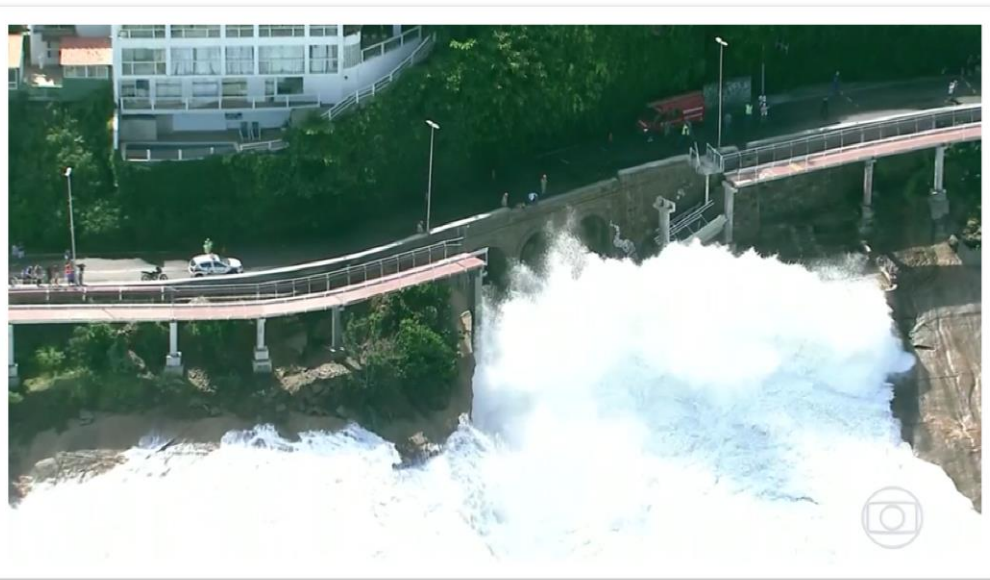


Aspectos Meteorológicos e Oceanográficos Relativos ao Acidente da Ciclovía em 21/04/2016

Tópicos:

- 1. Contextualização – Estudo feito pela Coppe em 2016.**
- 2. Condições meteorológicas – ventos.**
- 3. Condições oceanográficas – ondas e nível do mar (marés).**
 - ❖ **Clima de ondas ao largo (águas profundas).**
 - ❖ **Clima de ondas no costão da Gruta da Imprensa.**
 - ❖ **Altura da subida de onda no costão.**

Contextualização: Avaliação feita por equipe da COPPE/UFRJ



(Imagem <https://globoplay.globo.com/v/5038900/>)

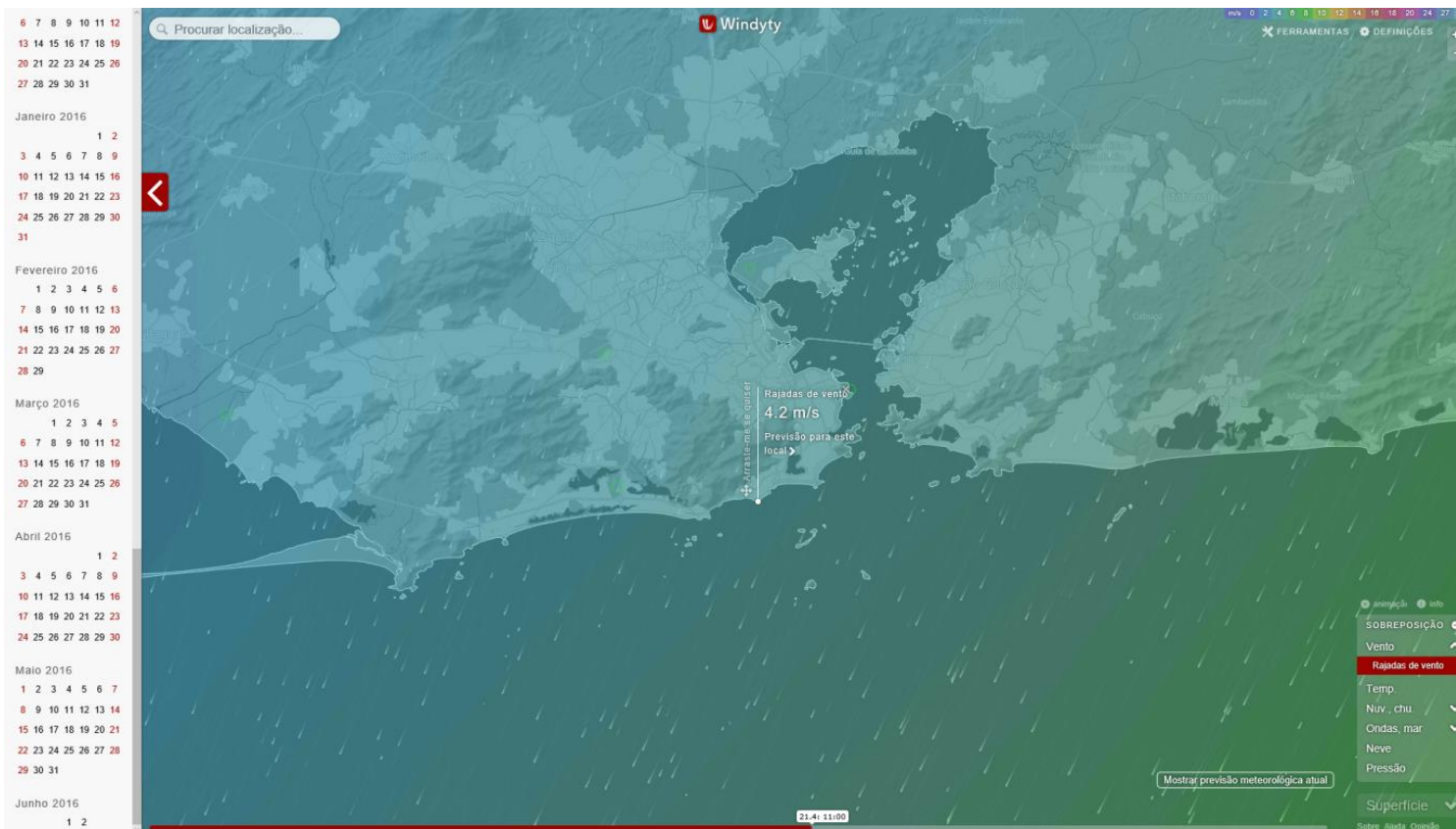
Projeto COPPETEC:	COPPE-20.006A
Título:	ESTRUTURA COSTEIRA DA CICLOVIA DA AV. NIEMEYER – RIO DE JANEIRO INVESTIGAÇÃO DOS MECANISMOS DE COLAPSO DA ESTRUTURA NO TRECHO DA GRUTA DA IMPRENSA E PROJETO CONCEITUAL PARA RECONSTRUÇÃO
Interessado:	SECRETARIA DE DEFESA CIVIL – PREFEITURA MUNICIPAL DO RJ Rua Afonso Cavalcanti, 455 – Cidade Nova Rio de Janeiro, RJ, CEP: 20211.110
Programa COPPE:	Engenharia Civil e Engenharia Oceânica
Data:	09 de Junho de 2016



Equipe Técnica

Alexandre Landesmann Eng. Civil, D.Sc (2003), Prof. Associado
Claudio Freitas Neves Eng. Civil, PhD (1986), Prof. Associado
Gilberto Bruno Ellwanger Eng. Civil, D.Sc (1988), Prof. Titular
Paulo Cesar Colonna Rosman Eng. Civil, PhD (1987), Prof. Titular
Romildo Dias Toledo Filho Eng. Civil, D.Sc (1997), Prof. Titular (coordenador)
Ronaldo Carvalho Battista Eng. Civil, PhD (1979), Prof. Titular

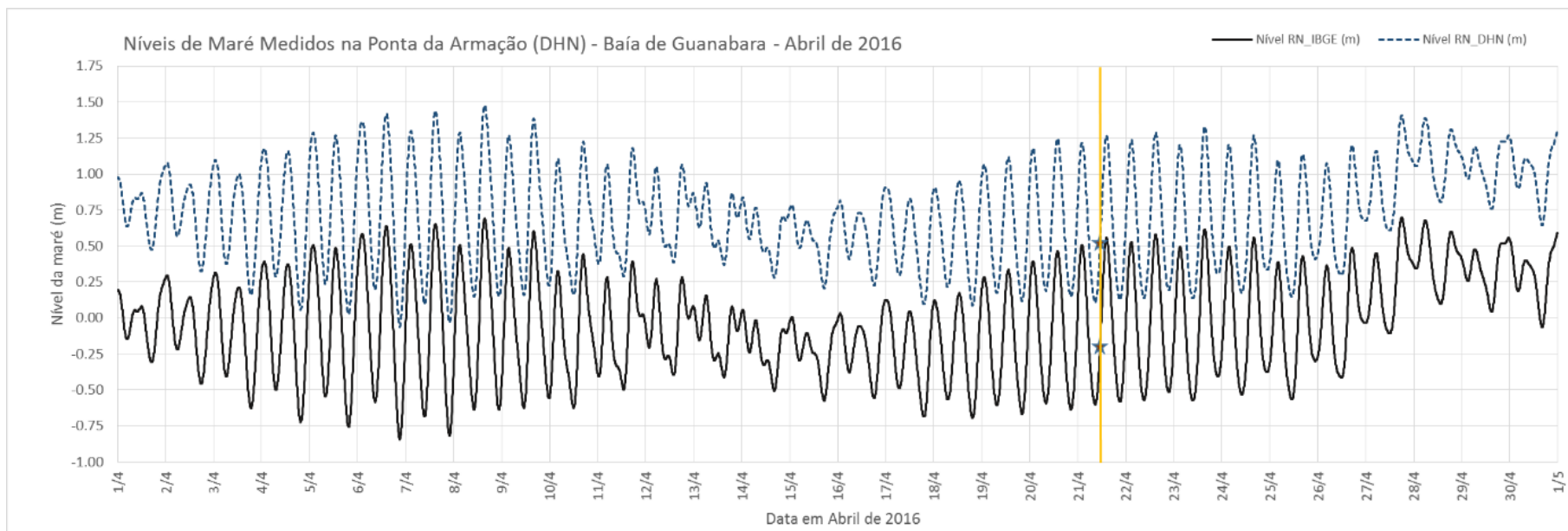
Condições meteorológicas: dia de sol com ventos fracos.



Isolinhas de rajadas de vento no município do Rio de Janeiro dia 21/04/2016 11:00 h. Verifica-se que nas cercanias do local do acidente, as rajadas de vento chegavam a apenas 4.2 m/s soprando de NE→SW, o que é característico de ventos fracos.

Imagem de www.windy.com obtida em maio de 2016.

Condições oceanográficas: níveis de água.



Níveis de maré no período de 01 a 30 de abril de 2016, com indicação do momento do colapso da ciclovia. No dia 21/04, os níveis de maré medidos e previstos eram praticamente os mesmos, indicando que não havia maré meteorológica relevante. Dados medidos pela DHN – Marinha do Brasil.

Condições oceanográficas: Clima de ondas ao largo do litoral da cidade do Rio de Janeiro, entre os dias 17 e 22 de abril de 2016.

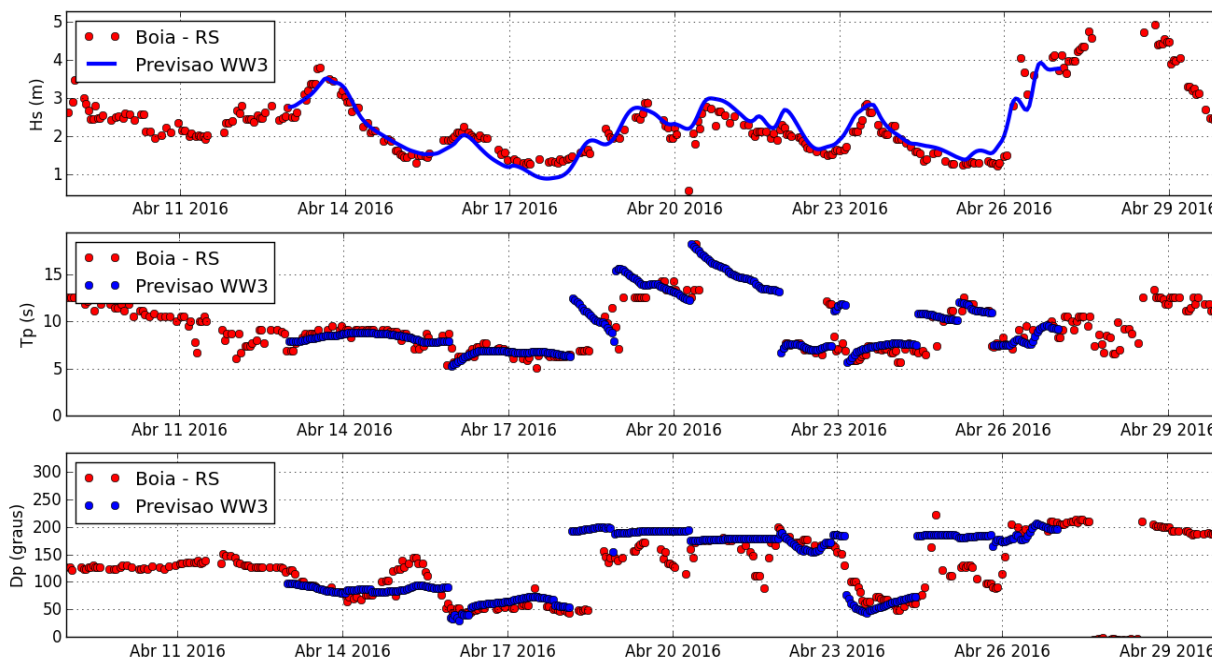
Clima de ondas reconstituído com modelo WW3 (WAVEWATCH III). O WW3 foi desenvolvido pela agência americana NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*). É o principal modelo utilizado pelos centros operacionais de previsão de ondas no mundo. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>.

Modelagem desenvolvida pela oceanógrafa Izabel Nogueira, M.Sc., sob coordenação do Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc., no Laboratório de Instrumentação Oceanográfica da AECO-PENO-COPPE/UFRJ

Configurações das grades computacionais para o modelo de ondas WW3.

Grade	Resolução	Latitudes	Longitudes
Global	1°	82S – 82N	180W – 180E
Atlântico Sul	0,25°	80S – 5S	65W – 10E
Sudeste	0,05°	22S – 28S	42,5W – 37W

Condições oceanográficas: Validação do clima de ondas reconstituído.



Comparação entre as séries de altura significativa (Hs), período de pico (Tp) e direção de pico (Dp) medidas pela bóia de Rio Grande (Bóia – RS) e modeladas pelo WW3 (Previsão WW3) para o período entre 13 e 27 de abril de 2016.

Condições oceanográficas: Ondas ao largo do Rio de Janeiro de 17 a 22/04/2016.

H_s ou $H_{1/3}$ é a altura significativa de ondas, que corresponde à altura média do terço de ondas com maiores alturas em uma dada série de ondas. Alturas equivalentes:

$$H_{rms} = 0.71 H_s \quad ; \quad H_{10\%} = 1.27 H_s \quad ; \quad H_{1\%} = 1.67 H_s \quad ; \quad H_{max} = 1.86 H_s$$

H_{rms} é a altura média quadrática das ondas, $H_{10\%}$ e $H_{1\%}$ são respectivamente as alturas que seriam excedidas por 10% e por 1% das ondas, e H_{max} seria a máxima altura esperada em uma série de até mil ondas.

Condições oceanográficas: Ondas ao largo do Rio de Janeiro de 17 a 22/04/2016.

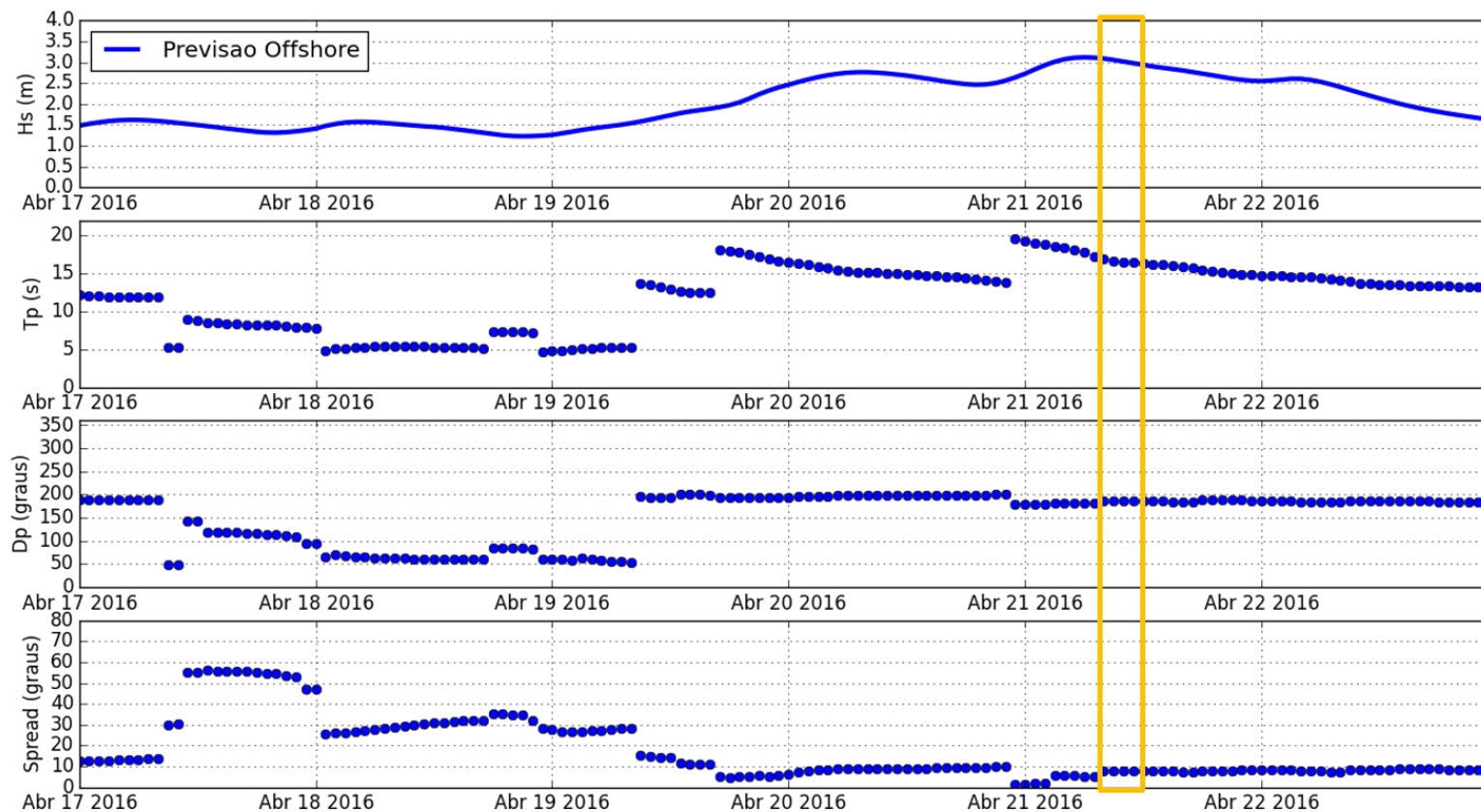


Figura 8 - Condições de ondas para o ponto $24,074^{\circ}$ S e $42,18^{\circ}$ W em termos de altura significativa (Hs), período de pico (Tp), direção de pico (Dp) e espalhamento direcional do pico (spread) entre os dias 17 e 22 de abril de 2016. O retângulo laranja destaca o período do acidente.

Condições oceanográficas: Onda 22/04

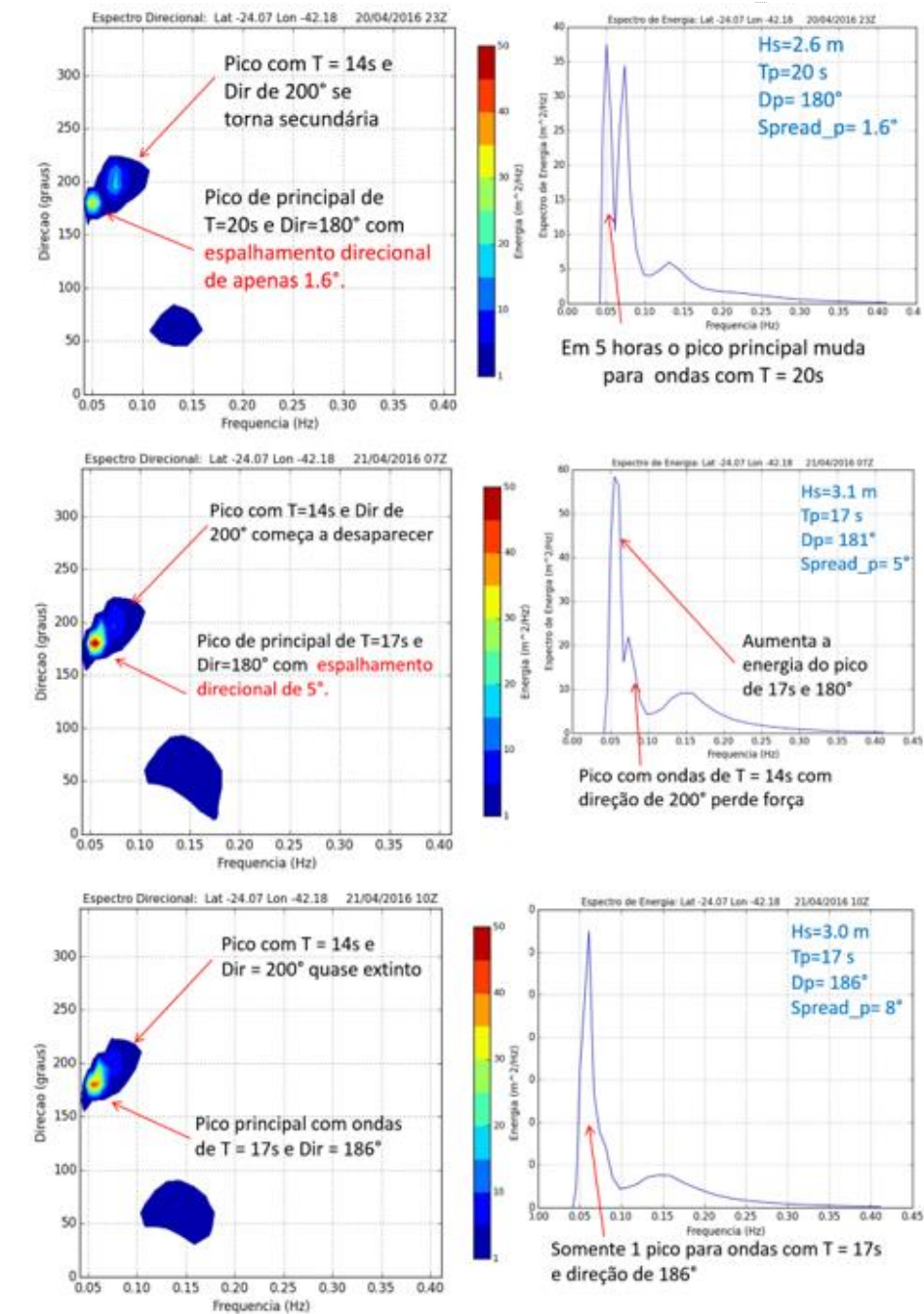
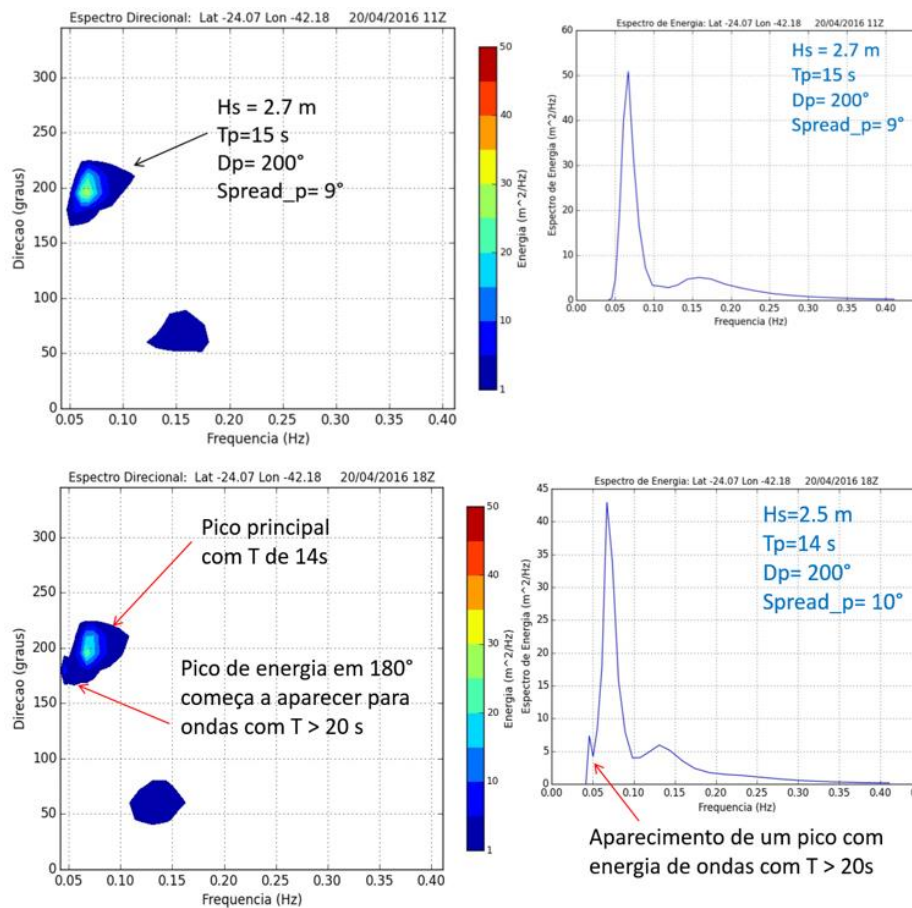


Figura 10. Evolução de espectros direcionais e de energia de ondas em 21/04/2016. Note que o gráfico acima refere-se às horas 23Z de 20/04 que equivale às 02h locais em 21/04. As horas zulu 07Z e 10Z correspondem, respectivamente, às horas locais 10h e 13h no Rio de Janeiro.

Figura 9. Evolução de espectros direcionais e de energia de ondas em 20/04/2016. As horas zulu 11Z e 18Z correspondem, respectivamente, às horas locais 14h e 21h no Rio de Janeiro.

Condições oceanográficas: Ondas ao largo do Rio de Janeiro - Estatística.

Tabela 3. Estatística de alturas e períodos de onda na zona costeira defronte à Av. Niemeyer, em local com coordenadas [23.0049 S; 43.2482 W], com dados de reanálise entre 1948 e 2008. Ref. SMC Brasil: <http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/smc-brasil>²

Direções	Frequência por Direção	Hs 50% (m)	Hs 90% (m)	Hs 99% (m)	Hs 12h (m)	Direções	Frequência por Direção	Tp 50% (seg.)	Tp 90% (seg.)	Tp 99% (seg.)	Tp 12h (seg.)
ESE	0.1%	1.06	1.33	1.52	1.56	ESE	0.1%	6.9	9.1	10.4	10.5
SE	24.9%	1.30	1.78	2.27	2.65	SE	24.9%	7.3	9.5	11.4	12.6
SSE	53.3%	1.48	2.14	2.73	3.32	SSE	53.3%	9.0	11.6	13.8	15.1
S	22.2%	1.88	2.72	3.58	4.23	S	22.2%	11.2	13.3	15.3	16.6
SSW	0.5%	1.22	2.03	3.42	3.72	SSW	0.5%	9.3	11.6	13.4	14.4
SW	0.0%	0.74	1.09	1.19	1.19	SW	0.0%	9.1	10.0	11.3	11.3

² Tabela produzida pela Oceanógrafa Julia de Lima Soares, na época mestranda na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do PENO – COPPE/UFRJ

Condições oceanográficas: Ondas no costão da Av. Niemeyer.

Procedimentos para definir as características das ondas no costão da Av. Niemeyer a partir de dados de onda ao largo:

- ❖ Modelagem de propagação de ondas do largo para a costa incluindo efeitos de refração, difração, arrebentação e dissipação.
- ❖ Metodologia usual de projeto considera:
 - Gradação de 1 a 2 segundos no período das ondas entre 8 e 16 seg.
 - Gradação de 11.25° ou 22.5° nas direções incidentes com azimutes entre ESE (112.5°) e SSW (202.5°). **Em análise pós fato, isso seria insuficiente para o caso.**
 - Para avaliar altura de subida no costão, é preciso determinar a onda impulsiva, i.e., a que estaria em vias de arrebentar ao pé do costão.
 - A relação entre a altura da onda e a profundidade de arrebentação depende da Esbeltez da Onda (H/L) e da declividade do fundo.

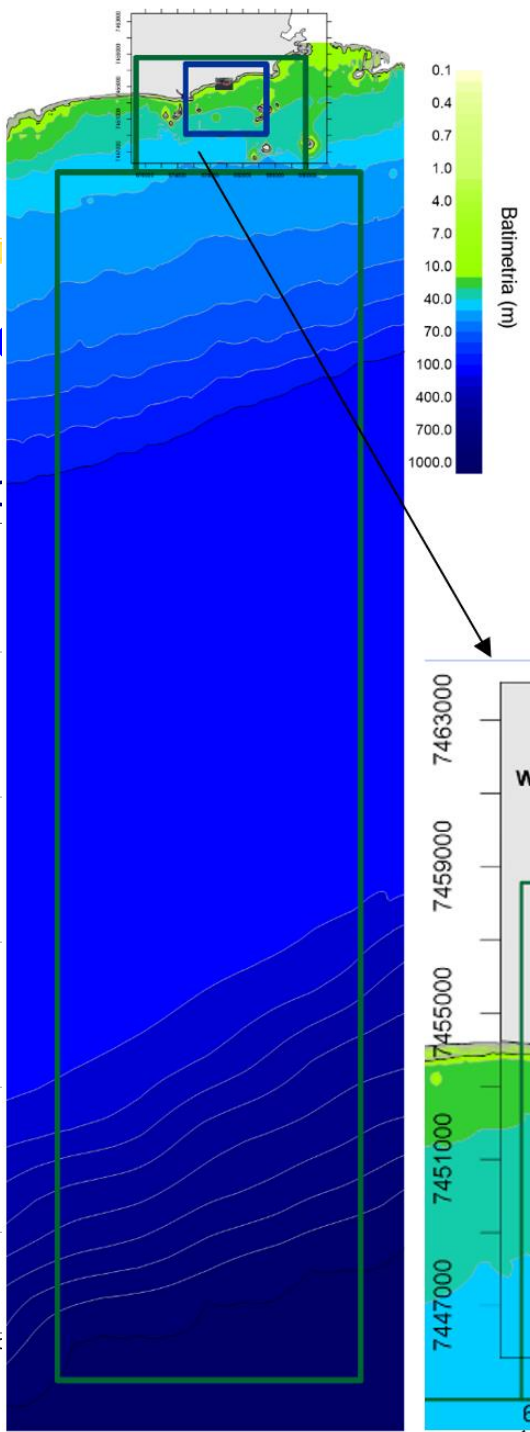
Condições oceanográficas: Onda Impulsiva no costão da Av. Niemeyer.

- ❖ Considerando o estado de mar ao largo às 11 h de 21/04/2016: $H_s \approx 3 \text{ m}$ e $T_p = 17 \text{ s}$
→ $H_{10\%} = 1.27H_s \approx 3.8 \text{ m}$; $H_{1\%} = 1.67H_s \approx 5.0 \text{ m}$; $H_{m\acute{a}x} = 1.86H_s \approx 5.6 \text{ m}$
- ❖ Pela declividade do fundo defronte à gruta da Imprensa (~1V:40H), a máxima altura que uma onda poderia ter em vias de arrebentar seria $0.8 \times h$.
- ❖ A profundidade h do local é incerta, pois há carência de detalhamento batimétrico, porém pelos dados disponíveis e levando em conta o nível de maré na hora do acidente, pode-se estimar uma profundidade no mar em frente da Gruta da Imprensa de $h \approx 5 \text{ m}$.
- ❖ **Tudo considerado, é muito provável que a máxima altura de onda impulsiva que atingiu o local fosse limitada pela profundidade local, assim $H_{m\acute{a}x} \approx 4 \text{ m} = 0.8 \times 5 \text{ m}$**

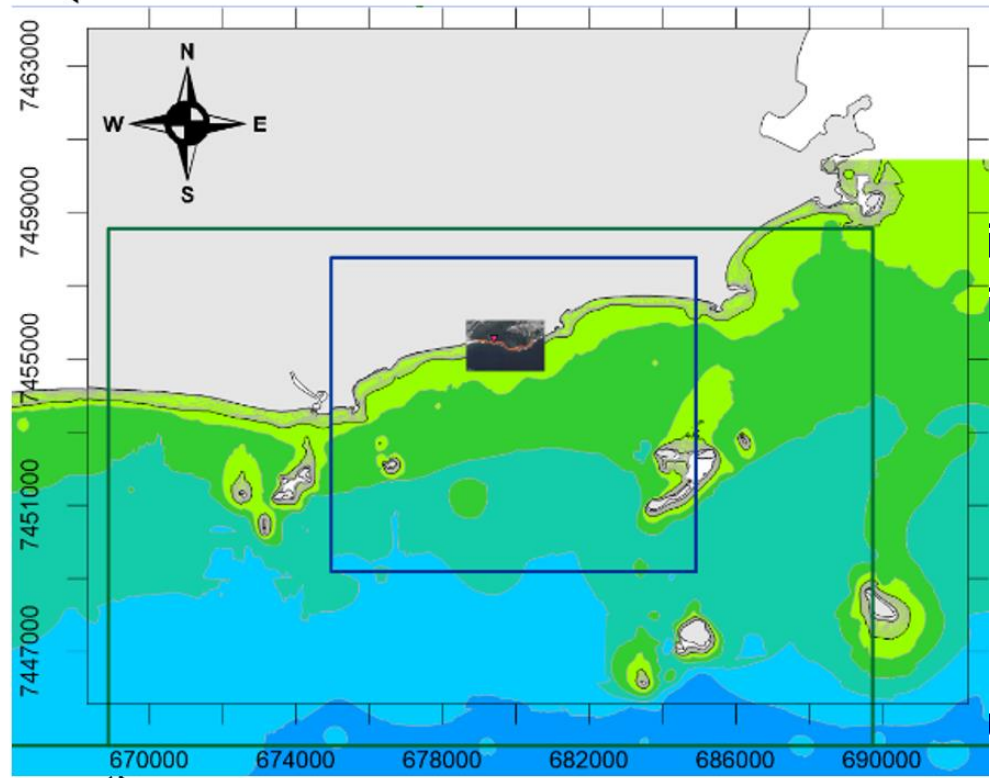
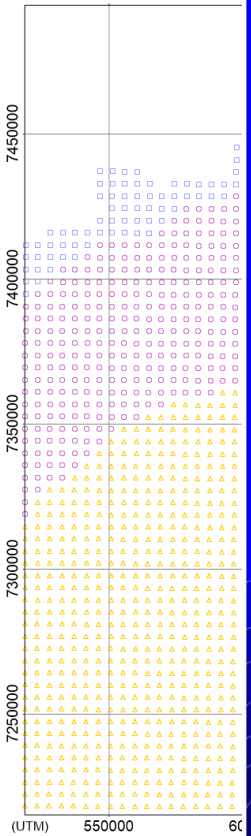
Em análises pós fato, o procedimento usual foi descartado e para determinação de onda no local adotou-se análise refinada com:

- Gradação de 1 segundo no período de ondas entre 15 e 20 seg.
- Gradação de 2.5° em leque de direções incidentes entre 175° e 192.5° .
- Para avaliar altura de subida no costão, é preciso determinar a onda impulsiva, i.e., a que estaria em vias de arrebentar ao pé do costão.

Condi
 Modela
 refração



Modelagem digital do terreno mostrando mapa de batimetria das grades de propagação de ondas externa e interna, com zoom na zona de interesse, utilizadas pelo SisBaHiA® (www.sisbahia.coppe.ufrj.br)



ia
 ital do

*Trabalho feito com

enharía Costeira e

Condições oceanográficas: Ondas no costão da Av. Niemeyer.

Modelagem de propagação de ondas do largo para a costa incluindo efeitos de refração, difração, arrebentação e dissipação*.

A seguir mostra-se resultados de modelagem computacional com o SisBaHiA, através de mapas isolinhas de Fator de Amplificação de Altura de Onda = H/H_0

H = altura da onda em um dado local

H_0 = altura da onda ao largo

Exemplo: considerando que a onda impulsiva ao pé do costão da Niemeyer teria $H = 4.0$ m, seria necessário:

$$H/H_0 = 1.33 \text{ para } H_0 = 3.0 \text{ m}$$

$$H/H_0 = 2.0 \text{ para } H_0 = 2.0 \text{ m}$$

Cota de subida de onda no costão ($Runup \rightarrow R_{u2\%}/H_s$):

→ Parâmetro de similaridade de arrebatção: $\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi H_s / g T_p^2}}$

Fonte: US Army Coastal Engineering Manual <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>.

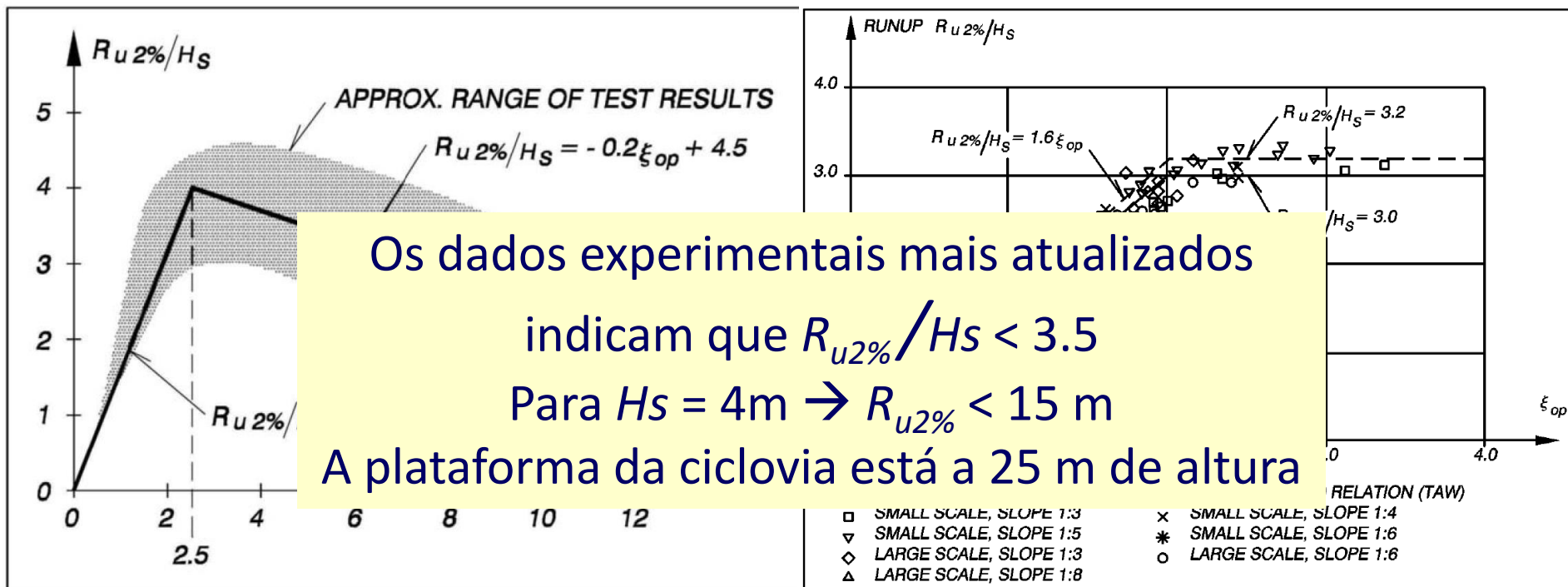
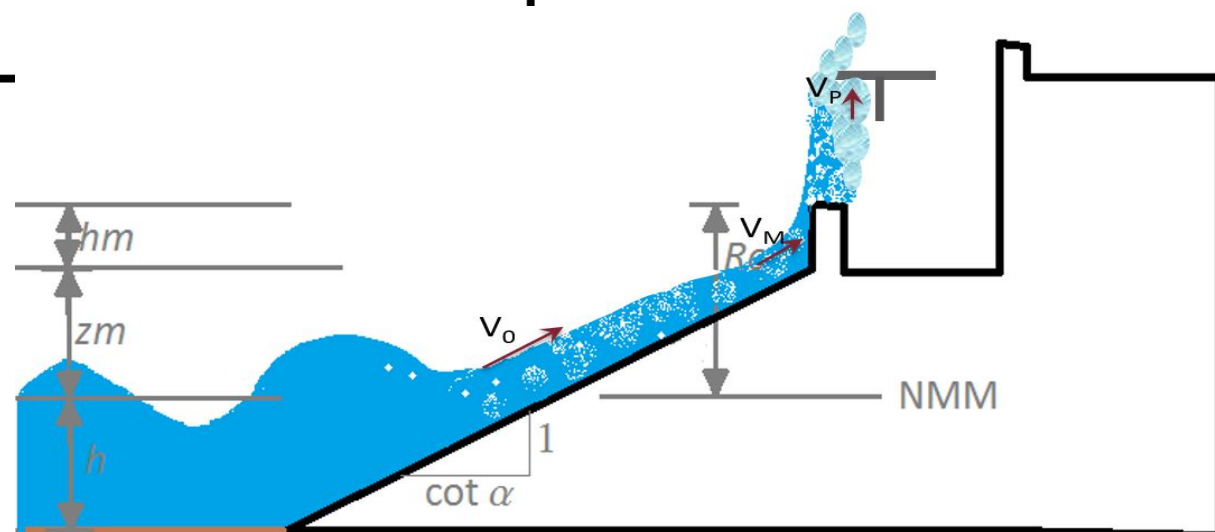
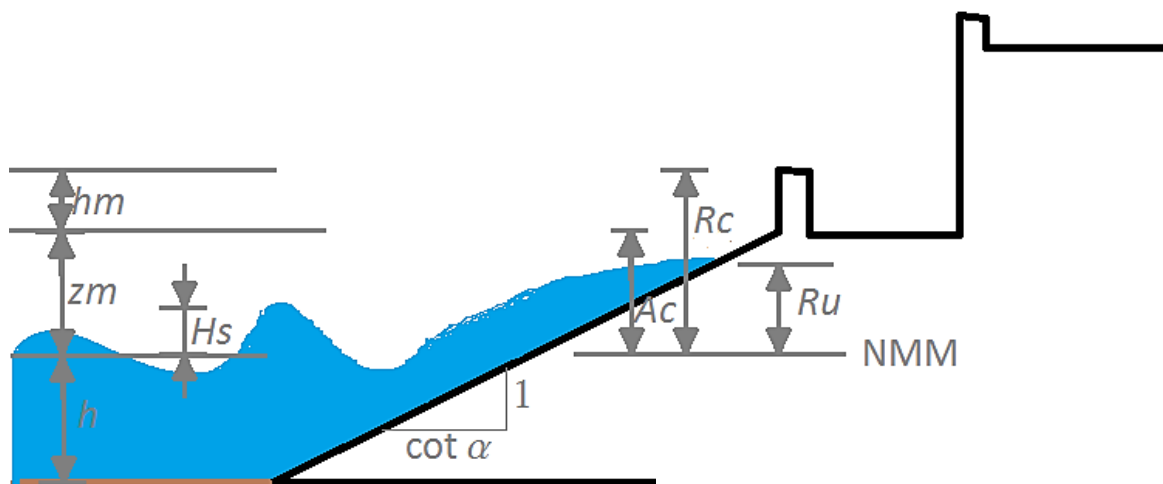


Figure VI-5-3. $R_{u2\%}$ for head-on waves on smooth slopes. Data by Ahrens (1981a) and Van Oorschot and d'Angremont (1968)

Figure VI-5-5. $R_{u2\%}$ for long-crested head-on waves on smooth slopes. From de Waal and van der Meer (1992)

Cota de subida de onda no costão ($Runup \rightarrow R_{u2\%} / H_s$): o paramento vertical da plataforma da Gruta da Imprensa.



Cota de subida de onda no costão ($Runup \rightarrow R_{u2\%}/H_s$): o paramento vertical da plataforma da Gruta da Imprensa.



Figura 25. Imagens de vídeo exibido no RJ-TV 2ª Edição, <https://globoplay.globo.com/v/5038900/20/5/2016>, com de diferença de dois segundos entre os quadros. Na imagem da esquerda vê-se ampla onda subindo o costão, nota-se que o espriamento da onda ainda não atingiu os muros verticais. Na imagem da direita, dois segundos após, fica evidente que a deflexão da onda causada pelos muros verticais produz jatos ascendentes que atingem a altura da ciclovía. Note que no mesmo instante, à esquerda dos muros a subida das ondas atinge alturas bem abaixo.

Cota de subida de onda no costão ($Runup \rightarrow R_{u2\%}/H_s$): o paramento vertical da plataforma da Gruta da Imprensa.



Figura 26. Formação de jato em feições naturais (esquerda) ou em obras de engenharia (direita). Ref. <https://www.youtube.com/watch?v=f03fnL2GwLo>

Com altura de subida máxima estimada em 15 m e plataforma da ciclovía a 25 m do mar, não era óbvio que haveria galgamento do paramento vertical com altura suficiente para atingir a ciclovía.

Cota de subida de onda no costão ($Runup \rightarrow R_{u2\%}/H_s$):
Vulnerabilidades da ciclovía quanto a ação de ondas.



Figura 33. Outros segmentos da ciclovía que são vulneráveis à ação de ondas. Note que o jato ascendente no lado direito da imagem à esquerda é causado pela deflexão de um pequeno muro de contenção de rochas soltas que fica abaixo. Fotos acima: <https://globoplay.globo.com/v/4972654/>. Foto maior abaixo: <http://noticias.r7.com/jornal-da-record/videos/ciclovía-que-desabou-no-rio-apresentava-rachaduras-antes-da-inauguracao-23042016>

Recomendações Técnicas no Relatório da Coppe (06/2016) pertinentes às ações do mar

- Executar batimetria no local e na região que se estende das Ilhas Tijucas, em frente à praia da Barra da Tijuca, até as ilhas Cagarras, em frente à praia de Ipanema, de modo a permitir a caracterização dos fenômenos de refração e de difração pelo fundo.
- Executar novo levantamento topográfico do costão rochoso ao longo da ciclovía, validando ou complementando o levantamento já existente, de modo a conduzi-lo se possível até a conformação de fundo adjacente ao costão.
- Conduzir levantamentos de perfis de praia em São Conrado, de modo a caracterizar eventuais mudanças batimétricas próximo ao costão, resultantes de mudanças sazonais no clima de onda.
- Integrar o levantamento batimétrico e o levantamento topográfico às mesmas referências geodésicas horizontal e vertical.
- Realizar estudo aprofundado das ondas costeiras, do galgamento e da reflexão destas no costão rochoso.
- Realizar estudo aprofundado da elevação do nível do mar instantâneo no local, correlacionando-o com o nível do mar na Ilha Fiscal ou na Ponta da Armação (fornecido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil), de modo a caracterizar a maré astronômica, a maré meteorológica e as eventuais sobre-elevações dinâmicas devidas às ondas.

A participação da equipe da COPPE nos estudos sobre a ciclovía encerrou-se em junho de 2016.

Não sabemos se as recomendações foram seguidas pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro com a contratação de terceiros.

-- Agradeço a atenção --