

O CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS DE DUAS REGIÕES DO LITORAL SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO – BRASIL

Rodrigo Nogueira de Araújo¹; Paolo Alfredini².

¹Professor Assistente e Mestre em Engenharia Civil na área de Hidráulica Marítima pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e-mail: rodrigo.araujo@poli.usp.br

²Professor Livre-Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Hidráulica, Av. Professor Lúcio Martins Rodrigues 120, CEP 05508-900 – Cidade Universitária, São Paulo-SP-Brasil
Fone: +55 11 3091-5735 e-mail: alfredin@usp.br, paolo.alfredini@poli.usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o cálculo do clima de ondas em águas profundas para duas regiões do litoral sul do Estado de São Paulo - Brasil. Aborda-se o problema da propagação e deformação de ondas em áreas litorâneas próximas à linha de costa com a utilização do modelo numérico de ondas Mike 21 NSW – Nearshore Waves – de autoria do DHI – Danish Hydraulic Institute. Os dados de ondas utilizados foram os medidos em campanhas na Ilha do Bom Abrigo (Cananéia-SP) nos anos de 1968 e 1969 e na Praia do Una (Iguape-SP) no período de 1982 a 1984. Apresentam-se as rosas de ondas em águas profundas anuais para estas duas regiões.

ABSTRACT

This paper presents deep water wave climate calculation for two areas of São Paulo State coast - Brazil. Nearshore wave propagation and deformation problems are considered. Wave numerical model Mike 21 NSW – Nearshore Waves – from DHI – Danish Hydraulic Institute is used. Wave climate data used were measured at field surveys at Bom Abrigo Island (Cananéia-SP-Brazil) from 1968 to 1969 and at Una Beach (Iguape-SP-Brazil) from 1982 to 1984. Annual deep water wave roses are presented for these two areas.

Palavras-chave: hidráulica marítima, clima de ondas, propagação de ondas

1. INTRODUÇÃO

Na maior parte das áreas costeiras do Estado de São Paulo as ondas de gravidade geradas pelo vento podem ser consideradas como a principal fonte de energia que condiciona as características das praias, sendo normalmente fator determinante em sua geometria e composição. As marés e os ventos complementam este quadro energético, podendo ter maior ou menor relevância, de acordo com a localidade estudada.

Como exemplos de obras costeiras onde o conhecimento do clima de ondas local é essencial pode-se citar:

- Obras de defesa dos litorais: espigões, muros, quebra-mares isolados e engordamento de praias.
- Obras para melhoramento da navegação: guias-correntes e canais dragados.
- Obras de abrigo portuário: quebra-mares e molhes.

Assim, o conhecimento do processo físico da propagação e deformação das ondas que ocorre nas áreas próximas à costa é essencial.

No presente trabalho utiliza-se registros de ondas de duas campanhas de medições, a primeira da região da Ilha do Bom Abrigo e a segunda da região da Juréia. Os dados de ondas utilizados para a região da Ilha do Bom Abrigo provêm da campanha realizada pelo SPH - Serviço de Pesquisas Hidráulicas (1968 a 1969). Os dados de onda utilizados para a região da Juréia provêm da campanha do CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (1982 a 1985), sendo a série histórica mais longa do litoral paulista.

Apresenta-se neste artigo os dados de onda em águas profundas calculados a partir dos dados registrados nestas duas campanhas. Tais dados de ondas em águas profundas certamente podem ter sua aplicação estendida para o

estudo de outras regiões da costa sul paulista, não se limitando às regiões de medição dos dados de onda.

2. PROPAGAÇÃO E DEFORMAÇÃO DAS ONDAS

Matematicamente é muito complexo e difícil descrever o fenômeno de propagação real das ondas, devido à sua não-linearidade, características tridimensionais e comportamento aleatório. Entretanto, existem teorias analíticas que descrevem as ondas de modo adequado. As ondas reais não são monocromáticas, mas pode-se traduzi-las convenientemente pelo período médio de registro e pela altura de onda significativa, média do terço maior das alturas de onda do registro. De fato, o cálculo da energia das ondas reais mostra-se equivalente ao cálculo da energia das ondas a partir desta onda significativa, daí o seu nome. O conhecimento do rumo de propagação completa o quadro de parâmetros necessário para representar a onda e proceder ao seu estudo de propagação e deformação.

Na medida em que a onda passa a propagar-se em águas intermediárias e rasas, passa a sofrer deformações devidas à sua interação com o fundo.

As deformações sofridas pela onda, tais como o empolamento e a refração, e que ocorrem devido à diminuição da profundidade e à batimetria que a mesma encontra ao propagar-se em direção à costa, exigem teorias e cálculos complexos para serem estimadas. O cálculo destas deformações para uma batimetria regular, isto é, com as isóbatas apresentando-se paralelas a uma praia retilínea, pode ser realizado sem grandes dificuldades. Entretanto, tal condição de batimetria não existe na prática, embora para algumas localidades este cálculo possa ser aceitável para determinadas aplicações. Assim, recorre-se à utilização de modelos computacionais para a realização dos cálculos

los de deformações de ondas em batimetrias complexas. Para áreas costeiras abertas, mas sem a existência de ilhas e obstáculos às ondas, pode-se negligenciar a difração e reflexão. Assim, para estas áreas pode-se utilizar modelos de ondas que basicamente consideram a refração e o empolamento, apenas.

3. MIKE 21 NSW – NEARSHORE WAVES

O Mike 21 NSW – Nearshore Waves – do Danish Hydraulic Institute, é um modelo de onda que descreve a propagação, crescimento e decaimento de ondas de curto período em áreas próximas à costa. O modelo calcula os efeitos de refração e empolamento que a onda sofre ao propagar-se e considera a dissipação de energia devida ao atrito de fundo e à arrebentação da onda em batimetrias complexas. O modelo também pode considerar o efeito de vento local e de interação entre a onda e corrente. Este modelo está sendo utilizado sob licença educacional pelo Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP.

As equações básicas, a descrição dos termos fontes e os métodos da solução numérica do MIKE 21 NSW são baseados na aproximação proposta por Holthuijsen et al (1989). O modelo é paramétrico e direcionalmente discreto. Para levar em conta o efeito de correntes as equações básicas do modelo são derivadas a partir da equação da continuidade da densidade de agitação da onda espectral. A parametrização da equação da continuidade no domínio da frequência é executada pela introdução dos momentos de ordem zero e de primeira ordem do espectro de agitação como variáveis dependentes.

A discretização espacial das equações diferenciais parciais básicas são apresentadas utilizando técnicas de diferenças finitas (método de Euler). Os momentos de ordem zero e de primeira ordem do espectro de agitação são calculados em uma grade retangular em um número de direções discretas. Esta grade é devidamente espaçada nos dois eixos do plano horizontal e cobre toda a área a ser modelada.

A saída básica do modelo é obtida pela integração dos parâmetros de ondas, tais como altura da onda significativa, período da onda média, direção da onda média, desvio padrão direcional e tensão de cisalhamento. Além disso, saídas de dados espectrais em forma de distribuição de energia da onda também podem ser obtidas em um número de pontos selecionados pelo usuário.

Os parâmetros de onda entrando no domínio da grade são especificados no contorno ao largo, que obrigatoriamente deve estar posicionado do lado esquerdo da mesma. A energia da ondas entrando pelo contorno é especificada através da altura da onda significativa, período médio da onda, rumo médio da onda e o desvio padrão do rumo.

O atrito de fundo é um processo pela qual as ondas dissipam parte de sua energia devido ao efeito de atrito no fundo do mar. Este efeito é cumulativo e a quantidade de energia dissipada aumenta com a distância, altura da onda, período da onda e diminuição de profundidade. O atrito de fundo em áreas dominadas por areia depende do

tamanho dos grãos dos sedimentos e das rugas do leito. Para o caso onde não há rugas no leito, o parâmetro de rugosidade de Nikuradse k_N pode ser estimado segundo Nielsen (1979) em $k_N = 2.5 d_{50}$, onde d_{50} é o diâmetro mediano do sedimento. Na presença de rugas, k_N pode ser muito maior que este valor. No caso das regiões da Juréia e de Bom Abrigo o valor de k_N foi estimado em 0.002m

A formulação do MIKE 21 NSW para a descrição e cálculo da arrebentação, que considera a esbeltez da onda e a limitação da profundidade, é baseada na formulação de Battjes e Janssen (1978).

4. BASE DE DADOS EMPREGADA

A qualidade da batimetria é essencial para obter-se resultados realísticos do modelo. A forma de entrada da batimetria no modelo é feita através de uma grade batimétrica. Entende-se por grade batimétrica a matriz que contém os valores de profundidade para pontos devidamente espaçados em um plano horizontal, de forma que estes pontos juntos representem de forma sintética a superfície do leito oceânico.

É importante que os espaçamentos de grade no plano horizontal sejam definidos de forma a fornecer uma resolução adequada da batimetria. Os resultados são afetados de acordo com a densidade de pontos da grade. Até um certo limite, quanto maior a densidade, melhores os resultados. Além disso, tal espaçamento deve também ser definido respeitando as condições de estabilidade impostas pelo modelo numérico.

A batimetria da região da Ilha do Bom Abrigo foi convertida em formato de entrada para o modelo numérico. Assim, criou-se uma grade de tamanho de 70 x 120 km com espaçamentos de 100 x 500 m, o que totaliza 168.941 pontos na grade. A grade está rotacionada na origem (301707E ; 7219283N) em 139° NV sentido anti-horário. Esta rotação faz-se necessária devido ao modelo numérico requerer que o lado de incidência das ondas seja sempre o lado esquerdo da grade.

Para a batimetria da região da Juréia criou-se uma grade com tamanho de 80 x 114 km com espaçamentos de 100 x 400 m, o que totaliza 229.086 pontos na grade. Esta grade está rotacionada na origem (370566E ; 7267296N) em 130° NV sentido anti-horário.

A batimetria foi obtida através de folhas de bordo e cartas náuticas da Marinha do Brasil, (1981 a 1982), sendo que a profundidade é sempre referida ao nível de redução da DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. A quase totalidade dos pontos batimétricos foi extraídas das folhas de bordo, que no caso das folhas da região da Juréia, tinham pontos espaçados de 150 metros em média, o que confere uma excelente qualidade para a grade batimétrica executada.

Os dados de ondas utilizados da região da Ilha do Bom Abrigo provêm da campanha realizada pelo Serviço de Pesquisas Hidráulicas, SPH (1968, 1969), no período de março de 1968 a julho de 1969. Foram observados rumos, períodos e alturas das ondas através de visadas com teodolito a uma bóia em local onde a profundidade média era de 17 m na época. A Figura 1 apresenta a localização da bóia com suas

coordenadas. Todas as coordenadas de posição deste trabalho são referidas ao sistema UTM – Datum Córrego Alegre/MG.



Figura 1 - Localização da Bóia - Ilha do Bom Abrigo

Os dados de onda utilizados da região da Juréia provêm da campanha do CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (1982 a 1985) e compreendem o período de medições de Fevereiro de 1982 a Setembro de 1984. Os parâmetros de altura e período de onda foram obtidos por um ondógrafo bóia-acelerômetro do tipo WaveRider Datawell, de fabricação holandesa. O referido ondógrafo foi fundeado a uma profundidade de 16 m, logo em frente à Praia do Una com as seguintes coordenadas UTM (287340E ; 7283290N). O rumo de incidência de ondas era observado através de um teodolito equipado com bússola de duas a três vezes ao dia, visando uma bóia. Durante o período de medições, a observação de rumo utilizou duas posições para esta bóia. Entre Fevereiro de 1982 até Fevereiro de 1984 a bóia foi visada posicionada em frente à Praia do Una, em local com 6 m de profundidade, na mesma direção em que se encontrava o ondógrafo, com as seguintes coordenadas UTM (281964E ; 7287916N). A partir de Março de 1984 as leituras passaram a ser feitas de um novo local, no Morro do Grajaúna. O novo ponto de visada, também marcado por bóia, situava-se em local com 8,5 m de profundidade e em coordenadas UTM (278335E ; 7283425N). Todas as profundidades estão referidas ao nível de redução da DHN. A localização da bóia e do ondógrafo estão apresentadas na Figura 2.



Figura 2 - Localização da bóia e ondógrafo – Juréia

5. METODOLOGIA

Foram aproveitados todos os dados de onda registrados pelas duas campanhas citadas, mesmos os incompletos, isto é, onde havia falta de um ou dois dos três parâmetros (altura significativa, rumo e período médio). A partir dos dados registrados pela campanha da Ilha do Bom Abrigo, que resultou em aproximadamente 1200 dados completos, criou-se uma série de 2 anos de dados de onda e para a Juréia, de 1147 dados completos, criou-se uma série temporal de 3 anos de ondas.

Os procedimentos para a criação das séries temporais anuais incluíram o preenchimento de lacunas nas bases de dados. Uma avaliação dos dados digitalizados em planilhas mostrou que muitas lacunas poderiam ser preenchidas com boa confiança, pois eram de pequena extensão. Todas as análises foram realizadas discretizando-se os meses. As demais lacunas foram preenchidas criteriosamente com trechos de dados de ondas reais medidos da mesma série. Procurou-se manter a média de todos os parâmetros de onda iguais, antes e depois do preenchimento e conseguiu-se manter a relação entre os parâmetros de ondas. O resultado do trabalho foi a criação para cada uma das bases de dados, Ilha do Bom Abrigo e Juréia, de uma série de ondas anual.

Estas séries de dados de onda são de localidades de águas intermediárias e, para que possam ser utilizadas para outras localidades, devem ser transpostas para ao largo, região de águas profundas.

O programa MIKE 21 NSW não calcula a transposição das ondas da costa para o largo, somente realiza o cálculo no sentido inverso, isto é, do largo para a costa. Para o cálculo em águas profundas das ondas medidas na Juréia ainda existe como complicador o fato do rumo não ter sido medido na mesma posição em que o ondógrafo registrou a oscilação ondulatória. Não é possível admitir que o rumo medido na bóia seja o mesmo encontrado no ondógrafo, principalmente pela diferença de profundidades que há entre suas posições, a bóia fundeada ora em 6 m (DHN) ora em 8,5 m (DHN) e o ondógrafo em 16 m (DHN) de profundidade. Assim, utilizou-se a metodologia proposta por Araújo (2000) para obter-se os dados de onda em águas profundas a partir dos dados registrados nas bóias e ondógrafo.

Durante o processo de transposição dos dados de onda para águas profundas cerca de 2000 simulações foram realizadas. Nessas simulações considerou-se o desvio padrão do rumo em 10° e o parâmetro de rugosidade de Nikuradse igual a 0,002 m para ambas as regiões. O intervalo discreto no espectro de rumos foi pequeno, de apenas 2° e disponibilizou-se 65 direções discretas para os cálculos numéricos. Assim, pode-se calcular com maior precisão as variações de rumo dos marulhos. Considerou-se o nível médio do mar para todos os cálculos.

6. RESULTADOS

As Figuras 3 a 6 apresentam as rosas anuais de ondas elaboradas a partir dos resultados dos cálculos das alturas significativas e rumos para as regiões em águas profundas da Ilha do Bom Abrigo e da Juréia.

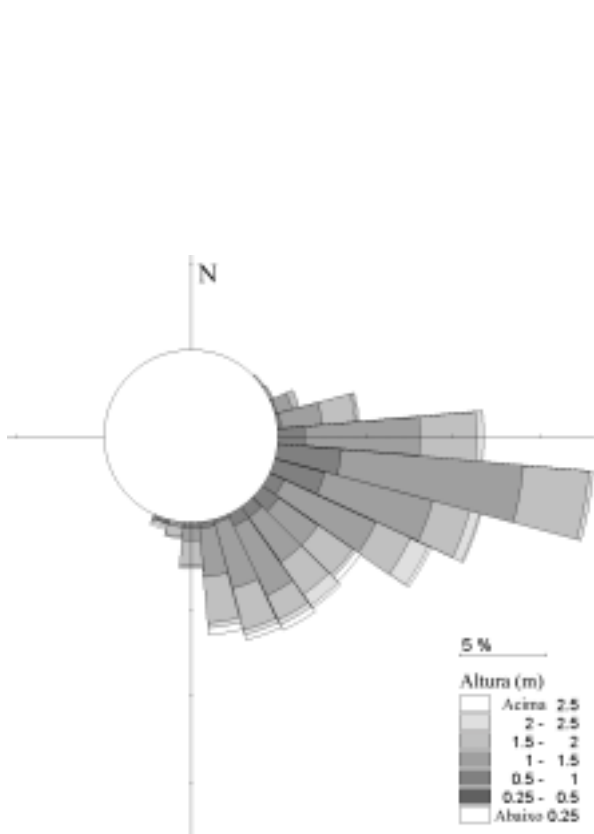


Figura 3 - Rosa Anual de Altura Significativa - Águas profundas - Região ao largo da Ilha do Bom Abrigo
 Alturas em metros

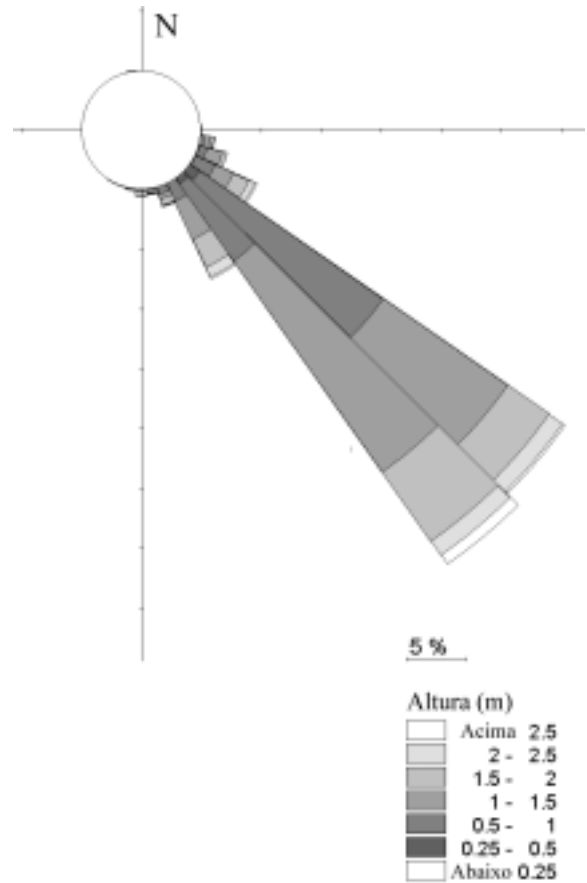


Figura 5 - Rosa Anual de Altura Significativa - Águas profundas - Região ao largo da Praia do Una - Juréia
 Alturas em metros

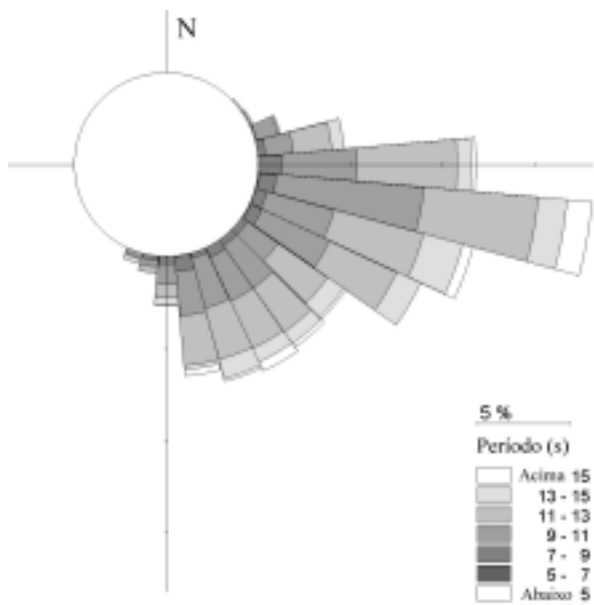


Figura 4 - Rosa Anual de Período Médio - Águas profundas - Região ao largo da Ilha do Bom Abrigo
 Períodos em segundos

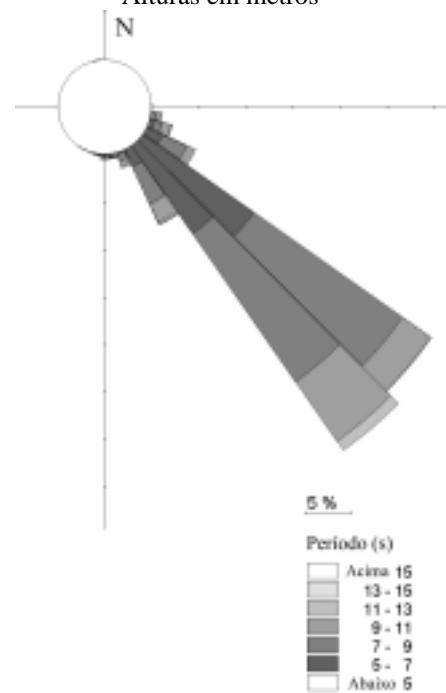


Figura 6 - Rosa Anual de Período Médio - Águas profundas - Região ao largo da Praia do Una - Juréia
 Períodos em segundos

A Tabela 1 resume os parâmetros médios de ondas em águas profundas para as duas regiões.

Tabela 1 - Parâmetros de ondas médios em águas profundas

| Região | Período | Altura Significativa | Período Médio | Rumo ($^{\circ}$ NV) |
|--------|---------|----------------------|---------------|-----------------------|
| | Anual | 1,35 m | 10,9 s | 122,0 |
| Bom | Pri/Ver | 1,29 m | 10,6 s | 115,7 |
| Abrigo | Out/Inv | 1,41 m | 11,2 s | 128,4 |
| | Anual | 1,22 m | 7,3 s | 135,9 |
| Juréia | Pri/Ver | 1,15 m | 6,8 s | 134,7 |
| | Out/Inv | 1,29 m | 7,7 s | 137,1 |

7. CONCLUSÕES

A distância entre os pontos de medições de ondas das duas regiões modeladas é de cerca de 100 km. Assim, inicialmente, não se deveriam esperar valores discrepantes dos parâmetros de ondas. Observa-se algumas diferenças entre os valores médios dos parâmetros de ondas em águas profundas. De fato, os dados da região da Ilha do Bom Abrigo apresentam períodos e alturas de ondas maiores e um rumo de incidência menor com o NV.

As alturas apresentam uma diferença média pequena, de aproximadamente 0,13 m, valor que pode-se considerar compatível.

O rumo apresenta uma diferença média de $13,9^{\circ}$. Entretanto, a ortogonal das isóbatas sofre uma variação de 9° entre as duas regiões. Assim, considerando-se a diferença de rumo em relação à ortogonal das isóbatas de cada região, chega-se a uma diferença de $4,9^{\circ}$. Esta diferença também pode ser considerada razoável, e nos climas de ondas de cada região a predominância do rumo resultante Nordeste-Sudoeste em relação à linha de costa é mantida.

O período certamente apresenta divergências. Provavelmente o tipo de medição e metodologia no tratamento estatístico do período médio resultaram nesta diferença. O período médio dos dados de Bom Abrigo foi obtido através da cronometragem da observação visual das ondas, enquanto que o período médio dos dados da Juréia resultou da análise dos registros do ondógrafo no domínio do tempo, com a utilização do método de Tucker-Draper.

Outra diferença notada refere-se à distribuição dos rumos entre os dois climas de ondas. A distribuição de rumos dos dados da Ilha do Bom Abrigo é bem ampla, enquanto que para os dados da Juréia apresenta-se extremamente concentrada. Talvez uma explicação seja o fato de que nas observações visuais as vagas possam ter sido observadas mais facilmente ao invés dos marulhos. A dúvida sobre esta questão ainda persiste e necessita ser melhor investigada com outras campanhas de medições de ondas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, R. N. (2000) "O cálculo do transporte de sedimento litorâneo: Estudo de caso das praias de Suarão e Cibratel, Município de Itanhaém, São Paulo". Dissertação

(Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BATTJES, J.A., AND J.P.F.M. JANSSEN (1978), "Energy loss and set-up due to breaking of random waves". Proc. of the 16th Int. Conf. on Coastal Eng. pp. 509-587. ASCE, New York.

CDTN (1982 a 1985) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - Divisão de Engenharia Ambiental "Relatórios de progresso da campanha de medições oceanográficas na região das Praias do Una e do Rio Verde, no litoral Sul do Estado de São Paulo". 11 volumes, Belo Horizonte.

HOLTHUIJSEN, L. H, BOOIJ, N., HERBERS, T.H.C. (1989) "A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents". Coastal Engineering, Vol 13, pp. 23-54.

MARINHA DO BRASIL (1981, 1982) - Diretoria de Hidrografia e Navegação. "Cartas Náuticas e folhas de bordo".

NIELSEN, P. (1979) "Some basic concepts of Wave Sediment Transport". Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.

SPH (1968, 1969) - Serviço de Pesquisas Hidráulicas - "Campanha de medições da Missão Hidrográfica de Cananéia". São Paulo.9