

## **TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA: INTERCOMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS**

**Carlos Ventura Soares**

Marinha – Instituto Hidrográfico, Divisão de Oceanografia  
Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa

**Eugen Rusu**

Marinha – Instituto Hidrográfico, Divisão de Oceanografia  
Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa

**António Alberto Pires Silva**

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa

**Oleg Makarynskyy**

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa

### **RESUMO**

A medição de parâmetros de agitação marítima faz-se tradicionalmente usando bóias ondógrafo e sensores de pressão. As recentes tecnologias acústicas (ADCP's) têm permitido medições "in-situ" de grande qualidade, comparativamente aos métodos tradicionais. Sistemas de detecção remota têm também sido desenvolvidos, desde os satélites aos radares de diferentes bandas (radares HF, VHF ou da banda X).

Esta comunicação pretende apresentar uma comparação entre as principais tecnologias de medição de agitação marítima, tendo em conta as suas principais vantagens e inconvenientes. Pretende-se ainda avaliar as melhores escolhas, conforme o tipo de utilização que se deseja fazer dos dados obtidos: uma utilização operacional, em que os dados são utilizados em tempo real ou quase-real, ou uma utilização para fins científicos, em que os dados são primeiramente processados e depois analisados, de modo a elaborar uma climatologia da agitação marítima no local. A alimentação de modelos de agitação marítima com parâmetros resultantes das observações condiciona também as tecnologias de medição e as metodologias de processamento.

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da agitação marítima sempre foi um desafio para o Homem ao longo da História, nomeadamente para os povos que viviam em zonas litorais. O desenho de navios ou a construção de estruturas portuárias foram certamente das primeiras acções a necessitar de recorrer a este tipo de conhecimento. No século XIX começou a fazer sentir-se a necessidade de abordar as climatologias de agitação marítima de um modo mais científico, tendo alguns matemáticos e físicos da época feito aproximações teóricas ao problema. Contudo, só após a Segunda Guerra Mundial, e após o desenvolvimento de mecanismos fiáveis de medição de ondulação, se passou a registar a ondulação de uma maneira sistemática e com carácter científico. Hoje em dia as necessidades de natureza militar (condições de operação de navios ou desembarques na costa), de engenharia costeira (estruturas portuárias ou de protecção da costa), de engenharia “offshore” (plataformas petrolíferas), de engenharia naval (desenho e construção de navios), de aproveitamento da energia das ondas (centrais de produção de energia) e de natureza ambiental (erosão costeira), continuam a implicar a necessidade de efectuar séries temporais de medição dos parâmetros caracterizadores da agitação marítima.

## 2. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

### Bóias ondógrafo

As bóias ondógrafo constituem o clássico meio de medição de ondulação em águas profundas. Estas bóias seguem livremente os movimentos da superfície do mar. Medindo as acelerações a que a bóia está sujeita, através de acelerómetros incorporados na bóia, obtêm-se os típicos parâmetros de agitação marítima, como sejam a altura (máxima, média e significativa), o período (máximo, médio e de pico) e a direcção da ondulação (média e dispersão). A deslocação vertical da bóia (e consequentemente a altura da onda) é obtida por dupla integração da aceleração vertical. O cálculo da direcção da ondulação é feito a partir das medições dos movimentos horizontais (acelerações horizontais) da bóia. As amarrações destas bóias (ligação ao fundo) estão concebidas de forma a interferirem minimamente com o movimento da bóia.

Numa bóia DATAWELL as medições são feitas tipicamente a partir de registos de 20 minutos em cada 3 horas. A razão de amostragem é de 1.28 Hz e os registos são agrupados em blocos de 200 segundos. Assim, cada registo de 20 minutos contém 6 blocos de 200 segundos.

### Sensores de pressão

Os sensores de pressão são usados desde os anos quarenta nas medições de agitação marítima. Devido ao seu princípio de utilização, medição da pressão entre a superfície e o sensor colocado no fundo, e às limitações técnicas que lhe estão associadas, a sua aplicabilidade restringe-se, na prática, a fundos inferiores a 20 metros.

Num sensor de pressão AANDERAA WTR-9 a operação, em ciclos, é controlada por um relógio interno. Quando o sistema é accionado este fica em “standby” até faltarem 15 minutos para o fim do intervalo de amostragem seleccionado (30 minutos, por exemplo). Nesse momento a medição começa, são calculados os parâmetros e os dados registados. Os parâmetros obtidos são tipicamente a altura máxima e significativa e o período médio, baseados em séries temporais de pressão de 8.5 minutos, amostradas a 2 Hz.

## Sensores acústicos por efeito de Doppler

Os ADCPs (Acoustic Doppler Current Profilers), também conhecidos por ADP's e ADCM's (a designação varia com o fabricante) são instrumentos acústicos, baseados no efeito de Doppler, capazes de medir com elevada precisão não só o campo das velocidades na coluna de água imediatamente acima (ou abaixo, caso instalados no casco de um navio ou embarcação) como também a agitação marítima à superfície.

O princípio básico da medição da agitação marítima através de um ADCP reside na sua capacidade em medir, a partir do fundo, as velocidades orbitais (induzidas pela ondulação à superfície) com grande precisão, associada à detecção da variação da superfície (como uma sonda invertida) e à medição da altura média da coluna de água, através de um sensor de pressão incorporado. De modo a obter-se o espectro da elevação da superfície livre, o espectro das velocidades, calculado a partir das séries temporais da velocidade, é transposto para a superfície recorrendo aos dados obtidos pelo sensor de pressão e aplicando a teoria linear da onda (Santos et al., 2001). Detalhes de funcionamento podem ser encontrados em Terray et al. (1997, 1999).

Num ADCP RDI Workhorse, a operação de medição pode ser efectuada nas frequências dos 300, 600 ou 1200 KHz (a frequência condiciona a profundidade máxima de utilização). O instrumento efectua três cálculos independentes do espectro da elevação da superfície da onda usando a velocidade orbital, a detecção da superfície e os dados de pressão (amostragem a 2Hz). Técnicas de processamento de sinal são usadas (Iterative Maximum Likelihood Method) para estimar a direcção da ondulação (Terray et al.1990). Os cálculos são feitos a partir de "bursts" pré-definidos (valores de 9 ou 18 minutos em cada hora, são frequentes). Do ADCP obtêm-se séries temporais da elevação da superfície da água, permitindo calcular parâmetros de agitação marítima como a altura significativa, período de pico, direcção média e o espectro direccionado da onda para cada "burst".

## Radares Costeiros

Os radares costeiros têm vindo recentemente a revelar-se como uma alternativa viável aos tradicionais sistemas de observação e monitorização marítimos, nomeadamente os respeitantes às observações de correntes superficiais (correntómetros) e características da agitação marítima (bóias ondógrafo, sensores de pressão e acústicos). O facto de serem uma tecnologia recente, ainda em desenvolvimento, implica muitas vezes que não sejam utilizados isoladamente mas em complemento aos sistemas clássicos, servindo estes também como factores de calibração e validação da tecnologia radar.

A utilização de sistemas radar está focalizada essencialmente em:

Radares HF – 3-30 MHz (métricos, 10-100m) – usados para determinação de correntes superficiais e altura e direcção da agitação marítima. Neste tipo de radares existem basicamente duas vertentes:

Sistema **CODAR** (Coastal Ocean Dynamics Applications Radar) – sistema já desenvolvido comercialmente, com largas dezenas de estações espalhadas pelo mundo, exploradas por várias entidades ligadas a universidades e pólos de investigação. O principal pólo é o de Monterey, onde a Naval Postgraduate School (NPS), com apoio da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tem operado um conjunto alargado de radares. A informação relativa a correntes é a mais utilizada por ser a mais fidedigna, enquanto a informação de agitação marítima tem uma componente mais experimental. Na Europa há a referir a Universidade de Hamburgo no desenvolvimento desta tecnologia.

Sistemas **OSCR** (Ocean Surface Current Radar) – sistemas semelhante ao CODAR, existindo apenas sistemas a serem operados por universidades e institutos de investigação da Europa (o mais importante é a Universidade de Southampton). Este sistema é mais difícil de instalar/operar que o sistema CODAR (um "array" de antenas que se entende por dezenas de

metros contra apenas uma antena pequena no CODAR). Embora obtenha melhores resultados que o CODAR na determinação da direcção da ondulação é inferior a este na determinação da altura da ondulação. A aquisição/instalação e operação de um sistemas destes fica também mais cara que o CODAR.

Uma análise extensiva sobre os Radares HF pode ser encontrada em Oceanography (1997).

Radares da banda X (ou banda I) – 3-30 GHz (centimétricos, 1 a 10 cm) – metodologia simples e pouco dispendiosa, que aproveita radares da banda dos radares de navegação para colher informação remota de agitação marítima. Um exemplo de utilização desta tecnologia na área de Sines pode ser vista em Izquierdo et al. (2002).

Radares VHF – 30-300 MHz (métricos – 1 a 10 metros), de que é exemplo o Sistema **COSRAD** – sistema a ser desenvolvido na Austrália (James Cook University). O sistema teoricamente apresentar melhor resolução que os radares HF embora tenha menor alcance (menos de 5 quilómetros).

## Satélites

Os satélites têm tido, nos últimos anos, utilização significativa na observação da agitação marítima. Isso deve-se ao facto de cobrirem extensas zonas, que de outro modo não seria possível observar. Os sensores mais recentes instalados em satélites são os sensores altimétricos ERS1, ERS2 e Topex. Estes altímetros dão estimativas de altura significativa de 7 em 7 km, com um período de retorno de 10 dias para o Topex e 35 dias para os ERS1 e ERS2.

## 3. COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS

### Vantagens, desvantagens e erros associados

Os diferentes sensores de observação de agitação marítima têm vantagens e desvantagens associadas à tecnologia de medição e às metodologias de processamento.

Assim, as bóias ondógrafo são consideradas, há largos anos, a referência nos sensores “in-situ” de medição das características da ondulação. As bóias, de tecnologia consolidada, são de versátil aplicação, seja ela em água pouco profundas ou em alto mar. Um dos problemas possíveis é o factor de erro induzido pela resistência da amarração ao livre movimento de deriva da bóia. Estima-se, no entanto, que esse factor de erro seja, no máximo, de 1.5% do valor de ondulação medido. Uma outra desvantagem na sua utilização é a sua grande exposição a condições adversas, sejam elas naturais (tempestades) ou associadas à actividade humana (abalroamentos).

Os sensores de pressão são muito úteis quando se pretende obter informação da altura da ondulação em lugares sensíveis, como sejam as entradas dos portos e as bacias de manobra e atracação. Têm a vantagem adicional de serem de construção mais robusta relativamente a outras tecnologias mais sensíveis a ambientes adversos. Estes sensores, contudo, não medem direcções da ondulação, o que pode ser limitativo para determinados fins. Uma outra desvantagem dos sensores de pressão é a sua limitada resposta em alta-frequência. Na prática estes sensores apresentam consistentemente valores de altura de ondulação mais baixos que os sensores tipo ADCP e bóia ondógrafo. Essa diferença pode ir até aos 20% em termos de energia (Tucker, 1991), sendo mais acentuada a pequenas profundidades. Este é aliás um problema longamente discutido por investigadores da especialidade. Bishop et al. (1987), baseado em experiência própria e de outros autores, afirma que a teoria linear continua a ser a melhor metodologia para compensar os dados de pressão de modo a dar estimativas

fiáveis da altura da onda (com erros inferiores a 5%). Lee et al. (1984) também alertam que em águas pouco profundas há que ter em conta, nas medições efectuadas com sensores de pressão, às correntes e à não linearidade das ondas. A pressão dinâmica exercida pelas velocidades orbitais induzidas pelas ondas é também fonte de erro. Estes sensores são usados quando não se exige um excessivo rigor ou quando os outros sistemas são desadequados.

Os ADCP's apresentam resultados muito semelhantes aos obtidos pela bóias ondógrafo. Apesar de ser uma tecnologia nova, os ADCP's têm substituído as bóias com vantagem em zonas costeiras, principalmente quando não há necessidade de informação em tempo real. Caso isso aconteça, as estruturas de apoio que serão necessárias (bóia à superfície para transmissão de dados via rádio, por exemplo) tornam o sistema menos competitivo em relação às bóias ondógrafo. Uma outra desvantagem em relação àquelas é a sua limitação em profundidade, embora seja possível chegar aos 200 metros com custos económicos excessivos (equipamentos demasiado onerosos).

Os radares costeiros têm como principal vantagem a sua extensa cobertura (da ordem das dezenas de quilómetros quadrados) comparativamente aos sistemas "in-situ". As suas desvantagens estão associadas ao seu recente aparecimento e consequentemente à sua ainda pouca solidez em termos de resultados obtidos. Perspectiva-se, no entanto, um futuro de expansão destes sistemas, dado que, apesar do significativo investimento inicial, acabam por ser mais baratos que os sistemas "in-situ" em termos de operação e têm uma cobertura infinitamente maior.

Os sistemas altimétricos baseados em satélites têm a enorme cobertura como principal argumento, o que é particularmente importante para verificar/calibrar os modelos globais. A sua fraca repetitividade, aliada ao facto do número de parâmetros passíveis de ser recolhido ser pequena, limita a sua utilização.

As diferentes metodologias de processamento da informação induzem naturalmente diferentes resultados. Cite-se, por exemplo, o uso de parâmetros espectrais da onda versus utilização de parâmetros estatísticos da onda. Os dados obtidos a partir das bóias ondógrafo são pós-processados usando métodos estatísticos e espectrais. Por outro lado o ADCP usa apenas métodos espectrais e os sensores de pressão tratamento estatístico da informação recolhida.

Em Soares et al. (2002), com base numa experiência de campo realizada na costa portuguesa, mostra-se que, para uma série temporal de observações simultâneas, existe concordância muito razoável entre as alturas significativas obtidas pelos ADCP e as bóias ondógrafo, enquanto os dados registados de alturas significativas provenientes dos sensores de pressão eram consistentemente mais baixos.

Em termos gerais, as diferentes tecnologias de aquisição, as limitações e os erros instrumentais (a razão sinal-ruído, os erros de calibração que induzem "offsets" sistemáticos), o ruído hidrodinâmico, a variabilidade nas amostragens intercomparadas e os "offsets" temporais e espaciais são causas para as diferenças encontradas entre dados de agitação marítima provenientes de diferentes sensores (Krogstad, 1999). As diferentes posições dos sensores em relação ao fundo (comparando, por exemplo, o ADCP com o sensor de pressão) ou a influência da maré e das correntes nos espectros de altura da onda baseados na informação da pressão (sensores de pressão e ADCP's) (Strong et al., 2000b) são também factores de erro a considerar.

### **Utilização Operacional versus Utilização Científica**

O tipo de utilização que se vai fazer da informação pode ditar a natureza da escolha da tecnologia. Assim, quando se pretende ter uma utilização operacional, nas aproximações a um porto ou para alimentar modelos operacionais por exemplo, com acesso à informação em tempo real ou quase-real, é comum serem utilizadas bóias ondógrafo nas aproximações e sensores de pressão junto aos locais de atracação. A utilização de ADCP's em tempo real, para os mesmos fins, ocorre poucas vezes em zonas costeiras mas é de frequente utilização

em plataformas petrolíferas. Nas referidas zonas costeiras este instrumento adequa-se melhor a uma utilização “stand-alone”, observando as características da agitação marítima em períodos limitados de tempo (um a dois meses entre substituições), normalmente com a finalidade de estudos técnico-científicos nos locais onde são colocados (estudos de dinâmica sedimentar, por exemplo). Climatologias da agitação marítima passam normalmente por bóias ondógrafo, fundeadas em posições com características de águas profundas.

Radares e satélites são metodologias de menor utilização em Portugal. Os radares costeiros, quaisquer que sejam as suas características, têm apresentado melhor qualidade na análise de informação correntométrica que de informação de agitação marítima. É de esperar, portanto, que esta tecnologia se mantenha no campo científico e experimental nos próximos anos. Estes sistemas têm grandes potencialidades em termos de utilização operacional, garantindo, por exemplo, a informação da agitação marítima para uma larga zona nas aproximações a um porto. A informação satélite, por outro lado, é de extrema importância na calibração e verificação dos modelos regionais e globais, sejam eles oceânicos ou meteorológicos, não sendo porém, devido à deficiente repetitividade, capazes de garantir informação em tempo real, o que limita assim a sua utilização operacional.

### **Alimentação, Validação e Calibração de Modelos**

Os modelos de agitação marítima necessitam de ser alimentados (condições de fronteira ou forçamentos), validados e calibrados por sistemas de observação “in-situ” ou de observação remota. Os primeiros são normalmente os preferidos (principalmente os ADCP’s e as bóias ondógrafo), dado assegurarem maior rigor na medição e obtenção de maior número de parâmetros. No entanto, principalmente em águas profundas oceânicas, apenas sistemas como os satélites permitem efectuar adequadas verificações e calibrações dos modelos globais e regionais, cobrindo extensas áreas, dada a quase não existência de sensores “in-situ” nessas áreas (nomeadamente bóias ondógrafo), por dificuldades logísticas de manutenção destes sensores, a grandes distâncias de costa e a grandes profundidades. Os radares podem assumir-se como tecnologia intermédia entre os sensores “in-situ” e os satélites para zonas costeiras mais alargadas, permitindo a alimentação, verificação e calibração dos modelos costeiros a custos de operação reduzidos.

Em termos científicos são ainda preferíveis sistemas com metodologias de processamento baseadas em análise espectral, em detrimento dos puramente estatísticos, pois aqueles permitem um melhor aproveitamento da informação por parte dos modelos espectrais que utilizam os dados, como sejam o SWAN ou o WW3.

Actualmente a definição de climatologias de agitação marítima passa por uma abordagem integrada de todos estes factores: sensores “in-situ”, sensores remotos e modelos. Assim, e de acordo com Vanlsegghem (2002), as condições necessárias para obter uma climatologia representativa de uma determinada área passam pela homogeneidade da informação de agitação marítima em espaço (sensores remotos cobrindo extensas áreas) e em tempo (sensores “in-situ” e modelos), resolução suficiente para evitar a sub-representação dos eventos e a independência dos eventos de modo a não os sobre-representar. Finalmente, para serem feitas comparações adequadas para efeitos climatológicos, deve a duração das séries temporais (bem como o número de registos) observadas ser a mesma, quaisquer que sejam as fontes utilizadas nas comparações.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta comunicação foram descritas as principais técnicas de aquisição de parâmetros de agitação marítima: as bóias ondógrafo, os sensores de pressão, os sensores acústicos por efeito de Doppler (sensores “in-situ”), os radares costeiros e os satélites (sensores remotos).

Foram apresentadas as vantagens, desvantagens e erros associados a cada tecnologia. As escolhas a ter em conta, conforme se pretenda uma utilização operacional ou científica dos sensores, foram também referidas. Foi finalmente dado enfoque à adequação dos sistemas de observação aos modelos matemáticos de agitação marítima.

Pretendeu-se dar uma panorâmica do tipo de tecnologias existentes, de modo a que o investigador científico, o engenheiro ou o gestor de recursos costeiros e portuários, possam conscientemente avaliar quais as tecnologias mais adequadas para os seus objectivos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este artigo é uma contribuição para o projecto PAMMELA2 (Previsão da Agitação Marítima junto à Costa: Modelos Espectrais e Assimilação de Dados), que se desenvolve no Instituto Hidrográfico e no Instituto Superior Técnico, suportado pelo financiamento PDCTM/P/MAR/15242/1999 da Fundação para Ciência e a Tecnologia.

#### 6. REFERÊNCIAS

Bishop, C.T. and Donelan, M.A., 1987: Measuring Waves with Pressure Transducers. *Coastal Engineering*, 11 (1987), 309-328

Izquierdo, P., Guedes Soares, C. e Fontes, J.B., 2002: Monitorização da Agitação Marítima por Radar, *8ª Jornadas Técnicas de Engenharia Naval*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Viana do Castelo, Portugal.

Krogstad, H.E., 1999: Methods for intercomparison of wave measurements. *Coastal Engineering*, 37.

Lee, D.Y. e Wang, H., 1984: Measurement of Surface Waves from Subsurface Gauge. Proceedings 19<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, ASCE, 1:271-286.

Oceanography, 1997: Special Issue on High Frequency Radars for Coastal Oceanography. *Oceanography*, Volume 10, Number 2.

Santos, L.Q., Soares, C. Ventura e Onofre, J.M., 2001: Utilização de Equipamentos Acústicos para Medição de Parâmetros de Agitação Marítima. *2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Sines, Portugal.

Soares, C. Ventura, Rusu, E., Santos, L.Q., Pires Silva, A.e Makarynsky, O., 2002: Coastal Wave Modelling Validation Using New Field Techniques. *7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Banff, Canada.

Strong, B. and Devine, P. 2000a: Now use ADCP's for waves as well as currents. *International Ocean Systems*, September/October, Volume 4 Number 5.

Strong, B., Brumley, B.H., Terray, E.A. and Kraus, C. 2000b: Validation of the Doppler shifted dispersion relation for waves in the presence of strong tidal currents using ADCP wave directional spectra and comparison data. *6<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 6-10 November, Monterey, USA.

Terray, E.A., Krogstad, H.E., Cabrera, R., Gordon, R.L. and Lohrmann, A., 1990: Measuring wave direction using upward-looking Doppler Sonar. *Proc. IEEE 4<sup>th</sup> Working Conference on Current Measurement*, IEEE Press, 252-257

Terray, E.A., Gordon, R.L. and Brumley, B.H., 1997: Measuring wave height and direction using upward-looking ADCPs. *Proc. Oceans'97*, IEEE Press, 287-290.

Terray, E.A., Brumley, B.H. and Strong, B., 1999: Measuring waves and currents with an upward-looking ADCPs. *Proc. IEEE 6<sup>th</sup> Working Conference on Current Measurement*, IEEE Press, 66-71.

Tucker, M. J., 1991: *Waves in Ocean Engineering: measurement, analysis, interpretation*. Ellis Horwood Limited, New York, U.S.A.

VanIseghem, S., 2002: Derivation of Design Wave from Joint Buoy, Satellite and Hindcast Data Sources. *7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Banff, Canada.