

Distribuição estatística de alturas de ondas individuais em Santa Catarina: resultados preliminares

Eloi Melo F^o, Karla M. G. T. Straioto, Davide Franco & Marco A.R. Romeu

Laboratório de Hidráulica Marítima – UFSC – Cx. Po. 5039, Florianópolis, SC 88040-970

emf@ens.ufsc.br, karlaloha@hotmail.com, franco@ens.ufsc.br, mar@ens.ufsc.br

RESUMO

Este trabalho analisa aspectos estatísticos das alturas de ondas individuais da agitação marítima. A teoria de Rayleigh é apresentada sucintamente e testada contra dados de campo coletados ao largo da ilha de Santa Catarina. Os testes indicam que a função densidade de probabilidade de Rayleigh ajusta-se bem ao histograma de alturas individuais. A relação entre $H_{1/3}$ e H_{med} teórica foi verificada nos dados. A teoria estatística (linear) de Rayleigh não apresentou resultados tão bons na previsão da probabilidade de ocorrência de ondas “extremas” ($H > 2H_{1/3}$), mas foi capaz de prever com um erro aceitável o valor da maior altura relativa ($H_{ext} / H_{1/3}$) de onda esperada para o total de ondas individuais observado.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição de Rayleigh, alturas de ondas, ondas em Santa Catarina.

1. INTRODUÇÃO

A interpretação espectral da agitação marítima considera que a superfície irregular do oceano oriunda da presença de ondas geradas pelo vento seja o resultado da composição de uma gama de “componentes regulares” com diferentes frequências, amplitudes e direções e com fases aleatórias. Essa é a idéia básica que fundamenta o conceito do Espectro Direcional do mar [8]. Adicionalmente, o mecanismo de geração pelo vento faz com que a energia das ondas tenda a se concentrar em torno de uma determinada frequência caracterizando um processo de banda estreita [6]. A interpretação espectral de um certo Estado de Mar é uma forma bastante útil e interessante de se descrever o fenômeno. Os modelos de geração de onda, por exemplo, utilizam esse conceito para prever a evolução das condições do mar em função do vento.

Entretanto, em aplicações práticas faz-se necessário determinar aspectos objetivos da agitação, principalmente no que concerne as alturas de ondas individuais que se farão presentes numa dada condição. Qual a faixa de variação de alturas e qual a maior altura de onda provável de ocorrer num certo Estado de Mar? Histórias sobre embarcações que se viram subitamente acossadas por ondas imensas sempre abundaram na literatura, mas por muito tempo a comunidade científica considerou o assunto como simplesmente fruto da imaginação de marinheiros amedrontados. Entretanto, estudos recentes demonstram que essas ondas gigantes (chamadas em inglês de “freak” ou “rogue waves”) são, sim, uma possibilidade real [5], [9]. Essas são algumas das muitas questões que ilustram a importância do tema.

O presente trabalho, baseado no estudo de Straioto [10], analisa a validade da distribuição de Rayleigh para a descrição estatística das ondas geradas pelo vento a partir de medições feitas pelo ondógrafo da UFSC ao largo da ilha de Santa Catarina durante o funcionamento do Programa de

Informação Costeira on-line. O trabalho dedica também especial atenção para a identificação e previsão estatística de ondas “extremas” encontradas na vasta massa de dados coletados.

2. REVISÃO DA TEORIA

Pelo seu caráter aleatório, as alturas de ondas individuais se prestam a uma análise estatística. Baseado na hipótese de que o processo é de banda estreita, Longuet-Higgins [6] demonstrou que a variável aleatória altura de onda segue a distribuição estatística de Rayleigh, originalmente obtida por Lord Rayleigh no final do século XIX para descrever a distribuição da intensidade dos sons emitidos por um número infinito de fontes. Nessa sessão apresenta-se um resumo da teoria estatística aplicada às ondas geradas pelo vento.

Sob a hipótese de que o processo é de banda estreita, o deslocamento vertical da superfície do mar num dado ponto η é interpretado como sendo o resultado da superposição de um grande número de senóides de amplitudes $H_m/2$ com frequências σ_m próximas de um valor comum σ [2]. Portanto, para M componentes de frequência tem-se:

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} \cos(\sigma_m t - \varepsilon_m) \quad (1)$$

onde ε_m representa as fases das componentes.

Escrevendo (1) equivalentemente em notação complexa, sendo σ a frequência do pico do espectro, obtém-se:

$$\eta(t) = \text{Re} \left[e^{i\sigma t} \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} e^{i[(\sigma_m - \sigma)t - \varepsilon_m]} \right] = \text{Re} \left[e^{i\sigma t} B(t) \right]$$

Para encontrar a distribuição de alturas das ondas *individuais* presentes basta analisar a variação (lenta) do envelope $B(t)$ que delimita as cristas e os cavados dessas ondas (ver Figura 1), dado por:

$$B(t) = \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} e^{i[(\sigma_m - \sigma)t - \varepsilon_m]} \quad (2)$$

Nesse contexto, pode-se imaginar que a área de geração de ondas é dividida num grande número de diferentes regiões cada uma delas contribuindo para a elevação da superfície η e para a função envelope B . Se considerarmos que cada região da área de geração seja suficientemente grande em relação ao comprimento de onda dominante, é possível admitir que as componentes provenientes das diferentes regiões tenham fases independentes entre si. Portanto, B é tido como uma soma de um grande número de componentes de fases aleatórias [6]. Ressalta-se que essa hipótese traz implicitamente a idéia de que as componentes se superpõem *linearmente* sem qualquer tipo de interação (não-linear) entre si.

Sendo as componentes individuais de $B(t)$ estatisticamente independentes e se um número grande M for usado em (2), pode-se mostrar [6] que a probabilidade de uma certa altura de onda individual (H') ser menor ou igual a uma altura de onda arbitrária H é dada por,

$$P(H' \leq H) = 1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (3)$$

onde H_{rms} é o valor médio quadrático das alturas presentes. A eq. (3) é a *função de distribuição de probabilidade* (também conhecida como função de distribuição cumulativa) de *Rayleigh* válida para a variável aleatória contínua altura de onda H .

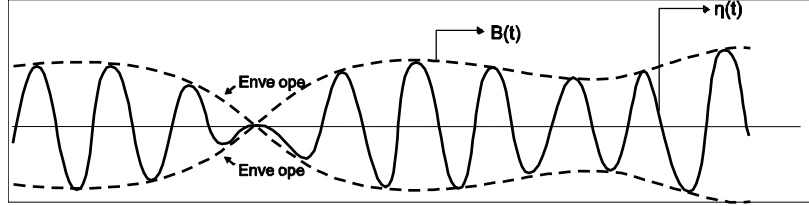


Figura 1: Deslocamento vertical da superfície do mar $\eta(t)$, sua função envelope $B(t)$ e algumas ondas individuais

A distribuição de probabilidades (3) permite determinar a altura \hat{H}_p excedida por pN ondas, onde p é uma dada fração do conjunto de N ondas:

$$\hat{H}_p = H_{rms} \sqrt{\ln \frac{1}{p}} \quad (4)$$

A *função densidade de probabilidade* (PDF) de Rayleigh (f_H) para a variável aleatória altura de onda, é obtida calculando-se a derivada da distribuição cumulativa [11]:

$$f_H(H) = \frac{2H e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} \quad (5)$$

É interessante observar que a PDF de Rayleigh, ao contrário de uma Gaussiana, por exemplo, não é uma função simétrica, mas apresenta uma *cauda* na região de alturas grandes a qual decai gradativamente (ver figuras 4 e 5, mais adiante). Essa característica tem implicações importantes para a estatística de casos extremos como se verá a seguir.

Essa teoria estatística permite estabelecer relações entre diferentes alturas de onda de interesse. Usando (4) e (5) obtém-se a seguinte expressão para H_p , a média das alturas das pN ondas que excedem a altura \hat{H}_p ,

$$H_p = \frac{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} H f_H(H) dH}{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} f_H(H) dH}$$

Operando-se a álgebra, chega-se a [8]:

$$\frac{H_p}{H_{rms}} = \sqrt{\ln \frac{1}{p}} + \frac{\sqrt{\pi}}{2p} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\ln(1/p)}} e^{-x^2} dx \right) \quad (6)$$

A Tabela 1 mostra alguns valores úteis de H_p / H_{rms} obtidas de (6),

$H_{1/10} = 1.80 H_{rms}$
$H_{1/3} = 1.416 H_{rms}$ (<i>altura significativa</i>)
$H_1 = H_{med} = 0.886 H_{rms}$ (<i>altura média</i>)

Tabela 1: Relação entre H_p e H_{rms} usando a distribuição de Rayleigh

Em particular a média do terço superior das maiores ondas individuais presentes ($H_{1/3}$) é a chamada altura *significativa* (H_s), tradicionalmente utilizada como parâmetro representativo do tamanho de um certo Estado de Mar.

As relações da Tabela 1 devem ser válidas se as hipóteses de banda estreita e de linearidade do processo forem atendidas. Todavia, para que este resultado seja verificado é essencial que a amostra contendo as pN alturas de ondas não seja muito pequena [3].

Adicionalmente, se desejarmos estimar a *maior* altura de onda provável de ocorrer em um registro com N ondas (H_{max}), uma aproximação possível é tomar $p=1/N$ em (4) e considerar $\hat{H}_{1/N} \approx H_{max}$,

$$H_{max} \approx \hat{H}_{1/N} = \sqrt{\ln N} H_{rms} = \sqrt{\frac{\ln N}{2}} H_{1/3} \quad (7)$$

Para um registro com 170 ondas, por exemplo, a aproximação acima daria o seguinte resultado para a altura máxima,

$$H_{max} \approx \sqrt{\frac{\ln 170}{2}} H_{1/3} = 1.60 H_{1/3} \quad (8)$$

O valor esperado para H_{max} , portanto, depende fundamentalmente do tamanho da amostra. Para fins práticos, Goda [3] sugere que o valor de H_{max} deva ser estimado considerando a duração da tempestade e o número de ondas ocorrido preservando ainda alguma tolerância para uma escala de desvio. A predição empregada geralmente cai dentro do intervalo

$$H_{max} = (1.6 \leftrightarrow 2.0) H_{1/3} \quad (9)$$

Esta estimativa de altura “máxima” remete aos casos de ondas excepcionalmente grandes que são muitas vezes observadas no mar como citado na introdução. Uma primeira questão que se coloca é: qual o critério para se considerar uma altura de onda como excepcional ou “extrema” – ou, como denominada na literatura internacional, uma “*freak wave*”? O estabelecimento de um

critério abrangente ainda é motivo de controvérsia na comunidade científica. Segundo [4], uma onda é considerada uma “*freak wave*” se sua altura exceder 2.2 vezes a altura significativa do registro no qual ela foi medida. Entretanto, o critério mais aceito pela comunidade científica em geral considera que uma onda seja “extrema” se sua altura exceder 2.0 vezes a altura significativa do Estado de Mar no qual ela ocorreu [5]. Ainda não há consenso se um simples critério estatístico desse tipo basta para definir se uma dada onda é uma “*freak wave*” ou não. É possível que características envolvendo a forma da onda (assimetria, altura da crista, etc) também devam ser consideradas. Neste trabalho optou-se por usar como critério a relação $H_{ext} > 2 H_{1/3}$, onde H_{ext} é a altura da onda “extrema” e $H_{1/3}$ é a altura significativa do registro.

3. DADOS DE CAMPO

Os dados usados neste trabalho foram coletados durante o funcionamento do Programa de Informação Costeira conduzido pelo Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC para monitorar a agitação marítima ao largo da Ilha de Santa Catarina. O equipamento utilizado para monitoramento das ondas foi um ondógrafo direcional Datawell Waverider Mark II que ficou fundeado ao largo da Praia da Armação a uma distância de cerca de 35 km da costa (posição $27^{\circ}44'34'' S$, $48^{\circ}09'53'' W$), num trecho com profundidade de 80 m conforme mostrado na Figura 2. Uma descrição do programa pode ser encontrada nas referências [7] e [1].

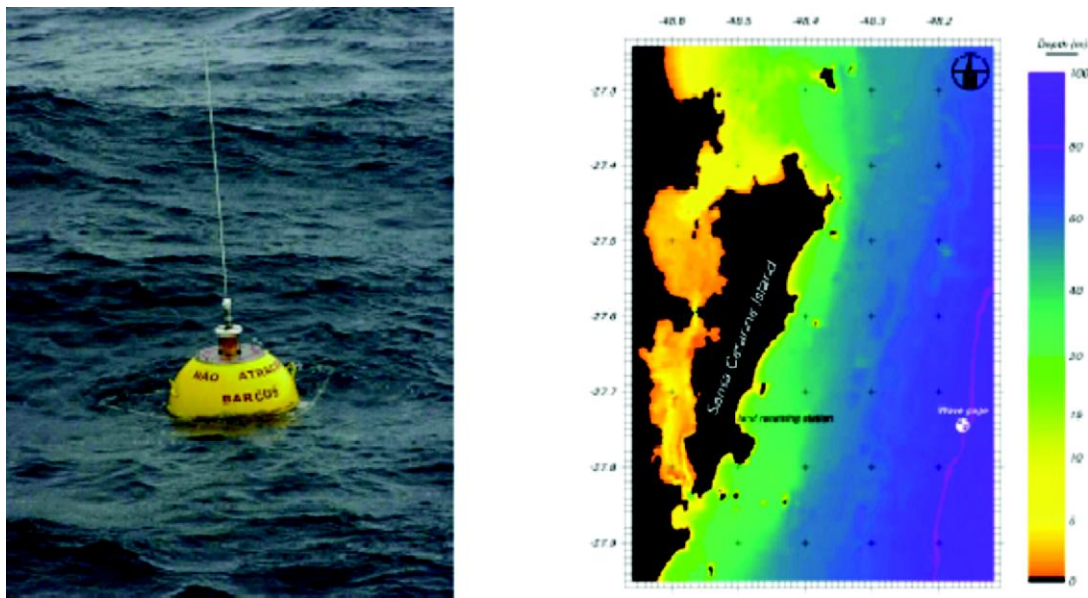


Figura 2 – Ondógrafo Waverider da UFSC e mapa do local do monitoramento.

Os dados analisados correspondem ao primeiro ano de medições que se estendeu de 16/01/2002 à 06/12/2002. A cada hora, o ondógrafo registrava por 1200 seg. a elevação vertical e os deslocamentos horizontais (2 componentes) da superfície do mar com um intervalo de amostragem de 0.78 s. Apenas o deslocamento vertical foi usado nesse trabalho. Optou-se por trabalhar com registros que continham 20 min. completos de medições (ou seja, 1535 pontos) e que não apresentavam nenhum erro identificado pelo equipamento. Além disso, foi elaborada

uma rotina para corrigir eventuais erros pontuais nas medições. Com isso, dos 7.203 registros do ano de 2002, foram utilizados para análise 5.833.

A identificação de alturas de ondas individuais nos registros foi realizada utilizando os métodos do *zero-ascendente* e do *zero-descendente*. Os métodos consistem no seguinte. Primeiramente, o nível médio da superfície é deduzido a partir do registro. Em seguida, buscam-se os pontos onde a superfície cruza a linha de nível médio subindo (zeros-ascendentes) e descendo (zeros-descendentes). Dois pontos de zeros-ascendentes consecutivos definem uma *onda individual* sendo a altura dessa onda medida pela distância vertical entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do nível d'água entre esses zeros-ascendentes. O método do zero-descendente é análogo, considerando-se como uma onda individual o trecho entre dois cruzamentos *descendentes* adjacentes (ver Figura 3).

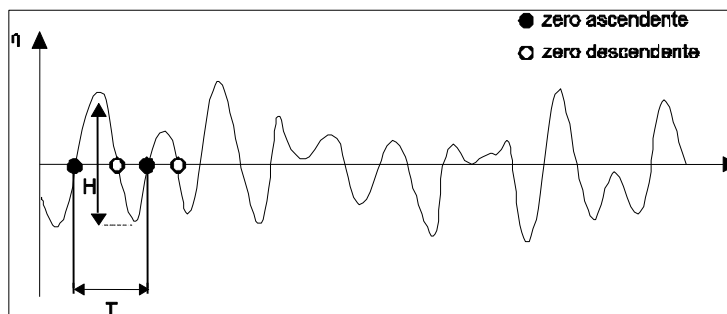


Figura 3 – Identificação de ondas individuais pelos métodos zero-ascendente e zero-descendente

A diferença entre os dois métodos reside no fato de que no caso do *zero-ascendente* a altura de onda é definida usando a crista e o cavado *seguinte* enquanto que no caso do *zero-descendente* a altura é calculada usando a crista e o cavado *anterior* a esta. Estatisticamente os métodos podem ser considerados equivalentes se a hipótese de comportamento linear da superfície do mar for verificada [3].

A aplicação dessas duas definições de altura de onda a cada um dos 5833 registros obtidos pelo ondógrafo permitiu montar a massa prima de dados para a análise estatística feita no presente trabalho.

4. RESULTADOS

4.1 Ajuste de histograma

No intuito de tirar o máximo proveito estatístico dos dados, o seguinte procedimento de *adimensionalização de alturas*, sugerido por Goda [3], foi adotado. Calculou-se, *para cada registro*, a respectiva *altura média*. Cada altura média foi então usada como referência para *adimensionalizar* as alturas de onda do registro em questão. Com esse artifício, cada um dos registros originou um grupo de alturas *adimensionais* com valores em torno de 1. Essa adimensionalização das alturas possibilitou o agrupamento de todos os 5833 registros num mesmo conjunto de dados.

Esse procedimento foi aplicado de forma idêntica para alturas definidas pelos métodos dos zero-ascendentes e dos zeros-descendentes. Os conjuntos de alturas adimensionais ficaram praticamente do mesmo tamanho nos dois casos, a saber:

- Método dos zeros-ascendentes: 1 169 806 ondas
- Método dos zeros-descendentes: 1 169 725 ondas

Para cada uma das definições de altura individual, construiu-se o histograma de alturas adimensionalizadas para o conjunto de *todos* os registros, como mostrado nas Figuras 4 e 5 . (Observa-se que isso seria impossível com alturas dimensionais). Nos histogramas, as alturas de ondas adimensionalizadas estão representadas no eixo das abscissas com um intervalo de classe de 0.25, o eixo das ordenadas representa a densidade de frequência relativa: n representa o número de ocorrências no setor e N o número total de ondas.

Assim, o primeiro teste da teoria estatística pode ser realizado verificando-se quão bem a função densidade de probabilidade de Rayleigh – eq. (5), usando H_{med} em lugar de H_{rms} pela relação dada na Tabela 1 – se ajustava aos dois Histogramas mencionados acima (ver Figs. 4 e 5).

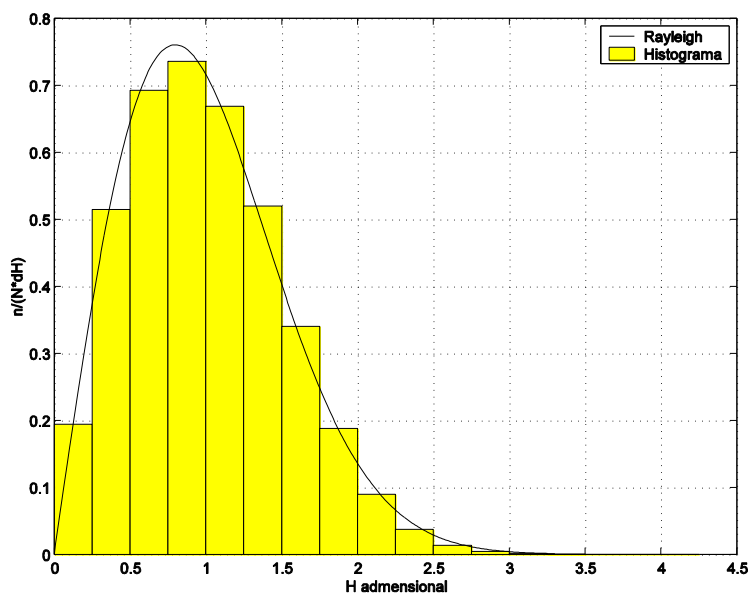


Figura 4 – Verificação de ajuste da PDF de Rayleigh com o histograma de alturas de zero-ascendente adimensionalizadas.

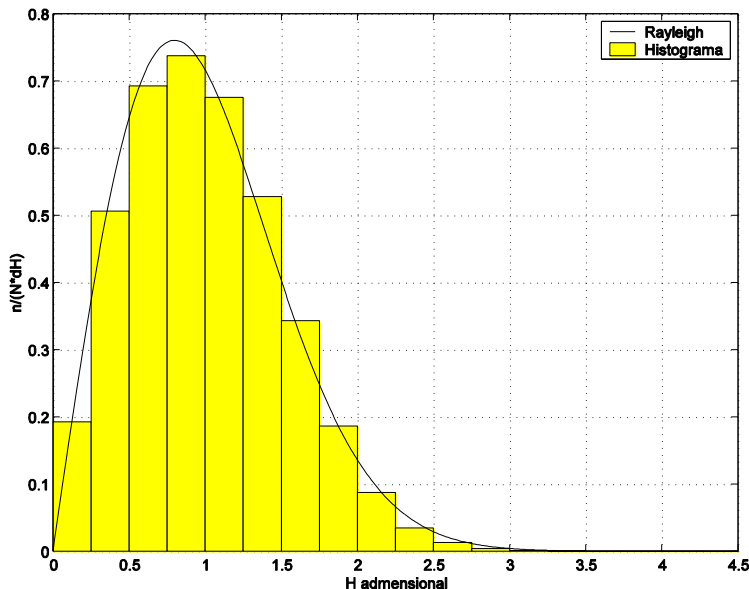


Figura 5 - Verificação de ajuste da Rayleigh com o histograma de alturas de zero-descendente adimensionalizadas.

Como se pode observar visualmente nas figuras, de maneira geral a PDF de Rayleigh ajusta-se bastante bem aos histogramas em ambos os casos suportando, portanto, a validade da teoria. Todavia, uma inspeção mais cuidadosa na cauda da PDF sugere que o ajuste para valores altos de H_{adim} não é tão bom quanto para valores menores. Esse aspecto tem implicações importantes para a análise de valores extremos como visto adiante. Nota-se também que os histogramas obtidos pelas duas definições de altura são quase idênticos.

4.2 Relação entre alturas médias características

Como visto acima, a teoria de Rayleigh estabelece relações determinadas entre alturas médias características (H_{rms} , H_{med} , $H_{1/3}$, etc). Assim, uma outra maneira de se averiguar a validade da teoria é verificar a compatibilidade dessas relações com as observações de campo. Escolheu-se a relação entre alturas significativa ($H_{1/3}$) e média (H_1) para o teste da teoria. Usando os resultados expressos na Tabela 1, a relação prevista pela teoria é : $H_{1/3} = 1.60 H_1$. A Figura 6 mostra o resultado dessa relação obtido da massa de dados utilizando as duas definições de alturas individuais.

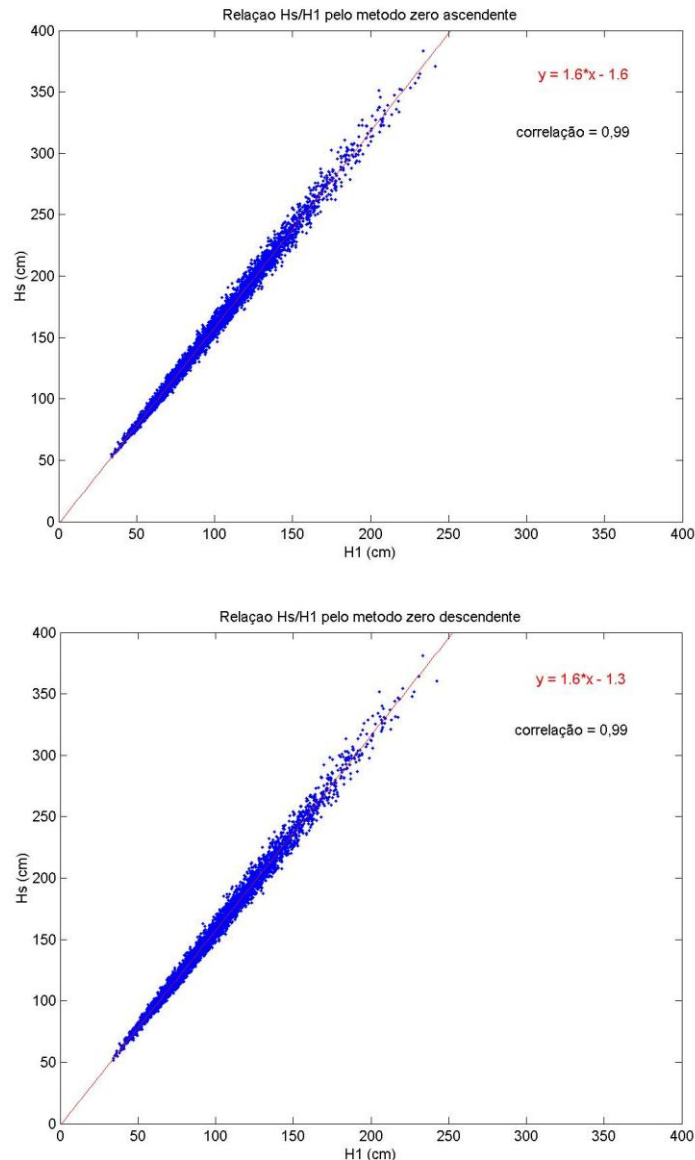


Figura 6 – Diagramas de dispersão para $H_{1/3} \times H_1$ pelas duas definições de altura

Para ambas as definições de altura, o coeficiente angular da reta de regressão linear foi exatamente 1.6 com um coeficiente de correlação de 0.99, confirmando, portanto, que a distribuição de Rayleigh descreve bem as relações entre alturas de ondas médias características da agitação marítima.

4.3 Previsão de Alturas “Extremas”

Os bons resultados obtidos anteriormente credenciam a distribuição de Rayleigh para ser usada com confiança, inclusive no que concerne a previsão de alturas “extremas”. Sob a hipótese de completa linearidade, essa previsão, na verdade, está contemplada na cauda da PDF de Rayleigh (ver Figs. 4 e 5).

Para investigar essa questão, o primeiro passo foi identificar na massa de dados disponível todas as ondas que se enquadravam como “extremas” de acordo com o critério mencionado na seção 2 : $H_{ext} > 2 H_{1/3}$. Essa identificação foi feita registro a registro (i.e., usando a altura significativa de *cada* registro como referência) para as ondas de zero-ascendente e de zero-descendente. O resultado foi o seguinte:

- Zero-ascendente: 210 ondas extremas identificadas num total de 1 169 806 ondas
- Zero-descendente: 140 ondas extremas identificadas num total de 1 169 725 ondas

O primeiro ponto a observar é que, para ondas “extremas”, o método usado para definir a altura das ondas influenciou sobremaneira o número de ondas observado. Fisicamente, isso significa que, para ondas “extremas”, usar o cavado anterior à crista não é estatisticamente equivalente a usar o cavado posterior na determinação da altura. Esse fato talvez possa ser interpretado como um indício de *assimetria* na forma dessas ondas “extremas” o que não seria consistente com a hipótese de linearidade do processo.

Estaria o número de ondas “extremas” observado de acordo com o que a teoria prevê ? Usando a eq (3) e a Tabela 1, a probabilidade de ocorrência de ondas com altura maior que 2.0 vezes a altura significativa é de 0,033%, ou seja, a teoria de Rayleigh prevê que 33 ondas num grupo de 10 000 enquadrar-se-iam como “extremas”. Num grupo de 1 169 800 ondas, o número provável de ondas “extremas” seria de 384 ondas, um valor maior que o encontrado por ambas as definições de altura. De fato, apesar de indicar valores na mesma ordem de grandeza do que o que a teoria prevê, os dados apresentam probabilidades de ocorrência para ondas “extremas” cerca de 50% menores do que a esperada: zero-ascendente $210/1169806 = 0.018\%$ e zero-descendente $140/1169725 = 0.012\%$.

Este resultado causou surpresa, pois está em contradição com o observado em outros locais. Liu e Pinho [5], por exemplo, encontraram um número de ondas “extremas” na Baía de Campos maior que o previsto por Rayleigh. A interpretação do porque a teoria superestimou a probabilidade de ocorrência de ondas “extremas” nos dados de SC requer um aprofundamento da investigação.

Finalmente, pode-se usar a teoria estatística apresentada para inferir qual seria a maior altura relativa de onda esperada para o total de ondas individuais observadas. Para tanto, basta usar a expressão (7) com $N = 1 169 806$ no caso de ondas zero-ascendente e $N = 1 169 725$ para ondas zero-descendente. Mantendo um nível compatível de precisão, o valor, em ambos os casos, é $H_{ext} / H_{1/3} = 2.60$. O que indicam os dados ?

Para ondas “extremas” identificadas pelo método zero-ascendente, a ocorrência que mostrou a maior relação $H_{ext} / H_{1/3}$ aconteceu no dia 07/04/2002 com registro iniciado às 10:00 hs: o ondógrafo mediu uma onda individual com 3.28 m num registro de altura significativa de 1.31 metros, portanto, a relação foi $H_{ext} / H_{1/3} = 2.49$. Para ondas “extremas” identificadas pelo método zero-descendente, a ocorrência que mostrou a maior relação $H_{ext} / H_{1/3}$ aconteceu no dia 19/06/2002 com registro iniciado às 20:00 hs: o ondógrafo mediu uma onda individual com 3.75 m num registro de altura significativa de 1.49 m, portanto, a relação foi $H_{ext} / H_{1/3} = 2.50$, praticamente idêntica a anterior. Portanto, no que se refere à previsão do valor máximo para a altura relativa, os dados forneceram um valor 4 % menor que o previsto pela teoria.

4.4 - Ondas “Extremas”: informações complementares

Em vista da importância do tópico, essa seção apresenta algumas informações de interesse sobre as ondas “extremas” observadas em SC em 2002.

As Figuras 7 e 8 apresentam detalhes dos registros nos quais as ondas com maior relação $H_{ext}/H_{1/3}$, acima mencionadas, foram identificadas pelos dois métodos.

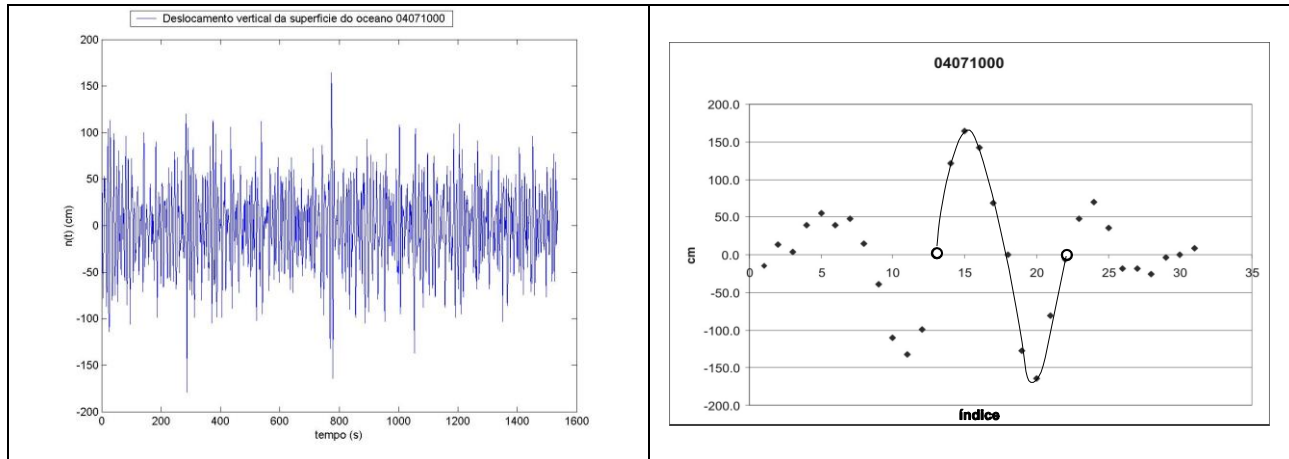


Figura 7 - Deslocamento vertical da superfície do mar para o dia 07/04/2002 com início às 10:00 hs e detalhe da onda “extrema” obtida pelo método zero-ascendente.

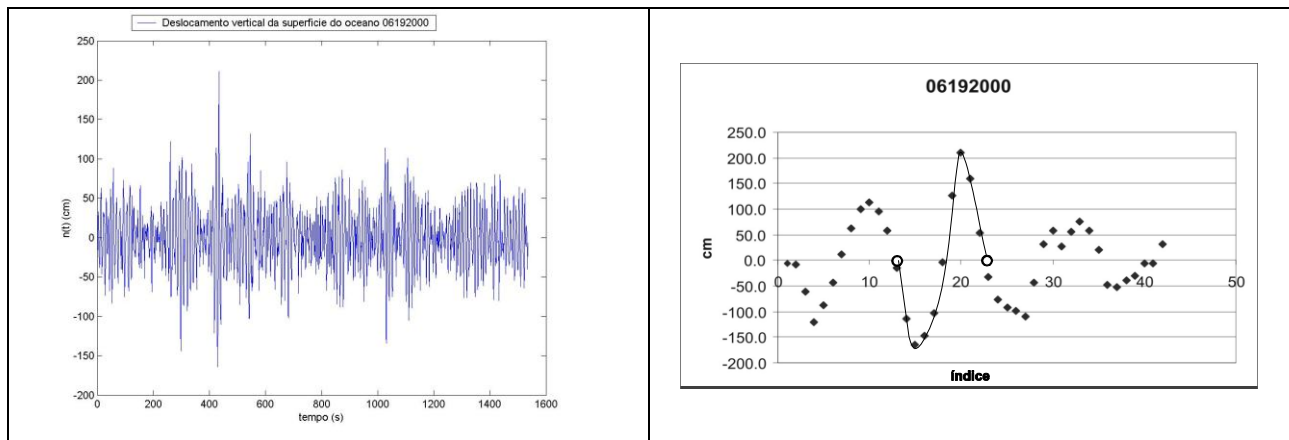


Figura 8 - Deslocamento vertical da superfície do mar para o dia 19/06/2002 com início às 20:00 hs e detalhe da onda “extrema” obtida pelo método zero-descendente.

Do total de ondas identificadas pelo método zero-ascendente, 0.018 % foram ondas “extremas”. Dessas ondas, 9.05 % foram da ordem de 1 m, 49.05 % da ordem de 2 m, 23.80 % da ordem de 3 m, 12.38 % da ordem de 4 m, 4.28 % da ordem de 5 m e 1.43 % da ordem de 6 m. Do total de ondas identificadas pelo método zero-descendente, 0.012 % foram ondas “extremas”. Dessas ondas, 13.57 % foram da ordem de 1 m, 45.71 % da ordem de 2 m, 25.71 % da ordem de 3 m, 11.43 % da ordem de 4 m e 3.57 % da ordem de 5 m. A Figura (9) mostra um histograma da relação $H_{ext}/H_{1/3}$ com intervalo de classe 0.1, para ambas definições.

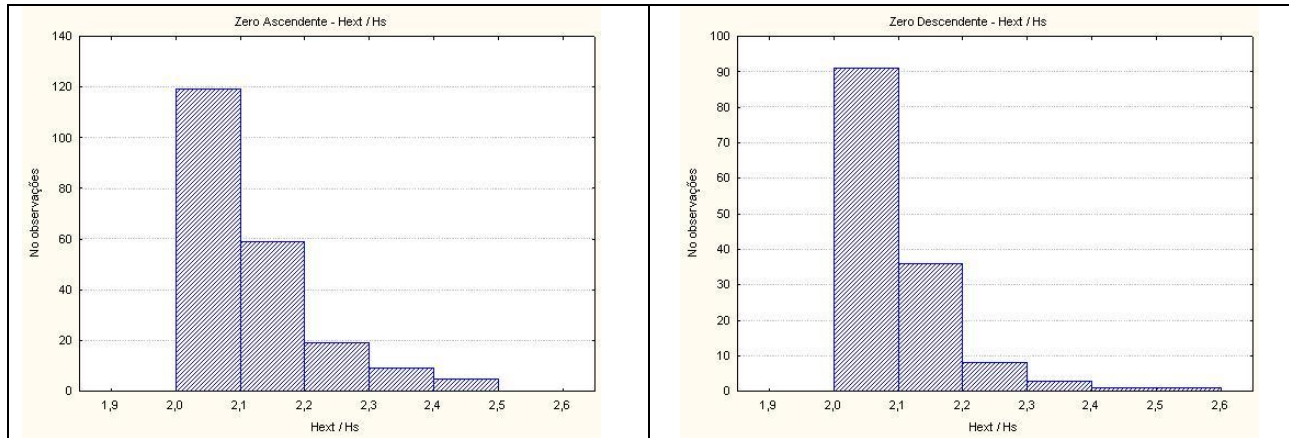


Figura 9 - Histograma da relação $H_{ext} / H_{1/3}$ para os dois métodos de definição de alturas

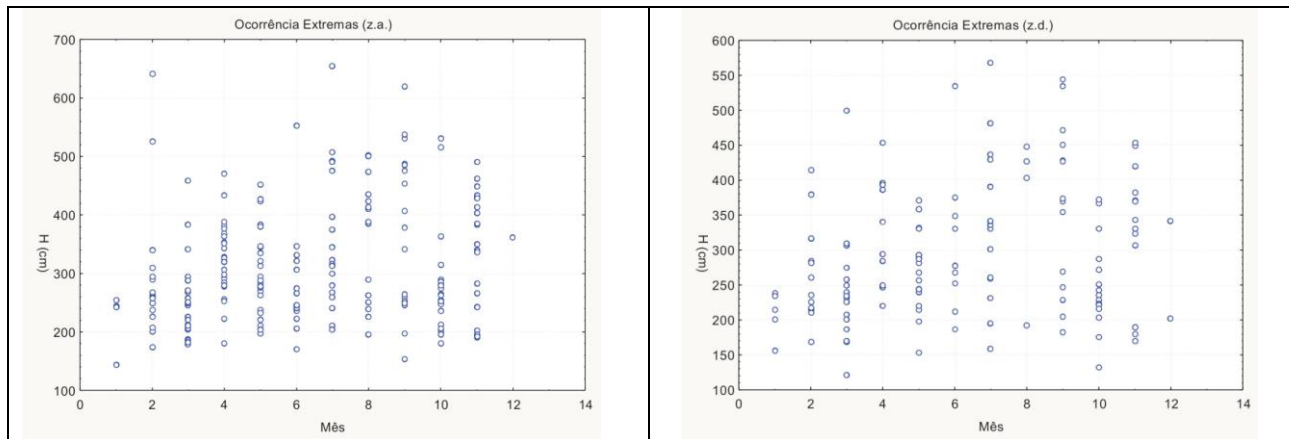


Figura 10 - distribuição anual de ocorrência de ondas “extremas” (ano de 2002): zero-ascendente painel a esquerda, zero-descendente painel a direita.

A maior onda “extrema” de zero-ascendente em valor absoluto mediu 6.55 m , tendo sido registrada no dia 28/07/2002 às 10:00 hs. Foi a 59ª onda medida num registro de 160 ondas com altura significativa de 3.26 metros , com relação $H_{ext} / H_{1/3} = 2.0$. A maior onda extrema de zero-descendente em valor absoluto mediu 5.68 m , tendo sido registrada no dia 28/07/2002 às 17:00 hs. Foi a 140ª medida num registro de 168 ondas com altura significativa de $2,71\text{ metros}$, com relação $H_{ext} / H_{1/3} = 2.1$.

Finalmente, muitas das ondas “extremas” encontradas nas medições apresentaram forma bastante assimétrica em relação a horizontal (i.e. cristas bem maiores que cavados e vice-versa). A título de exemplo apresenta-se na Figura 11 uma dessas ocorrências. Seria possível conseguir uma onda com uma crista tão alta como essa por uma mera superposição (linear) de componentes aleatórias ? É possível que a explicação para tal comportamento necessite incluir iterações não-lineares conforme indicado por vários autores.

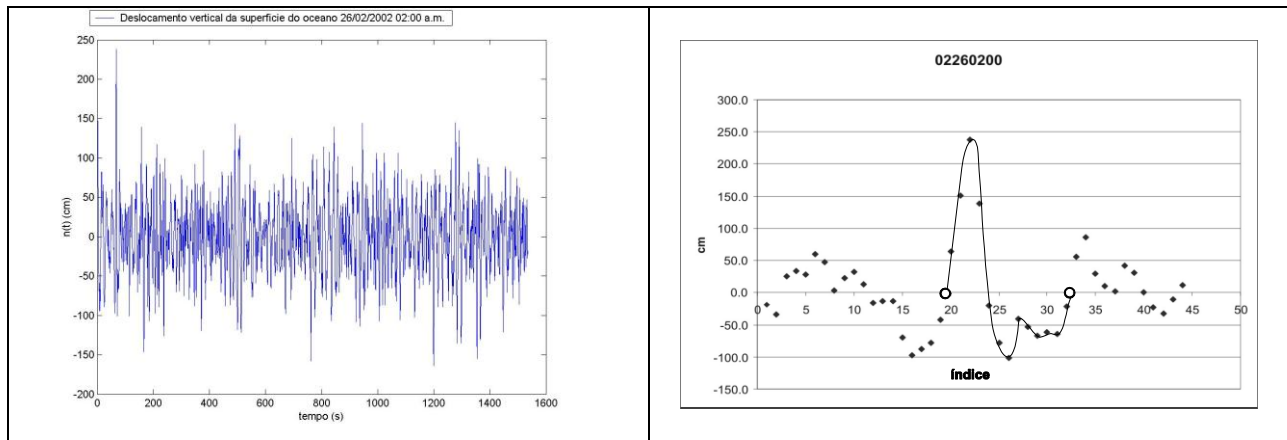


Figura 11 - Deslocamento vertical da superfície do mar para o dia 26/02/2002 com início às 02:00 hs e detalhe da onda “extrema” obtida pelo método zero-descendente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Registros da agitação marítima coletados ao largo de SC durante o Programa de Informação Costeira em 2002 foram usados para investigar a aplicabilidade da distribuição de Rayleigh para descrever estatisticamente as alturas de ondas individuais.

Os resultados dessa análise preliminar mostraram que a função de densidade de probabilidade (PDF) de Rayleigh parece ajustar-se bem ao histograma de alturas definidas tanto pelo método do zero-ascendente quanto do zero-descendente. O ajuste na cauda da PDF parece ser menos satisfatório que no restante. A relação entre altura significativa e altura média prevista pela teoria apresentou boa concordância com a observada em campo.

O uso da teoria de Rayleigh para ondas “extremas” – definidas como ondas com altura maior que 2.0 vezes a altura significativa – mostrou que (no caso de SC) a teoria tende a superestimar a probabilidade de ocorrência dessas ondas. Este resultado está em contradição com o encontrado em outros locais e merece uma análise mais cuidadosa. Mesmo assim, a teoria foi capaz de prever com um erro de 4 % o valor da maior altura relativa ($H_{ext} / H_{1/3}$) de onda esperada para o total de ondas individuais observado. Há indícios de que processos não-lineares desempenhem um papel importante na formação de ondas “extremas” no oceano.

6. REFERÊNCIAS

1. ARAÚJO, C.E.; FRANCO, D.; MELO F^O, E. & PIMENTA, F.M.; *Wave regime characteristics of the Southern Brazilian Coast*, Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 097; pp 15, 2003 (publicado em CD, sem paginação). Disponível em: < http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003_1.pdf>
2. DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A.; *Water wave mechanics for engineers and scientists*, World Scientific, v. 2 of Advanced Series on Ocean Engineering, 1984

3. GODA, Y.; *Random seas and the design of marine structures*, 1.ed., University of Tokyo Press, 1985.
4. KHARIF, C. ; PELINOVSKY, E.; *Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon*, European Journal of Mechanics B/Fluids, 603-634, 2003
5. LIU, P.C; PINHO, U.F.; *Freak Waves - more frequent than rare*, Annales Geophysicae, 22: 1839-1842, 2004.
6. LONGUET-HIGGINS, M. S.; *On the statistical distribution of the heights of sea waves*, Journal of Marine Research, v. 11, 245-266, 1952.
7. MELO F^o, E.; *Programa de Informação Costeira on line: Um balanço dos primeiros dois anos de funcionamento*, Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, pp 25, 2004.
8. OCHI, M. K.; *Stochastic Analysis and Probabilistic Prediction of Random Seas*, V. 13 of Advances in Hydrosience, 1982 .
9. STANSELL, P.; *Distribution of extreme waves, crest and trough heights measured in the North Sea*, Ocean Engineering 32: 1015-1036, 2005.
10. STRAIOTO, K.M.G.T.; *Estudo estatístico das alturas de ondas ao largo da ilha de Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso, Depto. de Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006
11. WONNACOTT, T.H.; WONNACOTT, R.H.; *Introdução à estatística*, (tradução de Alfredo Alves de Farias), Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.