

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas
Departamento de Matemática

Estudo estatístico das alturas de ondas ao largo da ilha de Santa Catarina

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Eloi Melo Filho ¹

Orientanda: Karla Maria Goulart Tredezini Straioto ²

Florianópolis, março de 2006.

¹E-mail: emf@ens.ufsc.br

²E-mail: karlalo@hotmai.com

Esta Monografia foi julgada adequada como **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO** no Curso de Matemática - Habilitação Licenciatura, e aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora designada pela Portaria nº 05/CMM/06

Prof.^a Carmem Suzane Comitre Gimenez
Professora da Disciplina

Banca Examinadora:

Elói Melo Filho - Ph.D. (Orientador)

Davide Franco - Dr. (Examinador)

Rubens Starke - Ms.D. (Examinador)

FLORIANÓPOLIS, SC - BRASIL

MARÇO DE 2006

Dedico este trabalho à meus pais maravilhosos que me apoiaram, confiaram, compreenderam e se sacrificaram muito para que eu pudesse concluir minha graduação e realizar esta monografia.

Meus agradecimentos
vão à toda equipe do
Laboratório de Hidráulica
Marítima da UFSC pela
colaboração e paciência,
ao professor Rubens Starke
por todos os ensinamentos,
pela compreensão, força
e apoio ao meu interesse
por esta área, ao professor
Elói Melo por me abrir os
olhos para uma nova ciência,
à meu namorado Leonardo
Rizzaro pela dedicação e
ajuda para finalização deste
trabalho e, aos que me iluminam
Miguel, Poiel e Anael.

Sumário

Resumo	x
1 Introdução	1
2 Fundamentos Estatísticos	5
2.1 Introdução	5
2.2 Uma noção de probabilidade	5
2.2.1 O espaço amostral	5
2.2.2 Eventos	6
2.2.3 Uma noção e axiomas de probabilidade	6
2.2.4 Propriedades elementares de probabilidade	8
2.2.5 Resultados Equiprováveis	11
2.2.6 Eventos Independentes	12
2.3 Variáveis aleatórias e suas distribuições	13
2.3.1 O conceito de variável aleatória	13
2.3.2 Funções de distribuição cumulativa	14
2.3.3 Variáveis aleatórias discretas	16
2.3.4 Variáveis aleatórias contínuas	17
2.3.5 Distribuição normal	18
2.3.6 Distribuição de Rayleigh	19

3	Propriedades Estatísticas de Ondas Geradas pelo Vento	21
3.1	Introdução	21
3.2	Elevação da Superfície do Mar e Definição de Ondas Representativas .	22
3.3	Distribuição de alturas de onda no oceano	24
3.3.1	Trem de onda simples: onda monocromática	25
3.3.2	Grupos de onda: ondas bi-cromáticas	25
3.3.3	Ondas com espectro de banda estreita	28
3.3.4	Função Densidade de Probabilidade de Rayleigh	32
3.4	Ondas Extremas	37
4	Área de Estudo	39
4.1	Caracterização Geográfica	39
4.2	Caracterização das Ondas	40
5	Metodologia	42
5.1	Introdução	42
5.2	O Ondógrafo Wave Rider Mark II	43
5.3	Registro de Dados	44
5.4	Método de análise	45
5.4.1	Classificação dos dados	46
5.4.2	Análise no domínio do tempo	47
5.4.3	Identificação de alturas de ondas e ondas extremas	47
5.4.4	Distribuição de alturas de ondas	48
6	Resultados	49
6.1	Distribuição de alturas de ondas	49
6.1.1	Método zero-ascendente	49
6.1.2	Método zero-descendente	52
6.2	Ondas Extremas	55

6.2.1	Método zero-ascendente	55
6.2.2	Método zero-descendente	72
7	Discussão dos Resultados	87
7.1	Distribuição de alturas de ondas	87
7.2	Ondas Extremas	88
8	Conclusões e Sugestões	93
A	Rotinas elaboradas no software Matlab	95
A.1	Classificação dos dados	95
A.1.1	Rotina um	96
A.1.2	Subrotina filelist	97
A.1.3	Subrotina leraw	97
A.2	Alturas de ondas e ondas extremas	98
A.2.1	Rotina dois	99
A.2.2	Subrotina correção	101
A.2.3	Rotina quatro	103
A.2.4	Rotina cinco	104
A.3	Distribuição de alturas de ondas	105
A.3.1	Rotina três	105

Lista de Figuras

2.1	Distribuição normal ou Gaussiana	19
2.2	Distribuição de Rayleigh	20
3.1	Exemplo de um possível registro de onda	23
3.2	Registro de onda resultante da soma de duas senoides	25
3.3	Grupo de ondas	26
3.4	Deslocamento vertical $\eta(t)$ e sua função envelope $B(t)$	30
4.1	Localização do ondógrafo	40
5.1	Ondógrafo e fundeio	43
5.2	esquema de transmissão dos dados	44
6.1	Distribuição de alturas de ondas utilizando o método zero-ascendente .	50
6.2	Relação entre as alturas significativas e alturas médias identificadas pelo método zero ascendente	51
6.3	Distribuição de alturas de ondas identificadas pelo método zero-descendente	53
6.4	Relação entre as alturas significativas e alturas médias identificadas pelo método zero descendente	54
6.5	Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 28/07/2002 às 10:00 am	56
6.6	Gráfico das alturas de ondas medidas em 28/07/2002 às 10:00 a.m. identificadas pelo método zero-ascendente	57

6.7	Plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método zero-ascendente em 28/07/2002 às 10:00 a.m.	58
6.8	Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 07/04/2002 às 10:00 a.m.	59
6.9	Gráfico das alturas de ondas medidas em 07/04/2002 às 10:00 a.m. identificadas pelo método zero-ascendente	60
6.10	Plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método zero-ascendente em 07/04/2002 às 10:00 a.m.	61
6.11	Relação entre as alturas extremas e alturas significativas identificadas pelo método zero ascendente	62
6.12	Gráfico de ocorrência de ondas extremas identificadas pelo método zero ascendente em relação aos meses	72
6.13	Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 28/07/2002 às 17:00 p.m.	73
6.14	Gráfico das alturas de ondas identificadas no registro do dia 28/07/2002 às 17:00 p.m. pelo método zero-descendente	74
6.15	Plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método zero-descendente em 28/07/2002 às 17:00 p.m.	75
6.16	Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 19/06/2002 às 20:00 p.m.	76
6.17	Gráfico das alturas de ondas medidas em 19/06/2002 às 20:00 p.m. identificadas pelo método zero-descendente	77
6.18	Plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método zero descendente em 19/06/2002 às 20:00 p.m.	78
6.19	Relação entre as alturas extremas e alturas significativas identificadas pelo método zero descendente	79
6.20	Gráfico de ocorrência de ondas extremas identificadas pelo método zero descendente em relação aos meses	86

7.1	Plot focando uma onda extrema encontrada pelo método zero-ascendente em 26/02/2002 às 02:00 a.m.	90
7.2	Plot do deslocamento vertical do oceano do registro do dia 26/02/2002 às 02:00 a.m.	91
7.3	Plot das alturas de ondas identificadas pelo método zero-ascendente em 26/02/2002 às 02:00 a.m.	92

Resumo da Monografia apresentada ao CFM/UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de graduada em Licenciatura Plena em Matemática

ESTUDO ESTATÍSTICO DAS ALTURAS DE ONDAS AO LARGO DA ILHA DE SANTA CATARINA

Karla M. Goulart Tredezini Straioto

Março/2006

Orientador: Elói Melo Filho

Este trabalho destina-se à uma aplicação de conceitos matemáticos, tais como cálculo diferencial e integral e estatística, à um fenômeno natural, mais especificadamente, a distribuição de alturas de ondas ao largo da ilha de Santa Catarina.

A partir de fundamentos probabilísticos desenvolveu-se uma teoria linear para descrever a distribuição de ondas do oceano, conhecida como distribuição de Rayleigh.

A teoria desenvolvida foi aplicada à dados reais de alturas de ondas, medidas pelo ondógrafo do Lahimar - UFSC, ao largo da ilha de Santa Catarina por dois métodos de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente durante o período de 16/01/2002 às 14:00 horas à 06/12/2002 às 13:36. Para ambos os métodos de definição de altura de ondas individuais fez-se a busca por ondas extremas, *freak waves*, nesta região.

Para a massa de dados analisada observou-se que a distribuição de Rayleigh é um bom método para descrever a distribuição de alturas de ondas individuais da região

estudada e, isso é válido para ambos os métodos de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente.

Foram obtidas diferentes observações de ondas extremas pra cada método de definição de ondas individuais, porém, em muitos casos, ondas extremas foram identificadas no mesmo registro por ambos os métodos.

A distribuição de Rayleigh é um bom método para estimativa da maior onda extrema registrada por qualquer dos métodos, zero-ascendente e zero-descendente, mas, não é muito eficiente na estimativa da quantidade de ondas extremas que serão identificadas por cada método.

Capítulo 1

Introdução

A necessidade da matemática em todas as áreas do conhecimento é de fato notória. Pode-se dizer que a matemática é a ciência que fala a "língua da natureza", ou seja, os fenômenos naturais e ambientais podem ser descritos matematicamente". Nesse sentido, é pertinente a famosa frase de Galileo Galilei "*O livro do Universo está escrito em linguagem matemática*".

Diante da importância dessa linguagem, ressalta-se a teoria da probabilidade que é um ramo da matemática, relacionado com fenômenos aleatórios (casuais). Nesse sentido, há um grande interesse de estudo nesse ramo matemático. Tal interesse se dá, pela grande possibilidade de aplicação, em diversas áreas e ciências, tais como: nas ciências físicas, biológicas, sociais, nas engenharias, no mundo de negócios, entre outras.

Não raro, em uma série de situações, nos deparamos com a incerteza quanto à ocorrência ou não de um determinado fenômeno; e o estudo probabilístico esforça-se no sentido de criar modelos capazes de representar fenômenos aleatórios... [11].

Com o anseio de aplicar a matemática a um fenômeno ambiental, o principal foco dessa monografia foi estudar a teoria da probabilidade, aplicada ao fenômeno aleatório, nesse caso especificamente, alturas de ondas do oceano.

Tal conhecimento se justifica e tem sido de vital importância na atividade econômica

mundial, quando dos estudos das condições meteo-oceanográficas para exploração de óleo e gás em águas profundas, no projeto de estruturas *offshore* para a estimação da magnitude dos esforços físicos, devidos à ação de componentes naturais (ventos, ondas e corrente), a que a estrutura estará exposta em seu tempo de serviço, [9], entre outros estudos.

Não é recente, o aparecimento de ondas imensas que devoram pessoas, navios e/ou destroem grandes estruturas, causando além de grandes tragédias, enorme prejuízo econômico aos envolvidos. Tais ondas, chamadas de "*freak waves*" ou "*rogue waves*", são objeto de estudo de muitos pesquisadores, tais como: oceanógrafos, engenheiros, físicos e matemáticos.

Cabe esclarecer que *freak waves*, aqui chamadas de ondas extremas, são ondas raras e muito grandes se comparadas com outras que ocorrem em relativa proximidade. Uma onda é considerada extrema se sua altura excede duas vezes a altura significativa do registro de ondas do qual ela é medida, enfatizando que o potencial dessas ondas de causar estragos para marinheiros, navios e estruturas *offshore* é muito grande, [13] [14].

Contudo, surge o seguinte problema da pesquisa: a aplicabilidade de conhecimentos e cálculos probabilísticos possibilita a descrição da distribuição de alturas de ondas individuais e de ondas extremas em determinada região?

Assim, essa monografia tem como objetivo geral, o estudo da teoria da probabilidade aplicada ao fenômeno aleatório - alturas de ondas do oceano, fazendo uma análise estatística das alturas de ondas medidas pelo ondógrafo do LahHiMar/UFSC, ao largo da Ilha de Santa Catarina, durante o ano de 2002, com especial atenção para a identificação de ondas extremas ("*freak waves*").

Diante do exposto traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Descrever os conceitos pertinentes ao tema, ou seja, os conceitos que tem relação direta com a teoria matemática linear desenvolvida para a probabilidade de alturas de ondas no oceano.

- Para os métodos de definição de ondas individuais zero-ascendente e zero-descendente, verificar, através da análise de dados reais de ondas, que a Distribuição de Rayleigh é um bom método para descrever matematicamente a distribuição de altura de ondas em condições ideais.
- Apresentar uma aproximação para a distribuição de alturas de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina usando a Distribuição de Rayleigh para dois métodos de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente.
- Relatar a existência de ondas extremas ao largo da Ilha de Santa Catarina, utilizando os dois métodos de definição de ondas individuais citados anteriormente.

A referida pesquisa se caracteriza como bibliográfica e descritiva. É bibliográfica, por que procura explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas em livros e artigos científicos, buscando a análise do assunto já discutido anteriormente por diversos autores aqui referenciados. Também é descritiva, pois, observa, registra e correlaciona fatos sem manipulá-los. Contudo, a pesquisa também é caracterizada como um estudo de caso situacional, ou seja, refere-se a descrição de eventos e/ou situações ocorridas em determinado ambiente e condição, que não podem ser generalizadas.

Assim, para um melhor entendimento dividiu-se a referida pesquisa conforme os objetivos específicos traçados, ou seja: No segundo capítulo apresenta-se os fundamentos estatísticos que dão base a teoria estatística das ondas do oceano. O terceiro capítulo desenvolve os conceitos pertinentes a teoria matemática linear desenvolvida para a probabilidade de alturas de ondas no oceano. O quarto capítulo dedica-se a caracterização da área de estudo. O quinto capítulo apresenta a metodologia utilizada para elaboração desta monografia. O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos da aplicação da teoria linear de distribuição de alturas de ondas à 5.833 registros de ondas medidas pelo ondógrafo durante o período de 16/01/2002 às 14:00 horas à 06/12/2002 às 13:36, fornecendo uma aproximação para a distribuição de alturas de

ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina usando a Distribuição de Rayleigh para dois métodos de definição de ondas individuais, zero - ascendente e zero - descendente, e relatando a existência de ondas extremas ao largo da Ilha de Santa Catarina, utilizando os métodos de definição de ondas individuais citados anteriormente. No sétimo capítulo os resultados obtidos são discutidos quanto a aplicabilidade da distribuição de Rayleigh e quanto as ondas extremas identificadas em cada método de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente.

Capítulo 2

Fundamentos Estatísticos

2.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo alguns fundamentos estatísticos que dão base a teoria estatística de ondas do oceano que será desenvolvida e aplicada nesta monografia.

Serão abordados alguns axiomas e propriedades de probabilidades bem como variáveis aleatórias e suas distribuições.

2.2 Uma noção de probabilidade

Existem, essencialmente, dois tipos de experimentos: determinístico e aleatório. No caso determinístico, quando repetimos o experimento exatamente nas mesmas condições, esperamos o mesmo resultado. No caso aleatório, se o experimento é repetido sob as mesma condições, os resultados serão diferentes e não previsíveis, [1], [3].

2.2.1 O espaço amostral

Definição 2.1 *Para algum experimento aleatório E , nós definimos o espaço amostral S como sendo o conjunto de todas os possíveis resultados do experimento.*

[1], [3], [4].

Os espaços amostrais podem ser finitos, contáveis ou enumeráveis, incontáveis ou não enumeráveis. Espaços amostrais com ambos, número de pontos finitos ou contáveis, serão chamados espaços amostrais discretos. [1].

2.2.2 Eventos

Definição 2.2 *Um evento elementar (ou ponto amostral) de S é um elemento único de S correspondendo a um resultado particular do experimento.*

Definição 2.3 *Um evento do espaço amostral S é algum subconjunto de S .*

[1], [3], [4].

Se A é um subconjunto de S , em alguma repetição do experimento o resultado, que é um evento elementar, pode ou não estar em A . Dizemos que A ocorre se o resultado está em A , [1].

2.2.3 Uma noção e axiomas de probabilidade

Considere um experimento E com um espaço amostral S e tome A como um evento particular em S . O experimento é repetido n vezes e o número de vezes que o resultado está em A (isto é, A ocorre) é observada. denotamos este número por $n(A)$. Numa situação física, intuitivamente espera-se que este seja o caso se os experimentos são repetidos independentemente sob as mesmas condições, [1]. Diremos que um experimento exibe uma regularidade estatística se, para algum evento A , em seu espaço amostral somos capazes de concluir que para alguma seqüência de n repetições do experimento a razão $\frac{n(A)}{n}$ converge para o mesmo limite com n tornando-se grande. A razão $\frac{n(A)}{n}$ é chamada de freqüência relativa do evento A . Definindo a probabilidade do evento A , $P(A)$ usando a freqüência relativa teremos

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(A)}{n} \quad (2.1)$$

Em muitos problemas físicos, esta é uma maneira aceitável de procedimento, [1].

Assim, para um evento A , a frequência relativa de A tem as seguintes propriedades:

- (i) $0 \leq \frac{n(A)}{n} \leq 1$, onde $\frac{n(A)}{n} = 0$ se A não ocorre em nenhum experimento e $\frac{n(A)}{n} = 1$ se A ocorre em todos os n experimentos

- (ii) Se A e B são eventos disjuntos então

$$\frac{n(A \cup B)}{n} = \frac{n(A)}{n} + \frac{n(B)}{n}.$$

Assim, desde que A e B não ocorram no mesmo experimento a soma das ocorrências de $A \cup B$ é a soma das ocorrências de A e B .

Baseado nessas duas propriedades de frequência relativa, iremos dizer que a probabilidade em algum espaço amostral tem as seguintes propriedades, [1].

Axiomas de probabilidade

A probabilidade $P(A)$ atribuída para algum conjunto A de um espaço amostral S deve satisfazer os seguintes axiomas:

- (i) $0 \leq P(A) \leq 1$, $P(S) = 1$

- (ii) Se A e B são eventos disjuntos (ou mutuamente exclusivos) então

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B)$$

- (iii) Se A_1, A_2, A_3, \dots é uma seqüência finita ou infinita de eventos disjuntos, então

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad (2.2)$$

[1], [3].

Desde que S seja o conjunto de todos os possíveis resultados, este é freqüentemente chamado de evento certo. S ocorre em todas as repetições do experimento, então $\left(\frac{n(S)}{n}\right) = 1$ e assim é razoável dizer que $P(S) = 1$.

Para espaços amostrais finitos, chamemos os pontos desse espaço (os eventos elementares) de e_1, e_2, \dots, e_n . Esses são os possíveis resultados individuais do experimento E . Suponha que representemos por P_i a probabilidade de e_i (atribuída arbitrariamente ou baseado num argumento intuitivo). Então:

(i) $P_i \geq 0, i = 1, \dots, n$

(ii) $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$.

[1].

2.2.4 Propriedades elementares de probabilidade

Usaremos aqui os axiomas apresentados acima para desenvolver algumas propriedades da probabilidade.

Propriedade 2.1 *Seja A um evento do espaço amostral S . Sendo \bar{A} o evento complementar de A no espaço amostral S temos que*

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$

Demonstração: Expressando o espaço amostral S como a união de dois eventos disjuntos A e \bar{A} , temos que $S = A \cup \bar{A}$. Pelo axioma (ii) e (2.2) vem que

$$P(S) = 1 = P(A) + P(\bar{A})$$

seguindo o resultado acima.

[1], [4]. Esta propriedade é tratada por Morettin, 1999, como Teorema do Evento Complementar.

Propriedade 2.2 *Se $A \subseteq B$ então $P(A) \leq P(B)$*

Demonstração: Provaremos isso decompondo B em $A \cup (B \cap \bar{A})$; note que A e $(B \cap \bar{A})$ são disjuntos.

Usando o axioma **(ii)** e (2.2) obtemos

$$P(B) = P(A) + P(B \cap \bar{A}).$$

A partir do axioma **(i)** $P(B \cap \bar{A}) \geq 0$ e assim $P(A) \leq P(B)$.
[1].

Teorema 2.1 *Se \emptyset é o evento impossível, então $P(\emptyset) = 0$*

Demonstração: Como $\emptyset \cap S = \emptyset$ e $\emptyset \cup S = S$, temos:

$$P(\emptyset \cup S) = P(S) \implies P(\emptyset) + P(S) = P(S)$$

e assim

$$P(\emptyset) = 0.$$

[3]

Definição 2.4 *Conjuntos B_1, B_2, \dots, B_n formam uma partição do espaço amostral S se*

(i) $B_i \neq \emptyset, i = 1, \dots, n$

(ii) $\bigcup_{i=1}^n B_i = S$

(iii) $B_i \cap B_j = \emptyset, i \neq j$

Em outras palavras, conjuntos B_1, B_2, \dots, B_n formam uma partição de S se eles são disjuntos e sua união é S , [1], [3].

Teorema 2.2 *Se os eventos A_1, A_2, \dots, A_n formam uma partição do espaço amostral S , então $\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$*

Demonstração: Pela definição de partição, os eventos A_1, A_2, \dots, A_n são mutuamente exclusivos - disjuntos - e $\bigcup_{i=1}^n A_i = S$.

Logo, $P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = P(S)$. Usando os axiomas **(ii)** e **(iii)** obtemos

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$$

[3]

Propriedade 2.3 Se B_1, B_2, \dots, B_n formam uma partição do espaço amostral S , então, para algum evento $A \subseteq S$,

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i)$$

Demonstração: O conjunto A pode ser expresso como

$$A = \bigcup_{i=1}^n (A \cap B_i)$$

e já que $B_i \cap B_j = \emptyset$, $i \neq j$, então $(A \cap B_i) \cap (A \cap B_j) = \emptyset$. Aplicando o axioma **(iii)** com equação (2.2) obtemos que

$$P(A) = P\left(\bigcup_{i=1}^n (A \cap B_i)\right) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i)$$

[1].

Propriedade 2.4 Se S é um espaço amostral discreto (finito ou contável) com eventos elementares e_i , $i = 1, 2, 3, \dots$, onde e_i tem probabilidade $P(e_i)$, então para algum evento $A \subseteq S$,

$$P(A) = \sum_{e_i \in A} P(e_i)$$

Demonstração: Este é apenas um caso particular da propriedade anterior, onde os conjuntos de partição são tomados como sendo seus eventos elementares, isto é, os e_i formam uma partição de S e

$$A \cap e_i = \begin{cases} e_i, & \text{se } e_i \in A; \\ \emptyset, & \text{se } e_i \text{ não pertence ao conjunto } A. \end{cases}$$

[1].

Propriedade 2.5 Para qualquer dois conjuntos A e B de S ,

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B).$$

Demonstração: Provaremos essa propriedade decompondo o conjunto $(A \cup B)$ no conjunto $A \cup [B \cap (\overline{A \cap B})]$ e, usando o axioma **(ii)** e (2.2)

$$\begin{aligned} P(A \cup B) &= P(A \cup [B \cap (\overline{A \cap B})]) \\ &= P(A) + P(B \cap (\overline{A \cap B})) \end{aligned} \tag{2.3}$$

da mesma maneira B pode ser decomposto como a união disjunta $(A \cap B) \cup [B \cap (\overline{A \cap B})]$. Logo,

$$P(B) = P(A \cap B) + P(B \cap (\overline{A \cap B}))$$

e reescrevendo esta última equação temos

$$P(B \cap (\overline{A \cap B})) = P(B) - P(A \cap B) \tag{2.4}$$

Substituindo (2.4) em (2.3) obtemos

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B).$$

[1], [3].

2.2.5 Resultados Equiprováveis

Uma importante situação ocorre quando o espaço amostral tem um número finito de eventos elementares, n . Neste caso, se denotamos os eventos elementares por e_i , $i = 1, \dots, n$, $S = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ e então

(i) $0 \leq P(e_i) \leq 1$, $i = 1, \dots, n$

(ii) $\sum_{i=1}^n P(e_i) = 1$

(iii) Se $A = \bigcup_{i \in I} e_i$ onde I é a coleção de todos os índices, então

$$P(A) = \sum_{e_i \in A} P(e_i).$$

[1].

Um caso particularmente simples e importante levanta-se quando cada evento elementar tem a mesma probabilidade, $P(e_1) = P(e_2) = \dots = P(e_n) = p$. Assim, de

(ii) temos

$$\sum_{i=1}^n P(e_i) = 1 \implies np = 1 \implies p = \frac{1}{n}$$

Isto freqüentemente ocorre na prática quando não temos razão física ou de outro tipo, para assumir que algum evento elementar é mais provável de ocorrer do que outro. Espaços amostrais discretos em que cada evento elementar tem a mesma probabilidade são chamados "igualmente prováveis" ou equiprováveis, [1], [3].

Considere um espaço amostral equiprovável contendo n eventos elementares, cada evento elementar tendo uma probabilidade de $\frac{1}{n}$. Se A é algum evento de S contendo k eventos elementares, $1 \leq k \leq n$, então

$$P(A) = \sum_{i=1}^k P(e_i) = \sum_{i=1}^k p = k \cdot p = k \cdot \frac{1}{n}$$

então

$$P(A) = \frac{k}{n}$$

[1], [3].

2.2.6 Eventos Independentes

Dizemos que dois eventos são independentes quando a realização ou a não-realização de um dos eventos não afeta a probabilidade do outro e vice-versa, [4].

Definição 2.5 *Seja S um espaço amostral, $A \subset S$ e $B \subset S$. A e B são eventos independentes se $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$.*

Ou seja,

$$P(B|A) = P(B) \text{ e } P(A|B) = P(A)$$

[3], [4].

2.3 Variáveis aleatórias e suas distribuições

Existem, basicamente, dois tipos de variáveis aleatórias: discretas e contínuas, [1], [3].

2.3.1 O conceito de variável aleatória

Definição 2.6 Tome S sendo um espaço amostral associado com algum experimento E . Uma variável aleatória X é uma função que atribui um número real $X(s)$ para cada elemento $s \in S$

[1], [4]

Assim, uma variável aleatória é uma função que associa a todo evento elementar pertencente a uma partição do espaço amostral um único número real, [3].

A primeira coisa que podemos notar sobre a definição de uma variável aleatória X é que X não é realmente uma variável por completo, X é uma função que mapeia os elementos de S na reta dos números reais. X também não é aleatório no sentido de que uma vez que o resultado $s \in S$ é conhecido, o número real $X(s)$ é completamente determinado. O resultado $s \in S$ que é aleatório, e não o mapeamento X . O termo variável aleatória entretanto é padrão, e freqüentemente denotaremos simplesmente por X , suprimindo a dependência do espaço amostral, [1].

Nem toda função de S na reta real será denotada como uma variável aleatória, somente funções que atribuem exatamente um número real para cada elemento de S são satisfatórias. Claramente, o mesmo número real pode ser atribuído para muitos elementos de S . O domínio de uma variável aleatória X é o espaço amostral S e a

imagem R_X é um subconjunto da reta real

$$R_X = [r \in \mathbb{R} | \exists s \in S / X(s) = r].$$

[1].

Definição 2.7 Os eventos $A \subset S$ e $B \subset R_X$ são chamados de eventos equivalentes se

$$A = [s \in S | X(s) \in B]$$

Definição 2.8 Se $A \subset S$ e $B \subset R_X$ são equivalentes, então definimos a probabilidade do evento B , $P(B)$, como sendo igual a $P(A)$.

[1].

Podemos perguntar por $P(X \geq x)$, a probabilidade de uma variável aleatória assumir valor maior ou igual a $x \in R_X$. X deve ser entendido como aleatório (uma função de resultados aleatórios de um experimento), enquanto x deve ser entendido não como aleatório, mas como um elemento em R_X .

A introdução de variáveis aleatórias unifica o estudo de probabilidade desde que as probabilidades sejam agora sempre definidas como subconjuntos da reta real, [1].

2.3.2 Funções de distribuição cumulativa

Para alguma variável aleatória X nós definimos a função $F_X(x)$ pela equação

$$F_X(x) = P(X \leq x) = P([s \in S | X(s) \leq x])$$

onde x é algum valor real, [1], [3].

A função $F_X(x)$ é chamada de função de distribuição cumulativa (CDF - *Cumulative Distribution Function*) da variável aleatória X .

Existem importantes propriedades das CDF's que são consequência da definição:

1. $0 \leq F(x) \leq 1$ para todo $x \in (-\infty, +\infty)$

Isso é consequência do fato de que para algum x , $F(x)$ é uma probabilidade.

2. $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$ e $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$
3. $F(x)$ é uma função não decrescente de x , ou seja, para dois valores particulares de x , x_1 e x_2 , $x_1 \leq x_2$, então $F(x_1) \leq F(x_2)$.
4. $F(x)$ é contínua pela direita.

Este é um resultado do fato que $F(x) = P(X \leq x)$.

Dessa forma, uma CDF pode ser descrita como uma função não decrescente, contínua pela direita e com a propriedade que $F(\infty) = 1$ e $F(-\infty) = 0$, [1], [3].

$F(x)$ pode ser expressa como a soma das três funções

$$F(x) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x)$$

onde

- (i) $F_1(x)$ é uma função que muda apenas em "saltos" e é constante entre os saltos;
- (ii) $F_2(x)$ é uma função contínua;
- (iii) $F_3(x)$ é uma função singular.

[1].

Definição 2.9 *Se a função de distribuição cumulativa (CDF) de uma variável aleatória X é do tipo $F_1(x)$, então X será chamada de variável aleatória discreta. Se a CDF da variável aleatória X é do tipo $F_2(x)$, chamaremos X de variável aleatória contínua. Se a CDF da variável aleatória X é a soma desses dois tipos, chamaremos X de variável aleatória mixada.*

[1].

2.3.3 Variáveis aleatórias discretas

Uma variável aleatória X é discreta somente se a sua imagem R_X contém um número finito ou enumerável de pontos.

Definição 2.10 (Função de Probabilidade) *É uma função que associa a cada valor assumido pela variável aleatória a probabilidade do evento correspondente, isto é*

$$P(X = x_i) = P(A_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

[3], [4]

Suponha que os saltos na CDF de uma variável aleatória discreta X ocorram nos pontos x_1, x_2, x_3, \dots onde a seqüência pode ser ambas, finita ou infinita e enumerável, e ainda assumimos que $x_i < x_j$ se $i < j$. Se $F(x)$ é a CDF dessa variável aleatória, então

$$F(x_i) - F(x_{i-1}) = P(X \leq x_i) - P(X \leq x_{i-1}) = P(X = x_i)$$

desde que x_i esteja ordenado. A seqüência de probabilidades $P(X = x_i)$, que será escrita mais convenientemente como $P(x_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, é chamada de distribuição de probabilidade da variável aleatória discreta X , [1].

A distribuição de probabilidade $P(x_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, de uma variável aleatória discreta deverá satisfazer duas propriedades:

(i) $0 \leq P(x_i) \leq 1$, $i = 1, 2, 3, \dots$;

(ii) $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$

Inversamente, alguma seqüência de números reais $P(x_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, satisfazendo essas duas propriedades pode ser qualificada como a distribuição de probabilidade de alguma variável aleatória discreta, [1], [3].

Sendo assim, a CDF $F_X(x)$ da variável aleatória discreta X é dada por

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} P(x_i)$$

Se A é um evento de R_X então a probabilidade de que em alguma repetição do experimento a saída $X(s)$ esteja em A , $P(X \in A)$ é

$$P(X \in A) = \sum_{x_i \in A} P(x_i).$$

Se R_X é espaço amostral finito contendo n elementos, x_1, x_2, \dots, x_n e cada elemento com a mesma probabilidade (isto é, resultados equiprováveis), então $P(x_i) = \frac{1}{n}$, $i = 1, 2, \dots, n$, e se A é algum evento do espaço amostral contendo k eventos elementares, então $P(X \in A) = \frac{k}{n}$ como anteriormente.

2.3.4 Variáveis aleatórias contínuas

Seja X uma variável aleatória contínua com CDF $F_X(x)$, que não é somente contínua como também tem derivada

$$F'_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) = f_X(x) \quad (2.5)$$

que é uma função contínua, [1].

Desde que $f_X(x)$ e $F_X(x)$ tenham sido assumidas contínuas e $F_X(-\infty) = 0$, segue que

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(y) dy. \quad (2.6)$$

Para algum intervalo (a, b) temos

$$P(a < X < b) = \int_{-\infty}^b f_X(y) dy - \int_{-\infty}^a f_X(y) dy = \int_a^b f_X(y) dy$$

e como uma variável aleatória contínua tem probabilidade zero em qualquer ponto específico, não faz diferença se excluirmos ou incluirmos um ponto no cálculo de probabilidade, dessa forma, a expressão (2.6) é a mesma para $P(a < X \leq b)$, $P(a \leq X < b)$ e $P(a \leq X \leq b)$ [1], [2].

É necessário que a derivada $\frac{dF_X(x)}{dx}$ exista, exceto talvez em um número finito de pontos, e que esta derivada seja contínua por partes para assegurar que $f_X(x)$ tenha as seguintes propriedades

(i) $f_X(x) \geq 0$;

(ii) $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)dx = 1$;

(iii) Para algum intervalo (a, b) ,

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(y)dy.$$

A função $f_X(x)$ é chamada de função densidade de probabilidade (PDF - *Probability Density Function*) de uma variável aleatória X .

Entretanto, a probabilidade de X estar em algum pequeno intervalo $(x, x + \Delta x)$ pode ser aproximada por

$$P(x \leq X \leq x + \Delta x) = \int_x^{x+\Delta x} f_X(x)dx \cong f(x)\Delta x$$

para Δx suficientemente pequeno, [1].

Note que $f_X(x)$ não necessita ser menor que a unidade para todos os valores de x , precisa somente ser positiva, contínua por partes com a unidade como área, tal função é a PDF de alguma variável aleatória.

2.3.5 Distribuição normal

Para muitas variáveis aleatórias, a função densidade de probabilidade é representada por uma curva específica chamada curva normal ou gaussiana. Entre as distribuições de variáveis aleatórias contínuas, esta é uma das mais empregadas. Por exemplo, os erros cometidos em mensurações de fenômenos físicos e econômicos freqüentemente tem distribuição normal, [2].

A função densidade de probabilidade $f_X(x)$ de uma distribuição normal é da forma

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

onde μ é a média e σ é o desvio padrão. A distribuição normal tem o aspecto gráfico da figura 2.1

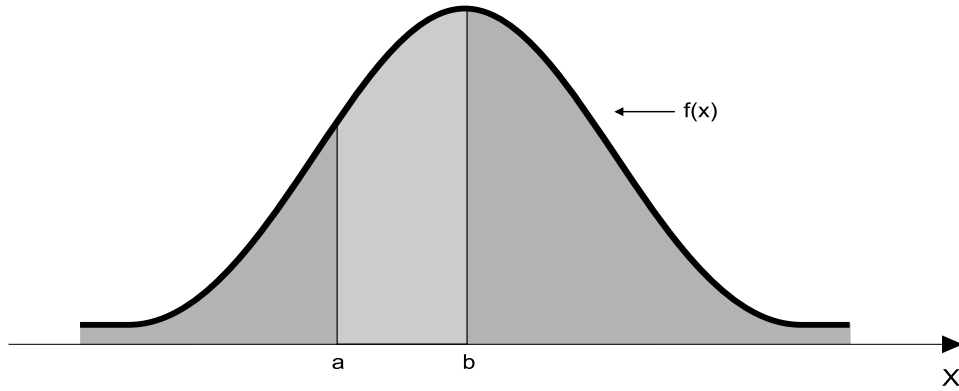


Figura 2.1: Distribuição normal ou Gaussiana

Note que, $f_X \geq 0$, não negativa, $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)dx = 1$ e ainda $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x)dx$.

2.3.6 Distribuição de Rayleigh

Para determinadas variáveis aleatórias - tais como intensidade de sons, alturas de ondas no oceano, entre outras - a função densidade de probabilidade é representada pela função densidade de probabilidade de Rayleigh é da forma

$$f(x) = \frac{2x}{R} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{R} \right) \right] \quad (2.8)$$

onde R é um parâmetro que, para distribuições de alturas temos $R = 8\sigma^2$, e para distribuições de amplitudes temos $R = 2\sigma^2$, onde σ^2 é a variância e σ é o desvio padrão. Dessa forma, para alturas, temos a seguinte relação para a função de densidade de probabilidade de Rayleigh

$$f(x) = \frac{x}{4\sigma^2} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{8\sigma^2} \right) \right] \quad (2.9)$$

Em termos de valor médio quadrático, x_{rms} , temos que para alturas $R = x_{rms}^2$ e assim

$$f(x) = \frac{2x}{x_{rms}^2} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{x_{rms}^2} \right) \right] \quad (2.10)$$

A distribuição de Rayleigh tem o aspecto gráfico da figura 2.2

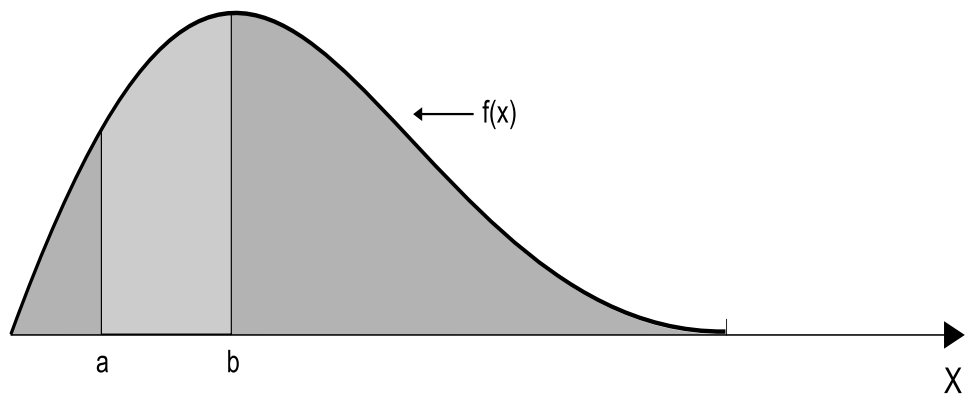


Figura 2.2: Distribuição de Rayleigh

Capítulo 3

Propriedades Estatísticas de Ondas Geradas pelo Vento

3.1 Introdução

Neste capítulo serão abordadas as propriedades estatísticas lineares das alturas de ondas do oceano.

Consideraremos que a superfície do oceano é composta por uma superposição de uma grande variedade de ondas monocromáticas (isto é, que possuem apenas uma frequência), movendo-se em diferentes direções e com diferentes frequências, fases aleatórias e amplitudes, [5].

Além disso, admitiremos também que essas diferentes frequências estão concentradas em torno de um certo valor. Isto significa um oceano de banda estreita (em que todas as frequências estão em uma faixa estreita em torno de um valor σ .), [5].

Dessa forma a distribuição estatística de ondas do oceano aqui utilizada, a distribuição de Rayleigh, é derivada teoricamente assumindo que o espectro de onda contém uma única faixa estreita de frequências e que a energia da onda está sendo recebida de um grande número de fontes diferentes cujas fases são aleatórias, [12].

A distribuição de Rayleigh foi 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. Em 1952, Longuet-Higgins demonstrou que esta distribuição também é aplicável à ondas no oceano, e desde então a distribuição de Rayleigh tem sido universalmente empregada para descrever alturas de ondas. Estritamente falando, Longuet-Higgins verificou a aplicabilidade da distribuição de Rayleigh para ondas irregulares qual têm uma pequena flutuação nos períodos de ondas individuais e suas alturas exibem uma batida como uma flutuação, [6].

3.2 Elevação da Superfície do Mar e Definição de Ondas Representativas

Consideremos que a elevação η da superfície do oceano num ponto fixo é uma função somente do tempo t .

Definir ondas individuais em um registro de ondas não é uma tarefa trivial e, de fato, não existe nenhum método absoluto de definição. Entretanto, tem-se utilizado freqüentemente em análise de ondas o método de cruzamento de zero-ascendente ou zero-descendente como técnica padrão para definir as ondas individuais [6]. Descreve-se brevemente a seguir estes métodos.

Primeiramente, o nível médio da superfície da água é deduzido a partir do registro e definido como o nível zero. Em seguida, busca-se o ponto do perfil da onda (forma do registro) que cruza a linha do zero (nível médio) subindo (zero-ascendente). Este ponto é tomado como o ponto de início de uma onda individual, observe o gráfico de elevação da superfície do mar abaixo

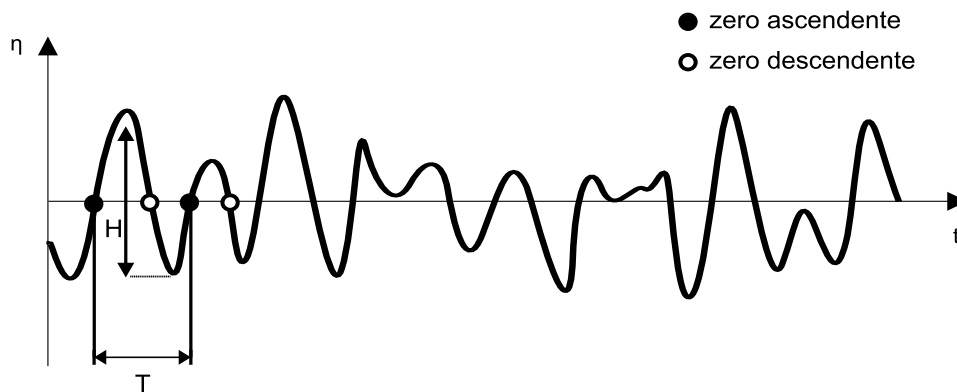


Figura 3.1: Exemplo de um possível registro de onda

Seguindo as subidas e descidas do perfil irregular da superfície, continua-se a busca pelo próximo ponto de cruzamento de zero-ascendente que ocorrerá após uma "descida" do perfil abaixo do nível zero. Quando se encontra o próximo ponto de cruzamento de zero-ascendente, define-se este ponto como o fim da primeira onda e o início da segunda onda.

Dois pontos de zero-ascendente adjacentes definem o período da onda se o eixo das abscissas for o tempo, e definem o comprimento de onda quando o eixo das abscissas for a distância.

A distância vertical entre o ponto mais alto e ponto mais baixo do nível d'água entre dois zero-ascendente adjacentes é definido como altura de onda, H , desconsiderando pequenas oscilações que não cruzam a linha do zero, e a amplitude é definida como sendo metade da altura $A = \frac{H}{2}$, [6]. Na definição do procedimento para o método de zero-descendente, os pontos onde o perfil da superfície cruza a linha do zero descendo são tomados como ponto de início e fim de ondas individuais. A diferença entre os dois métodos é principalmente conceitual, ou seja, no caso zero-ascendente a altura de onda é definida usando uma crista e o cavado seguinte enquanto no caso zero-descendente a altura é dada usando uma crista e o cavado anterior a esta. Estatisticamente os métodos podem ser considerados como equivalentes

[6], se a hipótese de comportamento linear da superfície do mar for verificada.

Historicamente, várias alturas de ondas tornaram-se populares na caracterização do estado do mar, estas são $H_{\frac{1}{3}}$ (altura significativa), definida por Sverdrup e Munk [1947], [12], H_{max} (altura máxima), H_{rms} (valor médio quadrático de altura) e outras. Para melhor entender o que estas definições significam, considere um grupo de N alturas de onda medidas num determinado ponto. Ordenando estas ondas da maior para menor e numerando-as de 1 à N , $H_{\frac{1}{3}}$ é definida como a média do primeiro maior terço de ondas $\left(\frac{N}{3} \text{ ondas}\right)$, [5], [6].

Correspondentemente, H_p seria definido como a média das primeiras pN ondas, com $p \leq 1$. (H_1 seria a média de todas as alturas de onda).

Se H_{max} é o valor máximo de H no intervalo temos $H_{max} = H_{\frac{1}{N}}$ e assim

$$H_{max} \geq H_p \geq H_1 \quad (3.1)$$

A altura de onda valor médio quadrático, H_{rms} , do nosso grupo de ondas é definido como

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i)^2} \quad (3.2)$$

onde H_i é a altura da i -ésima onda elementar, note que H_{rms} que é sempre maior que H_1 (altura média das ondas) no oceano real, [5], [6], [12].

3.3 Distribuição de alturas de onda no oceano

Seja H a variável aleatória altura de onda, \hat{H} um possível valor real que a função H pode tomar.

A probabilidade de uma altura de onda ser maior que uma altura de onda arbitrária \hat{H} , [5], é

$$P(H > \hat{H}) = \frac{n}{N} \quad (3.3)$$

onde n é o número de ondas maior que \hat{H} . Notemos ainda que $P(H \leq \hat{H}) = 1 - \frac{n}{N}$.

3.3.1 Trem de onda simples: onda monocromática

A forma mais simples possível de se representar uma onda na superfície da água é através de uma função senoidal e o símbolo η denota o deslocamento da superfície da água em relação ao nível médio

$$\eta(t) = \frac{H_0}{2} \cos \sigma t \quad (3.4)$$

Como, nesse caso as alturas de onda são todas iguais, $H_{max} = H_p = H_{rms} = H_0$ para todo p , [5], [12].

3.3.2 Grupos de onda: ondas bi-cromáticas

Sendo um trem de ondas simples com frequência σ representado por 3.4, para criar grupos de onda pode-se superpor dois trens de ondas, com uma ligeira diferença de frequência, como mostrado na figura 3.2

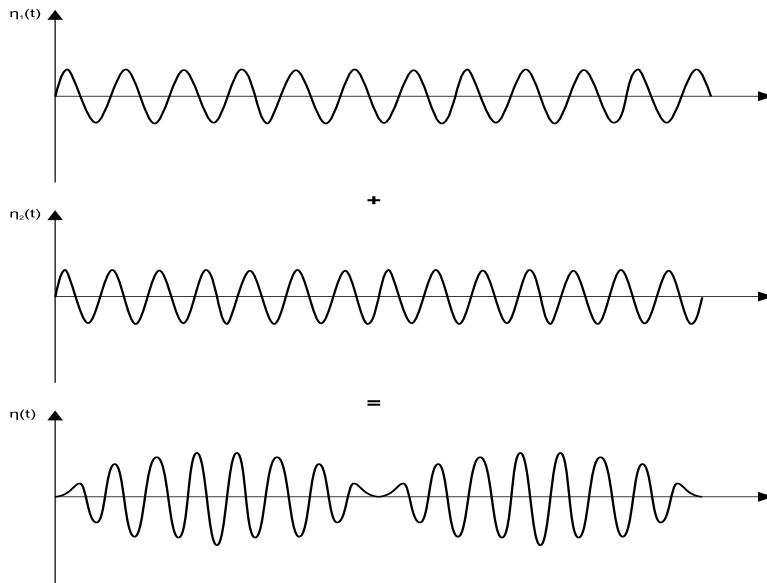


Figura 3.2: Registro de onda resultante da soma de duas senoides

Assim, para $\Delta\sigma$ suficientemente pequeno temos $\eta = \eta_1 + \eta_2$, onde $\eta_1 = \frac{H_0}{2} \cos \left[\left(\sigma - \frac{\Delta\sigma}{2} \right) t \right]$

e $\eta_2 = \frac{H_0}{2} \cos \left[\left(\sigma + \frac{\Delta\sigma}{2} \right) t \right]$, logo:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{H_0}{2} \cos \left[\left(\sigma - \frac{\Delta\sigma}{2} \right) t \right] + \frac{H_0}{2} \cos \left[\left(\sigma + \frac{\Delta\sigma}{2} \right) t \right] \\ &= H_0 \cos \sigma t \cos \frac{\Delta\sigma}{2} t \\ &= \frac{H(t)}{2} \cos \sigma t \end{aligned}$$

que representa um trem de onda de altura variável avaliado em $x = 0$.

O trem de onda resultante tem uma frequência σ e uma altura de onda lentamente modulada

$$H(t) = 2H_0 \cos \left[\left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right) t \right],$$

cujos períodos são mais longos que os períodos das ondas individuais. $H(t)$ define os valores máximos e mínimos de $\eta(t)$ e é comumente denominado função envelope. Assim, para examinar a distribuição de altura de onda para esse trem de onda, necessitamos apenas considerar o envelope de $t = 0$ à $\frac{\pi}{\Delta\sigma}$, ou de um anti-nó até o primeiro nó, [5], [12].

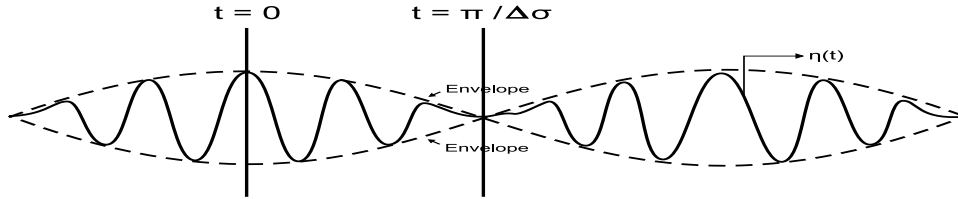


Figura 3.3: Grupo de ondas

Para determinar H_p , fazemos a média das alturas de onda no envelope de $t = 0$ à $t = \frac{p\pi}{\Delta\sigma}$, desde que as alturas de onda decresçam monotonamente.

$$H_p = \frac{1}{p\pi/\Delta\sigma} \int_0^{\frac{p\pi}{\Delta\sigma}} 2H_0 \cos \frac{\Delta\sigma}{2} t dt \quad (3.5)$$

Então

$$H_p = \frac{\Delta\sigma}{p\pi} \cdot 2H_0 \cdot \left(\frac{2}{\Delta\sigma} \right) \int_0^{\frac{p\pi}{\Delta\sigma}} \cos \frac{\Delta\sigma}{2} t \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right) dt$$

fazendo $u = \frac{\Delta\sigma}{2}t$ temos $du = \frac{\Delta\sigma}{2}dt$ e assim

$$\begin{aligned} H_p &= \frac{4H_0}{p\pi} \int_0^{\frac{p\pi}{\Delta\sigma}} \cos u du \\ &= \frac{4H_0}{p\pi} \left[\sin \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \cdot \frac{p\pi}{\Delta\sigma} \right) - \sin \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \cdot 0 \right) \right] \end{aligned}$$

logo

$$H_p = \frac{4H_0}{p\pi} \sin \left(\frac{p\pi}{2} \right) \quad (3.6)$$

O valor médio quadrático da altura de onda pode ser obtido da seguinte maneira

$$H_{rms}^2 = \frac{1}{\pi/\Delta\sigma} \int_0^{\frac{\pi}{\Delta\sigma}} 4H_0 \cos^2 \frac{\Delta\sigma}{2} t dt \quad (3.7)$$

assim

$$H_{rms}^2 = \frac{\Delta\sigma}{\pi} \cdot 4H_0^2 \cdot \left(\frac{2}{\Delta\sigma} \right) \int_0^{\frac{\pi}{\Delta\sigma}} \cos^2 \frac{\Delta\sigma}{2} t \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right) dt$$

fazendo $u = \frac{\Delta\sigma}{2}t \Rightarrow du = \frac{\Delta\sigma}{2}dt$ e obtemos

$$H_{rms}^2 = \frac{8H_0^2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 u du$$

utilizando a identidade trigonométrica $\cos^2 x = \frac{1 + \cos 2x}{2}$ vem que

$$\begin{aligned} H_{rms}^2 &= \frac{8H_0^2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + \cos 2u}{2} du \\ &= \frac{8H_0^2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos 2u}{2} \right) du \\ &= \frac{8H_0^2}{\pi} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cdot 0 \right) + (\sin \pi - \sin 2 \cdot 0) \\ &= \frac{8H_0^2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= 2H_0^2 \end{aligned}$$

Portanto

$$H_{rms} = \sqrt{2}H_0 \quad (3.8)$$

Dessa forma, através dos resultados (3.6) e (3.8) podemos expressar H_p em termos de H_{rms} como segue

$$\begin{aligned} H_p &= \frac{4H_0}{p\pi} \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \\ &= \frac{4}{p\pi} \cdot \frac{H_{rms}}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \\ &= \frac{4\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{H_{rms}}{p\pi} \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

ou

$$H_p = \frac{2\sqrt{2}}{p\pi} \cdot H_{rms} \cdot \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \quad (3.9)$$

3.3.3 Ondas com espectro de banda estreita

Para uma representação mais realista das ondas oceânicas geradas pelo vento, consideremos que a superfície do mar seja composta pela superposição de um grande número de senóides, mas com suas freqüências próximas de um valor comum σ . Nessa descrição, estamos admitindo que o estado de mar tenha espectro de banda estreita, [5]. Portanto, para M componentes de freqüência tem-se:

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} \cos(\sigma_m t - \epsilon_m) \quad (3.10)$$

onde ϵ_m representa a fase da componente.

Podemos escrever (3.10) equivalentemente em notação complexa, para isso lembrando que e^{ix} pode ser representado por seu desenvolvimento em série de Maclaurin,

onde obtemos

$$\begin{aligned}
e^{ix} &= 1 + ix + \frac{(ix)^2}{2!} + \frac{(ix)^3}{3!} + \dots \\
&= \left(1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} \dots\right) + i \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \dots\right) \\
&= \cos x + i \sin x
\end{aligned}$$

e dessa forma

$$\eta(t) = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} e^{i(\sigma_m t - \epsilon_m)} \right] \quad (3.11)$$

onde a notação $\text{Re}[\cdot]$ significa que estamos tomando apenas a parte real, $\text{Re}[e^{i\sigma_m t}] = \cos \sigma_m t$.

Sendo σ a frequência de pico do espectro, fazemos a seguinte fatoração

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

Novamente, para definirmos a distribuição de alturas de ondas, precisamos apenas analisar a estatística da variação lenta do envelope $B(t)$, sendo

$$B(t) = \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} e^{i[(\sigma_m - \sigma)t - \epsilon_m]} \quad (3.12)$$

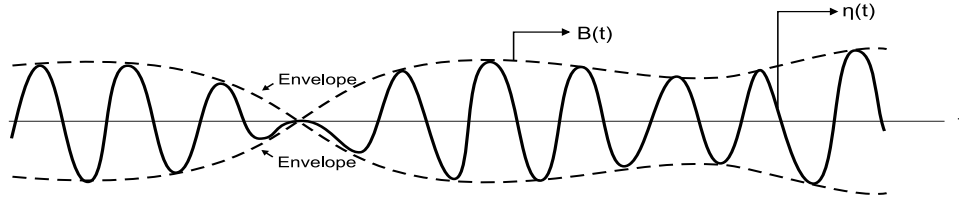


Figura 3.4: Deslocamento vertical $\eta(t)$ e sua função envelope $B(t)$

A energia da onda recebida por algum ponto na costa será originada em diferentes lugares de uma grande área. Podemos imaginar que a área de geração das ondas é dividida num grande número de regiões diferentes em que cada qual contribuirá para a altura de onda η e para função envelope B . Se cada região da área de geração é suficientemente grande em comparação com o comprimento de onda, podemos assumir que as fases das contribuições das diferentes regiões são independentes uma da outra. Dessa forma é natural assumirmos que B é uma soma de um grande número de componentes de fases aleatórias (Longuet-Higgins,1952).

Sendo as componentes individuais de $B(t)$ estatisticamente independentes e um número grande M é usado, [5] mostra que a probabilidade de uma altura de onda ser maior que uma altura de onda arbitrária (\hat{H}) é dada por ,

$$P(H > \hat{H}) = e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \quad (3.13)$$

Podemos comparar essa probabilidade teórica com nosso grupo de N ondas ordenadas através de (3.3), obtendo assim

$$\frac{n}{N} = e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \quad (3.14)$$

e dessa forma

$$P(H \leq \hat{H}) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \quad (3.15)$$

que é chamada de distribuição de Rayleigh.

Assim sendo, a função de distribuição cumulativa, CDF - também chamada de função de distribuição de probabilidade - da variável aleatória contínua altura de onda do oceano H é a distribuição de Rayleigh

$$F_H(\hat{H}) = P(H \leq \hat{H}) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \quad (3.16)$$

A expressão (3.14) nos fornece uma maneira de determinar o número de ondas de um total de N , que tem uma altura maior ou igual a uma certa altura \hat{H} , ou também podemos usar a mesma para determinarmos a altura \hat{H} excedida por n ondas em nosso grupo de N .

Aplicando logarítmo natural à ambos os lados da equação (3.14) encontramos

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{n}{N}\right) &= \ln e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \\ &= -\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2 \end{aligned}$$

Multiplicando pelo oposto de 1 obtemos

$$\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2 = -\ln\left(\frac{n}{N}\right) \implies (\hat{H})^2 = (H_{rms})^2 \ln\left(\frac{N}{n}\right)$$

e assim

$$\hat{H} = H_{rms} \sqrt{\ln \frac{N}{n}} \quad (3.17)$$

e dessa forma, a altura que é excedida por pN ondas é portanto

$$\hat{H}_p = H_{rms} \sqrt{\ln \frac{1}{p}} \quad (3.18)$$

3.3.4 Função Densidade de Probabilidade de Rayleigh

A função densidade de probabilidade, PDF, de altura de onda f_H segue da distribuição de probabilidade de Rayleigh $P(H \leq \hat{H})$

$$\begin{aligned} f_H(\hat{H}) &= \frac{d}{d\hat{H}}(P(H \leq \hat{H})) = \frac{d}{d\hat{H}}(1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2}) \\ &= 0 - e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \cdot \ln e \cdot \frac{d}{d\hat{H}} \left[- \left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}} \right)^2 \right] \\ &= -e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \cdot \frac{-2\hat{H}}{H_{rms}^2} \end{aligned}$$

e assim

$$f_H(H) = \frac{2He^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} \quad (3.19)$$

A função f_H é a função densidade probabilidade (PDF) para a variável aleatória contínua altura de ondas do oceano, mais conhecida como função densidade de probabilidade de Rayleigh.

Da teoria estatística podemos obter uma importante relação usando a função de distribuição de alturas de ondas.

A altura média de onda é definida como, [5],

$$\begin{aligned}
H_1 &= \frac{\int_0^\infty H f_H(H) dH}{\int_0^\infty f_H(H) dH} \\
&= \frac{\int_0^\infty H \frac{2He^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} dH}{\int_0^\infty \frac{2He^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} dH} \\
&= \frac{H_{rms} \int_0^\infty \frac{2H^2 e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} \frac{dH}{H_{rms}}}{\int_0^\infty \frac{2He^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}} \frac{dH}{H_{rms}}}
\end{aligned}$$

Usando a substituição de variável $x = \frac{H}{H_{rms}}$ e $dx = \frac{dH}{H_{rms}}$ vem que

$$H_1 = \frac{2H_{rms} \int_0^\infty x^2 e^{-x^2} dx}{2 \lim_{a \rightarrow \infty} \int_0^a x e^{-x^2} dx}$$

Integrando por partes obtemos

$$\begin{aligned}
H_1 &= \frac{H_{rms} \frac{1}{2} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx}{\frac{1}{2}} \\
&= H_{rms} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx \\
&= \frac{\sqrt{\pi}}{2} H_{rms}
\end{aligned}$$

Logo

$$H_1 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} H_{rms}$$

e dessa forma temos aproximadamente

$$H_1 = 0,866 H_{rms}.$$

Sabendo que a altura \hat{H}_p exedida por pN ondas é representada por (3.18), queremos

determinar a altura média das alturas das pN ondas H_p

$$\begin{aligned}
 H_p &= \frac{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} H f_H(H) dH}{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} f_H(H) dH} \\
 &= \frac{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} \frac{2H^2 e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} dH}{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} \frac{2H e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} dH} \\
 &= \frac{H_{rms} \int_{\hat{H}_p}^{\infty} \frac{2H^2 e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}^2} \frac{dH}{H_{rms}}}{\int_{\hat{H}_p}^{\infty} \frac{2H e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}}{H_{rms}} \frac{dH}{H_{rms}}}
 \end{aligned}$$

Ao fazermos a substituição de variável $x = \frac{H}{H_{rms}}$ obtemos $dx = \frac{dH}{H_{rms}}$ e assim

$$H_p = \frac{2H_{rms} \int_{\frac{\hat{H}_p}{H_{rms}}}^{\infty} x^2 e^{-x^2} dx}{2 \int_{\frac{\hat{H}_p}{H_{rms}}}^{\infty} x e^{-x^2} dx}$$

Integrando por partes a expressão acima segue que

$$H_p = H_{rms} \frac{\frac{1}{2} \frac{\hat{H}_p}{H_{rms}} e^{-\left(\frac{\hat{H}_p}{H_{rms}}\right)^2} + \frac{1}{2} \int_{\frac{\hat{H}_p}{H_{rms}}}^{\infty} e^{-x^2} dx}{\frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\hat{H}_p}{H_{rms}}\right)^2}}$$

Usando (3.18) temos,

$$\begin{aligned}
\frac{H_p}{H_{rms}} &= \frac{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right) e^{-\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)^2} + \int_{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)}^{\infty} e^{-x^2} dx}{e^{-\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)^2}} \\
&= \frac{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right) e^{-\left(\ln \frac{1}{p}\right)} + \int_{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)}^{\infty} e^{-x^2} dx}{e^{-\left(\ln \frac{1}{p}\right)}} \\
&= \frac{p \left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right) + \int_{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)}^{\infty} e^{-x^2} dx}{p} \\
&= \left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right) + \frac{1}{p} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx - \frac{1}{p} \int_0^{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)} e^{-x^2} dx \\
&= \sqrt{\ln \frac{1}{p}} + \frac{\sqrt{\pi}}{2p} - \frac{1}{p} \int_0^{\left(\sqrt{\ln \frac{1}{p}}\right)} e^{-x^2} dx
\end{aligned}$$

Logo

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

[5], [12].

A tabela abaixo mostra alguns valores de $\frac{H_p}{H_{rms}}$

Relação entre H_p e H_{rms} usando a distribuição de Rayleigh
$H_{\frac{1}{10}} = 1.80H_{rms}$
$H_{\frac{1}{3}} = 1.416H_{rms}$
$H_1 = 0.886H_{rms}$

Segundo [5], [6], [12], as relações acima devem ser verificadas se as ondas tiverem um espectro de banda estreita. Nesse caso, a distribuição de Rayleigh descreve a distribuição estatística de alturas de ondas de forma precisa.

Para validade deste resultado é essencial que a fração da amostra contendo as pN alturas de ondas H não seja muito pequena, de outra maneira a presente aproximação não é válida, [12].

Se desejamos saber qual seria a maior onda em um registro de N ondas, H_{max} , uma boa aproximação é tomarmos $p = \frac{1}{N}$ e encontrar $H_{\frac{1}{N}} \approx H_{max}$, obtendo

$$H_{\frac{1}{N}} = \sqrt{\ln N} H_{rms} \quad (3.20)$$

[8], ou ainda

$$H_{\frac{1}{N}} \approx \sqrt{\frac{\ln N}{2}} H_{\frac{1}{3}} \quad (3.21)$$

Para um registro de 170 ondas por exemplo, a aproximação (3.21) provinda da distribuição de Rayleigh estima que a altura da maior onda deste registro será

$$\begin{aligned} H_{\frac{1}{170}} &\approx \sqrt{\frac{\ln 170}{2}} H_{\frac{1}{3}} \\ H_{\frac{1}{170}} &\approx 1.60 H_{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

O valor esperado para H_{max} , a maior altura, depende fundamentalmente do tamanho da amostra, [12].

Goda, 1985, coloca que o valor de H_{max} seria estimado considerando a duração da tempestade de ondas, *storm waves*, do número de ondas e por reservar alguma tolerância para uma escala de desvio. A predição empregada geralmente cai dentro do intervalo

$$H_{max} = (1.6 \sim 2.0) H_{\frac{1}{3}}.$$

3.4 Ondas Extremas

Segundo Kharif, 2003, uma onda é extrema se sua altura excede 2.2 vezes a altura significativa do registro do qual ela é medida. Já diversos outros autores, e a

comunidade oceanográfica no geral, consideram que uma onda é extrema se sua altura excede duas vezes a altura significativa do estado de mar no qual ela ocorreu.

Sendo assim, para efeito de análise neste trabalho usaremos a definição $H_{ext} > 2H_{\frac{1}{3}}$, onde H_{ext} é a altura da onda extrema e $H_{\frac{1}{3}}$ é a altura significativa do registro.

Capítulo 4

Área de Estudo

4.1 Caracterização Geográfica

Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, uma ilha localizada na costa sul do Brasil, possuindo aproximadamente 80 km de distância entre o norte e o sul, na posição aproximada $27^{\circ}60'21''$ lat. sul e $48^{\circ} 34'53''$ long. oeste.

O ondógrafo utilizado para medições de onda tipo Datawell Waverider Mark II ficou fundeado de janeiro de 2002 à agosto de 2005 ao largo da Ilha de Santa Catarina, em frente a Praia da Armação, a uma distância da costa de cerca de 35 km, posição $27^{\circ}44'34''$ lat sul, $48^{\circ} 09'53''$ long oeste, num trecho com profundidade de 80 metros conforme mostrado na figura 4.1 abaixo:

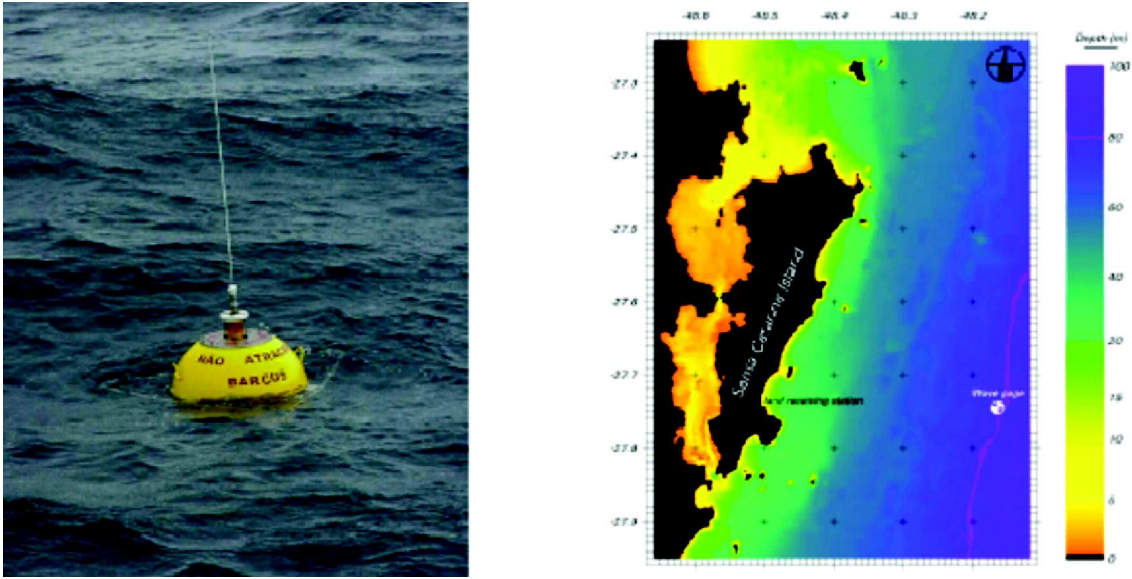


Figura 4.1: Localização do ondógrafo

4.2 Caracterização das Ondas

Análises dos parâmetros de onda ($T_p, \theta_p, H_{\frac{1}{3}}$) - que são o período de pico, a direção de pico e a altura significativa respectivamente - computados de hora em hora pela bóia waverider foram analisados em [18], mostrando que um padrão bimodal aparece em aproximadamente 32 por cento do tempo dos nossos registros.

Mares bimodais são caracterizados pela presença de um mar local, *sea*, estável com um sistema de *swell*, ou pela existência de diferentes sistemas de ondas relacionados à passagem de frente fria, [18].

Ambos, mares locais e *swell* são bem definidos na massa de dados apresentando as seguintes características:

- (i) Mares locais: 8 segundos de Leste com uma média de altura significativa de 1,25 metros;
- (ii) *Swell*: 12 segundos de Sul com uma altura significativa crescendo do verão até o inverno, estando $H_{\frac{1}{3}}$ na faixa de 1,25 à 2 metros.

Alturas de onda significativa maiores que 4 metros ocorrem em todas as estações do ano, embora com pouca frequência, [18].

Durante o outono e o inverno, condições de *swell* são mais frequentes do que de mares locais, *seas*. No verão existe um balanço entre esses dois estados e na primavera os mares locais, *seas*, são mais frequentes do que os *swells*, [18].

Capítulo 5

Metodologia

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização desta monografia.

A pesquisa iniciou-se com o estudo da teoria matemática envolvendo probabilidades, variáveis aleatórias, distribuição de variáveis aleatórias e um modelo matemático linear de estatística de ondas no oceano, que carrega consigo uma função de densidade de probabilidade característica, a função densidade de probabilidade de Rayleigh.

Sabendo da teoria matemática linear que rege a distribuição de alturas de ondas no oceano, a pesquisa passa para etapa de aplicação desta teoria a registros de ondas reais do oceano, medidas pelo ondógrafo Wave Rider Mark II, fundeado a 35 km ao largo da Ilha de Santa Catarina.

Os dados de ondas registrados pelo ondógrafo foram lidos por rotinas elaboradas em Matlab; esses passaram por um controle de qualidade antes de serem utilizados para busca de ondas extremas e para a observação da distribuição de alturas de ondas ao largo da Ilha de SC.

Elaboradas as rotinas para leitura dos registros, classificação dos dados, busca de ondas extremas e distribuição de alturas de ondas do oceano, essas foram aplicadas a registros do período de 16/01/2002 às 14:00 horas à 06/12/2002 às 13:36.

Feito isto, foi observado se a Distribuição de Rayleigh é um bom modelo matemático para representar a distribuição de alturas de ondas ao largo da Ilha de SC, para os casos de ondas individuais definidas pelo método zero-ascendente e zero-descendente.

Foi feita uma observação das medições de ondas extremas para cada caso de definição de onda, zero-ascendente e zero-descendente.

5.2 O Ondógrafo Wave Rider Mark II

As observações do estado do mar foram feitas através do ondógrafo direcional Datawell Wave Rider Mark II , ver figura 5.1 do Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC.

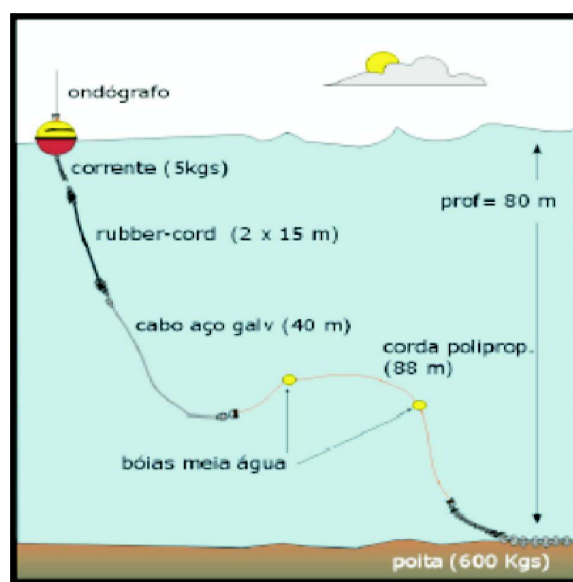


Figura 5.1: Ondógrafo e fundeio

O aparelho consiste de uma esfera de aço com 0.9 m de diâmetro e 250 kg de peso equipada com sensores capazes de medir as acelerações (componentes vertical e horizontais) da superfície do mar as quais permitem, após elaborado processamento, determinar as características do campo de ondas incluindo sua direção. A posição do

aparelho, medida através de um localizador GPS, e a temperatura da água também são monitoradas pelo instrumento sendo todos os dados transmitidos para terra via rádio com alcance de recepção de cerca de 50 km, [16], [18].

As medições do estado do mar foram transmitidas pelo ondógrafo para uma estação receptora montada no Laboratório de Peixes de Água Doce (LAPAD) da UFSC localizado na Praia da Armação - Florianópolis - que, por sua vez, as retransmitiu, via internet, para o LAHIMAR no campus da UFSC

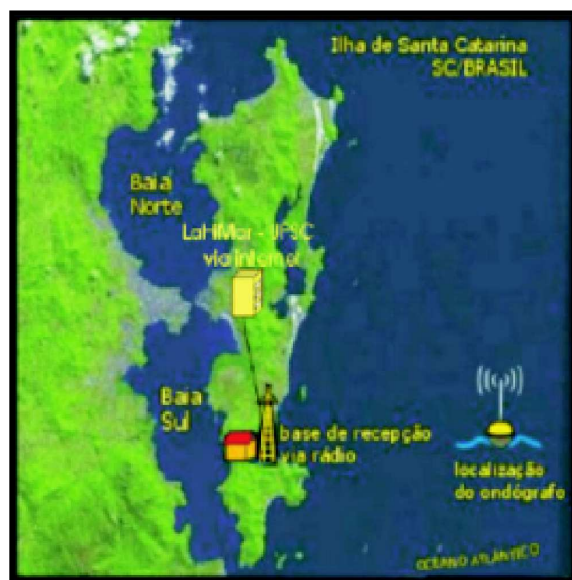


Figura 5.2: esquema de transmissão dos dados

5.3 Registro de Dados

Os dados de ondas analisados neste trabalho correspondem ao período das medições que se estende de 16/01/2002 às 14:00 horas à 06/12/2002 às 13:36.

A cada hora, o ondógrafo registrou 1.200 segundos (20 min) das séries de elevação do nível do mar η , e das inclinações ortogonais. A amostragem é feita com um intervalo de amostragem de 0,78 segundo (frequência amostral de 0,78 Hz). Estando

o ondógrafo a uma profundidade de 80 metros, observa-se que nesta profundidade ondas com comprimentos de onda menores que aproximadamente 160 metros estão em águas profundas. Pela teoria linear de ondas, o período de uma onda com 160 metros de comprimento seria de mais de 10 segundos. [18] confirma a presença de mares com período de 12 segundos, o que na teoria linear, equivaleria ondas com comprimento de 224 metros e, ondas com esse comprimento se propagando a uma profundidade de 80 metros estão na faixa de transição de águas profundas para águas intermediárias. Neste intervalo, as diferenças não são significativas se considerarmos que estamos em águas de profundidade intermediária ou profunda, sendo assim, é certo dizer que o ondógrafo está em águas profundas para maioria das ondas de gravidade por ele medida.

5.4 Método de análise

Foi feita uma aplicação da teoria linear de distribuição de alturas de ondas desenvolvida no capítulo 3 à dados de ondas registrados durante o ano de 2002.

A teoria de distribuição estatística de alturas de onda desenvolvida nesta monografia, a distribuição de Rayleigh, baseia-se em assumirmos que o espectro de onda contém uma única faixa estreita de frequências, mares monomodais, e que a energia da onda está sendo recebida de um grande número de fontes diferentes cujas fases são aleatórias, [12].

De acordo com estudos realizados pela equipe do LaHiMar [18], espectros bimodais estiveram presentes na nossa costa em 32 por cento do tempo durante o ano de 2002.

Goda, 1985, afirma que na maioria dos casos a distribuição de Rayleigh fornece uma boa aproximação para a distribuição de alturas de ondas individuais definidas para o método de zero ascendente e, isso é verdade não só para mares locais e swell individualmente mas também para o estado de mar local e swell combinados.

Segundo Romeo, 1999, que estudou a validade da distribuição de Rayleigh para

o caso de mares monomodais e bimodais, a distribuição ajusta-se bastante bem aos histogramas cujos espectros são monomodais, e a diferença encontrada para os histogramas de espectro bimodal é pequena. Dessa forma a distribuição de Rayleigh é válida para alturas de ondas em mares monomodais e bimodais.

Assim sendo, não foi feita uma análise espectral nos dados de ondas para identificação de mares bimodais e monomodais. Levamos em consideração que a distribuição de Rayleigh é válida para ambos os casos e nossa análise se restringiu somente a análise no domínio do tempo.

Foram identificadas alturas de ondas e ondas extremas para cada registro e, agrupados todos os registros de alturas de ondas do ano de 2002, foram testados os parâmetros que validam a adequabilidade da distribuição de Rayleigh para o período.

Isto foi feito para as duas definições de ondas individuais, zero- ascendente e zero- descendente.

5.4.1 Classificação dos dados

Os dados fornecidos pelo ondógrafo são processados em Matlab, fornecendo uma matriz com quatro colunas e o número de linhas pode variar dependendo de quantos pontos o ondógrafo conseguiu capturar naquela hora. A primeira coluna dessa matriz, denominada *status*, representa o quão confiável foi aquela medição, mensurado através dos seguintes códigos:

$$status \leq 1 = \textit{bom} \quad status > 1 = \textit{ruim}$$

[20].

Assim, para efeito de análise, consideramos que os registros teriam $erro1 = 0$ (ou seja, passariam por este primeiro teste de qualidade) se para todas as linhas da matriz, o *status* fosse menor ou igual a 1. Caso contrário, $erro1 = 1$.

Além disso, foram analisados os comprimentos dos registros, optamos por trabalhar com registros que continham vinte minutos completos de medições, ou seja, 1535

pontos. Dessa forma, os registros contém $erro2 = 0$ (passam pelo teste de qualidade 2) se possuem 1535 linhas, caso contrário, $erro2 = 1$.

A rotina elaborada em Matlab fornece um relatório especificando para cada registro quais tipos de erros neles estão contidos.

Os registros considerados inicialmente bons foram os que apresentaram $erro1 = erro2 = 0$, ou seja, os que passaram pelos dois testes de qualidade.

Os registros passaram por outro refinamento, foi elaborada uma subrotina que corrige eventuais erros de medições. Se o ondógrafo mediu algum ponto que é, em módulo, dez vezes maior que a média dos valores medidos pelo aparelho no registro, este é substituído por 0,1 se este ponto tem coordenada positiva ou por -0,1 se este ponto tem coordenada negativa. No caso do ondógrafo medir um ponto nulo, este é substituído pelo ponto medido anteriormente.

Depois da identificação das ondas extremas encontradas no período de estudo, essas foram plotadas em excel e analisadas uma a uma de forma visual com o intuito de averiguar a confiabilidade dos registros onde estas foram medidas.

Dos 7.203 registros do ano de 2002, foram utilizados para análise 5.833.

5.4.2 Análise no domínio do tempo

Para análise temporal, utilizou-se o método de cruzamento de zero-ascendente e o método de cruzamento de zero-descendente como técnicas para definir as ondas individuais. A descrição destes métodos é apresentada na Seção 3.2.

5.4.3 Identificação de alturas de ondas e ondas extremas

Com os dados já classificados, foi elaborada uma rotina em Matlab que mede, através do deslocamento vertical da superfície do oceano, as alturas das ondas presentes em cada registro e se nestes existem ondas extremas.

Utilizando os métodos zero-ascendente e zero-descendente para a definição de on-

das individuais no oceano e a relação $H_{ext} > 2H_{\frac{1}{3}}$ para definição de onda extrema, onde H_{ext} significa altura da onda extrema e $H_{\frac{1}{3}}$ é a altura significativa do registro, a rotina fornece as alturas das ondas, a altura significativa, a altura média e as alturas das ondas extremas de cada registro.

5.4.4 Distribuição de alturas de ondas

Nesta etapa do trabalho, os dados de alturas de ondas de todo período foram agrupados, as alturas foram ordenadas de forma decrescente e adimensionalizadas através da altura média.

Para a verificação da validade da Distribuição de Rayleigh para a massa de dados foi observado se a curva de Distribuição e o Histograma mostram boa coerência e foram testados os parâmetros, a partir da tabela de relação de H_p com H_{rms} , $H_{\frac{1}{3}} = 1.6H_1$ e $H_{\frac{1}{10}} = 2.0H_1$, onde H_1 é a altura média, $H_{\frac{1}{10}}$ é a média das altura do maior décimo de ondas do registro e $H_{\frac{1}{3}}$ é a altura significativa.

Foram comparados os resultados obtidos para cada diferente método de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Distribuição de alturas de ondas

6.1.1 Método zero-ascendente

Pelo método de definição de ondas individuais zero-ascendente, foi obtido um conjunto de 1.169.806 dados de ondas considerados estatisticamente independentes. Utilizando este método fez-se a distribuição de alturas de ondas, conforme descrito no capítulo 3, ao largo da Ilha de Santa Catarina durante o período de 16/01/2002 às 14:00 horas à 06/12/2002 às 13:36. A figura 6.1 mostra graficamente essa distribuição.

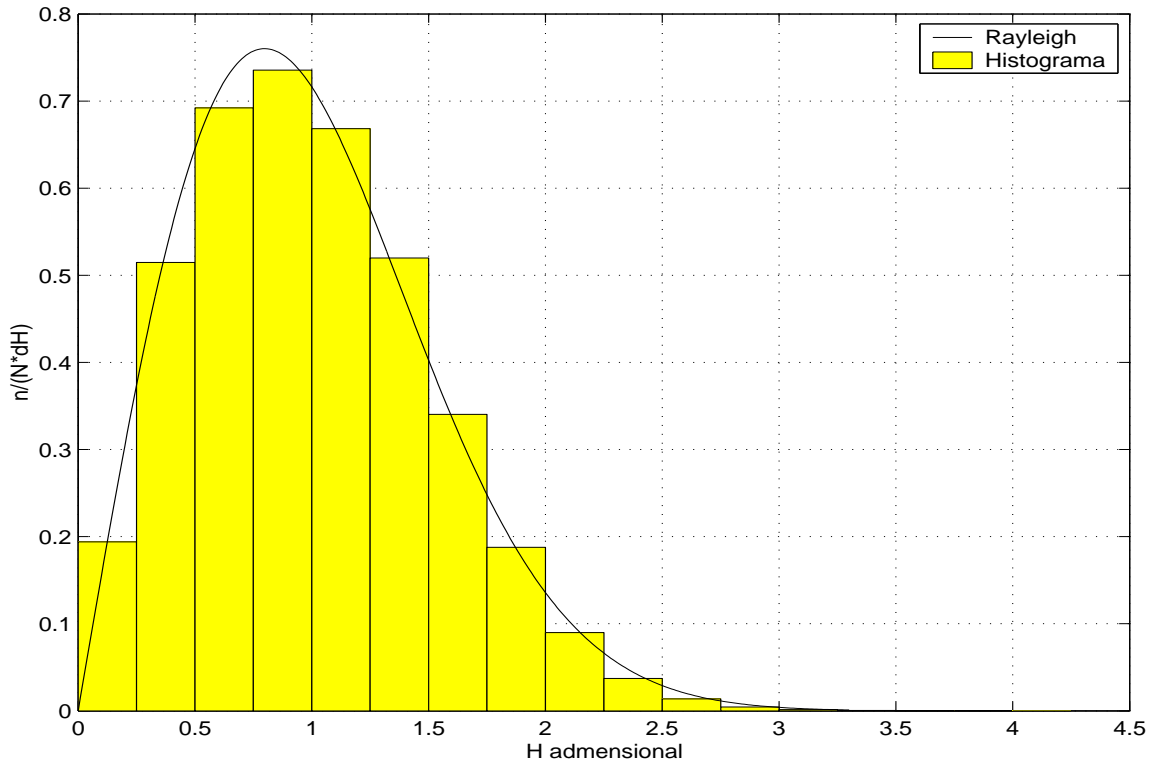


Figura 6.1: Distribuição de alturas de ondas utilizando o método zero-ascendente

As alturas de ondas adimensionalizadas estão representadas no eixo das abscissas, o eixo das ordenadas representa a densidade de frequência relativa, n representa o número de ocorrências no setor, N é o número total de ondas e ΔH é o intervalo de classe, utilizado 0,25.

A altura significativa anual foi de 1,58 metros , a altura $H_{\frac{1}{10}}$ foi de 1,98 e a altura média foi de 1,00 metro. Dessa forma, os parâmetros testados para verificação da adequabilidade da distribuição de Rayleigh à massa de dados resultaram

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.58H_1 \quad e \quad H_{\frac{1}{10}} = 1.98H_1$$

onde H_1 é a altura média, $H_{\frac{1}{10}}$ é a média das altura do maior décimo de ondas do registro e $H_{\frac{1}{3}}$ é a altura significativa.

A figura 6.2 mostra a relação existente entre as alturas médias e as alturas signi-

ficativas identificadas pelo método zero-ascendente, para a massa de dados analisada. O coeficiente angular da reta de regressão é 1.6.

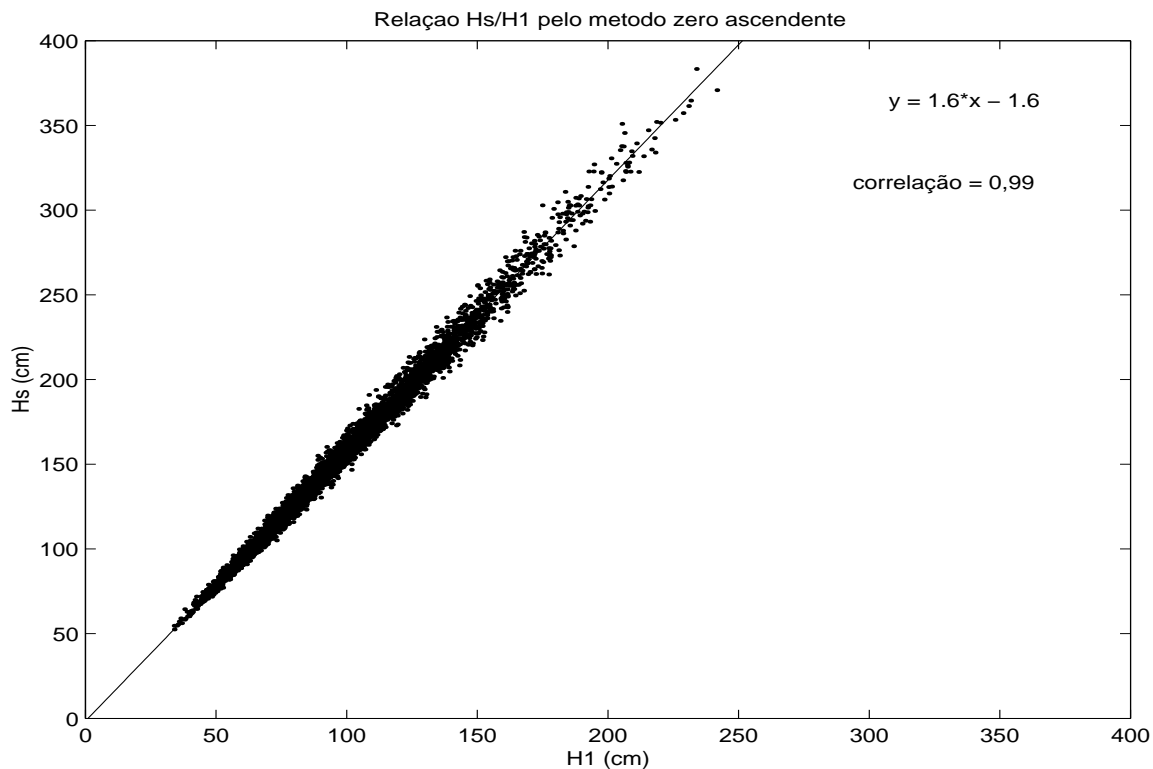


Figura 6.2: Relação entre as alturas significativas e alturas médias identificadas pelo método zero ascendente

Para o método zero-ascendente, onde foram encontradas 1.169.806 ondas no total a relação

$$H_{\frac{1}{N}} \approx \sqrt{\frac{\ln N}{2}} H_{\frac{1}{3}} \quad (6.1)$$

estima que a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ deverá apresentar, no máximo, a relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} \approx 2.6$.

Utilizando as relações $H_{\frac{1}{3}} = 1.416H_{rms}$ e

$$\frac{n}{N} = e^{-\left(\frac{\hat{H}}{H_{rms}}\right)^2} \quad (6.2)$$

para o método de definição de ondas individuais zero-ascendente estima-se que o número de ondas extremas encontradas, ou seja $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} > 2$, será de aproximadamente 385 ondas.

6.1.2 Método zero-descendente

Utilizando o método zero-descendente para definição de altura de ondas individuais, foram considerados 1.169.725 dados de alturas de ondas independentes. A figura 6.3 mostra o histograma e distribuição de probabilidade de alturas de ondas adimensionalizadas para o mesmo período utilizado no método zero-ascendente.

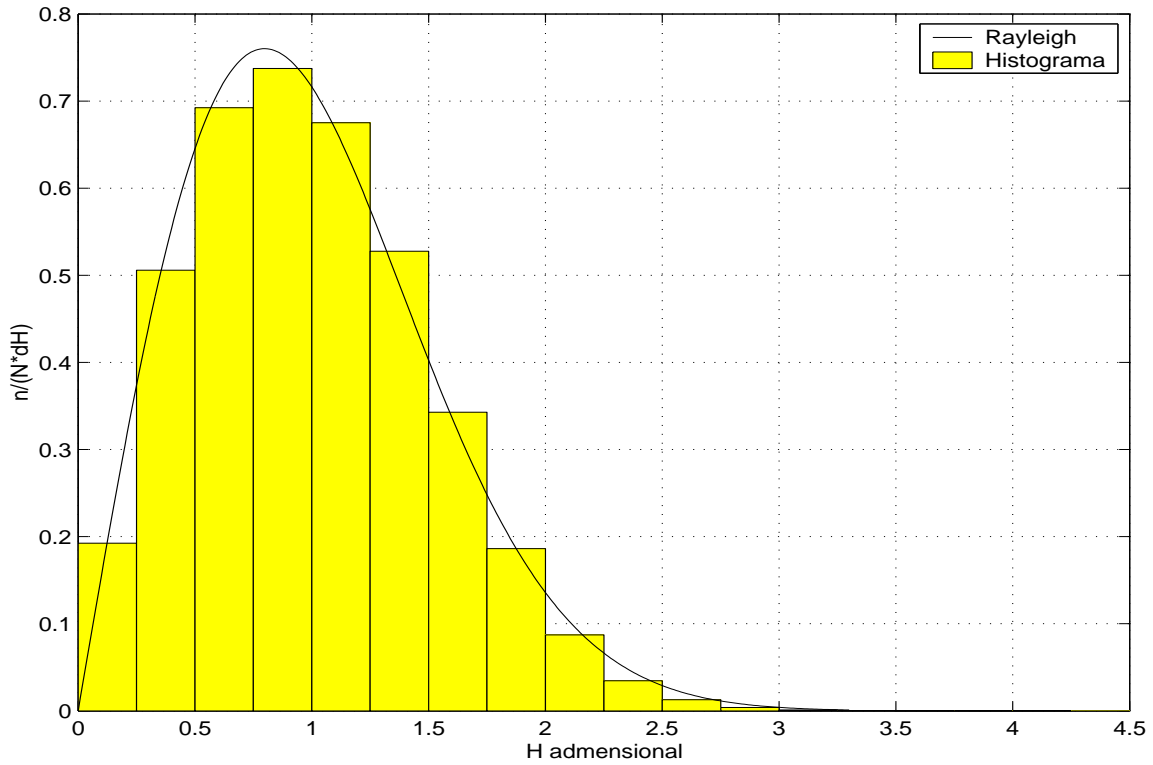


Figura 6.3: Distribuição de alturas de ondas identificadas pelo método zero-descendente

A altura significativa anual foi de 1.57 metros , a altura $H_{\frac{1}{10}}$ foi de 1,96 metros e a altura média foi de 1,00 metro. Dessa forma, os parâmetros testados para verificação da adequabilidade da distribuição de Rayleigh à massa de dados resultaram

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.57H_1 \quad e \quad H_{\frac{1}{10}} = 1.96H_1$$

onde H_1 é a altura média, $H_{\frac{1}{10}}$ é a média das altura do maior décimo de ondas do registro e $H_{\frac{1}{3}}$ é a altura significativa.

A figura 6.4 mostra a relação existente entre as alturas médias e as alturas significativas identificadas pelo método zero-descendente, para a massa de dados analisada. O coeficiente angular da reta de regressão é 1.6.

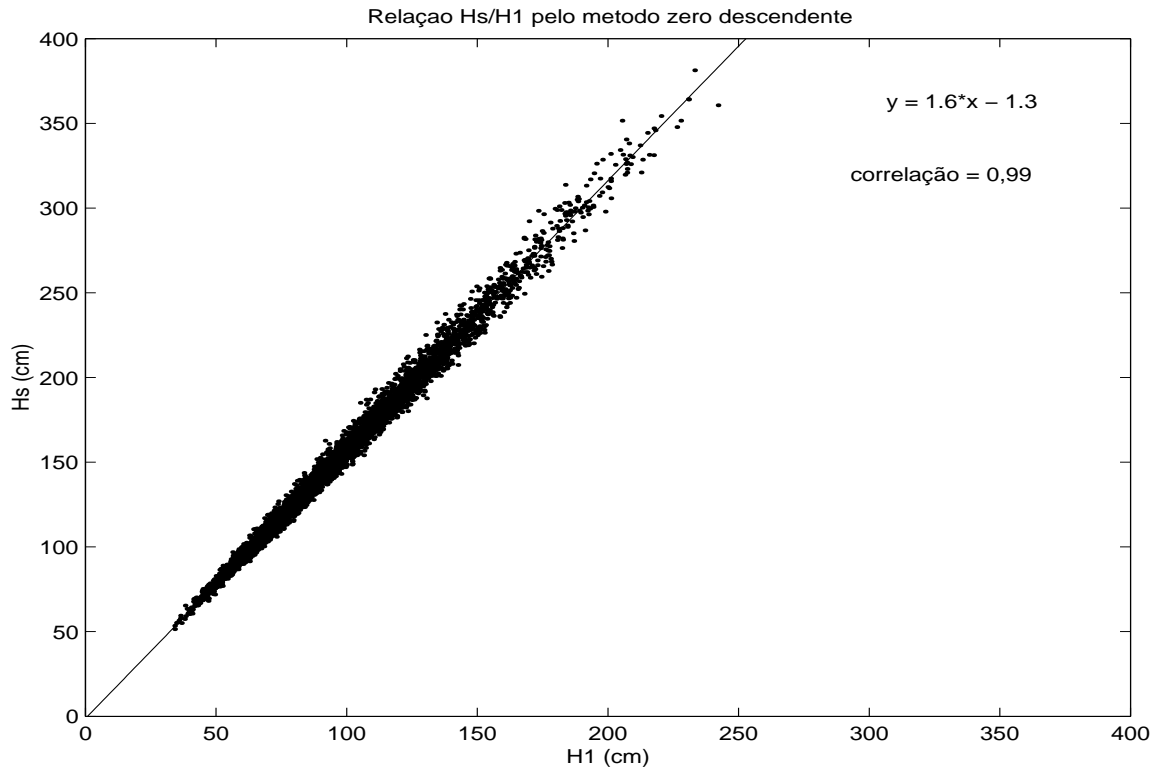


Figura 6.4: Relação entre as alturas significativas e alturas médias identificadas pelo método zero descendente

Para o método zero-descendente a relação (6.1) estima que a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ deverá apresentar, no máximo, a relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} \approx 2.6$.

Utilizando as relações $H_{\frac{1}{3}} = 1.416H_{rms}$ e (6.2) para o método de definição de ondas individuais zero-descendente estima-se que o número de ondas extremas encontradas, ou seja $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} > 2$, será de aproximadamente 385 ondas.

6.2 Ondas Extremas

6.2.1 Método zero-ascendente

Através do método zero-ascendente de definição de ondas individuais foram obtidas 210 ondas extremas durante o período de estudo. A maior onda extrema, com 6,55 metros, foi registrada no dia 28/07/2002 às 10:00 a.m., foi a 59^a onda a ser medida num registro de 160 ondas com altura significativa de 3,26 metros, obtendo assim a relação $H_{ext} = 2,00H_{\frac{1}{3}}$. Nas figuras 6.5 e 6.6 encontram-se, respectivamente, os plots do deslocamento vertical da superfície do oceano e das alturas de ondas identificadas pelo método zero-ascendente, do registro onde encontra-se esta onda.

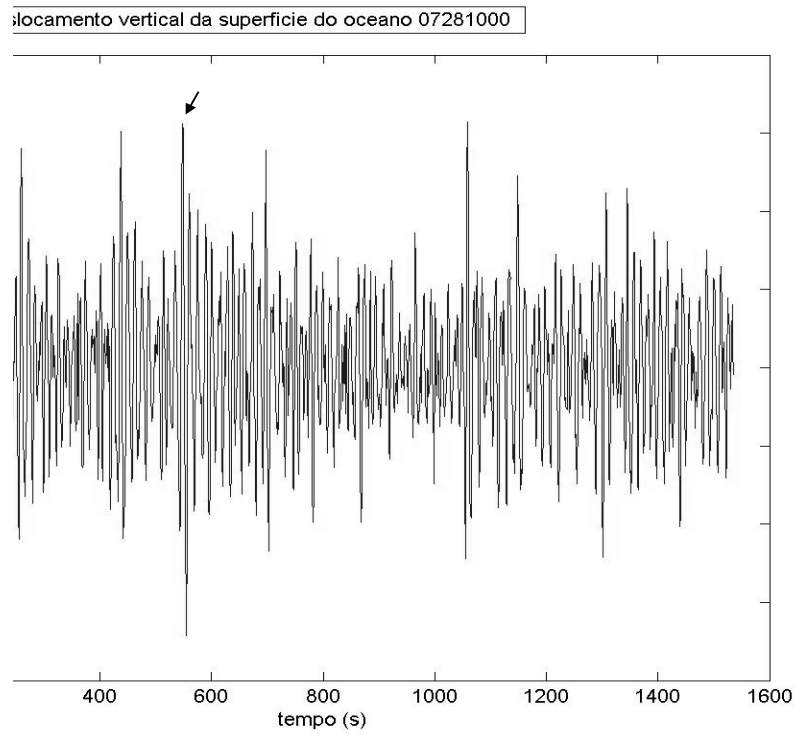


Figura 6.5: Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 28/07/2002 às 10:00 am

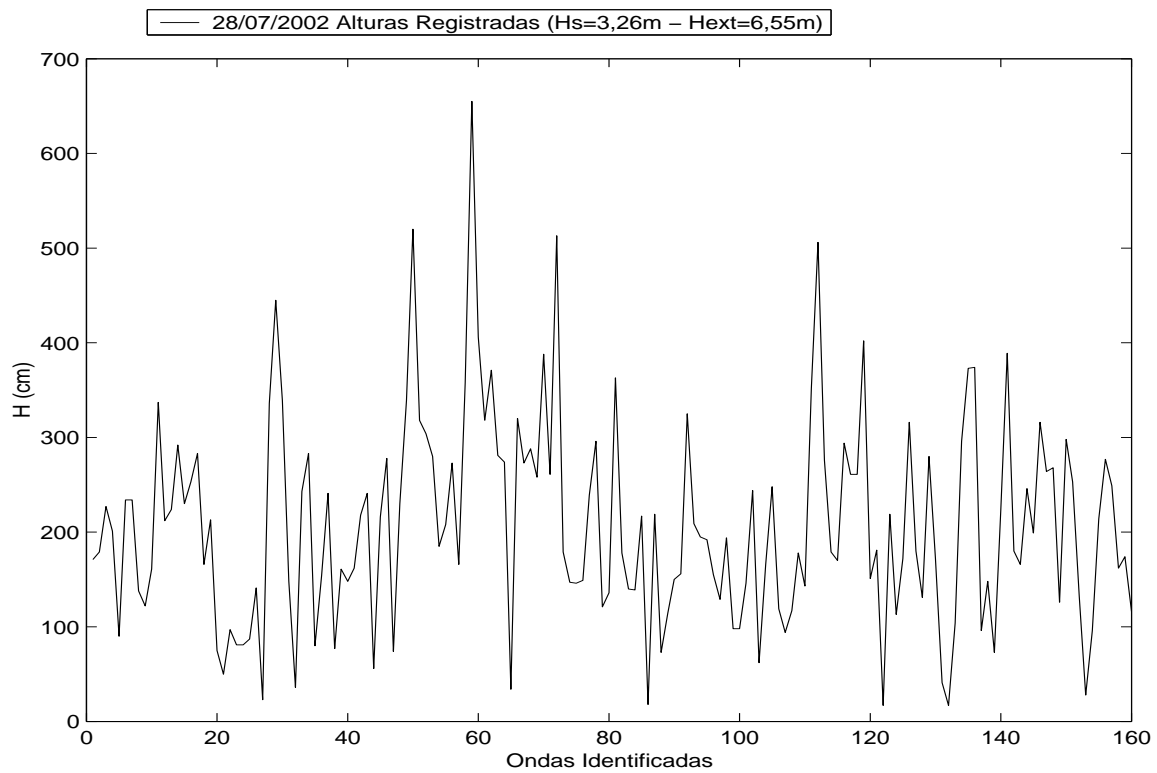


Figura 6.6: Gráfico das alturas de ondas medidas em 28/07/2002 às 10:00 a.m. identificadas pelo método zero-ascendente

Com a intenção de verificar a confiabilidade dessa medição, foi feito um plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método de definição de ondas individuais zero-ascendente, veja figura 6.7

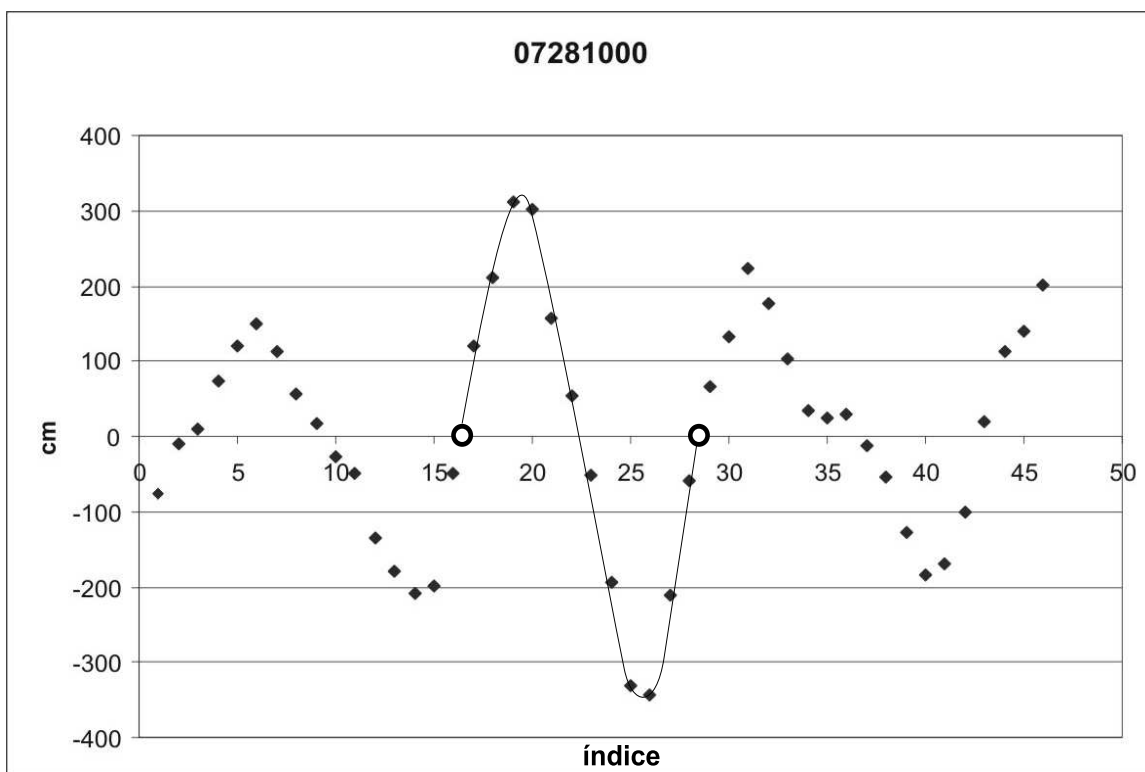


Figura 6.7: Plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método zero-ascendente em 28/07/2002 às 10:00 a.m.

Das ondas extremas identificadas pelo método de definição de ondas individuais zero-ascendente, a que mostrou maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ ocorreu no dia 07/04/2002 às 10:00 a.m., com 3,28m num registro de altura significativa de 1,31m, dessa forma $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} = 2,49$. O registro no qual essa onda foi identificada mediu 190 ondas num intervalo de tempo de 20 minutos. Abaixo seguem, respectivamente, os plots da elevação da superfície do oceano, 6.8, e das alturas identificadas, 6.9, no registro onde essa onda extrema foi medida.

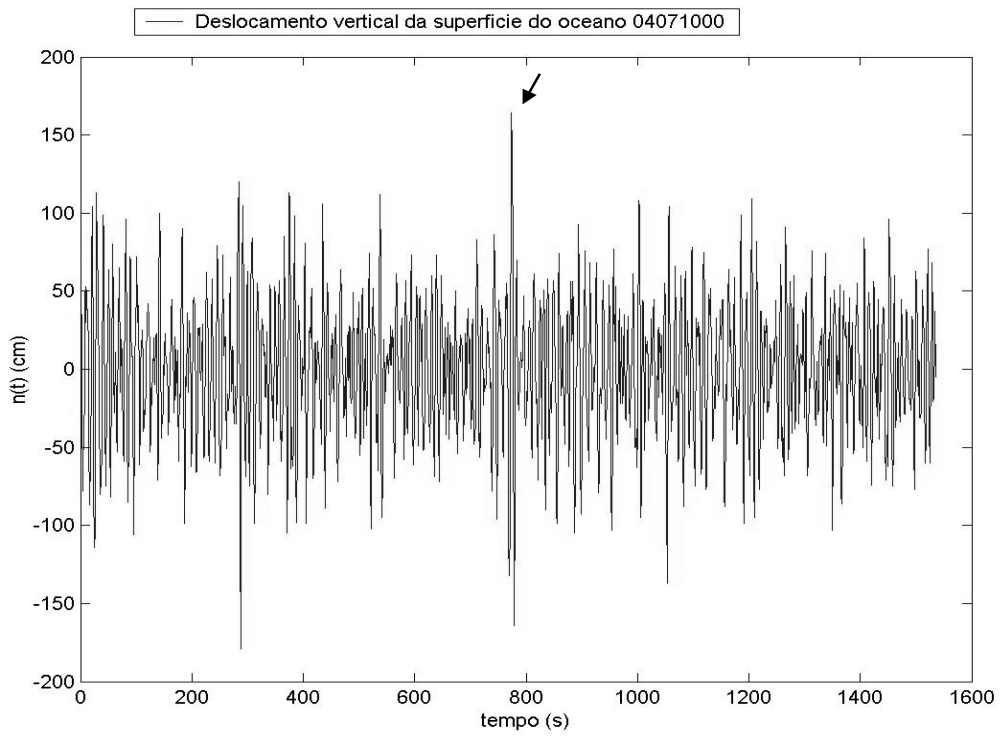


Figura 6.8: Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 07/04/2002 às 10:00 a.m.

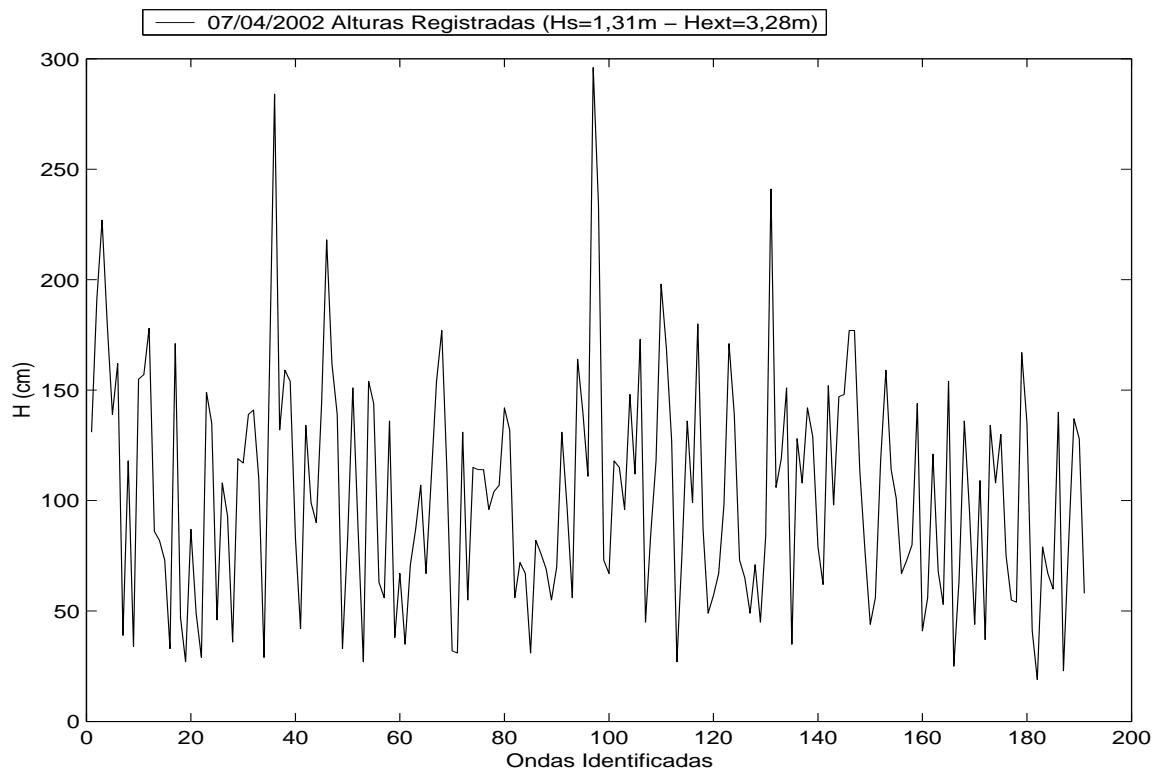


Figura 6.9: Gráfico das alturas de ondas medidas em 07/04/2002 às 10:00 a.m. identificadas pelo método zero-ascendente

Com a intenção de verificar a confiabilidade dessa medição, foi feito um plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método de definição de ondas individuais zero ascendente, veja figura 6.10

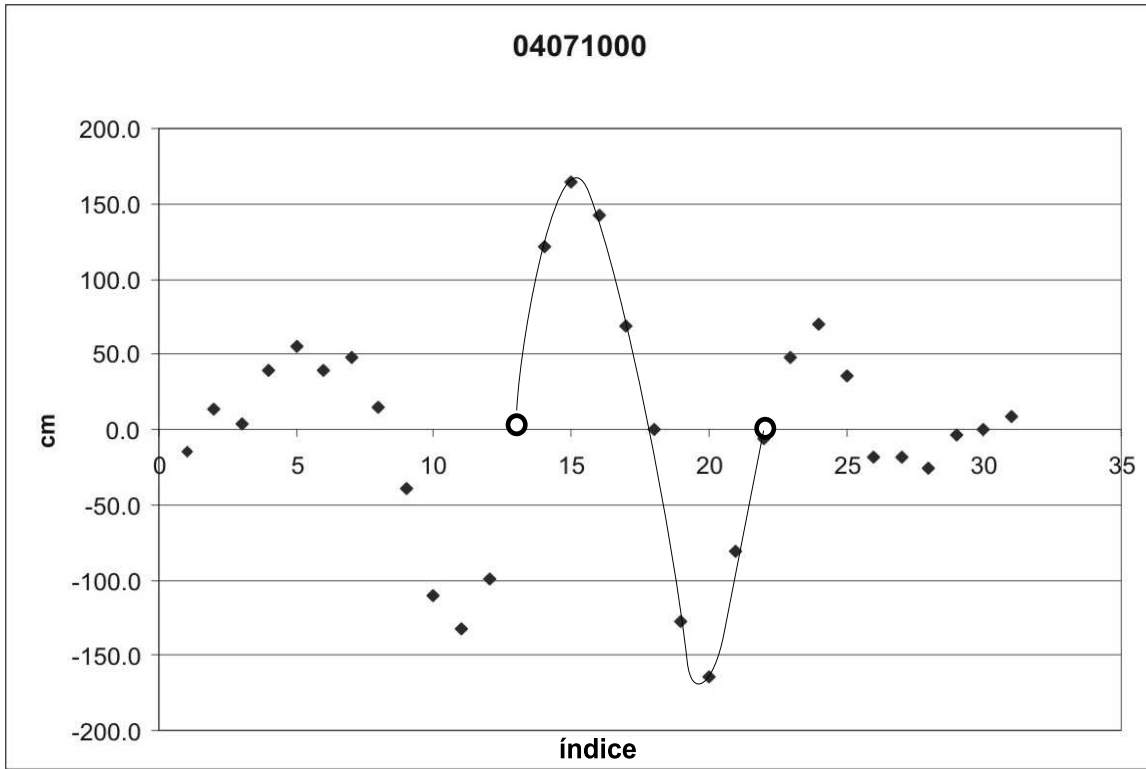


Figura 6.10: Plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método zero-ascendente em 07/04/2002 às 10:00 a.m.

A figura 6.11 mostra a relação existente entre as alturas das ondas extremas - identificadas pelo método zero ascendente - e a altura significativa dos registros nos quais essas ondas foram medidas. O valor do coeficiente angular da reta de regressão é 2.1.

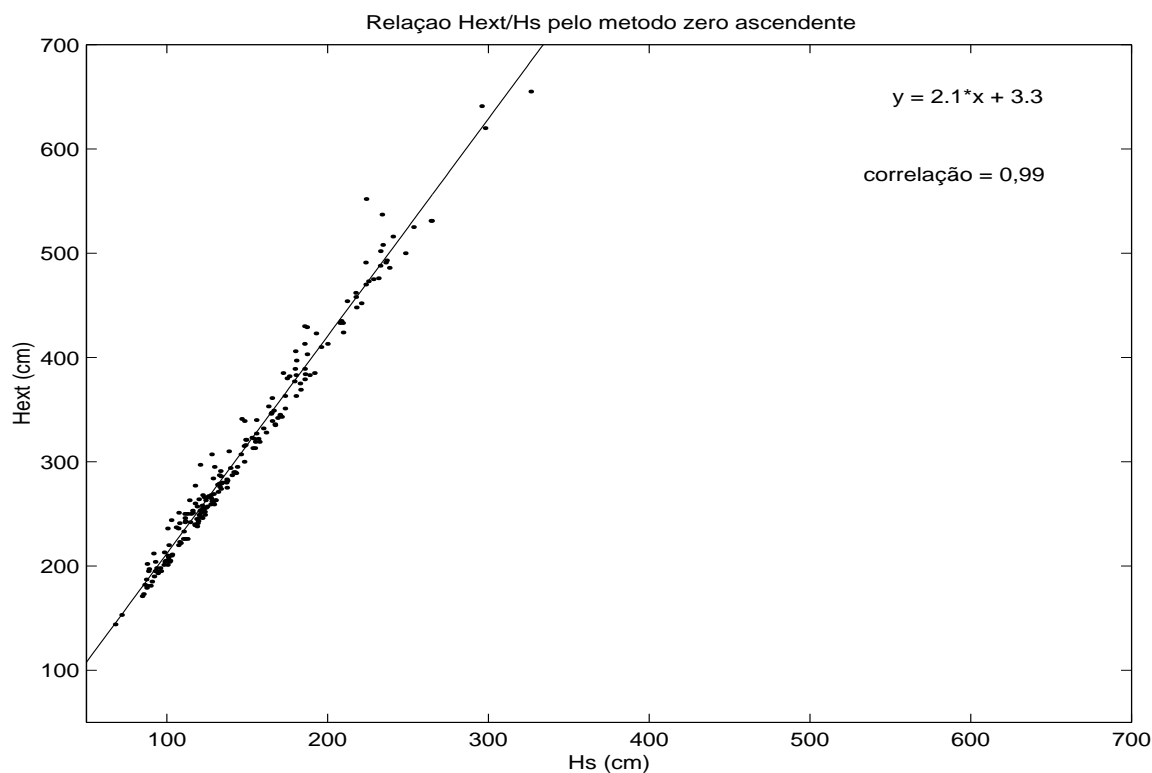


Figura 6.11: Relação entre as alturas extremas e alturas significativas identificadas pelo método zero ascendente

Das ondas extremas obtidas, 9,05% são da ordem de um metro , 49,05% são da ordem de dois metros, 23,80% são da ordem de três metros, 12,38% são da ordem de 4 metros, 4,28% são da ordem de 5 metros e 1,43% são da ordem de 6 metros. A tabela abaixo mostra as medições de ondas extremas para os registros onde pelo método de definição de ondas individuais zero-ascendente esse fenômeno foi identificado.

Na primeira coluna encontra-se a data de registro da onda extrema e a hora em que a bóia começou a registrar as elevações da superfície do oceano (os dois primeiros números se referem ao mês, o segundo par de números se referem ao dia e os quatro últimos números se referem a hora), a segunda coluna é a posição de medição da onda extrema naquele registro, a terceira coluna é a altura da onda extrema, a quarta coluna é a altura significativa do registro onde essa onda foi identificada e a quinta

coluna é a relação altura da onda extrema com a altura significativa do registro na qual essa onda foi medida.

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
01202300	128	255	122,35	2,08
01212000	49	244	102,70	2,38
01231400	140	242	114,55	2,11
01292200	185	144	67,90	2,12
01311800	154	242	111,26	2,18
02030400	133	525	253,43	2,07
02040900	94	641	295,82	2,17
02100000	92	262	127,97	2,05
02102200	138	237	105,78	2,24
02122000	150	201	98,11	2,05
02130300	181	262	128,81	2,03
02130900	163	290	142,29	2,04
02151000	86	173	85,46	2,02
02151400	124	208	100,91	2,06
02161300	29	226	111,34	2,03
02201800	171	268	127,31	2,11
02210300	5	249	119,97	2,08
02210700	208	339	148,22	2,29
02211500	183	310	138,53	2,24
02260200	5	339	165,46	2,05
02262200	86	249	123,56	2,02
02270200	215	295	129,51	2,28
02270700	124	260	117,48	2,21
02272000	9	258	121,86	2,12
02280000	131	257	125,09	2,05
3020200	35	213	98,42	2,16
03021100	136	384	185,95	2,07

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
03030300	80	458	217,55	2,11
03040900	174	295	143,80	2,05
03050300	101	246	111,17	2,21
03051500	49	205	101,94	2,01
03082300	147	187	87,23	2,14
03090900	29	179	87,47	2,05
03101900	243	250	112,81	2,22
03111500	53	226	112,81	2,00
03112100	197	267	125,95	2,12
03120930	30	204	98,75	2,07
03140400	140	257	118,69	2,17
03160500	108	251	107,36	2,34
03161500	131	205	101,67	2,02
03180400	199	185	90,77	2,04
03190400	9	182	86,28	2,11
03250500	112	287	140,46	2,04
03251000	34	271	131,89	2,05
03260100	21	210	102,94	2,04
03270100	32	220	107,25	2,05
03271100	155	341	146,59	2,33
04020000	104	369	183,20	2,01
04020200	144	382	176,20	2,17
04022300	61	343	171,37	2,00
04040200	149	307	146,02	2,10
04052300	194	291	133,27	2,18
04071000	97	328	131,70	2,49
04081500	37	433	209,37	2,07

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
04091700	21	321	149,32	2,15
04092100	87	327	155,59	2,10
04112100	170	278	131,45	2,11
04132300	70	284	128,74	2,21
04162100	102	319	157,58	2,02
04181300	78	363	173,53	2,09
04191800	71	389	179,73	2,16
04200300	107	280	137,01	2,04
04241300	159	297	120,69	2,46
04242000	138	222	108,55	2,05
04251200	35	181	87,53	2,07
04252300	151	256	124,33	2,06
04261300	9	253	116,00	2,18
04270500	170	377	179,30	2,10
04270900	140	470	223,68	2,10
04281200	45	353	163,16	2,16
04281600	174	319	154,98	2,06
04301200	234	351	173,47	2,02
05010600	32	313	153,44	2,04
05031700	152	345	170,33	2,03
05032100	202	279	132,64	2,10
05050900	41	198	95,82	2,07
05070800	105	283	137,19	2,06
05072300	76	269	129,13	2,08
05080200	20	263	124,14	2,12
05080600	140	238	118,70	2,01
05121900	201	197	88,91	2,22

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
05141100	87	211	103,19	2,04
05160700	29	233	110,49	2,11
05180700	128	322	156,86	2,05
05181500	31	423	192,81	2,19
05230100	157	452	220,90	2,05
05230700	18	383	180,22	2,13
05241300	189	380	174,71	2,18
05251000	104	347	165,17	2,10
05251400	79	276	132,82	2,08
05261900	120	294	139,49	2,11
05271700	107	335	167,25	2,00
05280400	12	427	173,79	2,46
05290500	237	220	101,16	2,17
05291000	72	204	101,70	2,01
05310500	197	277	117,50	2,36
05311400	24	287	132,60	2,16
06040000	114	241	119,08	2,02
06050600	139	205	101,29	2,02
06070000	50	322	154,26	2,09
06070200	138	307	127,82	2,40
06070400	105	246	122,05	2,02
06100500	88	236	100,41	2,35
06121800	202	552	224,01	2,46
06170600	21	346	164,69	2,10
06191700	104	266	125,20	2,12
06191800	15	274	133,54	2,05
06192000	52	321	148,92	2,16

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
06202000	98	223	107,92	2,07
06262200	72	332	160,00	2,08
06270800	73	240	117,25	2,05
06270800	74	241	117,25	2,06
06290700	50	171	84,65	2,02
06301900	156	246	119,72	2,05
07010500	184	323	152,82	2,11
07051600	46	210	100,53	2,09
07061700	17	259	129,32	2,00
07071300	156	204	92,79	2,20
07091300	99	493	236,66	2,08
07101800	102	375	182,78	2,05
07180500	19	268	122,24	2,19
07201100	76	279	133,63	2,09
07210600	29	300	148,10	2,03
07210900	148	316	148,81	2,12
07222000	87	508	234,25	2,17
07231500	105	397	180,52	2,20
07250000	150	241	107,87	2,23
07260300	51	475	228,48	2,08
07281000	59	655	326,43	2,01
07300600	30	491	223,64	2,20
07310300	200	313	154,75	2,02
07311600	161	344	170,28	2,02
08061400	54	195	93,41	2,09
08080100	35	251	121,04	2,07
08082300	82	263	130,16	2,02

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
08110500	97	424	209,69	2,02
08110700	91	435	208,48	2,09
08111000	137	410	195,93	2,09
08190600	158	413	199,93	2,07
08200700	31	502	232,88	2,16
08210500	29	385	191,80	2,01
08220800	162	389	185,70	2,09
08232200	167	290	141,60	2,05
08251300	18	263	114,08	2,31
08260000	93	239	117,37	2,04
08280200	74	226	110,27	2,05
08310100	26	500	248,35	2,01
08310700	34	473	225,46	2,10
09010900	154	531	264,29	2,01
09011300	101	488	232,72	2,10
09030300	31	620	297,95	2,08
09051500	52	245	118,49	2,07
09062000	58	259	127,19	2,04
09132000	110	454	212,09	2,14
09150600	101	379	185,71	2,04
09151700	65	476	231,58	2,06
09171400	144	342	168,83	2,03
09182200	1	486	238,36	2,04
09212300	18	537	233,76	2,30
09220900	92	406	179,95	2,26
09251000	145	265	127,41	2,08
09261700	282	198	93,64	2,11

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
09280700	119	153	71,85	2,13
09291100	180	251	116,11	2,16
09291800	223	253	120,63	2,10
09291900	225	250	114,99	2,17
10020100	18	181	89,87	2,01
10021900	60	255	123,08	2,07
10022200	191	289	143,02	2,02
10032000	212	281	137,12	2,05
10070300	64	236	107,16	2,20
10070500	245	250	111,11	2,25
10082300	45	264	119,90	2,20
10112300	85	315	147,95	2,13
10120800	175	247	121,27	2,04
10121600	174	252	123,52	2,04
10132100	27	201	100,41	2,00
10140900	52	195	96,32	2,02
10152200	170	212	91,72	2,31
10152300	170	205	99,27	2,07
10171200	188	531	264,79	2,01
10200700	149	286	133,62	2,14
10210100	157	363	180,30	2,01
10261100	184	263	130,23	2,02
10261400	83	275	137,35	2,00
10261900	177	280	134,40	2,08
10290000	136	253	121,15	2,09
10310800	20	516	240,54	2,15
11011000	71	448	217,89	2,06

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
11012000	176	413	185,64	2,22
11020500	25	383	188,77	2,03
11072300	46	385	172,23	2,24
11090100	219	340	155,61	2,18
11100800	61	491	236,15	2,08
11100900	89	462	217,38	2,13
11120500	7	430	185,65	2,32
11130400	109	336	167,12	2,01
11121900	178	243	119,43	2,03
11141100	120	190	92,11	2,06
11180900	241	202	87,72	2,30
11201800	268	243	111,48	2,18
11211300	207	282	137,60	2,05
11211900	88	403	187,14	2,15
11221900	185	433	207,62	2,09
11222000	177	429	187,01	2,29
11241300	58	195	88,58	2,20
11241400	126	195	92,60	2,11
11241500	181	193	94,30	2,05
11271100	67	349	166,40	2,10
11272000	86	266	123,11	2,16
12030500	85	361	165,37	2,18

A figura 6.12 abaixo mostra um gráfico mostrando a ocorrência das ondas extremas, identificadas pelo método zero ascendente, em relação aos meses do ano de 2002.

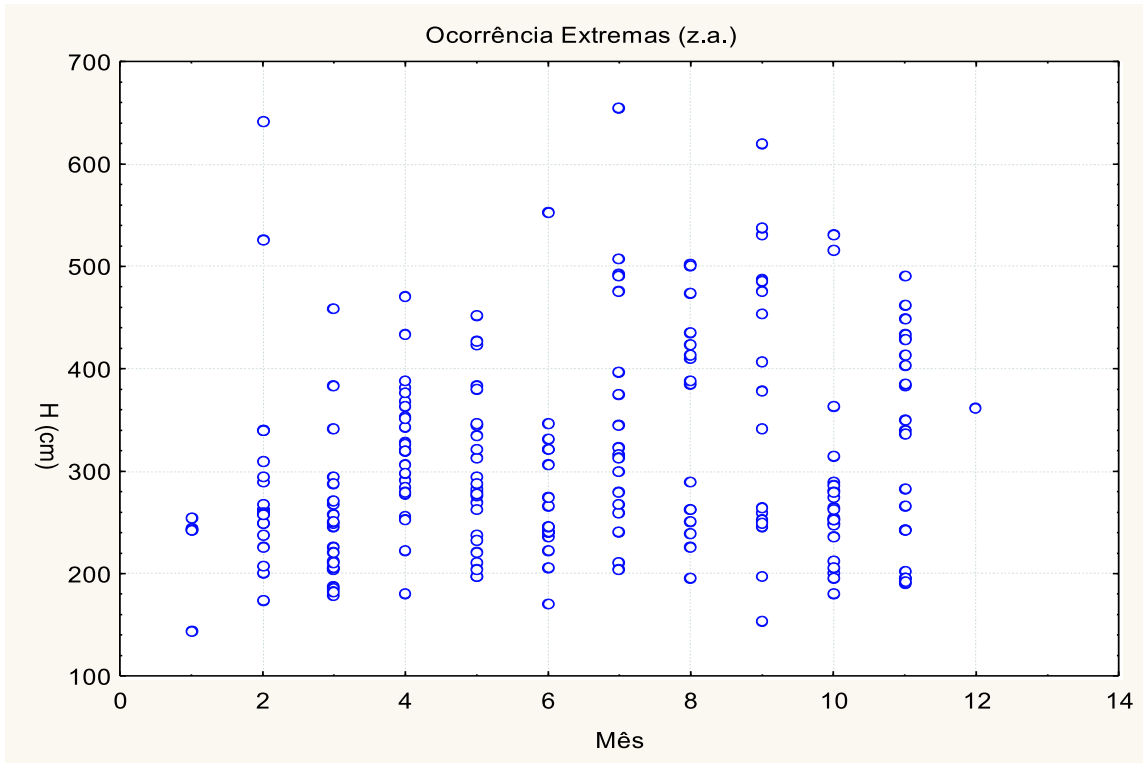


Figura 6.12: Gráfico de ocorrência de ondas extremas identificadas pelo método zero ascendente em relação aos meses

6.2.2 Método zero-descendente

Através do método zero-descendente de definição de ondas individuais foram obtidas 140 ondas extremas durante o período de estudo. A maior onda extrema foi registrada no dia 28/07/2002 às 17:00 p.m., foi a 140ª a ser medida com 5,68 metros de altura, num registro de 168 ondas com altura significativa de 2,71 metros, obtendo assim a relação $H_{ext} = 2,09H_{\frac{1}{3}}$. Nas figuras 6.13 e 6.14 encontram-se, respectivamente, os plots do deslocamento vertical da superfície do oceano e das alturas de ondas identificadas pelo método zero-descendente, do registro onde encontra-se esta onda.

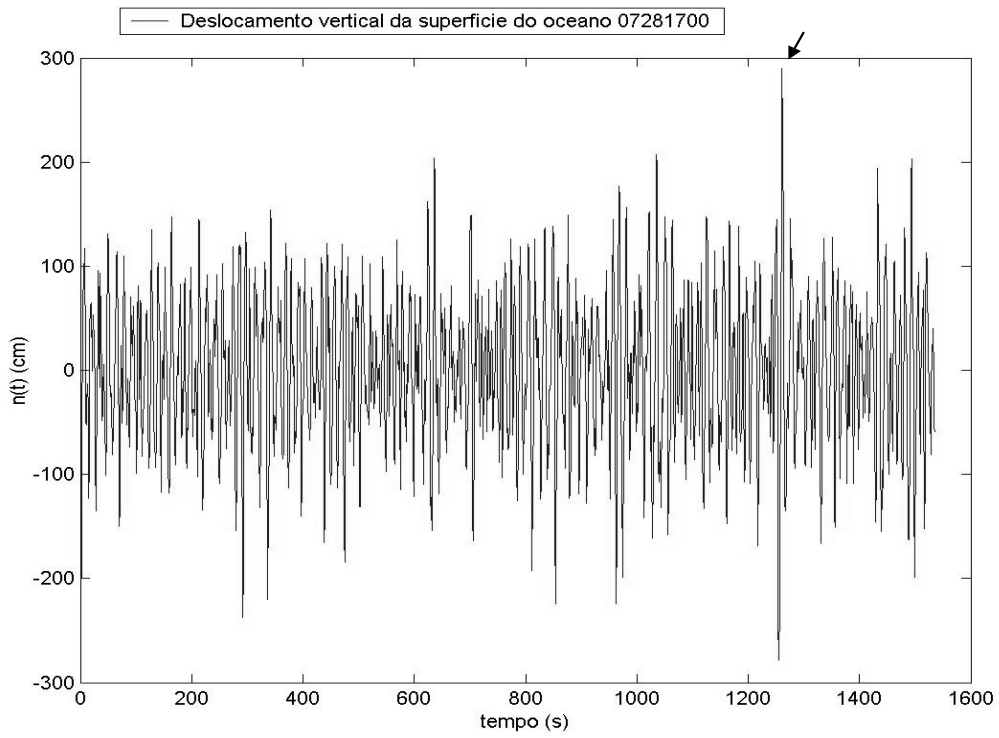


Figura 6.13: Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 28/07/2002 às 17:00 p.m.

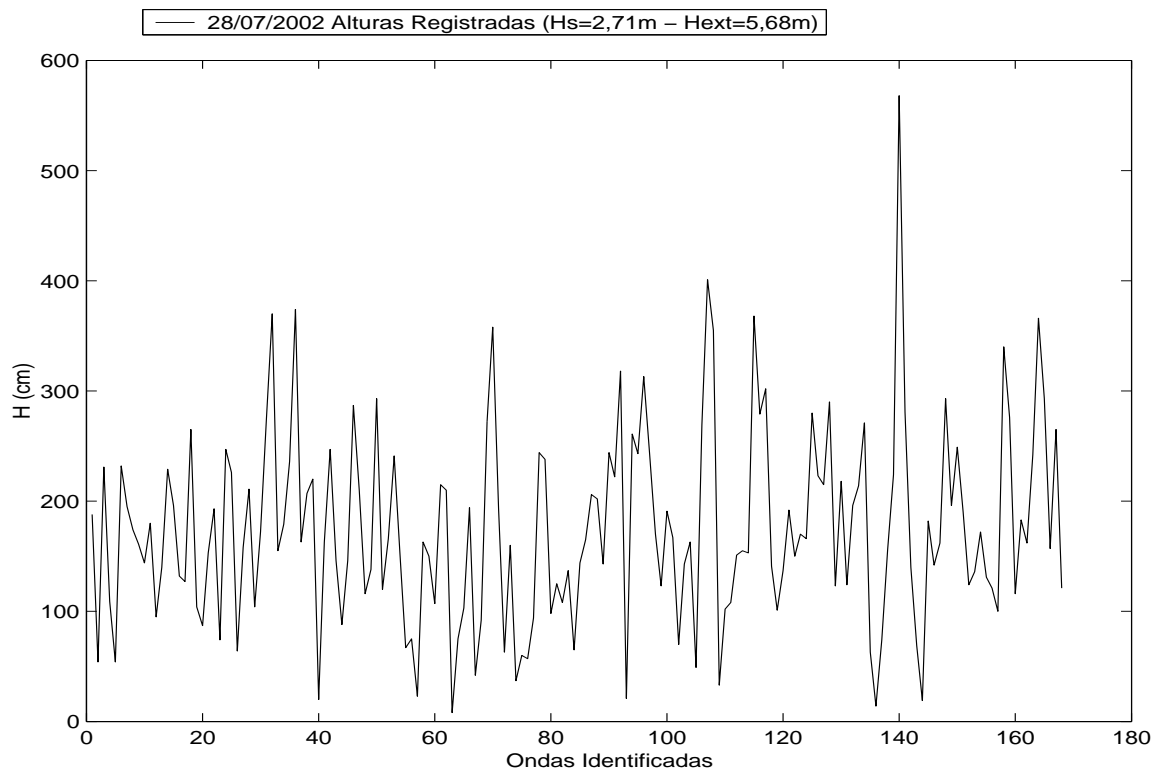


Figura 6.14: Gráfico das alturas de ondas identificadas no registro do dia 28/07/2002 às 17:00 p.m. pelo método zero-descendente

Com a intenção de verificar a confiabilidade dessa medição, foi feito um plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método de definição de ondas individuais zero-descendente, veja figura 6.15

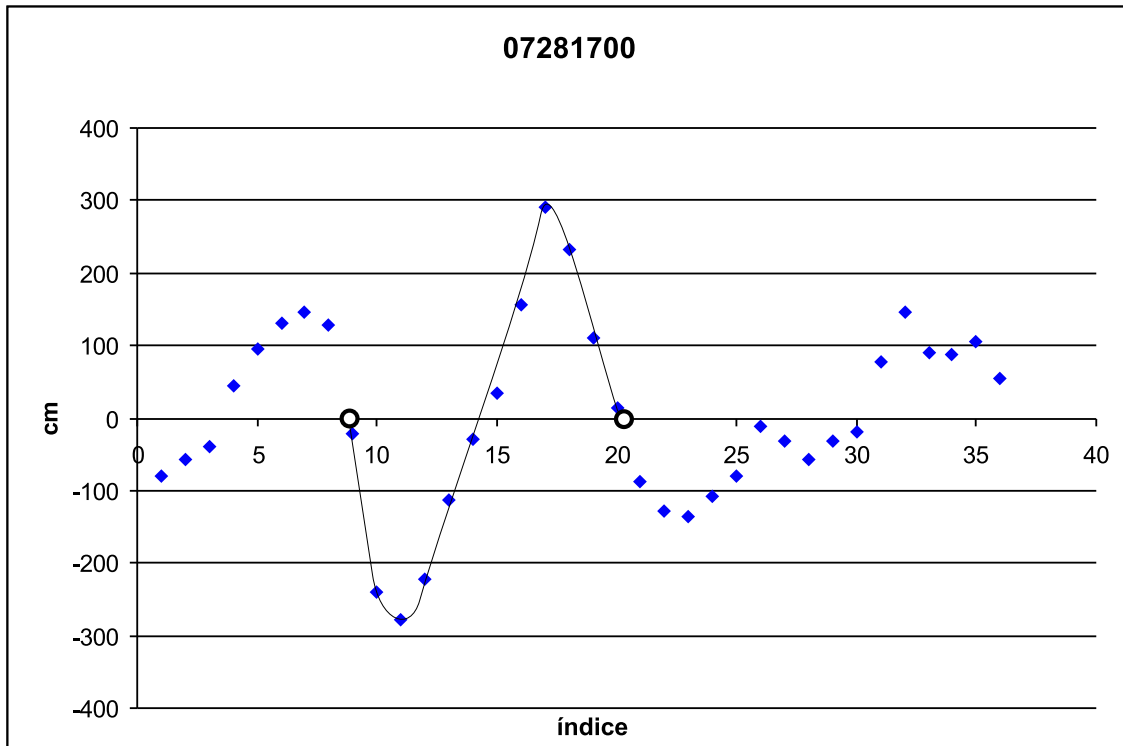


Figura 6.15: Plot focando a maior onda extrema encontrada pelo método zero-descendente em 28/07/2002 às 17:00 p.m.

Das ondas extremas identificadas pelo método de definição de ondas individuais zero-descendente, a que mostrou maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ ocorreu no dia 19/06/2002 às 20:00 p.m., com 3,75 m num registro de altura significativa de 1,49 m, dessa forma $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} = 2,50$. O registro no qual essa onda foi identificada mediu 182 ondas num intervalo de tempo de 20 minutos. Abaixo seguem, respectivamente, os plots da elevação da superfície do oceano, 6.16, e das alturas identificadas, 6.17, no registro onde essa onda extrema foi medida.

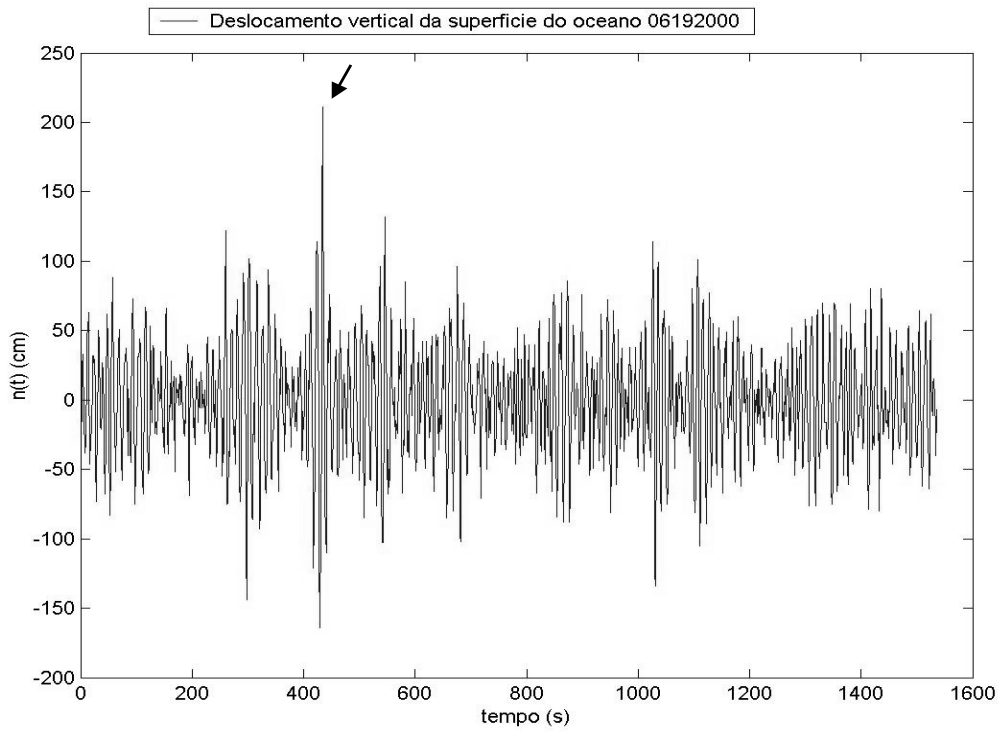


Figura 6.16: Plot do deslocamento vertical da superfície do oceano do registro 19/06/2002 às 20:00 p.m.

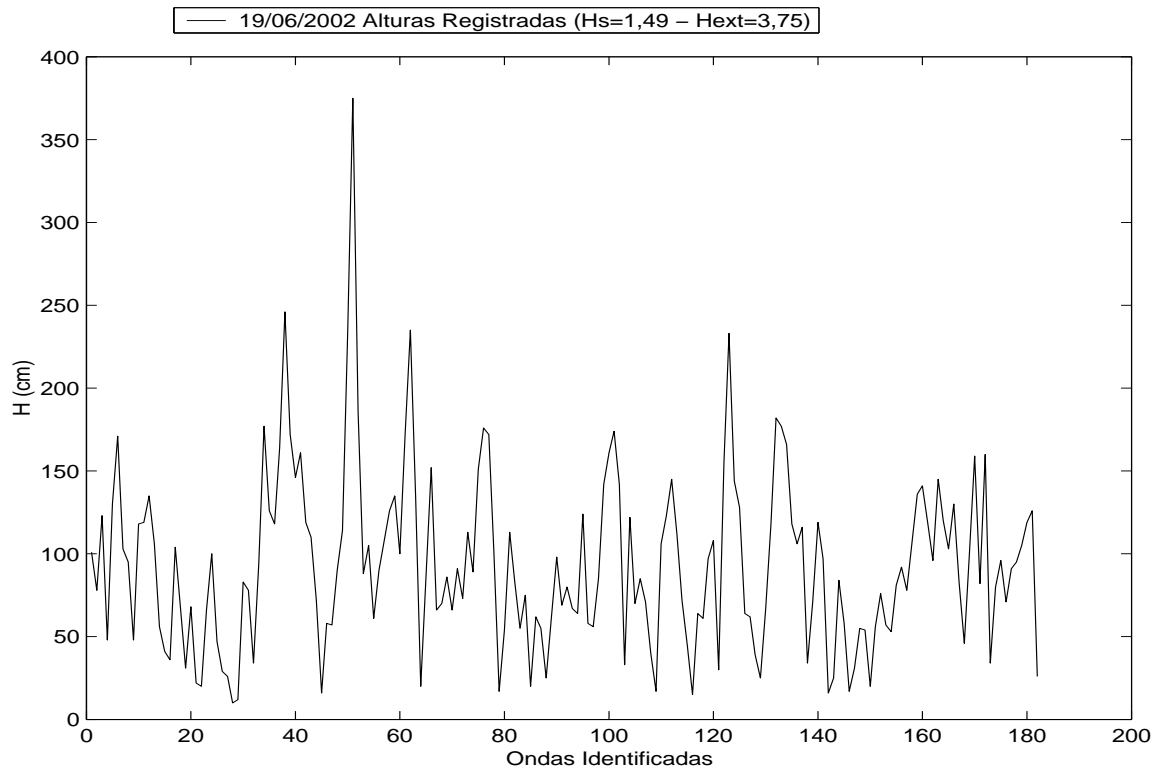


Figura 6.17: Gráfico das alturas de ondas medidas em 19/06/2002 às 20:00 p.m. identificadas pelo método zero-descendente

Com a intenção de verificar a confiabilidade dessa medição, foi feito um plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método de definição de ondas individuais zero-descendente, veja figura 6.18

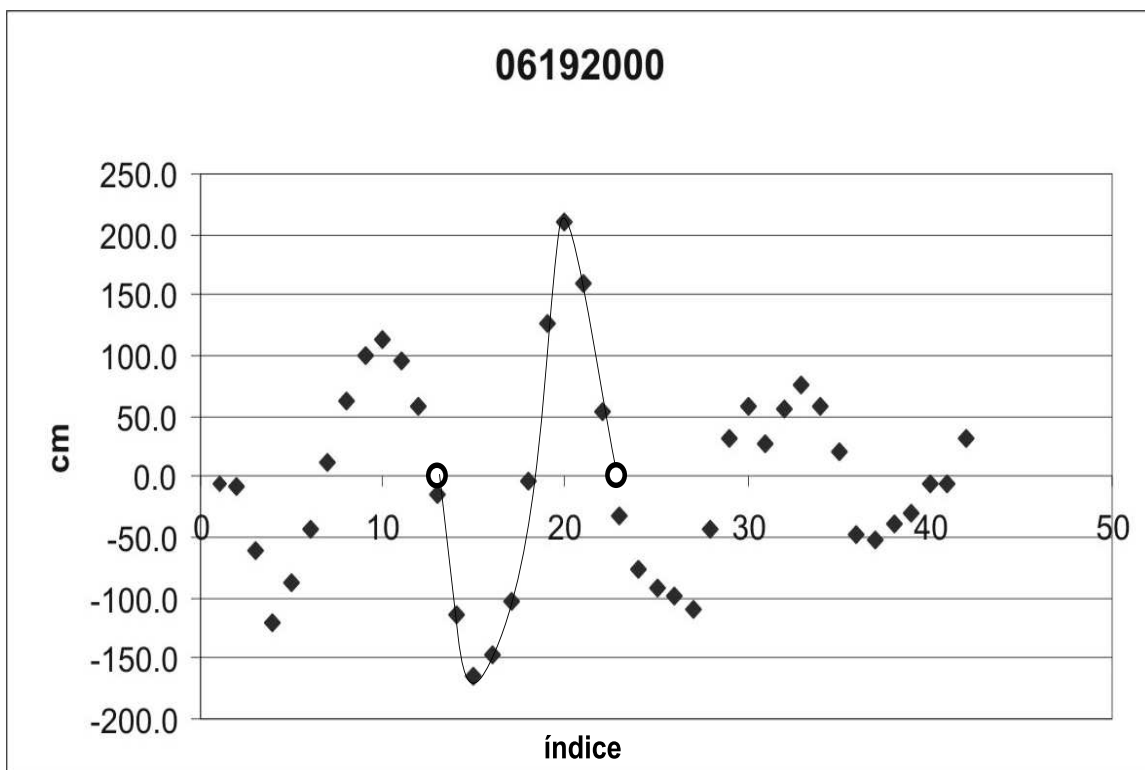


Figura 6.18: Plot focando a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ encontrada pelo método zero descendente em 19/06/2002 às 20:00 p.m.

A figura 6.19 mostra a relação existente entre as alturas das ondas extremas - identificadas pelo método zero descendente - e a altura significativa dos registros nos quais essas ondas foram medidas.

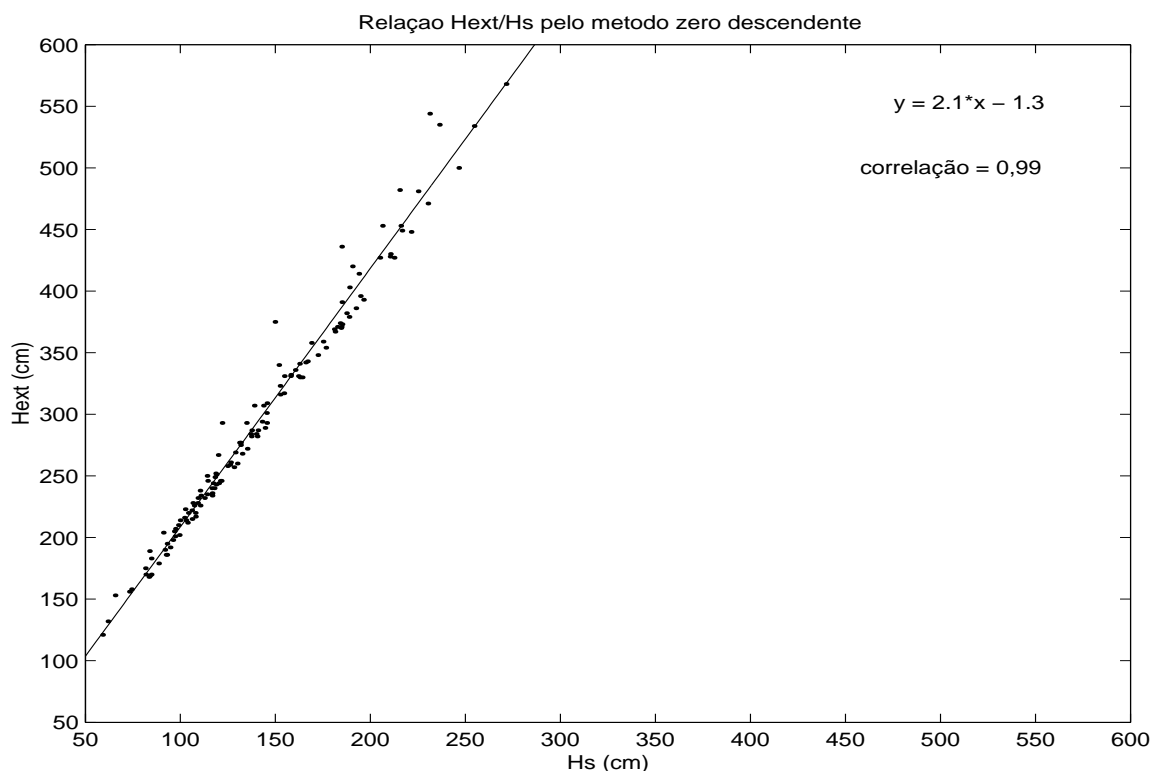


Figura 6.19: Relação entre as alturas extremas e alturas significativas identificadas pelo método zero descendente

Das ondas extremas obtidas por este método, 13,57% são da ordem de um metro, 45,71% são da ordem de dois metros, 25,71% são da ordem de três metros, 11,43% são da ordem de 4 metros e 3,57% são da ordem de 5 metros. A tabela abaixo mostra as medições de ondas extremas para os registros onde pelo método de definição de ondas individuais zero descendente esse fenômeno foi identificado.

Na primeira coluna encontra-se a data de registro da onda extrema e a hora em que a bóia começou a registrar as elevações da superfície do oceano (os dois primeiros números se referem ao mês, o segundo par de números se referem ao dia e os quatro últimos números se referem a hora), a segunda coluna é a posição de medição da onda extrema naquele registro, a terceira coluna é a altura da onda extrema, a quarta coluna é a altura significativa do registro onde essa onda foi identificada e a quinta

coluna é a relação altura da onda extrema com a altura significativa do registro na qual essa onda foi medida.

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
01212000	49	214	99,82	2,14
01212000	111	201	99,82	2,01
01242300	59	156	73,16	2,13
01280500	151	235	116,49	2,02
01311800	153	238	110,37	2,16
01312000	264	234	116,66	2,01
02010600	178	169	83,98	2,01
02051300	60	414	193,93	2,13
02060500	129	379	188,75	2,01
02061100	27	317	154,53	2,05
02091300	130	316	152,50	2,07
02091900	197	215	106,10	2,03
02122000	152	210	98,96	2,12
02130900	162	284	139,89	2,03
02140900	17	226	110,40	2,05
02181500	99	282	140,37	2,01
02231900	132	217	108,01	2,01
02261600	148	260	129,92	2,00
02270700	124	236	116,71	2,02
03011200	167	258	124,82	2,07
03020200	35	201	97,18	2,07
03061800	164	121	59,12	2,05
03080300	173	232	109,25	2,12
03081800	127	168	83,43	2,01
03100600	31	186	92,43	2,01
03140400	139	240	117,78	2,04
03151800	65	275	131,66	2,09

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
03181500	124	170	84,70	2,01
03191700	94	207	97,39	2,13
03200000	212	234	110,70	2,11
03200200	187	250	114,01	2,19
03221900	135	500	246,45	2,03
03250500	113	307	138,89	2,21
03270100	32	226	107,28	2,11
03271100	153	309	145,54	2,12
04052000	1	284	137,03	2,07
04201900	186	246	121,04	2,03
04211700	19	453	206,34	2,20
04230300	61	396	194,73	2,03
04231400	165	294	142,99	2,06
04241300	158	246	121,50	2,02
04242100	117	220	107,89	2,04
04261500	82	249	118,09	2,11
04271900	117	386	192,39	2,01
04272000	75	393	196,34	2,00
04281600	175	340	151,85	2,24
05030600	172	293	121,91	2,40
05031700	152	358	169,00	2,12
05041600	133	153	65,65	2,33
05050900	43	198	96,04	2,06
05080100	185	257	128,19	2,00
05081100	62	240	116,48	2,06
05091100	262	268	132,53	2,02
05091500	189	244	117,23	2,08

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
05100900	53	293	134,79	2,17
05141100	88	214	102,93	2,08
05141900	157	220	104,14	2,11
05160200	237	289	144,48	2,00
05170300	27	293	145,45	2,01
05181500	31	371	182,63	2,03
05241300	189	359	175,17	2,05
05250900	138	332	158,12	2,10
05261900	120	282	137,36	2,05
05271200	100	331	154,66	2,14
05281100	25	287	140,78	2,04
05310500	197	244	120,20	2,03
06020400	184	186	92,85	2,00
06091800	147	277	131,11	2,11
06102000	14	534	254,65	2,10
06160100	63	348	172,39	2,02
06192000	51	375	149,81	2,50
06201100	110	212	103,74	2,04
06231700	40	331	158,00	2,09
06270800	74	267	119,91	2,23
06301600	61	277	131,68	2,10
06301900	156	252	118,57	2,13
07012300	52	330	162,90	2,03
07050800	100	232	112,69	2,06
07070000	198	195	93,00	2,10
07092100	106	391	184,98	2,11
07101800	103	436	184,84	2,36

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
07110700	127	336	160,48	2,09
07152200	24	158	74,28	2,13
07200300	155	259	126,02	2,06
07231700	14	482	215,35	2,24
07260500	8	430	210,54	2,04
07270400	91	261	126,45	2,06
07271400	121	301	145,37	2,07
07281700	140	568	271,42	2,09
07300600	31	481	225,11	2,14
07301900	153	341	162,72	2,10
08070500	40	192	94,59	2,03
08110600	106	427	204,96	2,08
08220800	162	403	188,95	2,13
08311800	86	448	221,48	2,02
09042359	69	370	184,52	2,01
09050100	21	428	210,36	2,03
09101100	19	535	236,34	2,26
09130600	27	374	184,04	2,03
09130600	47	427	212,50	2,01
09130600	109	451	212,50	2,12
09151700	66	471	230,29	2,05
09212300	18	544	231,16	2,35
09220900	92	354	176,55	2,01
09230800	85	205	96,79	2,12
09232100	26	183	84,61	2,16
09232100	39	246	114,31	2,15
09251000	145	269	128,91	2,09

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
09292000	49	228	106,50	2,14
10011700	110	235	114,07	2,06
10012359	11	228	109,12	2,09
10021200	18	223	102,51	2,18
10030200	35	330	164,19	2,01
10060700	224	175	81,55	2,15
10070300	165	222	105,99	2,09
10081300	95	251	118,88	2,11
10082300	45	243	118,72	2,05
10120200	18	287	137,59	2,09
10151100	233	132	61,90	2,13
10152200	169	204	91,03	2,24
10180600	182	367	181,41	2,02
10212100	172	272	135,22	2,01
10230700	1	373	185,12	2,01
10291600	226	216	102,07	2,12
11011000	72	449	216,56	2,07
11012000	177	371	184,66	2,01
11032359	147	343	166,92	2,05
11041200	115	323	152,45	2,12
11071800	179	382	187,44	2,04
11092000	14	369	180,94	2,04
11100900	90	453	215,96	2,10
11131200	61	307	143,70	2,14
11200700	6	170	81,83	2,08
11201300	108	189	83,69	2,26
11222000	178	420	190,56	2,20

Registro	Posição	H_{ext}	$H_{\frac{1}{3}}$	$\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$
11241400	126	190	91,81	2,07
11242300	57	179	88,60	2,02
11291200	84	331	162,05	2,04
12011100	57	202	99,43	2,03
12030500	85	342	165,93	2,06

A figura 6.20 abaixo mostra um gráfico mostrando a ocorrência das ondas extremas, identificadas pelo método zero descendente, em relação aos meses do ano de 2002.

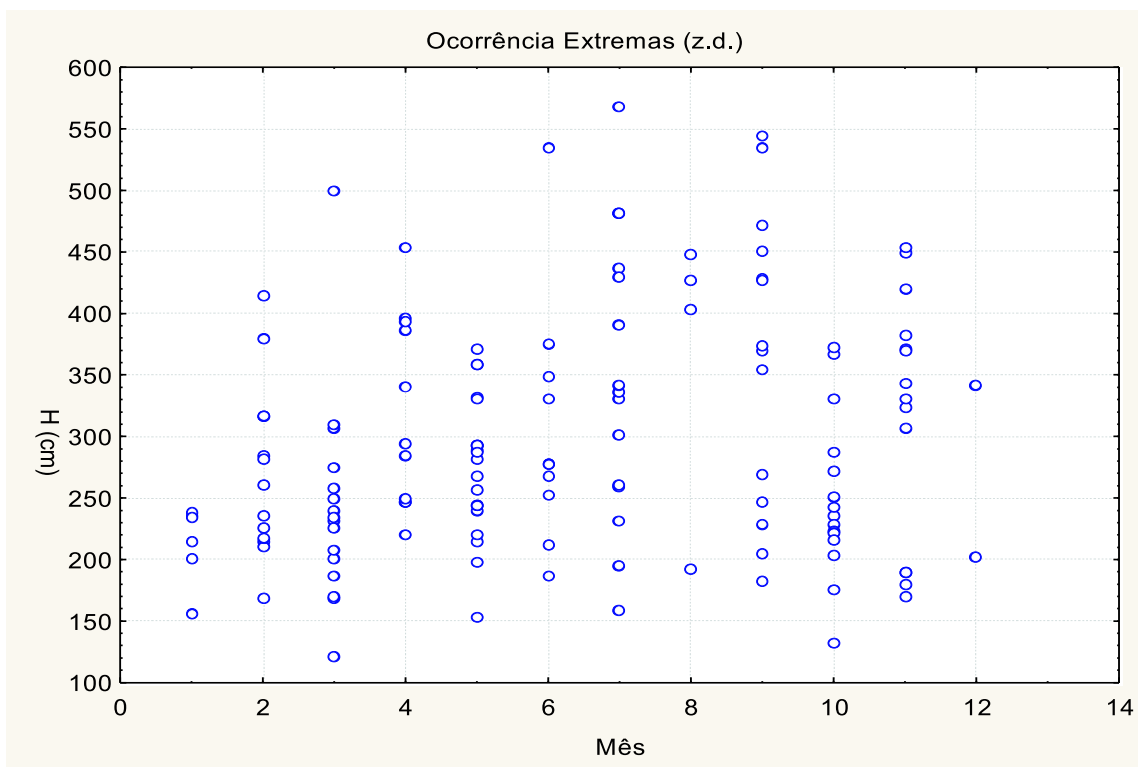


Figura 6.20: Gráfico de ocorrência de ondas extremas identificadas pelo método zero descendente em relação aos meses

Capítulo 7

Discussão dos Resultados

7.1 Distribuição de alturas de ondas

Mesmo sendo diferentes as alturas e o número de ondas do registro medidas por cada método, em ambos os casos de definição de ondas individuais a distribuição de alturas ajustou-se bem aos histogramas e, os parâmetros testados para o método zero-ascendente

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.58H_1 \quad e \quad H_{\frac{1}{10}} = 1.98H_1$$

e para o método zero-descendente

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.57H_1 \quad e \quad H_{\frac{1}{10}} = 1.96H_1$$

são bem condizentes com as relações encontradas na teoria

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.6H_1 \quad e \quad H_{\frac{1}{10}} = 2.0H_1.$$

Os valores de altura significativa, altura média e altura $H_{\frac{1}{10}}$ obtidas pelo método zero-ascendente e zero-descendente foram praticamente os mesmos e os plots que mostram a relação entre altura significativa e altura média para a massa de dados - em ambos os métodos de definição de ondas individuais - mostraram a relação linear existente entre esses dois parâmetros, sendo a inclinação das retas aproximadamente

1.6, assim podemos considerar que não há relevante diferença estatística entre as duas definições de ondas individuais, fato teoricamente confirmado.

Estes métodos significam basicamente que uma onda é uma crista com um cavado subsequente ou um cavado com uma crista subsequente, respectivamente.

7.2 Ondas Extremas

Foi observado que para cada método de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente, ocorreram números diferentes de ondas extremas, com alturas diferentes.

Em alguns registros, foram reconhecidas ondas extremas por ambos os métodos, em outros foram reconhecidas ondas extremas por apenas um dos métodos.

Para cada método de definição de ondas individuais obtemos resultados diferentes para a maior onda extrema do período analisado e para a onda extrema com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$.

Nos dados analisados foi identificado para o método zero-ascendente uma relação máxima de $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} \approx 2.49$ e, para o método zero-descendente $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} \approx 2.50$, o que está dentro do esperado pela distribuição de Rayleigh, relação máxima $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}} \approx 2.60$.

Na massa de dados analisados foram encontradas, para o método zero-ascendente, 210 ondas extremas e, para o método zero-descendente foram identificadas 140 ondas extremas. A distribuição de Rayleigh estimou que deveriam ser encontradas, aproximadamente, 385 ondas extremas para cada método de definição de ondas individuais.

Foi observado que na maioria dos casos de ondas extremas - em ambos os métodos de definição de ondas individuais - suas alturas mostraram a relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ muito próximas de 2.0 e, em relação a ocorrência de ondas extremas nota-se que, pelo método zero ascendente, os meses de abril e maio foram os que tiveram maior ocorrência e nos meses de julho, agosto e setembro a média das alturas das ondas extremas são

maiores. Para o método zero descendente maio foi o mês onde foi observada a maior ocorrência de ondas extremas e, como para o caso do método zero ascendente, nos meses de julho, agosto e setembro a média das alturas das ondas extremas são maiores.

Como foi utilizada a teoria linear de ondas no oceano neste trabalho, ou seja, a superfície do oceano é composta pela superposição de ondas senoidais, de que forma poderíamos encontrar uma onda com a forma mostrada na figura 7.1 através de soma de cossenos?

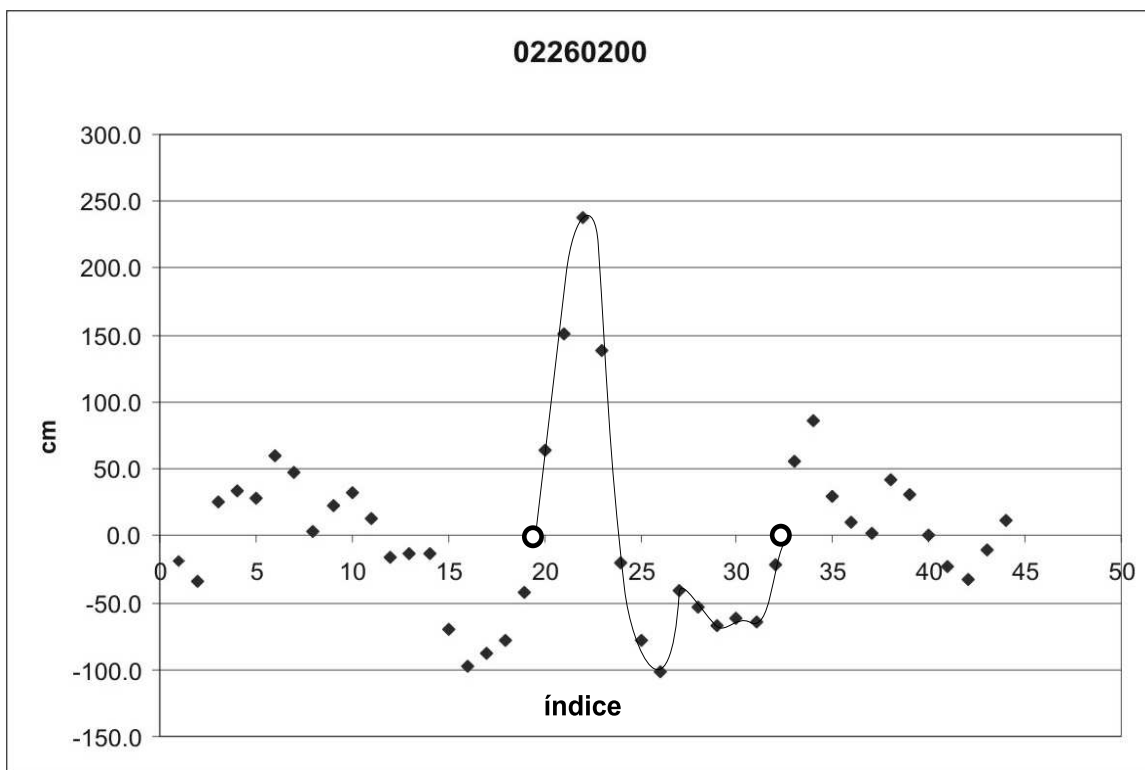


Figura 7.1: Plot focando uma onda extrema encontrada pelo método zero-ascendente em 26/02/2002 às 02:00 a.m.

Percebe-se que nesta onda ocorre algum outro tipo de interação que não só soma de cossenos.[15] afirma que teorias não lineares descrevem a ocorrência de "freak waves".

Abaixo seguem os plots da superfície do oceano e das alturas identificas no registro onde essa onda foi identificada

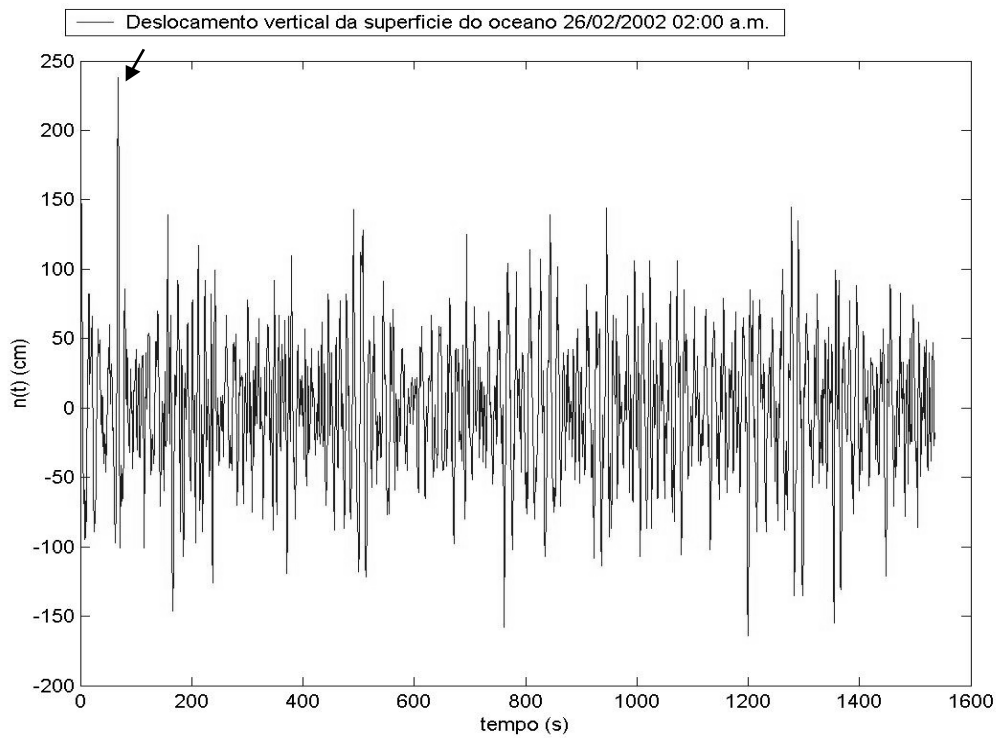


Figura 7.2: Plot do deslocamento vertical do oceano do registro do dia 26/02/2002 às 02:00 a.m.

Onde a altura da onda extrema identificada foi de $3.39m$, a altura significativa do registro foi de $1.65m$ e esta foi a quinta onda medida no registro do dia 26/02/2002 às 02:00 a.m.

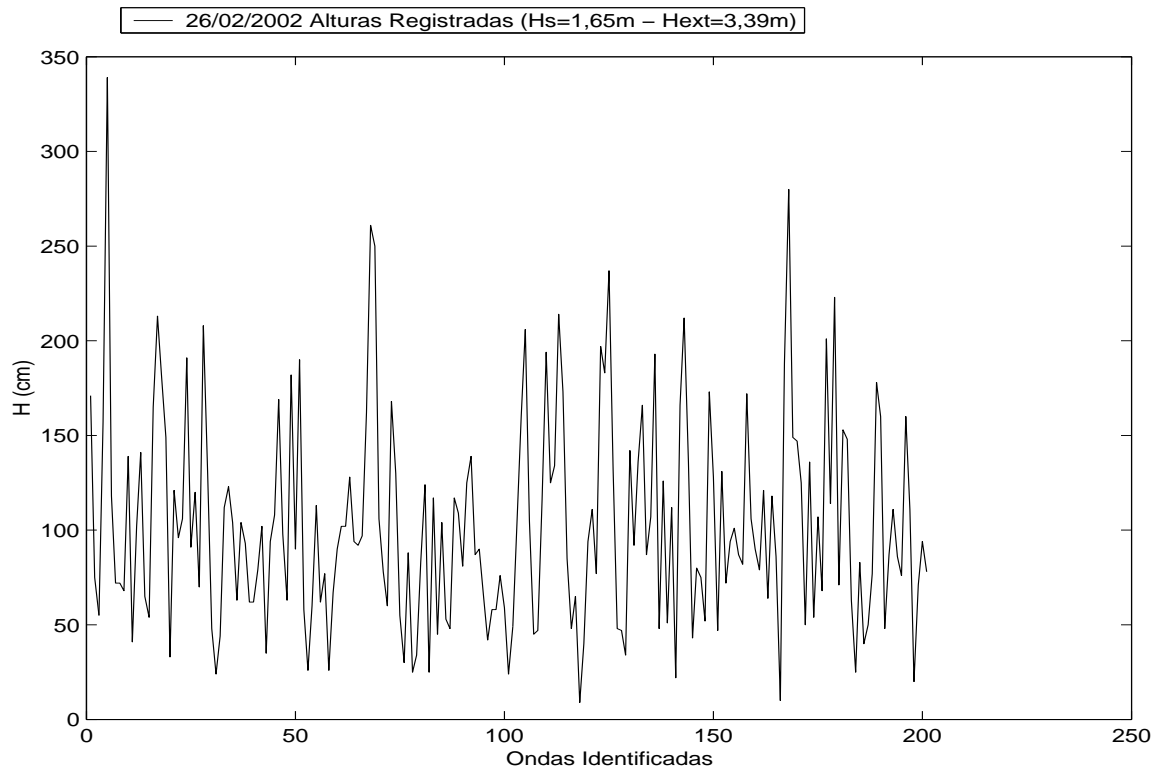


Figura 7.3: Plot das alturas de ondas identificadas pelo método zero-ascendente em 26/02/2002 às 02:00 a.m.

Para os registros onde ondas extremas foram encontradas pelos dois métodos de definição de ondas individuais, a diferença nas posições das onda extremas encontradas para cada método variam aleatoriamente, mas, na maioria dos casos as posições diferenciam-se dentro de um intervalo de até 10 posições.

Capítulo 8

Conclusões e Sugestões

O estudo realizado nesta monografia proporcionou vislumbrar a íntima conexão que existe entre os fenômenos naturais com a matemática. Em particular, foi fundamental o conhecimento de cálculo diferencial e integral, conceitos estatísticos, lógicas de programação e alguns fundamentos de oceanografia para o desenvolvimento e aplicação da teoria estatística que está por traz do fenômeno altura de ondas do oceano.

A interconexão dos vários ramos da matemática foi amplamente observada na descrição de ondas no oceano, e, de fato, as observações do fenômeno convergiram para os resultados teóricos.

Observou-se uma boa concordância entre a análise de dados reais de alturas de onda com a teoria matemática linear de distribuição de alturas de onda desenvolvida e largamente empregada para este tipo de análise. Isto é válido para os dois métodos de definição de ondas individuais empregados, zero-ascendente e zero-descendente.

As diferenças encontradas nas alturas de onda individuais observadas em cada método não foram estatisticamente significativas, e dessa forma, para análise da distribuição de alturas de onda individuais do oceano, é indiferente usarmos qualquer dos métodos empregados.

No que se trata de ondas extremas, as definições de ondas individuais empregadas

forneceram diferentes resultados. Em muitos casos foram identificadas ondas extremas por ambos os métodos, mas, não raro, ondas extremas foram identificadas por apenas um dos métodos.

As ondas extremas com maior relação $\frac{H_{ext}}{H_{\frac{1}{3}}}$ identificadas por cada método de definição de ondas individuais, zero-ascendente e zero-descendente, assumiram valores satisfatórios para concluir que essas alturas de ondas estão dentro do esperado pela distribuição de Rayleigh, porém, a quantidade de ondas extremas encontradas durante o período de estudo por cada método foi menor do que o esperado pela distribuição de Rayleigh.

Pode-se concluir também que existe diferença entre "ondas extremas" e "freak waves", já que as ondas extremas ocorrem unicamente por processos lineares e, dessa forma, existe uma simetria entre a crista e o cavado da onda, em contrapartida, as "freak waves", com influência de efeitos não lineares, não apresentam simetria entre a crista e o cavado da onda.

Gostaríamos de mencionar ainda que este estudo, longe de se exaurir aqui, tem a sua natural continuidade. Em primeiro lugar no que se trata de análise espectral, que na área da oceanografia, por exemplo, pode ser aplicada na identificação das amplitudes de ondas correspondentes a cada frequência, na observação de como a energia contida no mar está distribuída dentre as componentes de frequência, entre outras. Em segundo lugar, no estudo da distribuição de ondas extremas e de outros métodos de definição de ondas individuais, para determinar o método mais apropriado de definição de ondas individuais para o estudo de ondas extremas. Em terceiro lugar, no estudo das interações não lineares que provocam a ocorrência de "freak waves".

Apêndice A

Rotinas elaboradas no software Matlab

Neste apêndice serão apresentadas todas as rotinas elaboradas no software Matlab para a realização da análise presente nesta monografia.

A.1 Classificação dos dados

Para a classificação dos dados que seriam analisados nesta monografia foi elaborada a rotina um, que fornece um relatório informando, para cada registro, quais erros foram encontrados. Para os registros que não apresentam nenhum dos dois erros analisados, $\text{status} > 1$ e comprimento menor que 1535, a rotina salva o deslocamento vertical do registro ".raw" em um arquivo ".mat" com o mesmo nome, numa pasta.

A rotina um utiliza duas subrotinas, a subrotina filelist, que lista todos os arquivos brutos ".raw" para que sejam lidos e processados em Matlab, e a subrotina leraw, que lê os arquivos brutos ".raw" e os transforma em uma matriz de quatro colunas (status, deslocamento vertical, deslocamento horizontal em x e deslocamento horizontal em y) com número de linhas variável, dependendo de quantos deslocamentos o ondógrafo conseguiu medir no período de 20 minutos do registro.

A.1.1 Rotina um

```
function um;
nsmin= 1535;
in0 = cd;
indir = % diretório onde encontram-se os arquivos ".raw"de deslocamento vertical;
outdir =%diretório onde serão salvos os arquivos ".mat"de desl vert corrigido;
cd(indir);

fname=filelist('*raw');

[nfile, m]=size(fname);
for k=1 : nfile
cfname=(fname(k, :));

[status, vert, horx, hory]=leraw(cfname);

vert = vert(:);
ns(k,1)=length(status);
isbad=find(status > 1);
nisbad=length(isbad);
if (ns(k,1) < nsmin)
errL(k,1) = 0; % comprimento insuficiente
comprimentoinsuficiente=1
else
errL(k,1) = 1;
end
if nisbad > 0
errS(k,1)=0; % tem erro de sincronização
```

```

temerrodesincronizacao=1
else
errS(k,1)=1;
end
if(errL(k,1)*errS(k,1)~= 0) % não tem erro
cstrsave=[' save ',[outdir,'\',cfname(1:end-4)], ' vert'];
eval(cstrsave)
end
end
strsave=[' save ',[outdir,'\report'], ' fname errL errS ns '];
eval(strsave)

```

A.1.2 Subrotina filelist

```

function ff = filelist(ftype);
cdir = dir(['*',ftype,'*']);
ff = [];
for i=1:length(cdir),
ff = strvcats(ff,cdir(i).name);
end;
ff = sortrows(ff);

```

A.1.3 Subrotina leraw

```

function[status,vert,horx,hory]=leraw(filein);
fid=fopen(filein);
i=1;

```

```

while 1
tline = fgetl(fid);
if ~ ischar(tline), break, end
if i>= 1
h=findstr(tline,',' );
status(i)=str2num(tline(1:(h(1)-1)));
vert(i)=str2num(tline((h(1)+1):(h(2)-1)));
hory(i)=str2num(tline((h(2)+1):(h(3)-1)));
horx(i)=-str2num(tline((h(3)+1):end));
end
i=i+1;
end fclose(fid);

```

A.2 Alturas de ondas e ondas extremas

Para determinar as alturas das ondas individuais e as ondas extremas em cada registro foi elaborada a rotina dois, essa rotina utiliza uma subrotina chamada correção que corrige eventuais erros de medições, tais como valores absurdamente altos no deslocamento vertical da superfície do oceano e valores zero em determinados momentos da medição.

A rotina dois foi utilizada tanto para o método zero-ascendente quanto para o método zero-descendente fazendo-se uma pequena modificação. Para o método zero-ascendente a 12^a linha da programação é `h=find(difsign==2)`; e para o método zero-descendente esta linha torna-se `h=find(difsign==-2)`; no mais, todo o resto da programação continua a mesma para ambos os métodos.

Para plotar o deslocamento da superfície do oceano e as alturas de ondas identificadas por cada método, foram elaboradas as rotinas quatro e cinco respectivamente.

A rotina quatro, que plota o deslocamento da superfície do oceano, também utiliza a subrotina correção.

A rotina cinco é válida para ambos os métodos de definição de ondas individuais, mas, para cada método deve-se mudar o endereço do diretório aonde encontra-se o arquivo que se deseja plotar.

A.2.1 Rotina dois

```
%Calcula as alturas de ondas e identifica ondas extremas para cada registro

function dois;

m=dir(%diretório onde serão salvos os arquivos ".mat"de deslocamento vertical cor-
rigido);
a = size(m);
outdir2=% diretório onde serão salvas as alturas em ".mat"de todos os registros
outdir1=%diretório onde serão salvas as alturas extremas em ".mat"de todos os reg-
istros
for x=1 : 1 : a(1)
filein=m(x).name;
load(filein);
comp=length(vert);

%Corrigindo erros de medições

[cert]=correcao(vert);
eta=cert';

%Identifica ondas nos registros usando a def. de altura de zero ascendente
```

```

difsign=diff(sign(cert));
h=find(difsign==2);
for i=1:(length(h)-1)
onda=eta((h(i)+1):(h(i+1)));
honda(i)=max(onda)-min(onda);
end
honda=honda';
hmed=mean(honda);
alt=honda;

% Ordena em ordem crescente

hsort1=sort(alt);
hmed1=mean(alt);
fim1=length(hsort1);
ini31=round(2*fim1/3);
hmed31=mean(hsort1(ini31:fim1));

% Altura significativa individual

hsindiv=hmed31;

% Busca por ondas extremas

comp2=length(alt);
kk=1;
t=1;

```



```

extwave(kk)=0;
posicao(t)=0;
for y=1 : 1 : comp2
if alt(y) > 2*hsindiv
kk=kk+1;
t=t+1;
extwave(kk)=alt(y);
posicao(t)=y;
end
end
strsave=[' save ',[outdir2,'\',filein(1:end-4)], ' alt '];
eval(strsave)
xji=length(extwave);
if xji > 1
cstrsave=[' save ', [outdir1,'\',filein(1:end-4)], ' hsindiv extwave posicao'];
eval(cstrsave)
end
clear vert cert hmed honda alt hsort1 hmed1 fim1 ini31 hmed31 extwave comp2 hsin-
div posicao;
end

```

A.2.2 Subrotina correção

%Subrotina que corrige eventuais erros de medição

```
function [cert]=correcao(vert)
```

```
Somamedicoes=0.0;
```

```

MAXVAL=0.0;
for J=1:1535
VALABS=abs(vert(J));
Somamedicoes=Somamedicoes+VALABS;
if (MAXVAL < VALABS)
MAXVAL=VALABS;
end
end
CORRECAO=10*(Somamedicoes/1535);
MAXVAL;
P=0;
N=0;
for JJ=1:1535
if abs(vert(JJ)) > CORRECAO
if vert(JJ) > 0.0
P=P+1;
CORRECAO;
vert(JJ);
vert(JJ)= 0.1;
end
if vert(JJ)< 0.0
N=N+1;
CORRECAO;
vert(JJ);
vert(JJ)= -0.1;
end
end
end
end

```

```

j=0;
if vert(1)==0
vert(1)= vert(2);
end
for xx=2 : 1534;
if vert(xx)==0;
j=j+1;
vert(xx)=(vert(xx+1)+vert(xx-1))/2;
zero=vert(xx);
end
end
if vert(1535)==0
vert(1535)= vert(1534);
end
clear CORRECAO Somamedicoes MAXVAL;
cert=vert;

```

A.2.3 Rotina quatro

% Plota o deslocamento vertical do oceano

```

function quatro;

m=dir(% diretório onde está o registro de deslocamento vertical do oceano da maior
onda %extrema);
a = size(m);
for x= 1 : 1 : a(1)
filein=m(x).name;

```

```

load(filein);
comp=length(vert);
[cert]=correcao(vert);
eta=cert';
end
time= 1 : comp;
plot(time,eta)
legend('Deslocamento vertical da superficie do oceano');
xlabel('tempo (s)');
ylabel('n(t) (cm)');

```

A.2.4 Rotina cinco

% Plota as alturas de ondas identificadas para o metodo Hascendente

```

function passocinco;

m=dir(.....);
a = size(m);
for x=1:1:a(1)
filein=m(x).name;
load(filein);
H=alt;
comp=length(H);
end
posicao=1 : comp;
plot(posicao,H)
legend('Alturas registradas');

```

```
xlabel('Ondas Identificadas');  
ylabel('H (cm)');
```

```
% Para plotar as alturas identificadas para o método zero-descendente basta mudar o  
% nome do diretório na variável m
```

A.3 Distribuição de alturas de ondas

Para a obtenção da distribuição de alturas de ondas do ano de 2002 foi elaborada a rotina três. Essa rotina junta todos os dados de alturas de arquivos ".mat", adimensiona-os através da altura média, faz um histograma de distribuição das alturas de ondas e, usando a distribuição de Rayleigh, plota a distribuição de alturas de ondas do período.

Feito isto, a rotina testa os parâmetros de adequabilidade da distribuição de Rayleigh à massa de dados.

A.3.1 Rotina três

Plota distribuição de Rayleigh para todos os registros juntos

```
function Tres;  
clear all; clc;  
  
indir='%diretório onde estão todos os registros de alturas';  
outdir3='.....';  
cd(indir);  
fname=filelist('* .mat');  
[nfile,m]=size(fname);  
num=0;  
for mk=1 : 1 : nfile
```

```
mk;  
load(fname(mk,:));  
hmed2=mean(alt);
```

Junta os registros

```
long=length(alt);  
for mkx=1 : long  
num=num+1;  
hadm(num)=alt(mkx)/hmed2;  
end  
clear long alt hmed2  
end
```

Ordena em ordem crescente

```
hsort=sort(hadm);  
hmed=mean(hadm);  
fim=length(hsort);  
ini3=round(2*fim/3);  
hmed3=mean(hsort(ini3:fim));  
ini10=round(9*fim/10);  
hmed10=mean(hsort(ini10:fim));
```

Faz histograma de H adm. da onda

```
incre=0.25;  
intermax=ceil(max(hsort)/incre)*incre;
```

```

intermin=fix(min(hsort)/incre)*incre;
hinter=intermin : incre : intermax;
Noc=histc(hsort,hinter);
figure(1)
eixoy=Noc./(fim*incre);
bar(hinter,eixoy,'histc','y');
hold on grid on

```

Plota distribuição de Rayleigh

```

eixox=0:0.01:3.30;
ph=pi/2.*eixox.*exp(-pi/4.*(eixox.^2));
plot(eixox,ph);
legend('Rayleigh','Histograma');
xlabel('Hadmensional');
ylabel('n/(N*dH)');

```

Testa parâmetros

```

hlinha3=hmed3/hmed
hlinha10=hmed10/hmed

```

hlinha3 deve dar igual a 1.6

hlinha10 deve dar igual a 2.03

Referências Bibliográficas

- [1] BLAKE, Ian F.; *An Introduction to Applied Probability*, Wiley and Sons, 1979.
- [2] WONNACOTT, Thomas H.; WONNACOTT, Ronald H.; *Introdução à estatística*, tradução de Alfredo Alves de Farias, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.
- [3] MORETTIN, Luiz Gonzaga.; *Estatística Básica - Probabilidade*, Volume I, São Paulo, Makron Books, 1999.
- [4] CRESPO, Antônio Arnot.; *Estatística Fácil*, 16 Edição, Editora Saraiva, 1998.
- [5] DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, World Scientific, 1984. v. 2 of Advanced Series on Ocean Engineering.
- [6] GODA, Y.; *Random seas and design of marine structures*, 1.ed., University of Tokyo Press, 1985, v. 1 of 1.
- [7] OCHI, M. K.; *Ocean waves*, Second edition. ed. The Edinburg Building, Cambridge, CB2 2RU, United Kingdom: Cambridge, 1998. v. 1 of Cambridge Ocean Technology Series:6.
- [8] Ochi, M. K.; *Stochastic Analysis and Probabilistic Prediction of Random Seas*, Ven Te Chow, University of Illinois, University of Illinois, Urbana, Illinois. v. 13 of Advanced in Hydroscience, 1982 .

- [9] CARDOSO Jr., Hélio Gomes.; *Análise Bivariada de Extremos de Onda e de Vento na Bacia de Campos (Rio de Janeiro)*, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.
- [10] PINHO, Ugo Ferreira de; *Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos (Rio de Janeiro)*, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] GUIMARÃES, Romero Alves; *Introdução a Teoria da Probabilidade*, Monografia - Universidade Estadual do Paraíba, Campina Grande, 2004.
- [12] LONGUET-HIGGINS, M. S.; *On the statistical distribution of the heights of sea waves*, Journal of Marine Research, v. 11, p. 245 à 266, 1952.
- [13] STANSELL, Paul.; *Distribution of Extreme Waves, crest and trough heights measured in the North Sea*, Scholl of Phisics, The University of Endiburg, UK, 2004, disponível online em www.sciencedirect.com
- [14] STANSELL, Paul.; *Distribution of freak waves height in the North Sea*, Scholl of Phisics, The University of Endiburg, UK, 2004, disponível online em www.sciencedirect.com
- [15] KHARIF, Christian ; PELINOVSKY, Efim.; *Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon*, European Journal of Mechaninics B/Fluids, 2003, pp. 603-634, disponível online em www.sciencedirect.com
- [16] MELO F, Eloi.; *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, (Publicado em CD, sem paginação), maio de 2004.

- [17] Melo F, Eloi; ALVES H. G. M., José.; *Nota sobre a chegada dispersiva de ondulações lonínquas à costa brasileira*, Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Gramado, RS, pp 362-369, Vol. 5, 1993.
- [18] ARAÚJO, Carlos Eduardo; FRANCO, Davide; MELO, Eloi e PIMENTA, Felipe Mendonça .; *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), 2003.
- [19] ROMEO, Marco Antônio; *Verificação da Distribuição de Rayleigh para registros de ondas em São Francisco do Sul SC*, painel apresentado no III Seminário sobre ondas, marés e engenharia oceânica, Arraial do Cabo, RJ, , 1999.
- [20] *Manual do ondógrafo Waverider Mark II*