzida, são recriadas em laboratório condições tão próximas quanto possível às 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.

O Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP - foi o pioneiro no Estado de São Paulo na utilização de sistemas geradores de ondas regulares 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 (Estado de São Paulo, Brasil);
- Estudo do Arranjo Geral das obras de abrigo do Porto de Praia Mole (Estado do Espírito Santo, Brasil).

Nestes estudos, as estruturas foram dimensionadas frente à ação de ondas regulares caracterizadas pela altura e período significativos dos trens de ondas registrados no local, e extrapolados para o período de retorno de projeto.

Esta forma de análise, baseada nos trabalhos de Iribarren (1938, 1950) e que também inspiraram os estudos que culminaram na fórmula de Hudson (CEM, 2002) permite várias críticas, segundo Taveira-Pinto, F & Neves, A. C. (2003), dentre elas a de que a agitação é considerada de

uma forma muito simplista, pressupondo a uniformidade das características de cada onda individual.

Neste sentido, a partir do desenvolvimento do sistema de geração de ondas irregulares para o canal de ondas do LHEPUSP/FCTH (Gireli, T. Z., 2008), possibilitou-se uma análise da adequação deste procedimento que emprega ondas regulares no dimensionamento de quebra-mares de enrocamento.

Para tanto, decidiu-se por efetuar um estudo de caso empregando um quebra-mar de berma, visto que estas estruturas são dimensionadas para se deformarem frente à ação das ondas (PIANC, 2003), o que facilita a visualização das diferenças entre as metodologias de ensaio com ondas regulares e irregulares.

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar, a partir de um estudo de caso, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico, o quão adequado é o procedimento de dimensionamento de quebra-mares de berma, levando-se em conta apenas a onda significativa.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para esta avaliação foi realizado um estudo de caso empregando o projeto de um quebra-mar de berma, construído na praia de Saquarema, litoral do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

O Canal de Ondas do LHEPUSP empregado nos ensaios (Figura 4) 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.

O Gerador de Ondas (Figura 5) consiste de uma placa acoplada superiormente a um carrinho, acionado por um servo-motor de corrente alternada (Figura 6), um sensor potenciométrico de 100cm para promover a realimentação do sistema com relação à posição do carrinho no tempo (Figura 7), três pontas capacitivas para medição do nível d'água ao longo do canal (Figura 8), filtros metálicos para minimizar os efeitos de harmônicos parasitas oriundos do processo de geração de ondas (Figura 9), estruturas absorvedoras em ambas as extremidades do canal para minimizar a reflexão das ondas (Figura 10) e uma tubulação de 500mm ligando as extremidades de barlar e sotamar do canal para promover a compensação do nível d'água (Figura 11).

Recentemente foi desenvolvido um sistema de controle para este canal baseado na linguagem LabView<sup>®</sup>, dotando-o de um software capaz de controlar o movimento do gerador de forma a gerar

ondas regulares (com altura e períodos definidos) e irregulares (baseadas em espectros de energia da agitação ou trens de ondas randômicos).



Figura 4.- Vista do canal de ondas

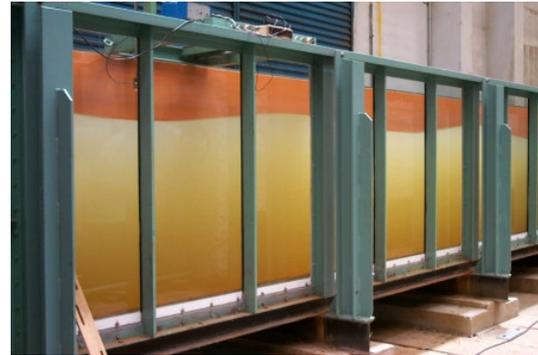


Figura 5.- Vista do gerador de ondas



Figura 6. – Servo-motor



Figura 7.- Sensor potenciométrico



Figura 8.- Ponta capacitiva para medir a Variação do nível d'água no canal



Figura 9.- Filtros metálicos dispostos à frente do gerador de ondas



Figura 10.- Estruturas absorvedoras das extremidades do canal



Figura 11.- Vista da tubulação de compensação de nível

As Figuras 12, 13 e 14 mostram cada um dos painéis da interface com o usuário do software desenvolvido.

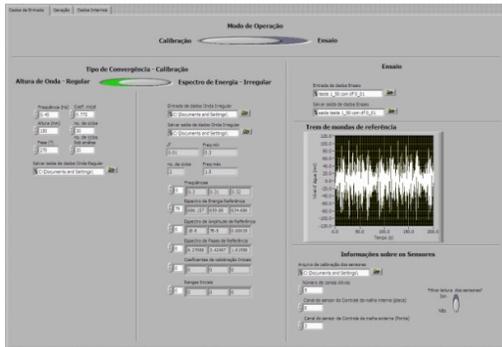


Figura 12.- Painel “Dados de Entrada” do software de controle da geração de ondas

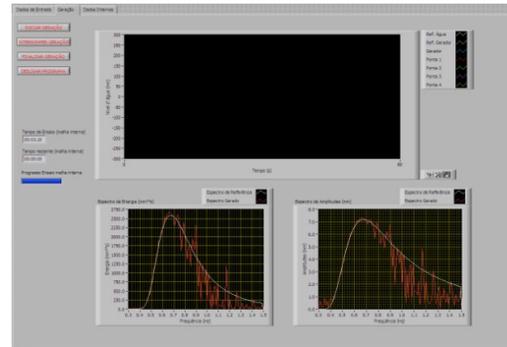


Figura 13.- Painel “Geração” do software de controle da geração de ondas

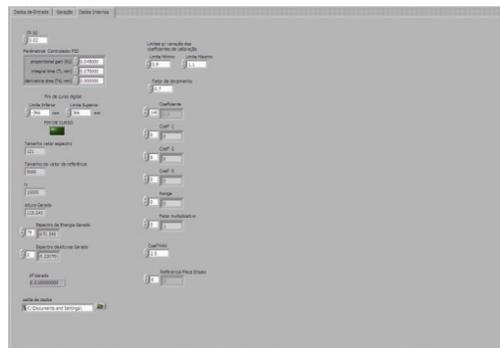


Figura 14.- Painel “Dados Internos” do software de controle da geração de ondas

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 na 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”.

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”.

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.

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.

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 de 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.

A Figura 15 mostra o diagrama de blocos desenvolvido para o software integrado de controle da geração de ondas.

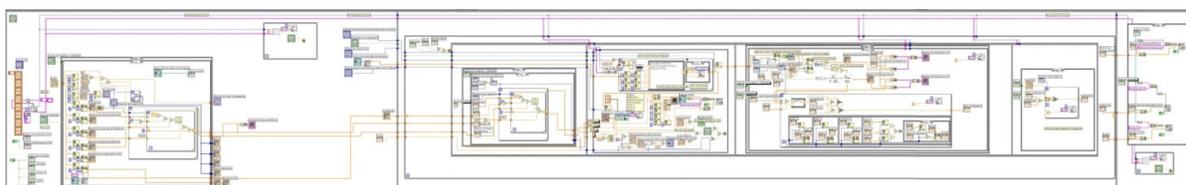


Figura 15.- Diagrama de blocos do software de controle da geração de ondas

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 num 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.

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  $\Delta t$  ;

- Transformar, a partir dos dados de calibração dos sensores, 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  $\Delta t$ , 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 Fast Fourier Transform;

- (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:
- Espectro de Energia;
- Coeficientes de calibração;
- Range.

A seção do cabeço da estrutura (Figura 16) foi modelada de acordo com o projeto original na escala 1:25, resultando na configuração apresentada nas Figuras 17 e 18 e nas profundidades no modelo e no protótipo referentes à obra e à posição de instalação da ponta de calibração dos trens de ondas apresentadas na Tabela 1.



Figura 16.- Vista do molhe guia-corrente de berma – Saquarema, RJ

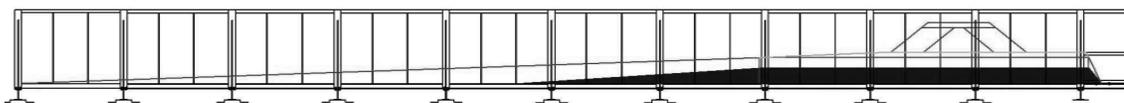


Figura 17.- Configuração final da plataforma do canal de ondas



Figura 18.- Perfil da seção do cabeço da estrutura montada no canal de ondas

Tabela 1. – Profundidades junto à obra e de calibração dos trens de ondas

	Profundidade obra		Profundidade Calibração	
	Modelo (cm)	Protótipo (m)	Modelo (cm)	Protótipo (m)
<b>Preamar</b>	35.6	8.9	95.6	23.9
<b>Meia maré</b>	32.2	8.1	92.2	23.1
<b>Baixa mar</b>	28.8	7.2	88.8	22.2

Como o quebra-mar sob estudo estava localizado em águas rasas, a onda de projeto, para os ensaios com ondas regulares, foi definida como sendo a máxima onda que não arrebentava antes de atingir a estrutura e adotado o período de 10 s.

Foram calibradas alturas de ondas regulares 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 localizada junto à obra. 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.

Já para a obtenção do trem de ondas irregular de características equivalentes foi empregado o modulo de Boussinesq do software MIKE 21 do Danish Hydraulic Institute, no qual foram inseridas as batimetrias da região e trens de ondas randômicos de diversas alturas e períodos significativos ao largo, até que se obtivesse, em profundidades próximas à da obra, trens de ondas com altura e período significativos iguais aos definidos para o estudo com ondas regulares.

Quanto à duração do ensaio, decidiu-se por manter a estrutura sob a ação de ondas por um período de maré, pois ensaios preliminares mostraram ser tempo suficiente para a estrutura atingir seu equilíbrio. A simulação da maré foi feita a partir de três níveis, conforme a Figura 19, resultando nos tempos de ensaios apresentados na Tabela 2.

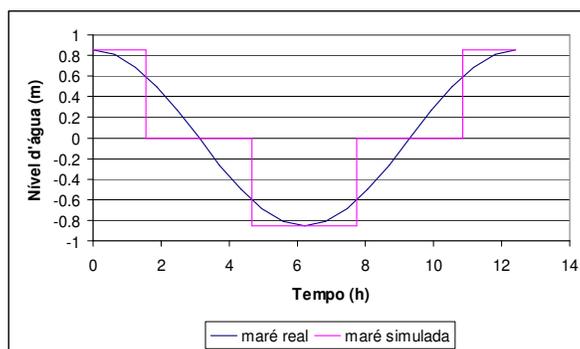


Figura 19.- Distribuição dos tempos de ensaios para simulação do efeito da variação de maré

Tabela 2. – Durações dos ensaios na escala 1:25

	$T_{\text{maré}}$	Tempo ensaio PM	Tempo ensaio MM	Tempo ensaio BM
	(h)	(min.)	(min.)	(min.)
<b>Protótipo</b>	12.42	93.1	186.3	186.3
<b>Modelo</b>	2.48	18.6	37.3	37.3

A diferença na resposta da estrutura frente à ação de ondas regulares e irregulares foi obtida em função dos recuos e profundidades de interseção obtidos em cada ensaio.

Para avaliar a repetibilidade dos resultados, foram realizados dois ensaios para cada condição, sendo estes chamados de R1 e R2, quando referentes a ensaios frente à ação de ondas regulares e I1 e I2, quando referentes a ensaios frente à ação de ondas irregulares.

Por fim, no intuito de generalizar os resultados obtidos, foi repetido o estudo inserindo a mesma estrutura na profundidade apresentada na Tabela 3, definida de forma que não ocorresse a arrebentação de nenhuma das ondas das séries irregulares.

Tabela 3. – Profundidades 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)
<b>Preamar</b>	60.6	15.15	95.6	23.9
<b>Meia maré</b>	57.4	14.35	92.2	23.05
<b>Baixa mar</b>	53.8	13.45	88.8	22.2

Analogamente ao caso do quebra-mar original, a nomenclatura adotada para os ensaios do quebra-mar profundo foi PR1 e PR2, quando referentes a ensaios frente à ação de ondas regulares e PI1 e PI2, quando referentes a ensaios frente à ação de ondas irregulares.

#### 4 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os coeficientes obtidos no processo de calibração de ondas regulares. Estes coeficientes correspondem à função de transferência entre a amplitude de excursão da placa do gerador e a altura de onda medida no local de interesse.

Durante os ensaios verificou-se que na preamar, junto à ponta de calibração, a maior altura de onda que arrebenta sobre a estrutura foi de 220 mm, e para os demais níveis, foi de 200 mm.

A partir de levantamento topo-batimétrico da estrutura indeformada e após os ensaios, foram levantados 11 perfis, de onde se extraiu dois perfis médios, M1 (média das seções 3 a 9 do quebra-mar) e M2 (média das seções 5 a 7 do quebra-mar).

Tabela 4. – Coeficientes de calibração dos trens de ondas regulares

Condição de maré	Altura no protótipo (m)	Altura no Modelo (mm)	Coeficiente
<b>BM</b>	4.50	180	1.078
<b>BM</b>	5.00	200	1.143
<b>BM</b>	5.50	220	1.164
<b>BM</b>	6.00	240	1.230
<b>BM</b>	6.50	260	1.281
<b>BM</b>	7.00	280	1.350
<b>MM</b>	4.50	180	1.250
<b>MM</b>	5.00	200	1.273
<b>MM</b>	5.50	220	1.276
<b>MM</b>	6.00	240	1.320
<b>MM</b>	6.50	260	1.370
<b>MM</b>	7.00	280	1.590
<b>PM</b>	4.50	180	1.220
<b>PM</b>	5.00	200	1.206
<b>PM</b>	5.50	220	1.200
<b>PM</b>	6.00	240	1.248
<b>PM</b>	6.50	260	1.280
<b>PM</b>	7.00	280	0.787

Como exemplo, as Figuras 20 a 22, mostram uma comparação entre os perfis da estrutura indeformada e após os ensaios realizados para as seções médias e para a de recuo máximo da Alternativa R1. Já a Tabela 5 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e

M2 e de máximo recuo obtido para ambas as alternativas ensaiadas frente à ação de ondas regulares.

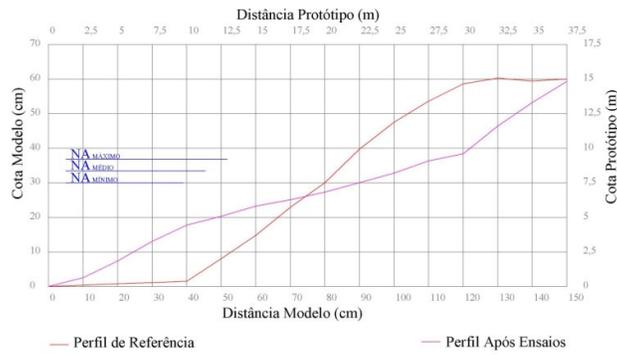


Figura 20.- Comparação da seção M1 – Alternativa R1

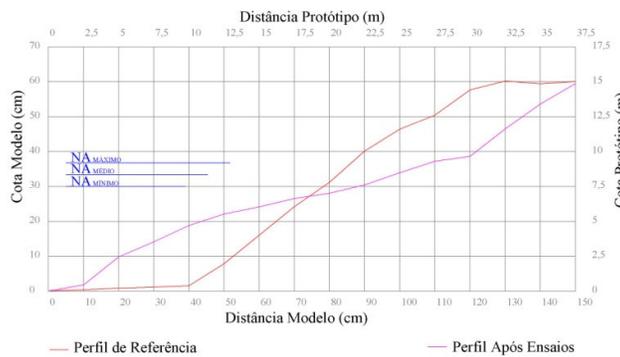


Figura 21.- Comparação da seção M2 – Alternativa R1

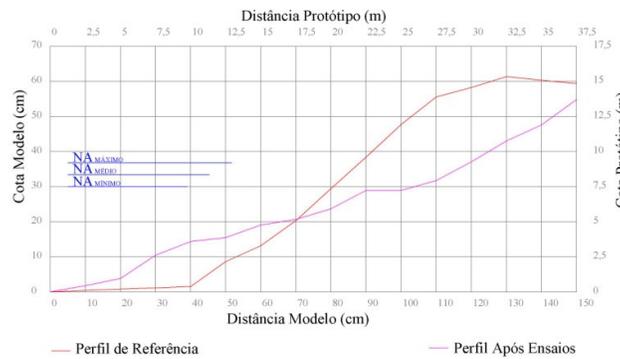


Figura 22.- Comparação da seção 4S – Alternativa R1

Tabela 5. – Recuos e profundidades de interseção – Alternativas R1 e R2

		R1-M1	R1-M2	R1-4S	R2-M1	R2-M2	R2-5S
<b>rec</b> <b>experimental</b>	<b>modelo</b> <b>(mm)</b>	317	318	403	334	343	363
	<b>protótipo</b> <b>(m)</b>	7.91	7.94	10.07	8.35	8.56	9.08
<b>h<sub>r</sub></b> <b>experimental</b>	<b>modelo</b> <b>(mm)</b>	73	63	127	89	79	85
	<b>protótipo</b> <b>(m)</b>	1.83	1.57	3.16	2.22	1.97	2.13

Como exemplo, a Figura 23 apresenta o trem de ondas obtido para o nível de preamar a partir do módulo de Boussinesq do MIKE 21. Já a análise estatística dos trens de onda obtidos encontra-se na Tabela 6.

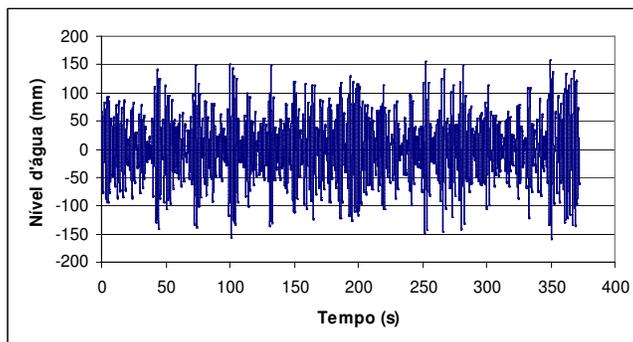


Figura 23.- Trem de ondas randômicas obtido a partir do módulo BW do MIKE 21 junto à obra referente ao nível de preamar

Tabela 6. –Análise estatística dos trens de ondas obtidos a partir do módulo BW

		PM	MM	BM
$H_{m\acute{a}x}$	Modelo (mm)	318	300	306
	Protótipo (m)	7.95	7.50	236.89
$H_s$	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

As Figuras 24 a 26 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.

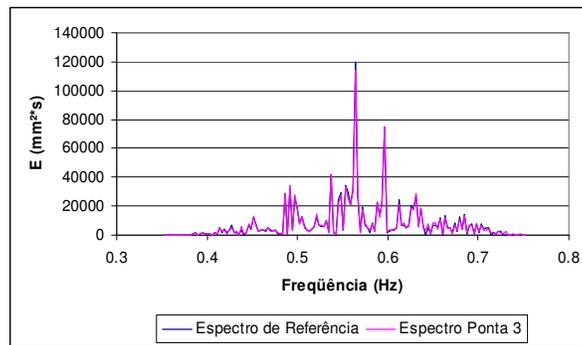


Figura 24.- Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado - Preamar

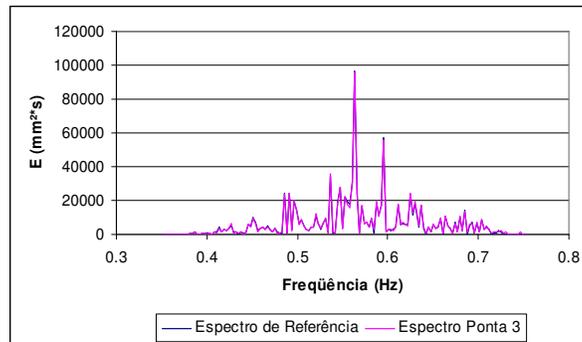


Figura 25.- Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado – Meia maré

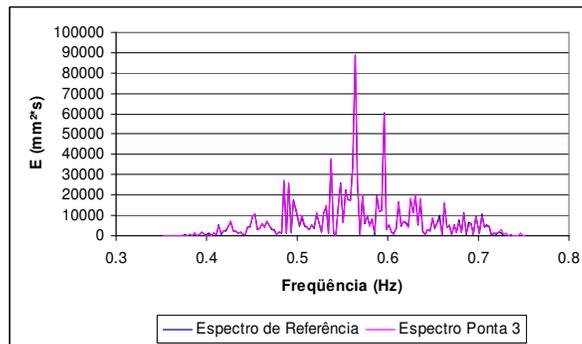


Figura 26.- Comparação entre os espectros de energia de referência e o calibrado – Baixa mar

Como exemplo, as Figuras 27 a 29 mostram uma comparação entre os perfis da estrutura indeformada e após os ensaios realizados para as seções médias e para a de recuo máximo da Alternativa I1. Já a Tabela 7 apresenta os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e de máximo recuo obtido para ambas as alternativas ensaiadas frente a ação de ondas irregulares.

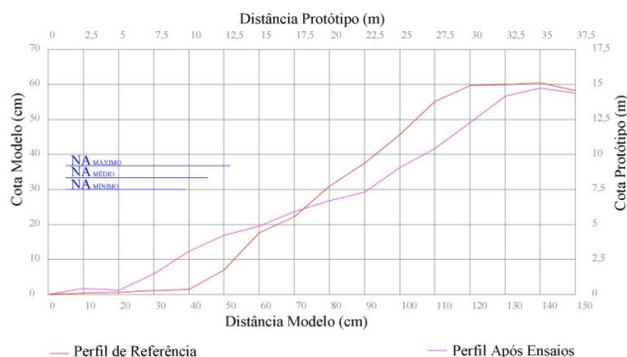


Figura 27.- Comparação da seção M1 – Alternativa I1

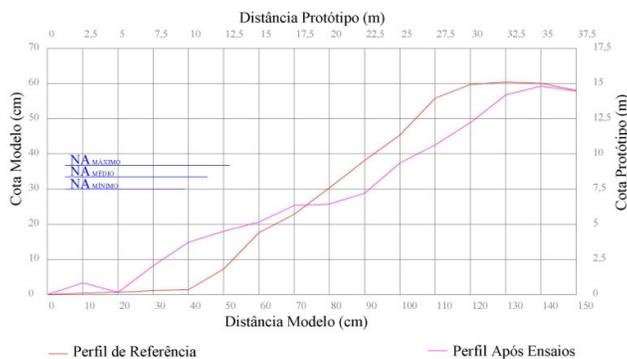


Figura 28.- Comparação da seção M2 – Alternativa I1

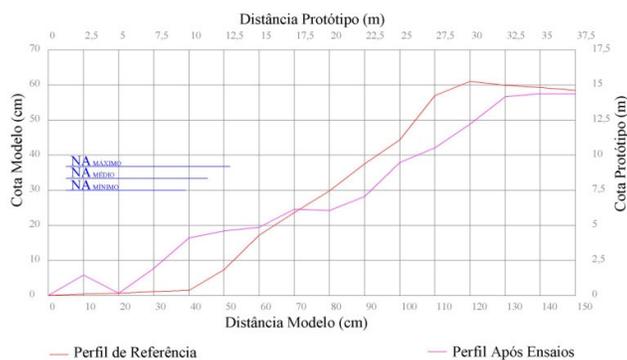


Figura 29.- Comparação da seção 6S – Alternativa I1

Tabela 7. –Recuos e profundidades de interseção – Alternativas I1 e I2

		I1-M1	I1-M2	I1-6S	I2-M1	I2-M2	I2-3S
<b>rec</b> <b>experimental</b>	<b>modelo</b> <b>(mm)</b>	215	212	234	182	190	231
	<b>protótipo</b> <b>(m)</b>	5.38	5.29	5.85	4.54	4.74	5.77
<b>h<sub>r</sub></b> <b>experimental</b>	<b>modelo</b> <b>(mm)</b>	90	80	89	110	96	119
	<b>protótipo</b> <b>(m)</b>	2.26	1.99	2.22	2.74	2.41	2.98

De maneira análoga ao que foi realizado para o quebra-mar original, foram obtidos os recuos e profundidades de interseção das seções M1 e M2 e de máximo recuo para ambas as alternativas ensaiadas frente a ondas regulares e irregulares, conforme apresentado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. –Recuos e profundidades de interseção – Alternativas PR1 e PR2

		PR1-M1	PR1-M2	PR1-9S	PR2-M1	PR2-M2	PR2-9S
<i>rec experimental</i>	Modelo (mm)	364	374	403	344	356	368
	protótipo (m)	9.09	9.36	10.07	8.61	8.61	9.21
<i>hf experimental</i>	modelo (mm)	142	156	127	126	152	137
	protótipo (m)	3.54	3.91	344	3.15	3.79	3.42

Tabela 9. –Recuos e profundidades de interseção – Alternativas PI1 e PI2

		PI1-M1	PI1-M2	PI1-8S	PI2-M1	PI2-M2	PI2-3S
<i>rec experimental</i>	modelo (mm)	268	267	330	278	284	343
	protótipo (m)	6.7	6.67	8.24	6.96	7.09	8.57
<i>hf experimental</i>	Modelo (mm)	136	146	156	150	141	162
	Protótipo (m)	344	3.65	3.89	3.75	3.52	4.04

## 5 DISCUSSÃO

Analisando primeiramente os ensaios com a seção do cabeço do quebra-mar de berma original, comparando os efeitos nas seções médias, percebe-se que o recuo apresentado pela estrutura sob ação de ondas regulares foi muito superior ao 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 à 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 aos ensaios com quebra-mar mais profundo, os resultados obtidos mostraram que em termos médios, a obra sob ação de ondas regulares teve um recuo 24% superior àquela sob ação de ondas irregulares. Entretanto, as seções de recuo máximo, nota-se que a diferença cai para apenas 7,5%.

## 6 CONCLUSÃO

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 com quebra-mar de berma, 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%.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AQUAMODELO** (2005). Projeto de estabilização da barra do Canal de Saquarema. Rio de Janeiro, Brasil.

**DANISH HYDRAULIC INSTITUTE SOFTWARES** Módulos do software MIKE 21.

**Gireli, T.Z.** (2008). “*Modelação Física Em Canal Da Geração De Ondas Regulares E Irregulares Para Estudo De Quebra-Mar De Enrocamento*”. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

**PIANC** (2003). State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters.

**Taveira-Pinto, F & Neves, A. C.** (2003). “*A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes*”. Engenharia Civil Um, número 16, 2003- página 95.

**U. S. ARMY/COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER - CEM** (2002) Coastal Engineering Manual.