

DNIT

Publicação INPH – 008.2021

**MANUAL DE ESTUDOS DE
ESTABILIDADE BIDIMENSIONAL
EM CANAL DE ONDAS IRREGULARES**

2ª edição

RIO DE JANEIRO

2023

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA-GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS

MINISTRO DOS TRANSPORTES

Renan Filho

DIRETOR-GERAL SUBSTITUTO DO DNIT

Fabricio de Oliveira Galvão

DIRETOR DE PLANEJAMENTO E PESQUISA

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

COORDENADOR-GERAL DO INPH

Domenico Accetta

**MANUAL DE ESTUDOS DE ESTABILIDADE
BIDIMENSIONAL
EM CANAL DE ONDAS IRREGULARES**

SEGUNDA EDIÇÃO – Rio de Janeiro, 2023

EQUIPE TÉCNICA:

Eng.º Paulo César da Silva Freire - INPH

Eng.ª Denise Paravato Tavares da Silva - INPH

MsC. William de Souza Barbosa - INPH

COMISSÃO DE SUPERVISÃO:

Eng.º Domenico Accetta – Coordenador-Geral do INPH

Eng.º Paulo Cesar da Silva Freire – Coordenador de Estudos e Pesquisa

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias.

Manual de Estudos de Estabilidade Bidimensional em Canal de Ondas Irregulares. 2ª Edição – Rio de Janeiro – RJ – 2023. 82p. (Publicação INPH – 008.2021)

Assunto geral. I. Série. II. Título.

Reprodução permitida desde que citado o DNIT como fonte.

Impresso no Brasil / Printed in Brazil.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS

Publicação INPH – 008.2021

MANUAL DE ESTUDOS DE ESTABILIDADE
BIDIMENSIONAL EM CANAL DE ONDAS
IRREGULARES

2ª Edição
Rio de Janeiro
2023

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT
DIRETORIA-GERAL – DG
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA – DPP
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS – INPH

Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH

Rua General Gurjão, 166 - Caju

CEP 20931-040 – Rio de Janeiro – RJ

E-mail: secretaria.inph@gmail.com

TÍTULO: MANUAL DE ESTUDOS DE ESTABILIDADE BIDIMENSIONAL EM CANAL
DE ONDAS IRREGULARES

Elaboração: INPH

Aprovado pela Diretoria Colegiada do DNIT em XXX (Relato XXX)

Processo SEI nº 50600.008772/2021-31

APRESENTAÇÃO

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH apresenta este relatório intitulado MANUAL DE ESTUDOS DE ESTABILIDADE BIDIMENSIONAL EM CANAL DE ONDAS IRREGULARES, desenvolvido por este Instituto, subordinado a Diretoria de Planejamento e Pesquisa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Ministério dos Transportes.

Este trabalho é parte integrante do conjunto de Manuais elaborados pela Coordenação de Pesquisa do INPH, que tem por objetivo apresentar uma visão abrangente das etapas a serem cumpridas ao longo de estudos bi e tridimensionais, em modelos físicos.

Eng.º Domenico Accetta
Coordenador-Geral do INPH

NOMENCLATURA E UNIDADES DE MEDIDAS UTILIZADAS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNID. DE MEDIDA
H_s ou $H_{1/3}$	Altura de onda significativa	m
T_p	Período de pico da onda	s
T_z	Período médio das ondas	s
λ	Escala	-
$S_{mp}(f)$	Densidade do espectro Pierson-Moskowitz	$m^2 s$
f	Frequência de onda (1/T de onda)	Hz
f_m	Frequência de pico (frequência cuja densidade espectral é máxima)	Hz
A	Constante de Phillips	-
G	Aceleração da gravidade	m/s^2
$S_j(f)$	Densidade do espectro JONSWAP	$m^2 s$
σ_a	Largura da lateral esquerda da onda	-
σ_b	Largura da lateral direita da onda	-
Γ	Fator de ajuste de pico	-
γ_s	Peso específico da rocha	t/m^3
γ_w	Peso específico da água	t/m^3
N_s	Constante de escala para cálculo	-
K_D	Coefficiente de estabilidade adimensional	-
θ	Ângulo de revestimento com a horizontal	Graus
γ_{wn}	Peso específico da água na natureza	t/m^3
γ_{wm}	Peso específico da água no modelo	t/m^3
W	Peso das pedras	t
W_n	Peso das pedras na natureza	t
W_m	Peso das pedras no modelo	t
O	Volume de ultrapassagem (<i>overtopping</i>)	$l/m/s$
V	Volume de água na bandeja coletora	l
L_n	Largura da bandeja na natureza	m
T_s	Tempo de teste, em segundos	s

LISTA DE ILUSTRAÇÕES – FIGURAS

Figura 1 – Materialização da geometria da seção transversal (FONTE: INPH)	24
Figura 2 – Comparação entre espectro de Pierson-Moskowitz e JONSWAP	29
Figura 3 – Comparação entre espectro de Pierson-Moskowitz (vermelho) e JONSWAP (azul) gerada pelo software Matlab®.....	30
Figura 4 – Vistas de topo e lateral do canal. Posicionamento das sondas e corte longitudinal	36
Figura 5 – Sonda sem gabarito (posição “zero”)	38
Figura 6 – Sonda sobre o gabarito (ponto em posição máximo mV).....	38
Figura 7 – Curva de ganho x Hs.....	44
Figura 8 – Peneiras	53
Figura 9 – Pesagem	53
Figura 10 – Mistura das pedras.....	54
Figura 11 – Núcleo (em azul)	56
Figura 12 – Berma (trecho horizontal em vermelho)	57
Figura 13 – Carapaça posterior (em azul).....	57
Figura 14 – Crista (em amarelo).....	58
Figura 15 – Seção do tipo convencional	59
Figura 16 – Quebra-mar do tipo convencional montado em canal de ondas do INPH	59
Figura 17 – Perfis da seção transversal de quebra-mar obtidos após três levantamentos da berma	66
Figura 18 – Posicionamento da bandeja em relação à obra. Observar que a bandeja está localizada no lado abrigado	70

Figura 19 – Detalhe da bandeja. Observar que a bandeja não encosta nas paredes, evitando o “efeito parede”	71
Figura 20 – Volume de ultrapassagem e danos decorrentes	73
Figura 21 – Volume de ultrapassagem e danos decorrentes	74
Figura 22 – Overtopping x % de dano.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grandezas e suas escalas derivadas.....	21
Tabela 2 – Estatísticas Hs (m) X Tp (s) – Porcentagem	26
Tabela 3 – Estatísticas Tp (s) X Direção (graus) – porcentagem.....	27
Tabela 4 – Estatísticas Hs (m) X Direção (graus) – porcentagem.....	27
Tabela 5 – Ganhos e Hs definidos para ensaio.....	45
Tabela 6 – Características dos testes de longa duração.....	47
Tabela 7 – Exemplo de pesos em gramas e distribuição em peso das pedras no modelo em cada trecho de seção	55
Tabela 8 – Resultados de uma série de ondas do teste de longa duração.....	62
Tabela 9 – Descrição dos dados da tabela de resultados	62
Tabela 10 – Taxa admissível de volume de ultrapassagem.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	DADOS DO PROJETO EXECUTIVO DA OBRA NECESSÁRIOS AO INÍCIO DO ESTUDO	15
2.1	SEÇÕES-TIPO TRANSVERSAIS DA ESTRUTURA	16
2.2	PROJETO ASSENTADO EM FUNDO MARINHO ATUAL	16
2.3	NÍVEIS D'ÁGUA (N.A.) MÁXIMO E MÍNIMO	17
2.4	ONDA DE PROJETO	17
2.4.1	Estatísticas das ondas reinantes no local da obra.....	17
3	ESCOLHA DA ESCALA DO MODELO	19
3.1	CONVERSÃO DE GRANDEZAS PARA A ESCALA ESCOLHIDA.....	20
4	ADEQUAÇÃO DO FUNDO DO CANAL CONFORME BATIMETRIA LOCAL	22
4.1	MATERIALIZAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CANAL	23
4.2	ADEQUAÇÃO AO FUNDO DO CANAL	24
4.3	INSTRUMENTAÇÃO DO CANAL.....	24
5	COMPOSIÇÃO DO TREM DE ONDAS	25
5.1	ESTATÍSTICA DE ONDAS	26
5.2	OBTENÇÃO DO TREM DE ONDAS.....	27
5.2.1	Espectro de onda por Pierson-Moskowitz.....	28
5.2.2	Espectro de onda por JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project).....	28
6	GERAÇÃO DO TREM DE ONDAS.....	31
6.1	PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DE TREM DE ONDAS	32
7	INSTRUMENTAÇÃO DO CANAL DE ONDAS.....	34
8	CALIBRAÇÃO DAS SONDAS.....	37
9	CALIBRAÇÃO DO CANAL DE ONDAS	39
9.1	PRIMEIRA ETAPA: AJUSTE DE ZERO E GANHO FÍSICO DA SONDA ...	40
9.2	SEGUNDA ETAPA: GERAÇÃO DE ONDAS	41
9.3	TERCEIRA ETAPA: ANÁLISE DO TREM DE ONDAS (PÓS-TESTE)	42
9.4	QUARTA ETAPA: GERAÇÃO DE ONDAS	42

10	CRIAÇÃO DA TABELA Hs POR (%) PARA MONTAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE TESTES.....	43
11	PROGRAMAÇÃO DOS TESTES DE LONGA DURAÇÃO.....	46
12	SEQUÊNCIA DE TRABALHO PARA A CONSTRUÇÃO DA SEÇÃO-TIPO TRANSVERSAL DA ESTRUTURA NO CANAL DE ONDAS	49
12.1	TRANSFORMAÇÃO DOS PESOS DAS PEDRAS PARA A ESCALA DO MODELO	50
12.2	SEPARAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DAS PEDRAS PARA CADA TRECHO DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	52
12.3	SEQUÊNCIA DE CONSTRUÇÃO NO CANAL DE ONDAS	56
12.3.1	Estrutura de proteção tipo berma.....	56
12.3.2	Quebra-mar do tipo convencional.....	58
13	DADOS DE SAÍDA DOS TESTES	61
14	ACOMPANHAMENTO DO COMPORTAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL AO LONGO E AO FINAL DOS TESTES	64
14.1	QUEBRA-MAR DE BERMA.....	65
14.2	QUEBRA-MAR CONVENCIONAL.....	67
15	ESTUDO DO VOLUME DE ULTRAPASSAGEM (VOLUME DE OVERTOPPING)	68
15.1	METODOLOGIA DE COLETA DE VOLUME DE ULTRAPASSAGEM	70
15.2	CÁLCULO DO VOLUME DE ULTRAPASSAGEM	71
15.3	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE VOLUME DE ULTRAPASSAGEM: ..	72
	ANEXOS	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Os modelos físicos são uma ferramenta valiosa para a Engenharia, sendo utilizados em situações tão diversas quanto a concepção de um protótipo ou a análise das soluções mais adequadas para um determinado problema.

Em Engenharia Hidráulica, a modelagem física é usada para ensaiar projetos de estruturas de enrocamento de proteção costeira e portuária. Tanto a obra como as condições naturais da região em que ela será implantada são reproduzidas em laboratório, em escala, e realizam-se estudos que têm por objetivo avaliar a eficácia do projeto da estrutura, otimizá-lo ou avaliar possíveis impactos que a obra causará na respectiva região de implantação.

Os modelos reduzidos podem ser bidimensionais ou tridimensionais, cada um dos quais atendendo às especificidades de um contexto de estudo.

Este manual diz respeito a modelo bidimensional para o estudo da estabilidade de estruturas marítimas ou de proteção costeira. Realizado em canal de ondas irregulares, o estudo se aplica às seções transversais com incidência de ondas perpendiculares ao eixo da obra.

O trabalho é fruto da experiência e da tradição do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH em modelos físicos, e foi pensado como um guia básico, embora abrangente, para a realização de estudos de estabilidade tridimensional em canal de ondas irregulares orientando a montagem do modelo, aquisição dos dados de entrada a serem nele reproduzidos, das medições a serem realizadas e a interpretação dos resultados obtidos.

Cabe esclarecer que o trabalho não esgota o assunto, sendo passível de atualizações em decorrência não só de outras técnicas de modelagem, como também de outras tecnologias, principalmente no que diz respeito a novos programas e equipamentos de geração de ondas.

O Manual, em que se consolidam os conhecimentos em modelagem física adquiridos ao longo da existência do INPH, é um legado para as novas gerações de engenheiros

e técnicos que tiverem a honra de dar continuidade ao trabalho desenvolvido por esta importante Instituição.

2 DADOS DO PROJETO EXECUTIVO DA OBRA NECESSÁRIOS AO INÍCIO DO ESTUDO

2 DADOS DO PROJETO EXECUTIVO DA OBRA NECESSÁRIOS AO INÍCIO DO ESTUDO

Em geral, o Cliente fornece o projeto executivo da obra, do qual se extraem os dados básicos para o início do estudo, e que serão apresentados a seguir.

Na falta de algum, ele será proposto pelo INPH, com base em sua experiência, e adotado em comum acordo com o Cliente/Projetista.

2.1 SEÇÕES-TIPO TRANSVERSAIS DA ESTRUTURA

Devem-se conhecer todas as características dessas seções transversais, tais como geometria, faixas de granulometria das pedras que as compõem, e, se for o caso, especificações de blocos artificiais porventura utilizados.

Em geral, essas informações são fornecidas pelo Cliente/Projetista via projeto executivo.

2.2 PROJETO ASSENTADO EM FUNDO MARINHO ATUAL

Como, em geral, as obras marítimas de abrigo ou de proteção costeira se assentam a diversas profundidades do fundo marinho, é fundamental o conhecimento detalhado e atual dessas profundidades.

Em termos de estudo bidimensional, é necessário conhecer, pelo menos, a profundidade em que a seção tipo se assenta na natureza, a fim de se construir, no fundo do canal, a base da seção e, assim, estabelecer uma referência adequada para a posterior representação geométrica da seção na escala adotada.

Também é necessário conhecer a declividade do fundo da canal no trecho entre o batedor de ondas e o pé da obra, de modo a se obter a propagação da onda o mais próximo possível do que ocorre na natureza.

O Cliente deverá fornecer a planta batimétrica atualizada da área de abrangência da obra.

Caso isso não ocorra, dever-se-á realizar levantamento batimétrico da região de interesse.

2.3 NÍVEIS D'ÁGUA (N.A.) MÁXIMO E MÍNIMO

Deverão ser obtidos os níveis d'água de preamar e de baixa-mar referentes a períodos de sizígia (luas nova e cheia).

O nível d'água de baixa-mar é relevante quando se estuda o fenômeno de carreamento de sedimentos na área de assentamento da obra (solapamento), e a estabilidade da estrutura propriamente dita sob a ação do fluxo e refluxo (*uprush* e *downrush*) das ondas no pé da estrutura. O nível d'água de preamar é relevante quando se submete a estrutura a esforços mais severos, decorrentes da ação de uma maior massa de água sobre ela, ou para avaliar possíveis ultrapassagens das ondas na estrutura (crista ou carapaça posterior).

Caso os níveis de d'água não constem no projeto executivo, eles deverão ser obtidos mediante consulta às Tábuas de Maré do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM), que correlaciona todos os portos em nosso litoral.

2.4 ONDA DE PROJETO

Em geral, é fornecida pelo projeto executivo. Na falta deste dado, ela deverá ser obtida mediante estudo específico da onda de projeto na região de interesse da obra.

2.4.1 Estatísticas das ondas reinantes no local da obra

São as que servem de base para a determinação de parâmetros de onda utilizados no projeto da obra e no modelo.

Essas estatísticas devem ser realizadas a partir de dados de ondas incidentes na região de implantação da obra. O ideal para o estudo de ondas é ter por base um período mínimo de cinco anos de registros.

Cabe observar que:

- H_s ou $H_{1/3}$: média da terça parte das ondas com maior altura registradas num determinado intervalo de tempo.
- T_p (período de pico da onda): período correspondente à frequência com maior densidade espectral. É um parâmetro importante, pois é representativo de ondas mais energéticas.
- T_z (período médio da onda): média dos períodos observados durante um determinado tempo de observação. Representa o período típico das ondas registradas durante esse tempo.
- Espectro de ondas (distribuição de energia de onda em função de sua frequência). Há vários espectros de ondas. Em geral, o INPH utiliza o espectro JONSWAP, com Y referente ao T_p a ser adotado.
- Y : fator de ajuste de pico do período, tomando como base um espectro de ondas adotado.

3 ESCOLHA DA ESCALA DO MODELO

3 ESCOLHA DA ESCALA DO MODELO

De posse dos dados supracitados, o passo seguinte é a escolha da escala a ser adotada no modelo, e a subsequente conversão das grandezas relevantes.

Como o objetivo do modelo é estudar e analisar os detalhes críticos da estrutura, a escala deve ser escolhida de modo a conciliar o nível de detalhamento desejado no modelo com as restrições mecânicas do gerador de ondas e com as dimensões do canal.

O batedor de ondas utilizado no INPH permite níveis d'água correspondentes a até a metade da altura de sua pá, ou seja, a altura máxima de água na pá é igual a 0,50 m.

Assim, para se determinar a escala, deve-se levar em conta:

- a) a faixa de escalas recomendadas para os estudos em modelos tridimensionais, normalmente situadas entre 1:30 e 1:70. Entretanto, caso possível, deve-se realizar o estudo em escala maior, desde que respeitadas as limitações do batedor de ondas e do canal.
- b) as limitações do batedor de ondas quanto à altura da lâmina d'água;
- c) a altura útil do canal.

A escala linear é denominada λ .

3.1 CONVERSÃO DE GRANDEZAS PARA A ESCALA ESCOLHIDA

Uma vez encontrada a escala, deve-se converter as grandezas para as respectivas escalas derivadas, via de regra em conformidade com a Lei de Froude, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Grandezas e suas escalas derivadas

Grandezas		Escalas auxiliares
Lineares	Horizontal	λ
	Vertical	λ
Áreas	Horizontal	λ^2
	Vertical	λ^2
Velocidades		$\lambda^{1/2}$
Tempos		$\lambda^{1/2}$
Vazões		$\lambda^{5/2}$
Pressões		λ
Pesos		λ^3
Forças	Horizontal	λ^3
	Vertical	λ^3
Rugosidades (Manning)		$\lambda^{1/6}$

Vale ressaltar que a escala adequada é extremamente importante para a obtenção de resultados consistentes e confiáveis nos testes, pois é a partir dela que se calcularão, por exemplo, os pesos das pedras utilizadas no modelo, as características dos trens de onda que agem sobre a estrutura e a duração dos testes.

4 ADEQUAÇÃO DO FUNDO DO CANAL CONFORME BATIMETRIA LOCAL

4 ADEQUAÇÃO DO FUNDO DO CANAL CONFORME BATIMETRIA LOCAL

Inicialmente, prepara-se o fundo do modelo para receber as características do projeto atual. Para tanto, realiza-se a obra de demolição do fundo existente, referente ao projeto anterior, e retiram-se os entulhos resultantes. Em seguida, executam-se as atividades descritas abaixo.

4.1 MATERIALIZAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CANAL

O Nesta etapa, representa-se, no vidro, a seção transversal da obra. Utilizando-se cores diferentes, identificam-se os trechos seção. Também se informam dados de projeto.

Em termos genéricos, são indicados os seguintes dados:

- Níveis de água;
- Faixa de peso das pedras;
- Formato da seção transversal;
- Escala;
- Cotas da seção transversal ;
- Cota de assentamento da seção.

A Figura 1 apresenta esta etapa.

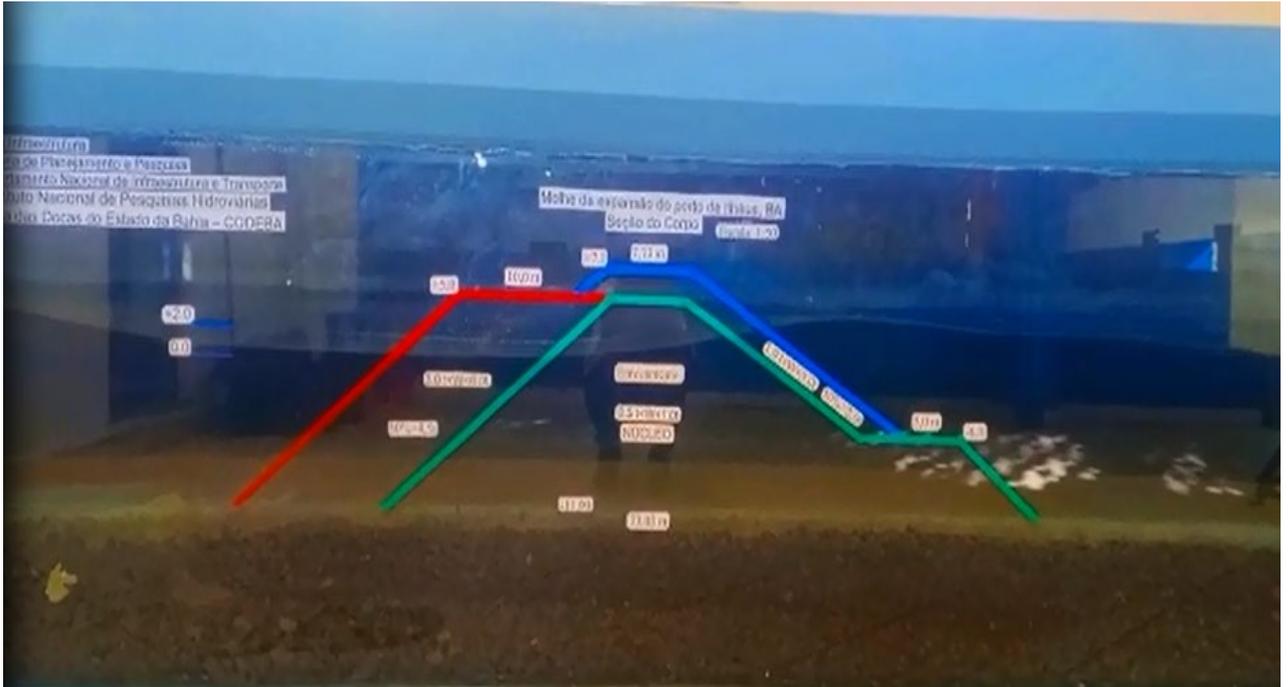


Figura 1 – Materialização da geometria da seção transversal (FONTE: INPH)

4.2 ADEQUAÇÃO AO FUNDO DO CANAL

Após a locação da obra no canal, adequa-se a declividade do fundo do canal no trecho entre o batedor e o pé da obra.

4.3 INSTRUMENTAÇÃO DO CANAL

Cumpridas as etapas acima, realiza-se a locação das sondas, conforme será apresentado adiante, no capítulo 7.

5 COMPOSIÇÃO DO TREM DE ONDAS

5 COMPOSIÇÃO DO TREM DE ONDAS

5.1 ESTATÍSTICA DE ONDAS

O trem de ondas deve ser composto com base nas estatísticas de ondas, utilizando-se as ondas de maior percentual de ocorrência na região da obra.

Tomando como exemplo as Tabelas 2 a 4, que apresentam estatísticas de ondas obtidas a partir de medições efetuadas no período de janeiro de 2001 a maio de 2012 no local da obra, o trem de ondas seria composto por $T_p = 7, 9$ e 11 s.

Para os T_p s determinados, observam-se, na Tabela 2, os maiores percentuais de ocorrência de H_s . No caso, utilizam-se os H_s variando de 1 até o valor de onda de projeto.

Tabela 2 – Estatísticas H_s (m) X T_p (s) – Porcentagem

H_s (m)	T_p (s)							Total
	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	>14	
0,5-1,0	0,00	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0
1,0-1,5	0,00	0,00	4,50	7,32	8,26	1,00	0,00	21
1,5-2,0	0,00	0,00	12,59	28,84	15,93	3,54	2,00	63
2,0-2,5	0,00	0,00	0,88	7,90	3,49	2,40	0,00	15
2,5-3,0	0,00	0,00	0,00	0,86	0,28	0,06	0,00	1
>3,0	0,00	0,00	0,00	0,07	0,04	0,00	0,00	0
Total	0,00	0,02	18,00	45,00	28,00	7,00	2,00	100

No caso de estudo em canal, a incidência da onda é frontal. Neste caso, não há necessidade de se utilizar os dados da Tabela 3. Entretanto, em estudos tridimensionais e de agitação de onda, esses dados são necessários à composição do trem de ondas.

Tabela 3 – Estatísticas Tp (s) X Direção (graus) – porcentagem

Tp (s)	DIREÇÃO (graus)															TOTAL (%)	
	0-22,5	22,5-45	45-67,5	90-112,5	112,5-135	135-157,5	157,5-180	180-202,5	202,5-225	225-247,5	247,5-270	270-292,5	292,5-315	315-337,5	337,5-360		
2 a 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 a 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
6 a 8	0,00	4,10	10,59	2,28	1,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,01
8 a 10	0,00	0,10	7,65	11,95	16,39	7,29	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,49
10 a 12	0,00	0,00	0,00	0,00	2,35	20,98	4,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,60
12 a 14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,60	3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,85
>14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03
TOTAL (%)	0,00	4,20	18,24	14,23	19,74	32,91	10,67	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

O mesmo raciocínio de aplica aos dados da Tabela 4.

Tabela 4 – Estatísticas Hs (m) X Direção (graus) – porcentagem

Hs (m)	DIREÇÃO (graus)															TOTAL (%)	
	0-22,5	22,5-45	45-67,5	67,5-90	90-112,5	112,5-135	135-157,5	157,5-180	180-202,5	202,5-225	225-247,5	247,5-270	270-292,5	292,5-315	315-337,5		337,5-360
0,5 a 1,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0 a 1,5	0,00	1,46	2,00	2,09	3,19	7,43	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,60
1,5 a 2,0	0,00	2,73	13,56	9,64	12,64	19,92	4,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63,31
2,0 a 2,5	0,00	0,00	2,65	2,35	3,63	4,91	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,70
2,5 a 3,0	0,00	0,00	0,02	0,16	0,26	0,57	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23
>3	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
TOTAL (%)	0,00	4,19	18,25	14,25	19,74	32,91	10,65	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

5.2 OBTENÇÃO DO TREM DE ONDAS

O INPH possui um banco de dados de espectros JONSWAP, para seus respectivos Tp e um determinado Y.

Caso o espectro JONSWAP desejado não conste desse banco, ele poderá ser gerado por programa específico, para os Tp e Y.

O programa de geração de trem de ondas utiliza os Tp escolhidos (conforme. 5.1), a escala adotada e o tempo de duração do ensaio.

O tempo de duração de cada ensaio, em geral, corresponde ao trem de ondas de 3 horas na natureza.

A duração de 3 horas de tempestade decorre de estudos que mostraram que os eventos máximos de ondas ocorrem dentro de um intervalo de tempo de 3 horas na natureza.

5.2.1 Espectro de onda por Pierson-Moskowitz

$$Smp(f) = \alpha * g^2 * (2 * \pi)^{-4} * f^{-5} * e^{\left(-\frac{5}{4} * \left(\frac{f_m}{f}\right)^4\right)} \quad (1)$$

Onde:

$Smp(f)$ é a densidade do espectro Pierson-Moskowitz, expressa em metro quadrado segundo (m^2s);

f é a frequência de onda ($1/T$ de onda), expressa em Hertz (Hz);

f_m é a frequência de pico (frequência cuja densidade espectral é máxima), expressa em Hertz (Hz);

α é o 8,1 (Constante de Phillips) adimensional;

g é a aceleração da gravidade, expressa em metros por segundo ao quadrado (9,816 m/s^2).

5.2.2 Espectro de onda por JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project)

$$Sj(f) = \alpha * g^2 * (2 * \pi)^{-4} * f^{-5} * e^{\left(-\frac{5}{4} * \left(\frac{f_m}{f}\right)^4\right)} * \gamma e^{\left(\frac{-(f-f_m)^2}{2 * \sigma^2 * f_m^2}\right)} \quad (2)$$

Onde:

$Sj(f)$ é a densidade do espectro JONSWAP, expressa em metro quadrado segundo (m^2s);

f é a frequência de onda ($1/T$ de onda), expressa em Hertz (Hz);

f_m é a frequência de pico (frequência cuja densidade espectral é máxima), expressa em Hertz (Hz);

α é a Constante de Phillips (8,1) adimensional;

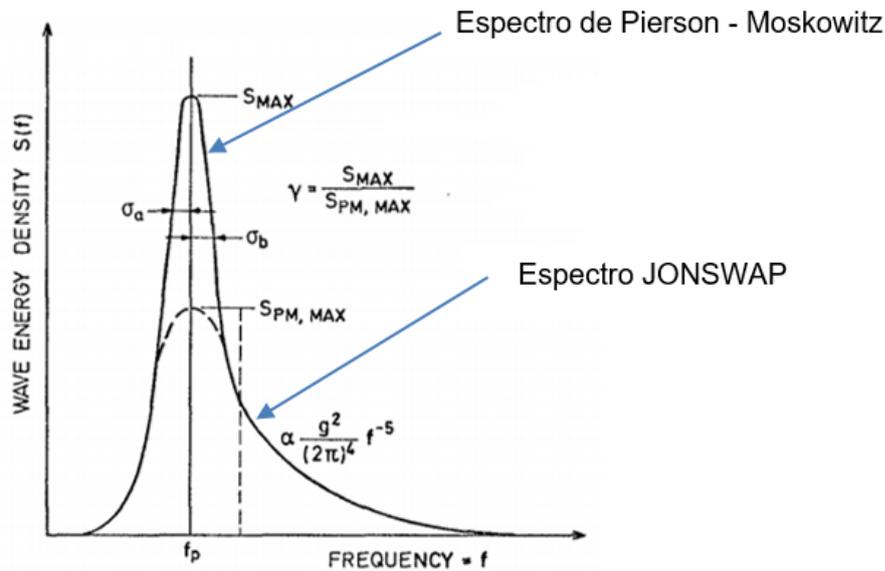
g é a aceleração da gravidade, expressa em metros por segundo ao quadrado (9,816 m/s^2);

σ é o $\begin{cases} \sigma_a = 0,07, & \text{se } f < f_m, \\ \sigma_b = 0,09, & \text{se } f > f_m \end{cases}$ (largura da lateral esquerda e direita da onda,

respectivamente), adimensional;

γ é o $\frac{S_j(f_m)}{S_{mp}(f_m)}$ (Fator de ajuste de pico), adimensional.

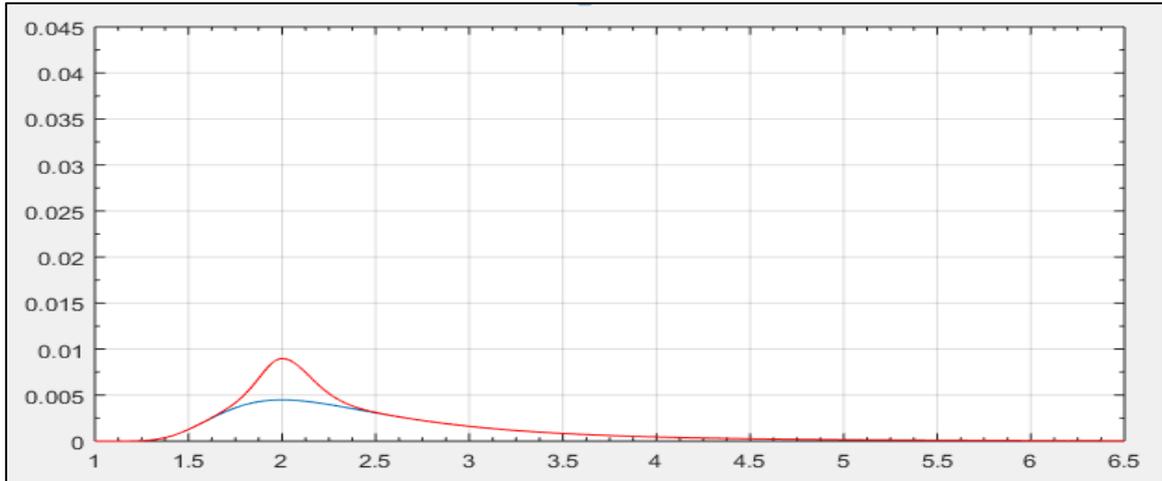
A Figura 2 apresenta os espectros de Pierson-Moskowitz e JONSWAP.



Adaptado de: Abu Husain, Mohd Khairi & Mohd Zaki, Noor Irza & Najafian, Gholamhossein (2014).

Figura 2 – Comparação entre espectro de Pierson-Moskowitz e JONSWAP

Para fins ilustrativos, apresenta-se, na Figura 3, a comparação das curvas representativas dos dois espectros, obtidas através do programa *Matlab*®. Vê-se, claramente, a diferença de formato de pico gerada pelo fator Gama.



Fonte: INPH (2014)

Figura 3 – Comparação entre espectro de Pierson-Moskowitz (vermelho) e JONSWAP (azul) gerada pelo software Matlab®

6 GERAÇÃO DO TREM DE ONDAS

6 GERAÇÃO DO TREM DE ONDAS

O INPH conta com dois computadores para a geração de trem de ondas: o primeiro, aqui identificado como Computador 1, é utilizado para criação e validação de trens de ondas. O segundo, denominado Computador 2, é utilizado para acionar a pá do batedor de ondas a fim de reproduzir o trem de ondas.

6.1 PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DE TREM DE ONDAS

NO COMPUTADOR 1

A pasta “Espectros”, na área de trabalho (*desktop*), contém arquivos de geração de ondas prontos (.dlc), bem como planilhas Excel (.xlsx) com espectros expressos em função de γ e T_p . Caso não haja um arquivo de geração de onda com as características desejadas, busca-se o espectro desejado, em geral expresso como γ por T_p , em uma planilha Excel (.xlsx). Converte-se o arquivo para .txt; em geral, copia-se o conteúdo da planilha para um editor como o Bloco de Notas.

- a) Na pasta “Análises”, abrir o programa Wave e selecionar o modo de operação “Seleção de arquivo” e abrir o arquivo .txt contendo o espectro desejado. A caixa “Escalonamento” fornece opções para a adequação do espectro gerado através de coeficientes. Por padrão, permanece desmarcada;
- b) Preencher a caixa “Parâmetros do Ensaio” com a escala e a duração adotados;
- c) Clicar em “Configurações”. Na janela “Configurações Gerais”, preencher os dados da seguinte maneira:
 - Altura de Lâmina d’água (distância entre o fundo da canal no pé da obra e o nível d’água). Deve ser preenchida de acordo com a obra estudada, sempre levando em consideração a escala do modelo e o nível d’água máximo permitido pelo batedor de ondas (1/2 da altura da pá do batedor de ondas, de maneira conservadora).
 - Tipo de Gerador de Ondas: deve ser sempre selecionada a opção “Pistão”.

- Parâmetros de Espectro JONSWAP t_a e t_b : constantes adimensionais pertinentes à formulação matemática do espectro. Devem ser sempre $t_a = 0,07$ e $t_b = 0,09$.
 - Unidade de medida: deve-se colocar em centímetros, para maior controle do batedor e das ondas geradas.
 - Passo de tempo: determina o intervalo de tempo entre amostragens do ensaio. Por padrão, utilizam-se 0,01 ou 0,02 segundos. Intervalos menores dependem da capacidade do controlador em processá-los, não sendo recomendável realizar diminuições sem testes prévios.
- d) Clicar em “Salvar” na janela “Configurações Gerais”; a mesma será fechada. Clicar, então, em “Calcular”;
- e) Serão gerados, para visualização, dois espectros, um real e um em escala, relativos ao canal de ondas irregulares. Caso seja necessário realizar alguma correção no espectro, habilitar a opção “Escalonamento” e alterar os fatores até obter-se o espectro em escala desejado;
- f) Clicar em “gravar”. Isto permitirá a criação de um arquivo de geração de ondas (.dlc). Recomenda-se nomear o arquivo com o γ e T_p utilizados;
- g) Transferir o arquivo .dlc criado, corretamente identificado, para o Computador 2. Para tanto, utiliza-se um pendrive ou outro dispositivo USB.

NO COMPUTADOR 2

De posse do arquivo de geração de trem de ondas (.dlc) desejado, passa-se às etapas seguintes, que dizem respeito à calibração das sondas para análise do trem de ondas e à operação do gerador de ondas.

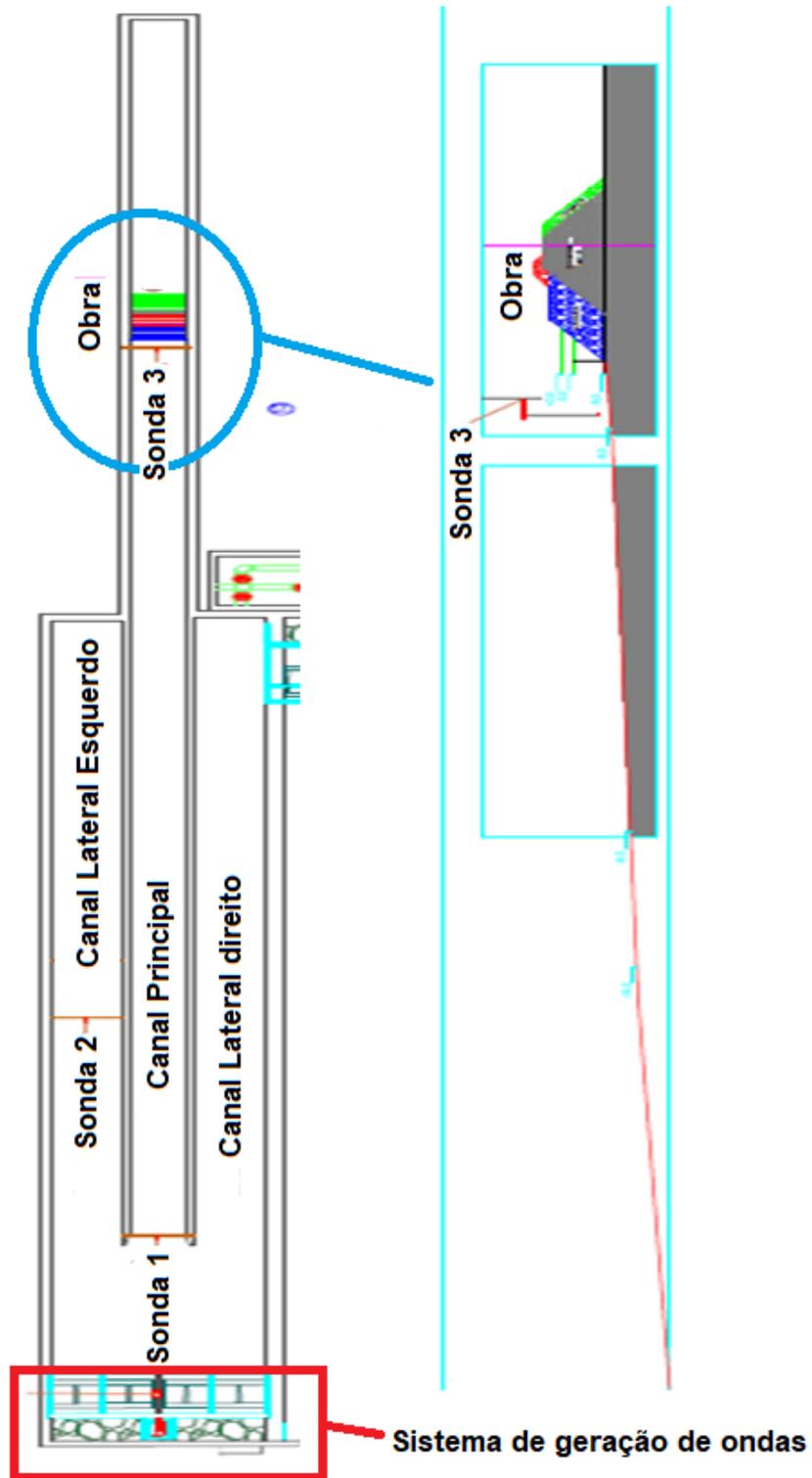
7 INSTRUMENTAÇÃO DO CANAL DE ONDAS

7 INSTRUMENTAÇÃO DO CANAL DE ONDAS

Usualmente, são colocadas três sondas no canal:

- Sonda 1 – posicionada em frente ao batedor, no início do canal principal (central). Mede a onda gerada ao largo. Esta sonda ainda pode captar ondas refletidas pela obra, o que pode acarretar alterações no Hs e no Tp do trem de ondas.
- Sonda 2 – posicionada no meio de um dos canais laterais. É a sonda de referência do ensaio, pois ela mede a onda gerada, mas que não sofre interferência da reflexão. É a sonda usada como referência de Tp e Hs.
- Sonda 3 – posicionada no canal principal, na frente da obra. Mede a onda que incide diretamente sobre a obra. Esta sonda sempre será influenciada por reflexões após a instalação da obra.

Os padrões de reflexão e re-reflexão ocorrem indefinidamente durante toda a execução dos ensaios e são complicados e, em certa medida, mascaram a medição das ondas incidentes. Existem sistemas de geração de ondas que, mediante software, atenuam ou anulam esses efeitos, através de movimentos compensatórios das pás dos batedores de ondas. O batedor de ondas do INPH não possui esses dispositivos. A Figura 4 a seguir mostra o esquemático de posicionamento das sondas no canal.



Fonte: INPH (2014)

Figura 4 – Vistas de topo e lateral do canal. Posicionamento das sondas e corte longitudinal

8 CALIBRAÇÃO DAS SONDAS

8 CALIBRAÇÃO DAS SONDAS

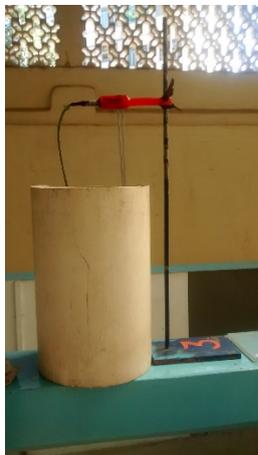
A calibração das sondas serve para estabelecer uma faixa de variação de medidas de alturas de ondas que estão dentro do trem de ondas.

A calibração das sondas deve ser realizada sempre antes de cada ensaio.

No processo, utiliza-se um recipiente contendo água. O nível d'água no recipiente deve atingir a metade da altura da sonda. Utiliza-se, também, um gabarito de altura conhecida, a qual é convertida em mV, em função da escala adotada.

A Figura 5 apresenta a posição da sonda fixada numa base, sem o gabarito (ponto 0 mV). A Figura 6 apresenta a posição da sonda sobre o gabarito, que, em função da escala, está correlacionada a um determinado número de mV.

O processo de leitura é repetido até que se encontre a leitura 0 (mV) para a posição sem o gabarito, e a posição em que o número de mV corresponda à altura do gabarito



Fonte: INPH

**Figura 5 – Sonda sem gabarito
(posição “zero”)**



Fonte: INPH

**Figura 6 – Sonda sobre o gabarito
(ponto em posição máximo mV)**

9 CALIBRAÇÃO DO CANAL DE ONDAS

9 CALIBRAÇÃO DO CANAL DE ONDAS

9.1 PRIMEIRA ETAPA: AJUSTE DE ZERO E GANHO FÍSICO DA SONDA

NO COMPUTADOR 2

- a) Abrir o programa SISGO (Sistema de Geração de Ondas), na área de trabalho (*desktop*) do Computador 2;
- b) Selecionar a opção F3: Geração e Aquisição;
- c) Normalmente, utiliza-se um arquivo que já contenha o número de sondas a serem usadas, apenas ajustando-se a escala. Caso não haja este arquivo, pode-se gerar um arquivo com o número desejado, bastando apenas preencher os dados pedidos e selecionar um número de sondas condizente com o número real de sondas conectadas. Recomenda-se identificar as sondas de acordo com sua posição no canal;
- d) Clicar em “Salvar” e salvar o arquivo de calibração, corretamente identificado e na escala do ensaio, na pasta pertinente ao estudo que esteja sendo realizado;
- e) Clicar em “OK” e, então, em “F1- Calibrar canais 1 a 16”. Uma janela aparecerá, indicando as leituras das sondas conectadas, conforme foram nomeadas na etapa 3;
- f) Com a sonda presa a seu suporte e inserida em um balde com água deve-se ajustar o dial “Zero Coarse” correspondente à mesma no aparelho Wave Meter, até que se obtenha a leitura “0”;
- g) Com a leitura zerada, colocar a placa de acrílico sob o suporte da sonda e, então, ajustar o dial “Gain” (“Ganho”) até que se obtenha a leitura “1”;
- h) Uma vez determinado o ganho para cada uma das sondas a serem utilizadas, estas poderão ser posicionadas na canal de ondas (conforme Capítulo 7);
- i) Depois que as sondas estiverem posicionadas, não se deve mexer no ganho. A leitura deverá ser zerada utilizando-se o dial “Zero Coarse” apenas;

- j) Pressionar “Retornar” no programa e, então, em “calibrado”, para dar continuidade ao processo de geração de ondas.

9.2 SEGUNDA ETAPA: GERAÇÃO DE ONDAS

- a) Após calibrar as sondas, a janela “Configuração de Onda” abrirá;
- b) Criar um ganho aleatório;
- c) Gerar um tempo mínimo de ondas (máximo de 5 min);
- d) Na aba “Abrir arquivo”, clicar em “F2 – Ler Arquivo”;
- e) Selecionar o arquivo de geração de ondas a ser utilizado (.dlc) previamente transferido;
- f) Preencher a caixa “Duração” com o tempo desejado de duração do ensaio;
- g) Clicar em “OK”;
- h) Neste momento, o programa SISGO estará pronto para dar início ao teste. O botão indicador “Geração e Aquisição” estará iluminado. Clicar no botão “INICIAR”;
- i) A janela “Zera Batedor” abrirá, indicando que o batedor está se deslocando para a posição inicial (0 mm). Após terminar o deslocamento, clicar em “Continuar”;
- j) O teste começará. Na janela “Geração de onda” será possível acompanhar o desenrolar do teste, e ainda verificar o trem de ondas teórico em contraste com o real do modelo.

Após o término do teste, será gerado um arquivo contendo todos os dados do teste de ondas. Este arquivo deverá ser salvo e transferido para o Computador 1 para análise.

9.3 TERCEIRA ETAPA: ANÁLISE DO TREM DE ONDAS (PÓS-TESTE)

NO COMPUTADOR 1

- a) Na pasta “Análises”, abrir o programa “Análise de Ondas”;
- b) Selecionar a opção “Ler Arquivo”, e abrir o arquivo correspondente ao teste realizado;
- c) Clicar em “Calcula”. Será gerado um arquivo de texto (.txt) contendo as informações do teste;
- d) A janela “Selecione um nome para valores ordenados” abrirá. Clicar em “Cancelar”;
- e) A janela “Selecione um nome para valores calculados” abrirá. Este contém todas as informações desejadas. Salvar com o nome e características do teste.

9.4 QUARTA ETAPA: GERAÇÃO DE ONDAS

Poderá ser necessário adequar o trem de ondas para que este atinja o H_s de projeto. Neste caso, deverá ser usado o fator multiplicativo “Ganho”, disponível no processo de geração de ondas na janela “Configuração de Onda” para criar uma curva de escalonamento do trem de ondas na forma $Ganho \times H_s$. Para tanto, são necessários:

- Trem de ondas para cada T_p a ser estudado;
- Canal de ondas sem obra, apenas instrumentado;
- Seção a ser estudada desenhada, implantada no piso da canal.

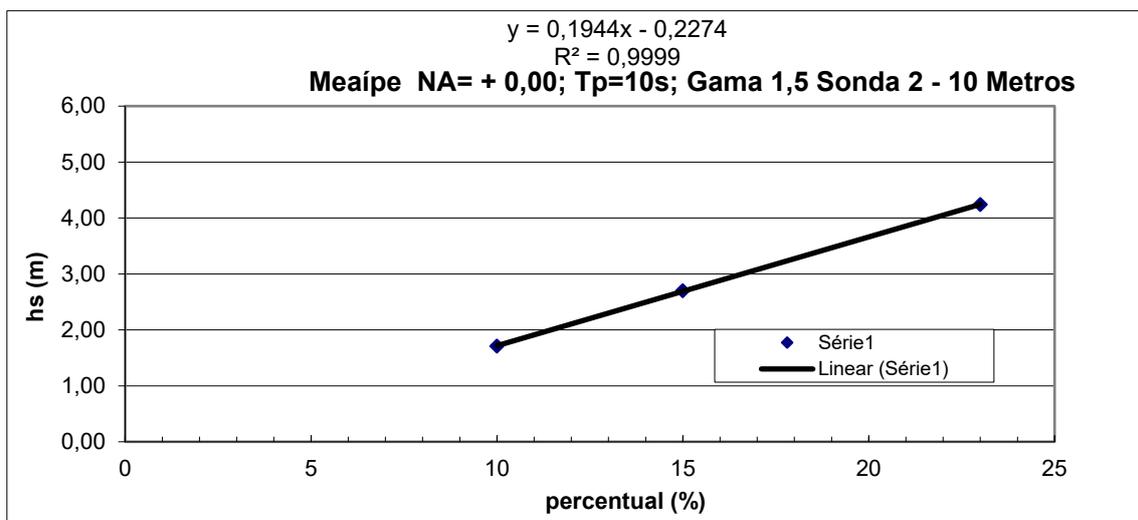
Deverão ser realizados sucessivos testes de curta duração (em geral 5 minutos) com valores de Ganho distintos (em geral 3 a 5 valores), que, por sua vez, resultarão em valores de H_s observados nos testes distintos, proporcionais ao Ganho adotado. Estes testes deverão ser realizados para o mesmo trem de ondas e N.A.

**10 CRIAÇÃO DA TABELA Hs POR (%) PARA MONTAGEM DA
PROGRAMAÇÃO DE TESTES**

10 CRIAÇÃO DA TABELA Hs POR (%) PARA MONTAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE TESTES

Com o canal ajustado e instrumentado, procede-se à montagem do trecho da obra a ser representado em modelo e iniciam-se os preparativos para os testes propriamente ditos, conforme as seguintes etapas:

- De acordo com as estatísticas de ondas do projeto, definem-se os Hs mínimo e máximo para o teste;
- Define-se uma curva (em geral, através da ferramenta Excel) “Ganho x Hs “ específica para aquele trem de ondas, para cada sonda. A equação resultante, através de uma correlação linear, é usada, então, para determinar qual Ganho deve ser inserido para a obtenção do Hs desejado durante o teste com a obra. A Figura 7 apresenta a curva de ganhos determinada para Hs = 1,71 m; 2,7 m e 4,24 m.



Fonte: INPH

Figura 7 – Curva de ganho x Hs

A Tabela 5 apresenta os valores de ganhos extraídos da curva, para $H_s = 3,20$ m; 3,40 m e 3,80 m.

Tabela 5 – Ganhos e H_s definidos para ensaio

(%)	H_s (m)	(%)	H_s (m)
10,00	1,71	17,63	3,20
15,00	2,7	18,66	3,40
23,00	4,24	20,72	3,80

Cabe observar que, após a colocação da obra, os valores de H_s sofrerão alteração devido à reflexão das ondas. A sonda localizada em frente ao batedor (sonda que registra as ondas geradas) é usada, então, para verificar os H_s do trem de ondas.

A validação da calibragem é feita conforme apresentado no Capítulo 13 adiante.

11 PROGRAMAÇÃO DOS TESTES DE LONGA DURAÇÃO

11 PROGRAMAÇÃO DOS TESTES DE LONGA DURAÇÃO

Para se conhecer o comportamento da obra face a condições de ondas severas e continuadas atuando por um determinado período de tempo (o equivalente a três horas na natureza), elabora-se uma programação de testes em que cada conjunto de H_s , T_p (conforme Capítulo 5) e nível d'água (conforme 2.3) é aleatoriamente agrupado. Devem constar desta programação:

- o H_s de projeto, que, em geral, é reproduzido na segunda metade da sequência de ensaios; e
- um H_s maior que o do projeto, que simula uma onda atípica, e tem por finalidade avaliar o comportamento da obra sob condições ainda mais severas do que se poderia esperar e avaliar se a obra disporá de reserva técnica para uma onda maior que a de projeto. Em geral, esta onda é 15% maior que a onda de projeto. Este teste é realizado ao final da programação.

A Tabela 6 apresenta exemplo de programação de testes. Nela, a onda de projeto tem $H_s = 4,0$ m, e a onda atípica tem $H_s = 4,5$ m.

Tabela 6 – Características dos testes de longa duração

Nº do Ensaio	H_s (m)	T_p (s)	N. A. (m)
1	3,4	10	0,0
2	3,2	10	0,0
3	3,8	10	0,0
4	3,2	15	2,1
5	3,2	13	0,0
6	3,8	10	2,1
7	3,8	15	2,1
8	3,4	13	2,1
9	3,2	10	2,1
10	3,2	13	0,0
11	3,4	13	2,1
12	3,2	15	0,0
13	3,4	10	2,1
14	3,2	13	0,0
15	3,2	10	0,0

Nº do Ensaio	Hs (m)	Tp (s)	N. A. (m)
16	3,2	13	0,0
17	3,2	13	2,1
18	3,4	15	2,1
19	3,2	10	0,0
20	3,2	10	2,1
21	3,2	15	2,1
22	3,4	10	2,1
23	3,4	10	0,0
24	3,4	10	2,1
25	4,0	15	2,1
26	3,4	10	0,0
27	3,2	13	0,0
28	3,2	15	2,1
29	3,2	13	0,0
30	3,8	10	0,0
31	3,2	10	0,0
32	3,2	15	2,1
33	3,2	10	2,1
34	3,2	10	2,1
35	4,5	13	2,1

**12 SEQUÊNCIA DE TRABALHO PARA A CONSTRUÇÃO DA SEÇÃO-TIPO
TRANSVERSAL DA ESTRUTURA NO CANAL DE ONDAS**

12 SEQUÊNCIA DE TRABALHO PARA A CONSTRUÇÃO DA SEÇÃO-TIPO TRANSVERSAL DA ESTRUTURA NO CANAL DE ONDAS

12.1 TRANSFORMAÇÃO DOS PESOS DAS PEDRAS PARA A ESCALA DO MODELO

Conforme explicitado anteriormente, o modelo reduzido deve representar o mais fielmente possível o protótipo na natureza. Assim, os pesos das pedras que compõem o modelo devem ser selecionados em estrita correspondência, em escala, com os estabelecidos no projeto, de modo a preencher a estrutura de maneira correta. Os pesos no modelo são determinados mediante a formulação matemática apresentada a seguir.

Da fórmula de HUDSON, temos:

$$W = \frac{\gamma_s * H_s^3}{N_s * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3} \quad (3)$$

Onde:

W é o peso das pedras, expresso em toneladas;

N_s é o chamado número de estabilidade (adimensional);

γ_s é o peso específico da rocha, expresso em tonelada por metro cúbico ($\cong 2,65 \text{ t/m}^3$);

H_s é a altura da onda de projeto no pé da estrutura, expresso em metros (m);

γ_w é o peso específico da água, expresso em tonelada por metro cúbico (salgada = $1,02 \text{ t/m}^3$ e doce = $1,003 \text{ t/m}^3$);

OBS: a água salgada tem peso específico variante, (faixa de $1,02 \text{ t/m}^3$ a $1,035 \text{ t/m}^3$), porém usualmente utilizamos $1,02 \text{ t/m}^3$.

Na fórmula, o fator N_s (número de estabilidade) é expresso por

$$N_s = (K_D * \cot \theta)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Onde:

θ é o ângulo de revestimento com a horizontal

K_D é um coeficiente de estabilidade adimensional, deduzido de experimentos em laboratório, para diferentes tipos de blocos de carapaça, e para danos muito pequenos (poucos blocos movidos da carapaça).

OBS.:

K_D é cerca de 3 para rocha natural de pedreira

K_D é cerca de 10 para blocos de concreto com intertravamento artificial

Para o cálculo da relação entre o peso da “pedra real” e o peso da pedra em escala, basta usar a formula de HUDSON duas vezes, uma para a natureza e outra para o modelo e, em seguida, achar a razão entre os dois:

$$N_s = \frac{\gamma_s * H_{sn}^3}{Wn * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wn}} - 1\right)^3} \text{ para a natureza} \quad (5)$$

$$N_s = \frac{\gamma_s * H_{sm}^3}{Wm * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wm}} - 1\right)^3} \text{ para o modelo} \quad (6)$$

Igualando as duas, temos:

$$\frac{\gamma_s * H_{sn}^3}{Wn * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wn}} - 1\right)^3} = \frac{\gamma_s * H_{sm}^3}{Wm * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wm}} - 1\right)^3}, \quad (7)$$

Logo:

$$\frac{Wn}{Wm} = \frac{\frac{\gamma_s * H_{sn}^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wn}} - 1\right)^3}}{\frac{\gamma_s * H_{sm}^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wm}} - 1\right)^3}} = \frac{\frac{H_{sn}^3}{(1.598)^3}}{\frac{H_{sm}^3}{(1.642)^3}} \quad (8)$$

Como $H_{sn} = \lambda * H_{sm}$ (com λ sendo o fator de escala),temos:

$$\frac{Wn}{Wm} = \frac{(\lambda * H_{sm})^3}{(1.598)^3} = \frac{(\lambda)^3}{(1.598)^3} = \frac{(\lambda)^3 * (1,642)^3}{(1.598)^3} \quad (9)$$

$$\frac{Wn}{Wm} = \frac{(\lambda)^3 * 4,4277}{4,08096} \text{ (água salgada para doce)}$$

No geral:

$$\frac{Wn}{Wm} = \frac{(\lambda)^3 * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wm}} - 1\right)^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{wn}} - 1\right)^3} \quad (10)$$

Onde:

wn é o peso das pedras na natureza, expressa em tonelada (t);

wm é o peso das pedras no modelo, expressa em tonelada (t);

γ_s é o peso específico da rocha, expressa em tonelada por metro cúbico (2,65 t/m³);

γ_{wn} é o peso específico da água na natureza, expressa em tonelada por metro cúbico (t/m³);

γ_{wm} é o peso específico da água no modelo, expressa em tonelada por metro cúbico (t/m³);

λ é o fator de escala.

12.2 SEPARAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DAS PEDRAS PARA CADA TRECHO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Para cada etapa construtiva, ao menos 50 % das pedras utilizadas devem ter peso maior ou igual ao peso médio da faixa de peso da etapa. Este é um mecanismo para garantir a estabilidade da estrutura, através de um gradiente granulométrico.

Sendo, assim, o procedimento para separação, por peneiramento, transcorre de acordo com as seguintes etapas:

- Peneirar as pedras, utilizando-se peneiras com diâmetros distintos, sempre em ordem decrescente. Em geral, são utilizadas 4 peneiras. A Figura 8 ilustra duas das peneiras usadas e material retido em cada uma delas;



Fonte: INPH

Figura 8 – Peneiras

- b) Do volume retido em cada peneira retirar uma amostra;
- c) Pesar as pedras de cada amostra individualmente, e elencá-las de acordo com a peneira em que ficaram retidas. São criadas, assim, tabelas que relacionam a peneira utilizada (diâmetro) ao peso das pedras retidas (Tabela 7). Um procedimento adicional para melhor analisar a distribuição granulométrica pode ser a construção de uma curva Percentual acumulado X Peso da amostra. A Figura 9 mostra a preparação de amostra para pesagem;



Fonte: INPH

Figura 9 – Pesagem

- d) A análise das tabelas irá sugerir, então, a melhor forma de corrigir o processo de separação das pedras para que se atinja a faixa de peso desejada. Pode-se alterar o peso das pedras, as peneiras utilizadas ou uma combinação;

- e) O processo de peneiramento, pesagem e amostragem deve ser corrigido e repetido até que se possam obter dois volumes de pedras: o primeiro, correspondente à metade superior da faixa de peso desejada; o segundo, correspondente à metade inferior da faixa de peso desejada;
- f) Separar os dois volumes obtidos, correspondentes às duas metades da faixa de peso desejada, em pilhas distintas. Estes volumes podem ser subdivididos posteriormente, para maior precisão da distribuição;
- g) O próximo passo envolve estabelecer um “traço” para a mistura das pedras, para que se obtenha, no modelo, a distribuição granulométrica de projeto;



Fonte: INPH

Figura 10 – Mistura das pedras

- h) Para tanto é necessário encher um recipiente de dimensões conhecidas (em geral uma caixa pequena) com pedras retiradas de um dos montes previamente separados, conforme mostra a Figura 10, e, em seguida, contá-las; o procedimento deverá ser repetido para cada um dos montes separados;
- i) O número de pedras de um monte necessário para encher o recipiente indicará a proporção na qual as pedras deste monte deverão ser usadas na mistura. Por exemplo, se um certo número “n” de pedras de um monte enche o recipiente e “2n” pedras de um segundo monte encham o mesmo recipiente, o traço será 2:1, ou seja, duas vezes mais pedras do primeiro monte entrarão na mistura.

Tabela 7 – Exemplo de pesos em gramas e distribuição em peso das pedras no modelo em cada trecho de seção

p=1	p=2	p=3	p=4	
83,60	0,10	10,70	27,70	Núcleo
85,60	17,70	12,60	29,50	Berma e Crista
85,70	19,20	12,70	33,00	Atrás do Núcleo
86,90	20,30	12,70	34,30	Descarte
87,00	21,00	13,00	36,30	
87,00	21,50	14,30	36,90	
87,70	21,70	14,40	41,00	
88,90	21,90	14,40	41,30	
89,40	22,30	14,50	42,00	
89,50	22,50	14,80	42,50	
89,60	23,00	15,40	42,80	
89,90	23,50	15,40	43,50	
89,90	24,20	15,50	44,20	
90,20	24,20	15,50	44,40	
90,20	24,40	15,90	44,60	
90,40	24,90	16,10	44,70	
91,20	24,90	16,20	44,80	
91,50	25,00	16,20	44,90	
91,50	25,20	16,40	45,10	
91,70	25,20	16,70	45,20	
92,10	25,40	16,70	45,50	
92,30	26,00	16,90	45,60	
92,50	26,20	16,90	45,80	
92,70	26,30	17,10	45,80	
93,00	26,40	17,30	46,30	
93,70	26,50	17,40	46,50	
93,70	26,50	17,40	46,70	
94,20	27,20	17,50	46,70	
94,40	27,70	17,80	48,10	
96,00	27,70	17,80	48,80	
96,40	27,80	17,90	49,10	
96,40	28,10	17,90	49,20	

Fonte: INPH

12.3 SEQUÊNCIA DE CONSTRUÇÃO NO CANAL DE ONDAS

No Brasil, as estruturas de enrocamento de proteção costeira e portuária mais comumente empregadas podem ter seções convencionais ou de berma. O enrocamento convencional pode ser composto por blocos de rocha ou por blocos artificiais.

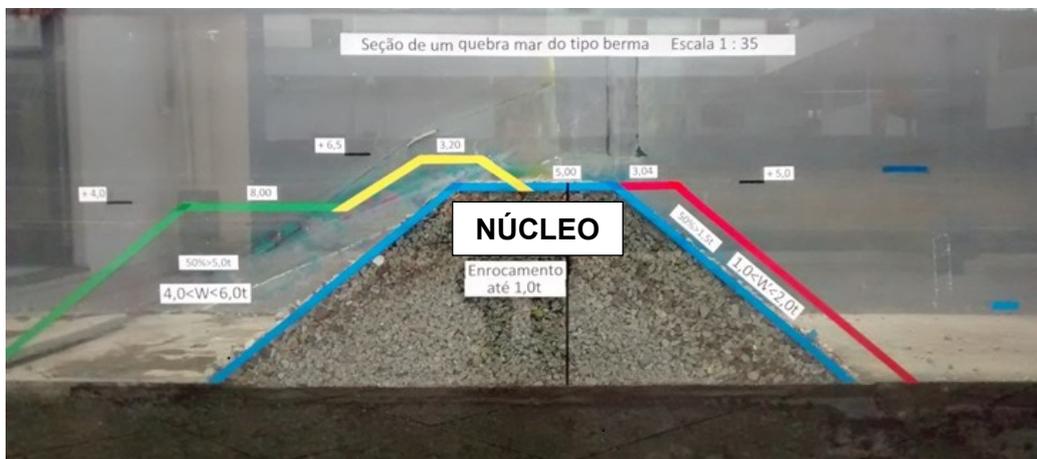
Cabe ao projetista responsável pelo projeto a adoção do enrocamento mais adequado para tipo de obra desejado, bem como o cálculo dos pesos dos blocos da estrutura.

Contudo, o conhecimento de algumas características de ambos os tipos é pertinente ao processo construtivo dos mesmos em modelos de escala reduzida.

12.3.1 Estrutura de proteção tipo berma

É construída obedecendo-se à seguinte ordem:

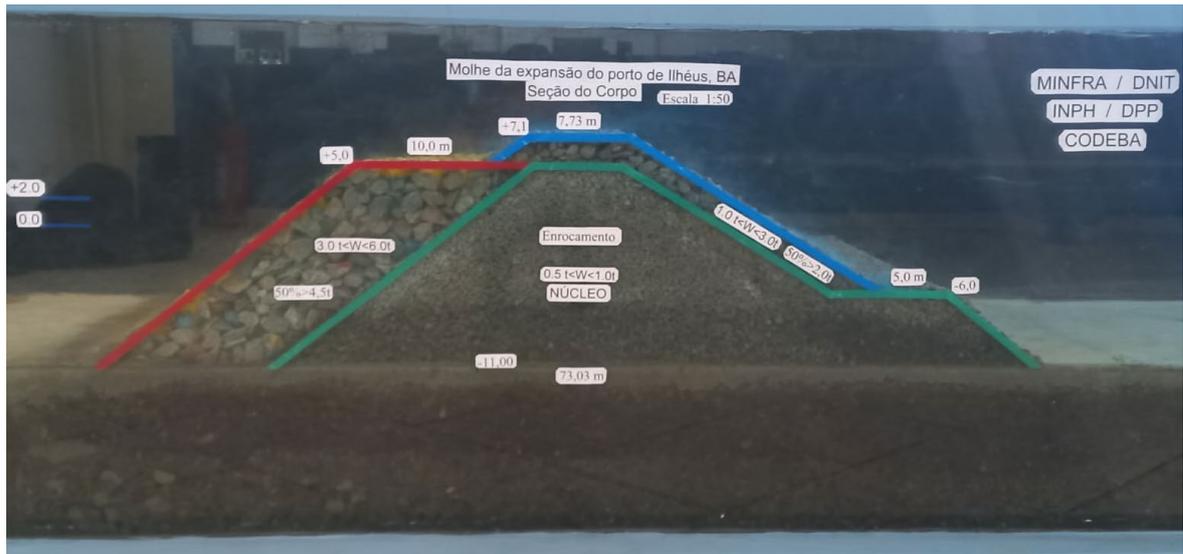
- Núcleo, que corresponde à região demarcada pela linha azul, conforme Figura 11.



Fonte: INPH (2014)

Figura 11 – Núcleo (em azul)

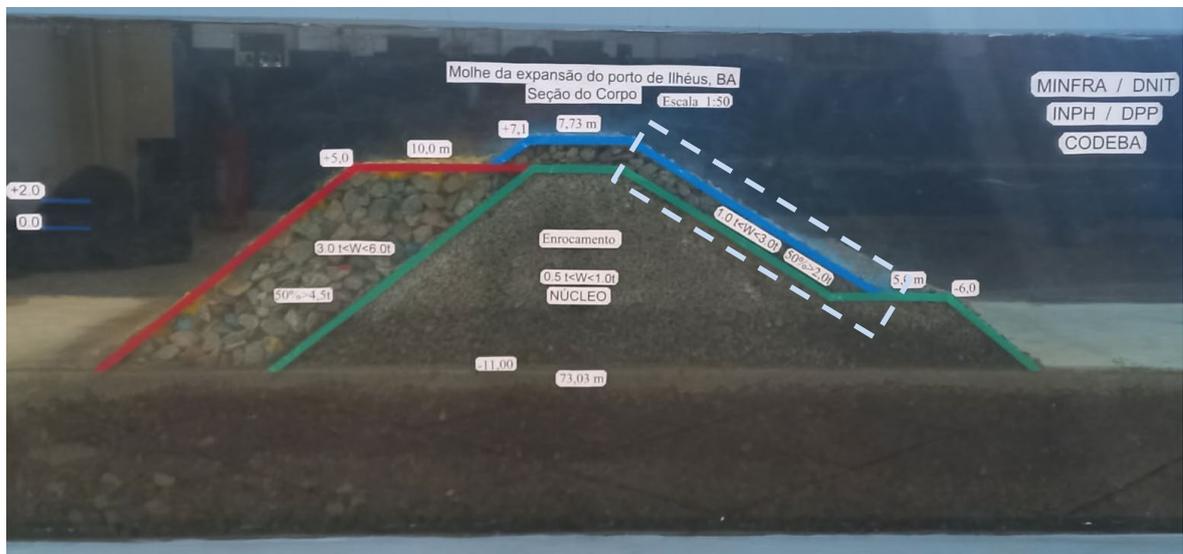
- Berma, que corresponde ao trecho horizontal da região demarcada pela linha verde, conforme Figura 12.



Fonte: INPH

Figura 12 – Berma (trecho horizontal em vermelho)

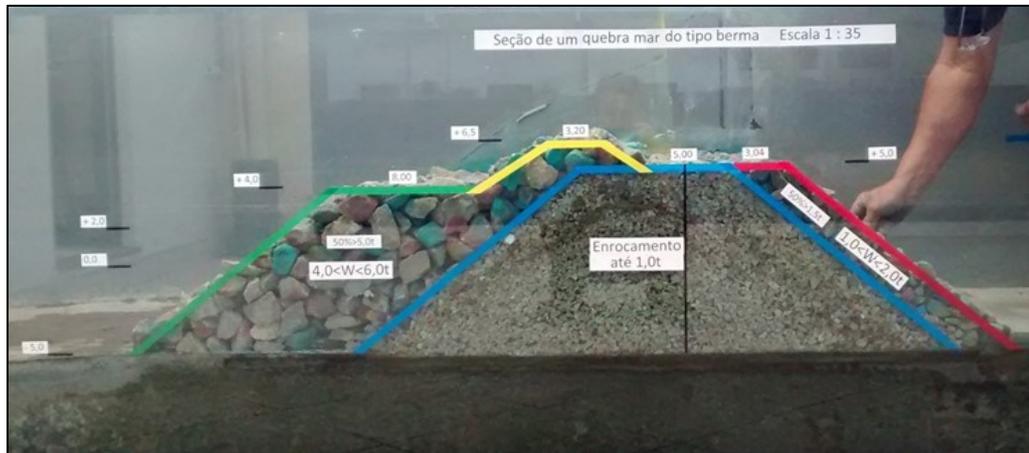
- Carapaça posterior, que corresponde à região demarcada pela linha vermelha, conforme Figura 13.



Fonte: INPH (2014)

Figura 13 – Carapaça posterior (em azul)

- Crista, que corresponde à região demarcada pela linha amarela, conforme Figura 14.



Fonte: INPH (2014)

Figura 14 – Crista (em amarelo)

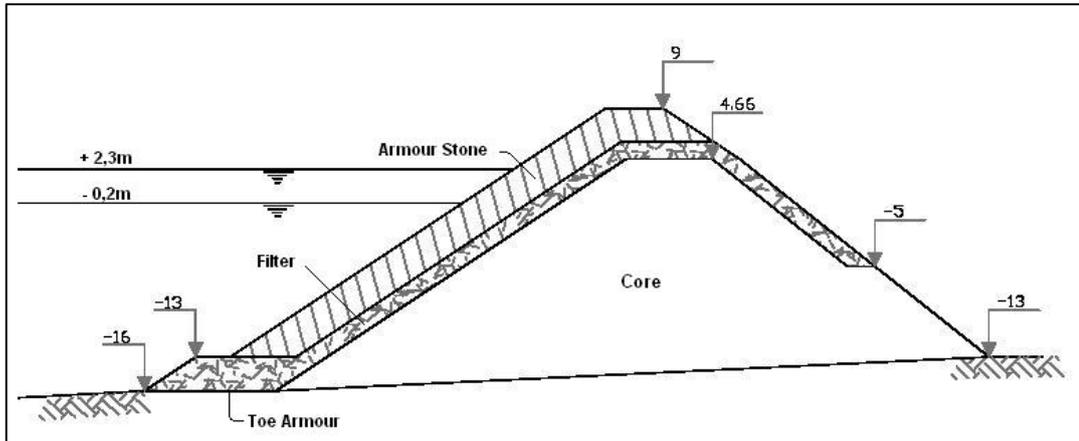
Durante a execução de cada etapa, as pedras são basculadas com o auxílio de baldes.

12.3.2 Quebra-mar do tipo convencional

É uma estrutura composta por:

- Núcleo;
- Sub-carapaça frontal;
- Sub-carapaça posterior (lado abrigado);
- Carapaça frontal;
- Carapaça posterior (lado abrigado);
- Crista.

As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, exemplo de seção transversal de quebra-mar convencional e de um estudado no INPH (no caso, em canal de ondas).



Fonte: INPH (2014)

Figura 15 – Seção do tipo convencional



Fonte: INPH (2014)

Figura 16 – Quebra-mar do tipo convencional montado em canal de ondas do INPH

No modelo, a construção da seção obedece à sequência apresentada acima.

No modelo as pedras do núcleo são basculadas, usando-se, para tanto, recipientes. As pedras das demais componentes da seção são colocadas uma a uma, na

natureza, com equipamento chamado pinça. No modelo também são colocadas uma a uma, manualmente.

Também deve-se observar que, tanto na natureza quanto no modelo, carapaças e sub-carapaças são projetadas em duas camadas.

Tanto na natureza quanto no modelo, as pedras da segunda camada devem ser colocadas apenas após a primeira camada ter sido finalizada. Cada pedra da segunda camada deve ser posicionada de modo a obter o embricamento das pedras.

13 DADOS DE SAÍDA DOS TESTES

13 DADOS DE SAÍDA DOS TESTES

Após o término de cada teste, é gerado um arquivo, na forma da Tabela 8, contendo dados na natureza e os seus equivalentes no modelo. A Tabela 9 apresenta o significado da terminologia utilizada no arquivo.

Cada sonda está posicionada conforme apresentado no Capítulo 7 deste manual.

Tabela 8 – Exemplo de resultados de uma série de ondas do teste de longa duração

MODELO (cm, g e s)		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Canal	Ondas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	H med	Tz	RMS	H(1/3)	T(1/3)	
V	Desc. Real	267	75,16	74,87	74,53	74,06	73,55	72,99	72,43	71,77	71,05	70,32	64,47	60,82	39,4	2,2	13,68	59,77	2,4
W	Referência	278	78,5	78,23	77,89	77,46	76,96	76,39	75,79	75,15	74,47	73,75	68,06	64,78	40,8	2,11	14,32	63	2,27
X	son1 bat	353	5,33	4,67	4,64	4,63	4,61	4,58	4,57	4,55	4,48	4,48	4,26	4	2,36	1,67	0,81	3,75	2,1
Y	son2 aux	318	3,57	3,53	3,51	3,48	3,45	3,43	3,41	3,41	3,36	3,34	3,2	3,1	1,82	1,85	0,63	2,87	1,96
Z	son3obr	321	6,9	6,89	6,82	6,8	6,72	6,69	6,56	6,5	6,48	6,47	5,98	5,61	3,25	1,81	1,09	5,27	2,16
NATUREZA (m, T e s)		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Canal	Ondas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	H med	Tz	RMS	H(1/3)	T(1/3)	
V	Desc. Real	267	37,58	37,44	37,26	37,03	36,77	36,49	36,21	35,89	35,53	35,16	32,23	30,41	19,7	15,57	6,84	29,88	16,94
W	Referência	278	39,25	39,12	38,94	38,73	38,48	38,2	37,9	37,58	37,23	36,88	34,03	32,39	20,4	14,95	7,16	31,5	16,06
X	son1 bat	353	2,66	2,33	2,32	2,32	2,31	2,29	2,29	2,27	2,24	2,24	2,13	2	1,18	11,78	0,41	1,88	14,86
Y	son2 aux	318	1,78	1,76	1,76	1,74	1,72	1,72	1,71	1,71	1,68	1,67	1,6	1,55	0,91	13,06	0,32	1,43	13,88
Z	son3obr	321	3,45	3,44	3,41	3,4	3,36	3,34	3,28	3,25	3,24	3,23	2,99	2,81	1,63	12,77	0,55	2,64	15,24

Tabela 9 – Descrição dos dados da tabela de resultados

Coluna	Descrição
A	Contagem das ondas medidas
B	Primeira maior onda
C	Segunda maior onda
D	Terceira maior onda
E	Quarta maior onda
F	Quinta maior onda
G	Sexta maior onda
H	Sétima maior onda
I	Oitava maior onda
J	Nona maior onda
K	Décima maior onda
L	Vigésima maior onda
M	Trigésima maior onda
N	Altura média de onda

Coluna	Descrição
O	Período médio
P	Onda RMS (valor eficaz de onda)
Q	Onda significativa (H_s)
R	Período de pico (T_p)

A comparação entre os dados da natureza e os gerados pelo modelo permite avaliar se as condições iniciais estabelecidas estão sendo adequadamente reproduzidas. Verifica-se, assim, se processo de reprodução de trem de ondas é consistente.

A validação dos testes é realizada mediante a análise dos valores do número de ondas (coluna A), período médio da onda (T_z ; coluna O), altura da onda significativa (H_s ; coluna Q) e período de pico da onda (T_p ; coluna R) obtidos no modelo. Esses valores deverão estar próximos aos do protótipo, estabelecidos na programação de testes, pois a calibração inicial do modelo é feita sem a obra.

Pequenas alterações desses valores podem decorrer de reflexões de ondas após a implantação da obra.

**14 ACOMPANHAMENTO DO COMPORTAMENTO DA SEÇÃO
 TRANSVERSAL AO LONGO E AO FINAL DOS TESTES**

14 ACOMPANHAMENTO DO COMPORTAMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL AO LONGO E AO FINAL DOS TESTES

14.1 QUEBRA-MAR DE BERMA

Durante os testes, acompanham-se as movimentações das pedras nas diferentes partes da seção, de modo a se conhecer como a estrutura reage às diversas condições de ondas que incidem sobre ela.

Em geral, ao final de cada teste, essas movimentações são quantificadas e esquematicamente identificadas em planta da seção no canal.

Entende-se por dano o percentual de pedras que se deslocam em relação ao número inicial de pedras utilizadas na construção dos trechos da estrutura. Assim, por exemplo, se dez pedras se deslocam num universo de cem pedras, o dano é de 10 %.

Neste contexto, para melhor caracterizar se as eventuais pedras deslocadas representam dano na estrutura, pesa-se cada uma delas, e verifica-se se seu peso está dentro da faixa estabelecida no projeto. Se, de dez pedras deslocadas num universo de 100, cinco tiverem pesos muito fora da faixa adotada no projeto, o dano é de 5 %.

Além dessas observações, realizam-se, periodicamente, levantamentos topográficos da berma, a fim de se acompanhar suas deformações em resposta à ação das ondas.

Normalmente, são realizados três levantamentos da berma, conforme segue:

- O primeiro é feito ao fim de uma sequência inicial dos 10 primeiros testes da programação que antecedem o da onda de projeto. Serve para avaliar a acomodação da estrutura;
- O segundo é feito após onda de projeto;
- O terceiro é feito após o último teste da programação, em que a onda foge ao espectro de projeto, e que reproduz condições de onda muito mais severas que a de projeto, e visa a avaliar a reserva técnica da seção de projeto.

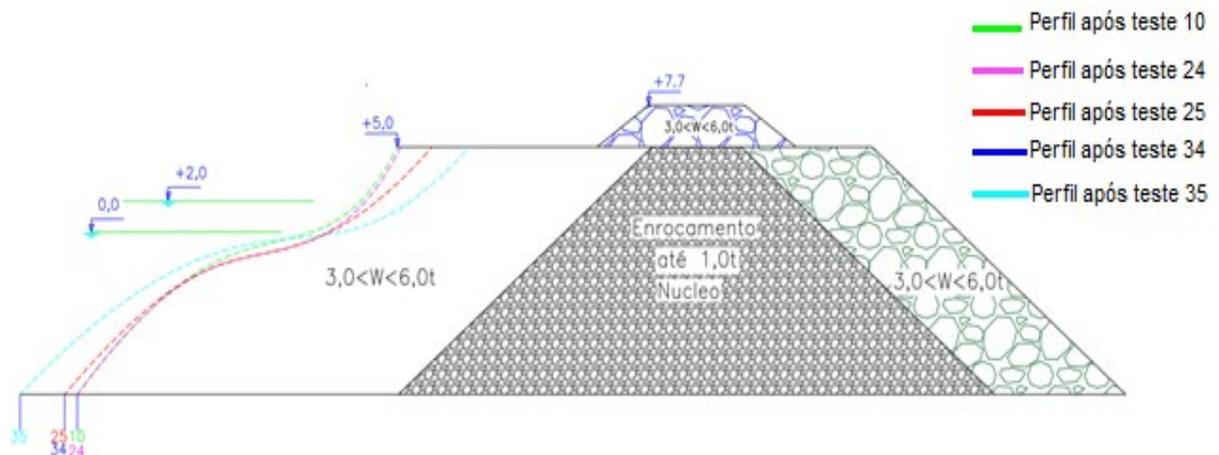
Os dados obtidos nesses levantamentos permitem elaborar os perfis da seção nos diferentes estágios de solicitação da estrutura, conforme apresentado na Figura 17.

No que diz respeito à berma, analisa-se, ao final dos testes, se ela mantém uma largura aceitável para o funcionamento da estrutura e para eventuais reparos/manutenção.

No que diz respeito à crista e à carapaça posterior, verifica-se se os danos ocorridos são aceitáveis face os critérios estabelecidos para o funcionamento adequado da obra.

Em geral, o dano máximo aceitável é de 10 %, sendo que o Cliente pode exigir percentuais menores de danos ou, até mesmo, nenhum dano, considerando-se o tempo de recorrência da obra.

A documentação das diversas etapas dos testes, incluídas as situações previstas no processo ou de natureza excepcional, é feita mediante fotos e vídeos.



Fonte: INPH (2014)

Figura 17 – Perfis da seção transversal de quebra-mar obtidos após três levantamentos da berma

14.2 QUEBRA-MAR CONVENCIONAL

Os danos são computados de modo igual ao descrito no subitem acima, para as partes diferentes da berma, ou seja, crista, carapaças e sub-carapaças.

Avalia-se, então, se os danos ocorridos são aceitáveis em face dos critérios estabelecidos para a realização de reparos e/ ou funcionamento adequado da obra.

A documentação das diversas etapas dos testes, incluídas as situações previstas no processo ou de natureza excepcional, é feita mediante fotos e vídeos.

**15 ESTUDO DO VOLUME DE ULTRAPASSAGEM (VOLUME DE
OVERTOPPING)**

15 ESTUDO DO VOLUME DE ULTRAPASSAGEM (VOLUME DE OVERTOPPING)

Esse fenômeno configura a ultrapassagem das ondas sobre a crista da estrutura.

A ultrapassagem pode causar:

- danos na crista e na carapaça posterior (lado abrigado);
- paralisações na operação portuária no lado abrigado, caso haja alguma estrutura de acostagem;
- prejuízos em estruturas que não podem ser submetidas ao impacto da água, como píeres de contêineres, de minérios, etc.;

Cabe ressaltar que nem sempre a ultrapassagem causa problemas no lado abrigado - por exemplo, quando se tem uma obra de fixação da barra de um rio.

A medição do volume de ultrapassagem, quando necessária, deve ser feita na parte abrigada do enrocamento.

A medição só deve ser realizada se, após o final de ensaios:

- a estrutura se mantém estável e com reserva de berma adequada, no caso de quebra-mar de berma;
- os danos ocorridos se situam dentro dos limites aceitáveis, no caso de quebra-mar convencional.

Caso isso não ocorra, deverão ser realizadas as correções dos pesos das pedras no projeto. Com a estrutura recomposta, em consonância com os novos pesos recomendados, deverão ser realizados novos testes, até se alcançar a estabilidade desejada da estrutura.

15.1 METODOLOGIA DE COLETA DE VOLUME DE ULTRAPASSAGEM

Inicialmente, instala-se uma bandeja coletora no abrigado do quebra-mar. O comprimento na bandeja deve ser o maior possível, excluindo-se pequenos trechos próximos às paredes, evitando-se, assim, a captação de água das paredes (figuras 18 e 19).



FONTE: INPH

Figura 18 – Posicionamento da bandeja em relação à obra. Observar que a bandeja está localizada no lado abrigado



FONTE: INPH

Figura 19 – Detalhe da bandeja. Observar que a bandeja não encosta nas paredes, evitando o “efeito parede”

A medição do volume de água que ultrapassa a crista é feita mediante a coleta do líquido acumulado durante o período de ensaios, em que ocorrem ultrapassagens. Ao final desse período, a água coletada é recolhida numa proveta, fornecendo, o volume d’água em litros.

O comprimento da bandeja, o tempo de coleta e o volume d’água coletado são transformados para os respectivos valores da natureza, em metros, segundos e litros.

Dividindo-se o volume d’água, em l, pelo tempo de medição (s), obtém-se a vazão (Q).

Dividindo-se a vazão (Q) pela dimensão linear do trecho em que foi feita a medição de volume de ultrapassagem, determina-se $Q = l/s/m$ de obra.

15.2 CÁLCULO DO VOLUME DE ULTRAPASSAGEM

Para o cálculo da vazão de ultrapassagem devem ser considerados o comprimento da bandeja, a escala do modelo e a duração do ensaio. Para efeito de cálculo, a unidade de medida relativa à ultrapassagem é l/s/m, sendo o fator de escala o cubo da escala definida (λ^3).

$$O = \frac{V * \lambda^3}{L_n * T_s} \quad (11)$$

Onde:

O é a vazão de ultrapassagem, expressa em litros por segundo por metro (l/s/m);

V é o volume de água na bandeja coletora, expresso em litros (l);

λ é a escala, adimensional;

L_n é o comprimento da bandeja na natureza, expressa em metros (m);

T_s é o tempo de ensaio, expresso em segundos (s).

15.3 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE VOLUME DE ULTRAPASSAGEM:

Considerando-se o cálculo de vazão de ultrapassagem d'água (l/s/m), apresentado acima, pode-se classificar o dano decorrente. Para tanto, utilizam-se as Figuras 20, 21 e 22 e Tabela 10 apresentadas a seguir.

Inseguro para qualquer velocidade	Perigoso	Dano estrutural	Dano mesmo se totalmente protegida	Dano mesmo pavimentado
				Dano se não pavimentado
			Dano se carapaça Posterior desprotegida	Sem dano
			Dano se Crista Desprotegida	
		Sem dano		
Inseguro para altas velocidades	Desconfortável sem perigo	Danos menores		
Seguro em todas as velocidades	Molhado sem desconforto	Sem dano		
veículos	Pedestres	Construções	Paredes Aterradas	Paredes Revestidas

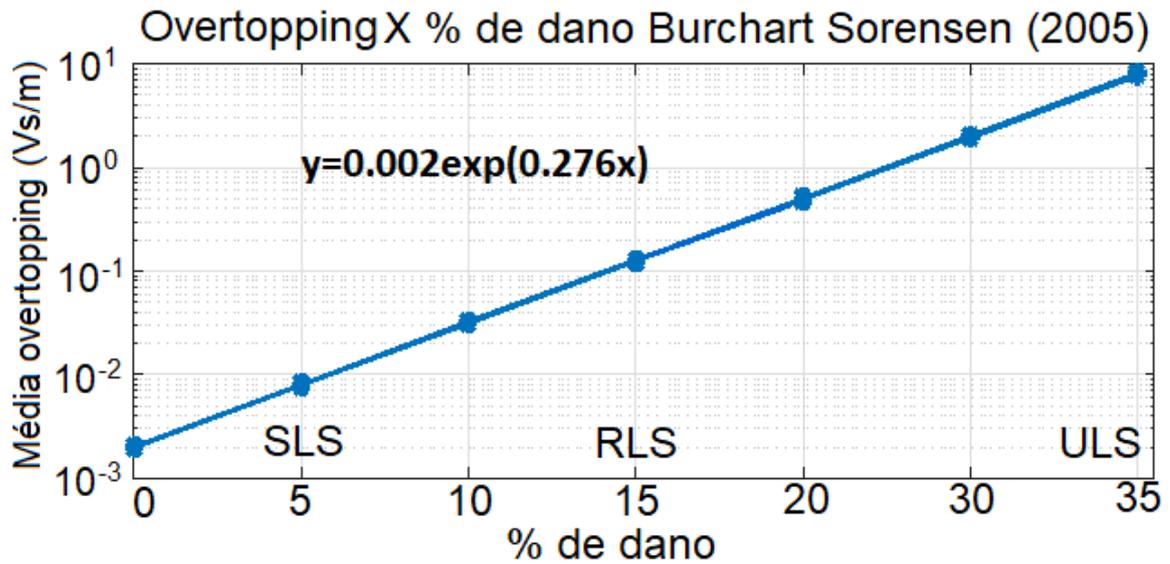
Adaptado de: *The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering* (2007)

Figura 20 – Volume de ultrapassagem e danos decorrentes

	q (descarga média de overtopping)(m ³ /s/m de comprimento)	V _{max} (pico de volume de overtopping)(m ³ /m de comprimento)
Pedestres		
inseguro para pedestres desatentos, sem visão clara do mar, passagem relativamente fácil, perturbada ou assustada na proximidade da borda	$q > 3 \cdot 10^5$	$V_{max} > 2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$
Inseguro para pedestres atentos, visão clara do mar, não facilmente perturbado ou assustado, capaz de tolerar a passagem molhada e mais larga	$q > 1 \cdot 10^4$	$V_{max} > 0.02 - 0.05$
inseguro para o pessoal treinado, bem calçado e protegido, esperado para ficar molhado, cobrindo fluxos apenas em níveis mais baixos, sem jato caindo, baixo risco de cair da passarela	$q > 1 \cdot 10^3 - 0.01$	$V_{max} > 0.5$
veículos		
inseguro para dirigir em velocidade moderada ou alta, queda impulsivo overtopping caindo ou jatos de alta velocidade.	$q > 1,10^5 - 5,10^5$	$V_{max} > 5 \cdot 10^3$
inseguro para condução em baixa velocidade, overtopping por fluxos pulsantes apenas em níveis baixos, sem queda de jatos	$q > 0.01 - 0.05$	$V_{max} > 0.1$
marinas		
afundamento de pequenas embarcações a 5-10 m da parede, danos a iates maiores	$q > 0.01$	$V_{max} > 1 - 10$
dano significativo ou afundamento de iates maiores	$q > 0.05$	$V_{max} > 5 - 50$
Construções		
Sem danos	$q < 1 \cdot 10^6$	
Danos menores a anexos, toldos, etc.	$1 \cdot 10^6 < q < 3 \cdot 10^5$	
Danos estruturais	$q > 3 \cdot 10^5$	
Paredões de aterros		
Sem danos	$q < 2 \cdot 10^3$	
Danos se a crista estiver desprotegida	$2 \cdot 10^3 < q < 0.02$	
Danos se a carapaça posterior estiver desprotegida	$0.02 < q < 0.05$	
Danos mesmo se estiver totalmente protegida	$q > 0.05$	
Paredões revestidos		
Sem danos	$q < 0.05$	
Danos se não estiver pavimentado	$0.05 < q < 0.2$	
Danos mesmo se estiver pavimentado	$q > 0.2$	

Adaptado de: The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2007)

Figura 21 – Volume de ultrapassagem e danos decorrentes



Fonte: Burchart Sorensen (2005)

Figura 22 – Overtopping x % de dano

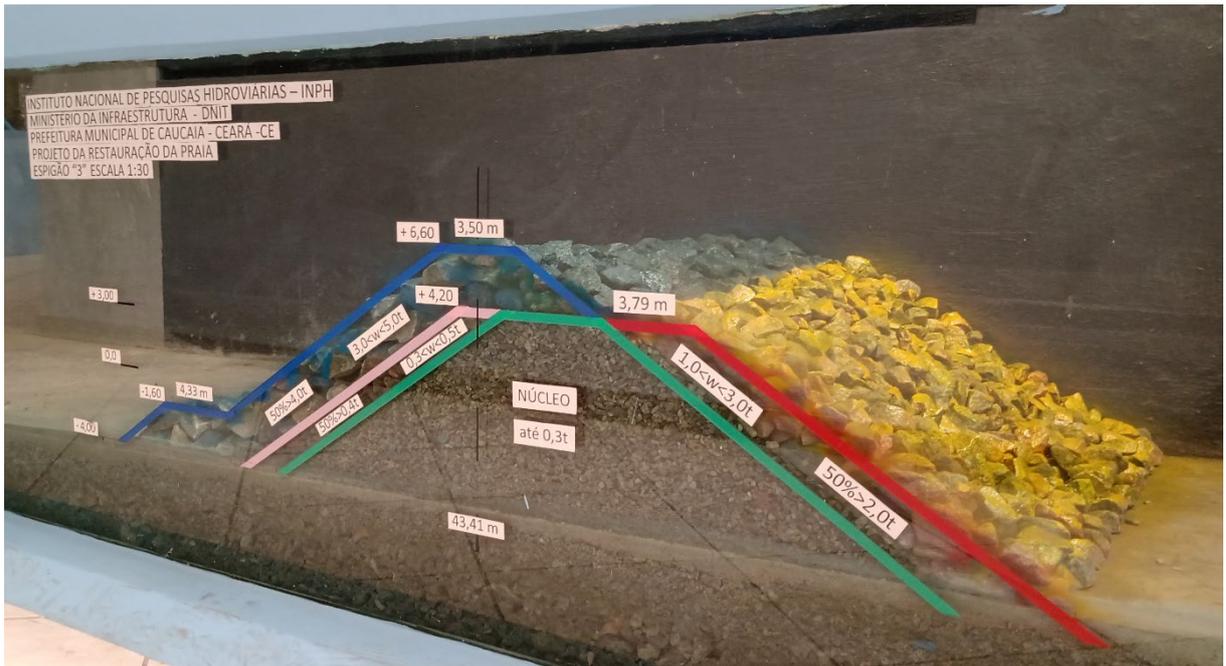
Tabela 10 – Taxa admissível de volume de ultrapassagem

Situação	Observação	Taxa admissível de overtopping q(l/s/m)
Classe IV SLS*	Nível durante operação	0,0010
Classe IV RLS*	Nível de manutenção	0,15
Classe IV ULS*	Nível de rutura	10
Construções sem dano	Área do pateo	0,001
Construções danos menores	Valor limite	< 0,03
Construções danos estruturais	Valor limite	> 0,03

* SLS=Limite de estado de trabalhabilidade; RLS=Limite de estado de reparabilidade; ULS=Limite Final.

Adaptado de: *The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering* (2007)

ANEXOS



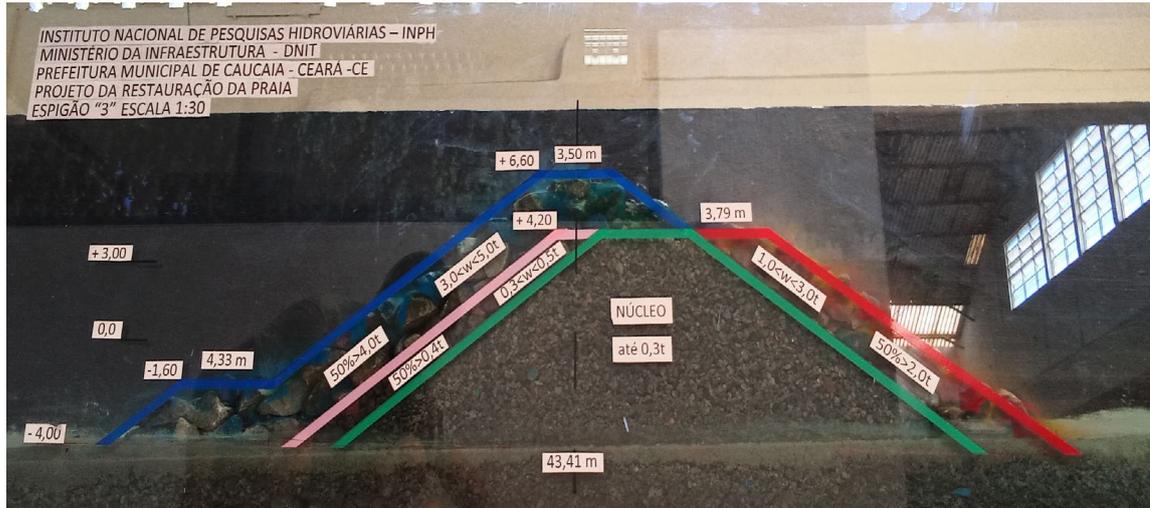
FONTE: INPH

Figura A3 – Seção transversal do tipo convencional construída com blocos de rocha



FONTE: INPH

Figura A4 – Detalhe da carapaça do talude frontal



FONTE: INPH

Figura A5 – Seção transversal do tipo convencional construída com blocos artificiais (tetrápodes)



FONTE: INPH

Figura A6 – Detalhe da carapaça do talude frontal

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. CIRIA; CUR; CETMEF. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. 2ª Edição. C683, CIRIA, Londres, 2007. Disponível em: <https://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/introduction.pdf> (Acessado em 02 de maio de 2019).
- II. HUSAIN, M. K. A.; NOOR, I. M. Z.; NAJAFIAN, G. Prediction of Extreme Offshore Structural Response: An Efficient Time Simulation Approach. LAMBERT Academic Publishing, 2013.
- III. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS. INPH 021/2000. Estudo de estabilidade em bacia de ondas tridimensional do quebra-mar de pecem quarta nota técnica.
- IV. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS. INPH 020/2008. Estudo de estabilidade tridimensional das novas seções transversais tipo do porto da barra do aço.
- V. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS. INPH 008/2021. Manual de estudos de estabilidade bidimensional em canal de ondas irregulares.