

CARACTERIZAÇÃO DO AGRUPAMENTO DE ONDAS E O SEU EFEITO NOS SISTEMAS NAVIOS-AMARRAS

Maria da Graça Neves^(a), Rui Capitão^(a), João Alfredo Santos^(a)

^(a) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

gneves@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt, jasantos@lnec.pt,

RESUMO

A agitação marítima surge frequentemente com ondas agrupadas. O interesse deste fenómeno reside no facto de que os grupos de ondas jogam um papel importante na geração de oscilações de longo período e estas oscilações podem conter, quer a frequência de ressonância de um dado porto, originando então oscilações ressonantes dessa bacia portuária, quer a frequência de ressonância de um sistema navio-amarras-defensas. Porém, normalmente, os estudos de caracterização da agitação marítima não apresentam indicações sobre agrupamento de ondas.

Nesta comunicação, exemplifica-se a importância dos grupos de ondas no funcionamento de um porto através da utilização do modelo numérico do LNEC para simulação do comportamento de navios amarrados, MOORNAV. Chama-se atenção para a utilidade da informação sobre o agrupamento de ondas existente num determinado estado de mar, apresentando-se uma análise crítica de alguns dos métodos existentes de quantificação do agrupamento de ondas de um registo. Para obter dados de referência para cada um dos métodos apresentados, são mostrados os valores dos parâmetros para condições de agitação simuladas numericamente e para dados reais.

1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima surge frequentemente sob a forma de grupos de ondas, isto é, conjuntos de ondas sucessivas cujas cristas (ou alturas) estão acima de um certo nível de agrupamento, v (ou, para simplificar, de uma certa altura de onda, $H_c = 2v$). Os grupos de ondas, por sua vez, podem ser responsáveis pela geração de oscilações de longo período (da ordem dos minutos) no interior de bacias portuárias, já que a sua gama de frequências pode conter, quer a frequência de ressonância de um dado porto, originando então oscilações ressonantes dessa bacia portuária, quer a frequência de ressonância de um sistema navio-amarras-defensas. Estas oscilações podem, assim, provocar movimentos excessivos nesse sistema, dificultando as operações de carga e descarga e podendo causar até a quebra de amarras.

Existem numerosas referências de efeitos ressonantes em portos portugueses (Sines, Leixões, etc.) cuja origem pode estar relacionada com o agrupamento de ondas. Além disso, Burcharth, 1979, entre outros, investigou a importância do impacto dos grupos de ondas em estruturas costeiras, assinalando a necessidade da utilização de parâmetros de agrupamento de ondas na análise da agitação marítima. Porém, normalmente, os estudos de caracterização da agitação marítima não apresentam indicações sobre agrupamento de ondas.

Nesta comunicação, procura-se chamar a atenção para a importância dos grupos de ondas (entendidas neste trabalho como de zero ascendente) devido à sua associação a efeitos em obras marítimas ou navios amarrados e para a utilidade da informação sobre o agrupamento de ondas existente num determinado estado de mar.

Assim, na secção 2, aplica-se o modelo numérico do LNEC, MOORNAV para ilustrar a influência de um grupo constituído pela sobreposição de duas ondas sinusoidais no comportamento de navios amarrados.

Na secção 3 faz-se uma apresentação crítica de alguns dos métodos existentes de quantificação do agrupamento de ondas de um registo, nomeadamente os métodos que usam as séries de alturas de onda, em que se aborda a caracterização dos grupos de ondas numa perspectiva discreta, e os métodos que usam a envolvente das ondas, em que a caracterização dos grupos de ondas é realizada numa perspectiva contínua.

Na secção 4, apresenta-se a aplicação dos métodos para diferentes estados de mar, quer reais quer obtidos numericamente, com forte e com fraco agrupamento de ondas. Com base nestes dados, apresentam-se valores de referência para cada um dos métodos de quantificação do agrupamento apresentados.

Finalmente, na secção 5, apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. APLICAÇÃO DO MODELO SIMNAV

O pacote numérico MOORNAV, implementado no LNEC para estudo do comportamento de navios amarrados, baseia-se na abordagem da função de resposta a impulso proposta por Cummins (1962). Este pacote é composto essencialmente por dois modelos numéricos que lidam, respectivamente, com a resposta do navio livre sujeito à acção das ondas e com a dinâmica do sistema de amarração.

Assumindo a linearidade do comportamento do navio livre, é possível decompor a resposta do navio à acção das ondas em dois problemas mais simples: o problema de radiação, em que se determinam as forças e os momentos que são necessários exercer no navio para que este oscile em água parada segundo cada um dos seis graus de liberdade possíveis para o movimento do navio; o problema de difracção, em que se determinam as forças e os momentos exercidos pela agitação incidente no casco imóvel do navio. O modelo numérico WAMIT resolve estes problemas no domínio da frequência utilizando um método de painel (Newman e Sclavounos, 1988). Para um conjunto seleccionado de frequências obtêm-se, do problema de radiação, os coeficientes das matrizes de massa adicionada e de amortecimento, bem como, do problema de difracção, as forças e os momentos exercidos pelas ondas.

As funções de resposta a impulso (também designadas por funções de atraso) e os coeficientes de massa adicionada para frequência infinita associados aos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio são obtidos das transformadas de Fourier dos resultados do domínio da frequência para o problema de radiação. As séries temporais das forças actuantes no navio obtêm-se da sobreposição das forças devidas a cada uma das frequências em que pode decompor-se a onda incidente no navio.

Aquelas séries temporais, juntamente com as funções de resposta a impulso, os coeficientes de massa adicionada e os parâmetros do sistema de amarração (amarras e defensas) permitem a montagem das equações de movimento do navio amarrado. Da resolução destas equações obtêm-se as séries temporais dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio e dos esforços nas amarras e nas defensas. Este problema é resolvido com o modelo numérico BAS (Mynett *et al.*, 1985).

Para a montagem das equações de movimento do navio amarrado é necessária informação acerca da disposição e comportamento material dos componentes do sistema de amarração. Para as defensas são necessárias a posição e as curvas carga-deflexão enquanto para as amarrações são as curvas carga-elongamento e a posição dos cabeços de amarração (bem como a posição dos pontos de amarração no navio) que têm de ser conhecidos.

O caso de teste escolhido para ilustrar a influência do agrupamento de ondas no comportamento de navios amarrados é o “Cassiopeia” (comprimento fora-a-fora de 98.6 m, boca de 15.9 m e calado de 4.8 m) amarrado no cais comercial do porto da Figueira da Foz. Trata-se de uma configuração já modelada pelo LNEC no âmbito de um estudo realizado para o então Instituto Portuário do Centro (Santos, 2000).

A Figura 1 apresenta a painelização da parte imersa do casco do “Cassiopeia” e da protecção marginal adjacente modelada com um talude impermeável de 1:1. Foram utilizados 764 painéis para o casco e 1200 para o aro representando o talude, dos quais 500 na face correspondente ao talude. Em Santos (2000) podem observar-se os gráficos das funções de resposta a impulso obtidas bem como os detalhes do tratamento dos resultados do domínio da frequência.

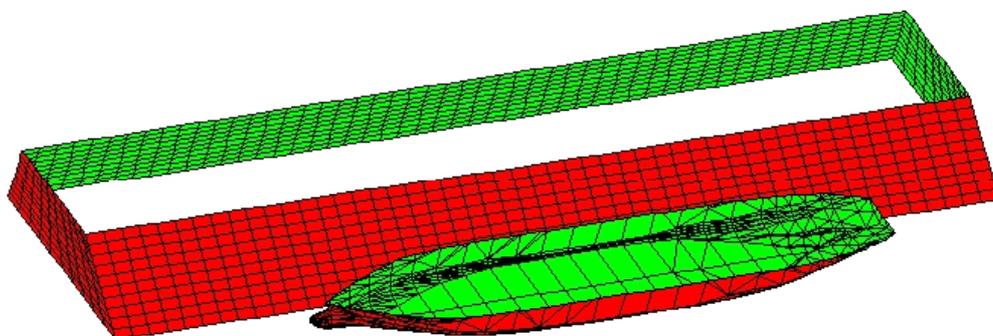


Figura 1 – Painelização utilizada nos problemas de radiação e de difração

O esquema de amarração utilizado é apresentado na Figura 2. Na Figura 3 a) e b) apresentam-se as relações constitutivas das amarras e das defensas, respectivamente, enquanto o Quadro 1 e o Quadro 2 contêm as coordenadas das extremidades das defensas e das amarras não deformadas.

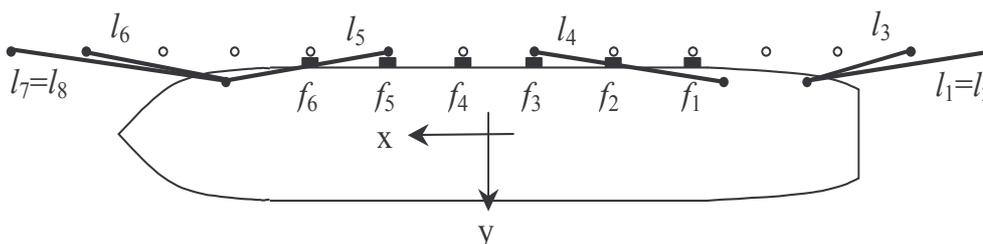


Figura 2 – Esquema de amarração

Quadro 1 – Coordenada x dos pontos de contacto das defensas

| f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 |
|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| -27.00 | -17.00 | -7.00 | +3.00 | +13.00 | +23.00 |

Quadro 2 – Coordenadas das extremidades das amarras

| Amarra | Coordenadas cais (m) | | | Coordenadas navio (m) | | |
|--------|----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | x | y | Z | x | y | z |
| l_1 | -67.00 | -9.50 | +3.20 | -40.79 | -7.00 | +3.70 |
| l_2 | -67.00 | -9.50 | +3.20 | -40.79 | -7.00 | +3.70 |
| l_3 | -57.00 | -9.50 | +3.20 | -40.79 | -7.00 | +3.70 |
| l_4 | -7.00 | -9.50 | +3.20 | -29.29 | -8.00 | +2.20 |
| l_5 | +13.00 | -9.50 | +3.20 | +35.00 | -7.00 | +4.20 |
| l_6 | +53.00 | -9.50 | +3.20 | +35.00 | -7.00 | +4.20 |
| l_7 | +63.00 | -9.50 | +3.20 | +35.00 | -7.00 | +4.20 |
| l_8 | +63.00 | -9.50 | +3.20 | +35.00 | -7.00 | +4.20 |

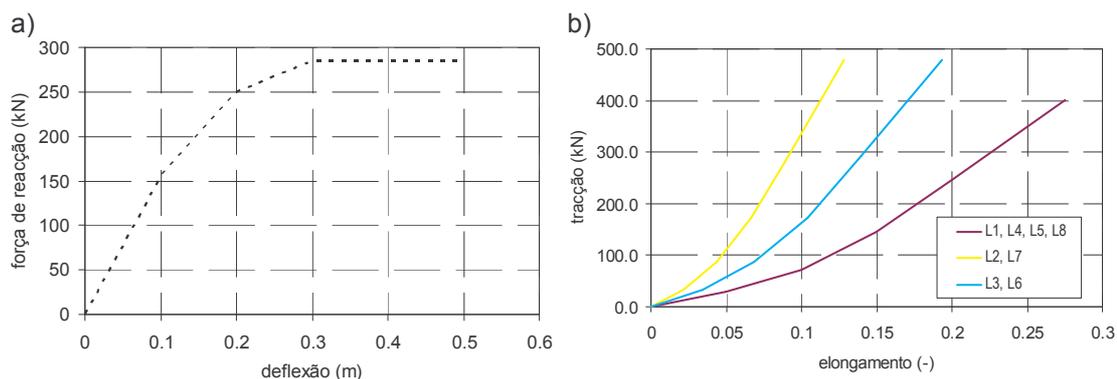


Figura 3 – Curvas de comportamento dos elementos do sistema de amarração. a) defensas; b) amarras

O primeiro exercício com esta configuração consistiu na determinação da frequência natural do sistema navio - amarras - defensas. Numa situação sem ondas, desviou-se inicialmente o navio 2 m da posição de repouso no sentido positivo do eixo x (o eixo longitudinal do navio) e observaram-se as oscilações resultantes. Na Figura 4 representa-se a série temporal da coordenada x do centro de gravidade do navio. Da transformada de Fourier desta série, verificou-se que a componente com maior energia tem uma frequência de 0.0305 Hz. Determinando a resposta do sistema para ondas com 0.10 m de altura e cuja direcção de propagação é colinear com o eixo longitudinal do navio, confirmou-se que esta deve ser a frequência própria da oscilação do sistema segundo o eixo x.

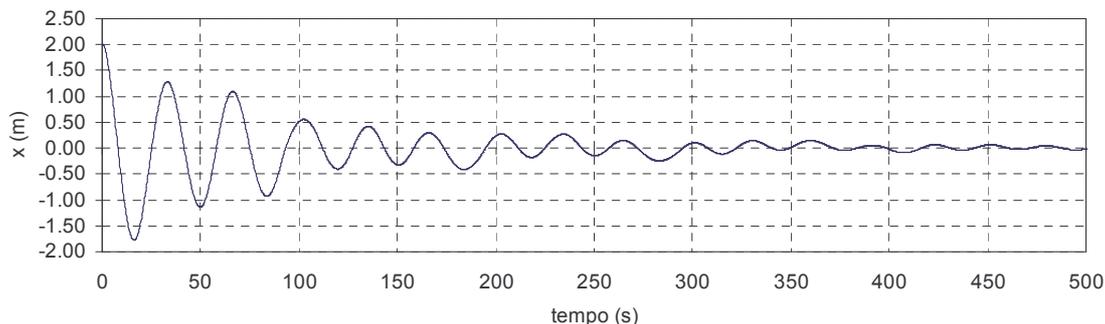


Figura 4 – Evolução temporal da coordenada x do centro de gravidade do navio depois deste ter sido desviado da posição de repouso 2 m no sentido positivo do eixo x.

A sobreposição de duas ondas sinusoidais de frequências ω_1 e ω_2 (e números de onda k_1 e k_2) propagando-se no mesmo sentido dá origem a uma elevação da superfície livre onde são visíveis a existência de grupos de ondas cuja envolvente tem uma frequência $(\omega_1 - \omega_2)/2$ e um número de onda $(k_1 - k_2)/2$. Com este grupo propaga-se uma onda longa ligada de frequência $(\omega_1 + \omega_2)$. Se a frequência desta onda ligada for semelhante à frequência de ressonância do sistema navio-amarras-defensas, é expectável que a resposta do sistema seja mais notável do que quando solicitado pelas ondas isoladas. É o que pode observar-se no Quadro 3 onde se apresentam as amplitudes do movimento segundo o eixo x quando o sistema é solicitado por ondas de frequência 0.167 Hz e 0.198 Hz (Onda 1 e Onda 2, no Quadro 3) e uma amplitude de 0.25 m e pelo grupo resultante da sobreposição dessas ondas (Grupo no Quadro 3). Importa referir que os resultados só se tornam notáveis quando se inclui o efeito da onda associada ao grupo. Nesse caso, a amplitude do movimento passa de 0.065 m para 0.690 m. Na Figura 5 apresenta-se a série temporal da elevação da superfície livre, enquanto na Figura 6 se apresentam os gráficos das séries temporais do movimento do centro de gravidade do navio segundo a coordenada x na situação em que não se considera apenas as ondas componentes

do grupo (linha “Grupo”) e na situação em que se inclui o efeito da onda longa ligada ao grupo (linha “Grupo + 2ª ordem”).

Quadro 3 – Amplitude máxima do movimento segundo o eixo x do centro de gravidade do navio

| | Onda 1 | Onda 2 | Grupo | Grupo + 2ª ordem |
|---------------|--------|--------|-------|------------------|
| Amplitude (m) | 0.013 | 0.047 | 0.065 | 0.690 |

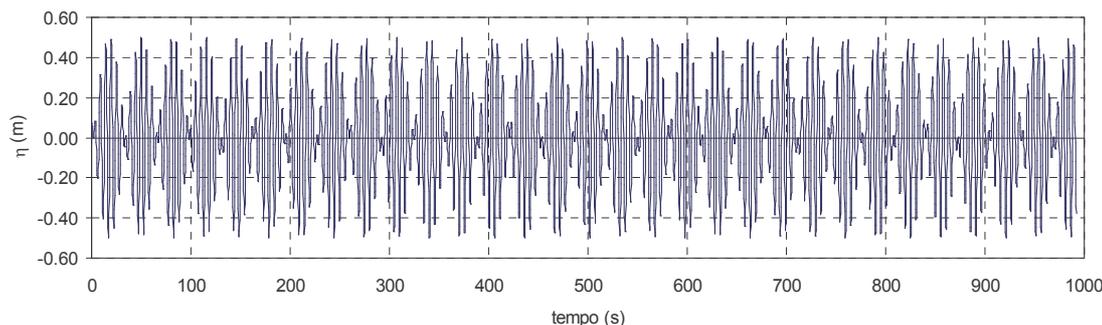


Figura 5 – Série temporal da elevação da superfície livre resultante da sobreposição de duas ondas sinusoidais de frequências 0.167 e 0.198 Hz e altura 0.5 m.

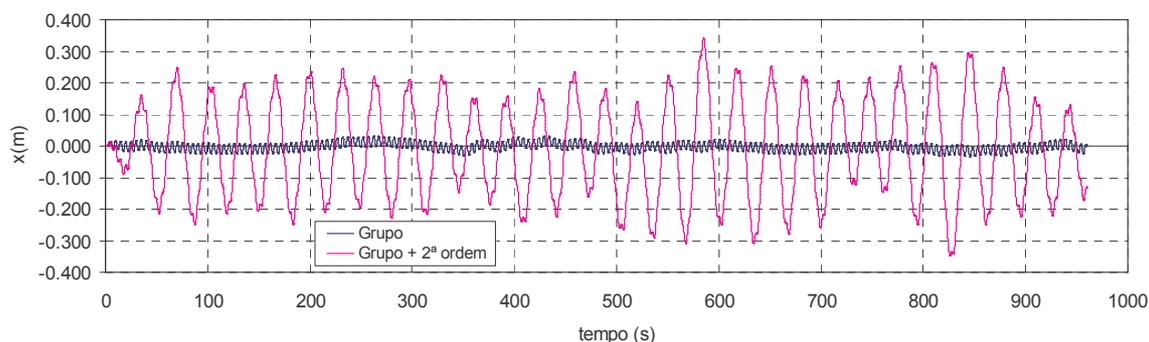


Figura 6 – Séries temporais da coordenada x do centro de gravidade do navio quando o sistema navio – amarras – defensas está sujeito ao grupo de ondas resultante da sobreposição de duas ondas sinusoidais de frequências 0.167 e 0.198 Hz e altura 0.5 m.

3. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGRUPAMENTO DE ONDAS

3.1. Introdução

Em geral, a caracterização de ondas marítimas faz-se através da análise das distribuições das alturas, períodos e direcções de onda (análise no tempo), assim como através da análise dos espectros correspondentes (análise espectral). Porém, muitas vezes só o conhecimento da informação espectral de um certo registo de onda numérico ou real, apesar de ser fundamental, não é suficiente. Efectivamente, do ponto de vista da engenharia, a ocorrência de um certo número de ondas de altura superior a certo nível tem consequências diferentes na estrutura solicitada conforme estas ondas são consecutivas ou intervaladas com outras de menor altura.

Assim, o simples conhecimento do espectro dum registo não possibilita o total conhecimento do registo, o que pode constatar-se ao examinar o conhecido modelo espectral das fases aleatórias utilizado normalmente na simulação numérica de registos de ondas com um dado espectro $S(f)$ (Carvalho, 1989):

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N \cos(2\pi f_k t + \beta_k) \sqrt{2S(f_k) \Delta f_k} \quad (1)$$

De acordo com este modelo, para obter uma realização, $\eta(t)$, com um certo espectro $S(f)$ há que especificar as fases (aleatórias) das ondas, f_k , para além da especificação do próprio espectro. Realmente, verifica-se que, para um mesmo espectro, alterar as fases tem como consequência a produção de registos necessariamente diferentes e com agrupamentos de ondas diferentes (Capitão e Carvalho, 1997).

Uma forma imediata e fácil de caracterizar os grupos de ondas de um registo de ondas consiste na contagem do número de ondas, J , de cada sequência de cristas que excedem um certo nível de agrupamento, v (Figura 7). À média do número de ondas das sequências assim encontradas em cada registo chama-se valor médio do número de ondas dos grupos de ondas de nível v , $E[J]$. Este tipo de caracterização de grupos de ondas assume uma perspectiva discreta.

Uma outra forma de caracterização de grupos de onda menos óbvia utiliza a noção de envolvente de um registo ou realização, $\eta(t)$, a qual é uma função, $R(t)$, cujo gráfico liga as cristas de $\eta(t)$ (Figura 7). Esta caracterização, que assume um ponto de vista contínuo, consiste no cálculo da duração do grupo de ondas, D , isto é, o intervalo de tempo durante o qual as cristas das ondas do grupo se mantêm acima de v . À média das durações dos grupos ao longo do registo chama-se valor médio da duração dos grupos de ondas de nível v , $E[D]$.

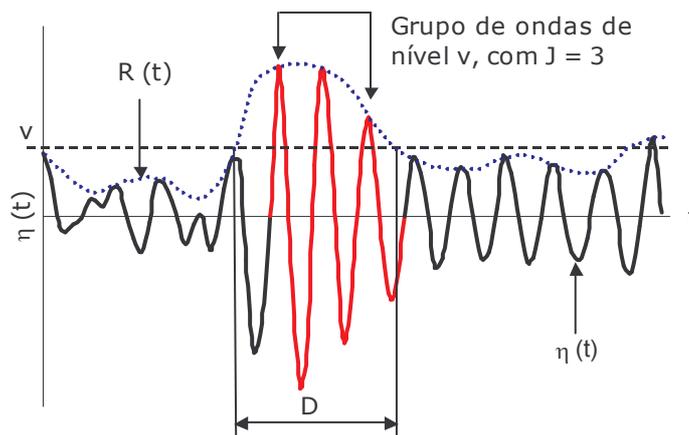


Figura 7 – Grupo de ondas de nível v e sua duração

É fácil relacionar aproximadamente os valores médios das duas variáveis J e D , relativas às perspectivas discreta e contínua, se se conhecer o período médio do registo, T_z :

$$E[D] = T_z E[J] \quad (2)$$

sendo: $E[D]$ o valor médio da duração dos grupos de ondas, medido em unidades de tempo;

T_z o período médio (de zero ascendente) das ondas;

$E[J]$ o valor médio do número de ondas dos grupos de ondas.

Notar que, desta forma, se for possível dispor das distribuições de J e D , será praticável obter outros parâmetros de interesse para além de $E[J]$ e de $E[D]$.

Podem seguir-se várias vias para o tratamento teórico dos grupos de ondas:

- Através da série de alturas de onda, com o método dos chorrilhos, o método de Kimura e o método de Kimura Espectral. Nestes métodos, a caracterização dos grupos de ondas é realizada segundo uma perspectiva discreta. Estes métodos serão tema da Secção 3.2.
- Através da envolvente das ondas, com o método da envolvente, o método da envolvente de Rice/Hilbert, as fórmulas de Longuet-Higgins, 1984, e o método REIA (adaptação do método

SIWEH de Funke e Mansard, 1979), em que se considera uma perspectiva contínua da mesma caracterização. As fórmulas de Longuet-Higgins, 1984, serão abordadas na Secção 3.3.

- Paralelamente, se se admitir que o espectro determina os grupos de onda, pode ainda utilizar-se um conjunto de parâmetros espectrais desenvolvidos com o intuito de relacionar as estatísticas do comprimento de grupos de ondas (aqui representado por $E[J]$) com a forma do espectro do registo. Este assunto será tratado na Secção 3.4.
- Finalmente, existe o chamado método directo que consiste em determinar directamente, a partir do próprio registo, e não do espectro, toda a informação respeitante aos grupos de ondas que realmente ocorrem. Este método, por necessitar sempre da existência do registo de ondas, não será aqui abordado.

De acordo com Tucker, 1991, a primeira das abordagens é mais adequada quando o espectro do registo em análise é largo, ao passo que a segunda é melhor para os registos de espectros mais estreitos. Notar que os métodos dos dois primeiros grupos acima mencionados são métodos indirectos e neles procuram-se variáveis ou parâmetros que, de algum modo, caracterizem os grupos de ondas.

Claramente, uma variável de grande interesse é o número de ondas dos grupos, J , ou a correspondente duração do grupo, D (Figura 7), com os consequentes parâmetros valor médio, $E[J]$ ou $E[D]$, variância, $var[J]$ ou $var[D]$, etc.. No entanto, se se tiver acesso às distribuições de J ou de D , outros parâmetros caracterizadores dos agrupamentos de ondas podem ainda ser calculados.

Nesta comunicação, vai interessar essencialmente a caracterização de grupos de ondas através de $E[J]$, obtido quer através das alturas de onda (Secção 3.2) quer da envolvente (Secção 3.3), e dos parâmetros espectrais do terceiro grupo (Secção 3.4). O valor de $E[J]$, calculado através de qualquer que seja o método, servirá assim como *medida da intensidade do agrupamento de ondas* de um certo registo.

3.2 Caracterização de grupos de ondas através das alturas de onda

Por motivos históricos, começa-se por descrever o chamado *método dos chorrilhos* (*method of runs*) que foi proposto, entre outros, por Goda, 1976. Um *chorrilho* é uma sucessão de *experiências de Bernoulli* com um mesmo resultado (êxitos ou fracassos) que, quando aplicado às ondas, é o que normalmente se designa por grupo de ondas. A hipótese que está na base da teoria dos chorrilhos, que consiste em considerar cada elemento do chorrilho uma experiência de Bernoulli, traduz-se, quando aplicada aos grupos de ondas, em admitir que alturas de onda diferentes são independentes e que é constante a probabilidade, p , de uma qualquer altura, H , exceder o valor $H_c (= 2v)$. Esta teoria, permite, de algum modo, fazer uma caracterização estatística dos grupos de ondas, mas a hipótese que lhe está na base (que, como se viu, consiste em admitir que alturas de onda diferentes são independentes e que é constante a probabilidade, p , de uma qualquer altura, H , exceder o valor H_c) é bastante duvidosa, para não dizer totalmente incorrecta. Por isso, não é de admirar que os resultados teóricos que produz não sejam corroborados na prática, como mostra Vledder, 1983. Este autor conclui, de estudos de vários autores, que os valores do número médio de ondas dos grupos estimados a partir de registos reais são sempre maiores que os previstos pela teoria dos chorrilhos, o que é também confirmado nos resultados apresentados nesta comunicação.

Realmente, Rye, 1974, tinha verificado que existe correlação entre as alturas de onda reais. Segundo Rye, 1974, o coeficiente de correlação de ordem m das alturas de onda de um registo (ou seja, entre as alturas de onda de ordem k e $k+m$) é dado por:

$$r_m = \frac{1}{\sigma^2(N-m)} \sum_{k=1}^{N-m} (h_k - \bar{H})(h_{k+m} - \bar{H}) \quad (3)$$

sendo:

h_k - as altura das ondas sucessivas do registo;

\bar{H} - a altura média das ondas do registo;

σ - o desvio-padrão das alturas de onda do registo.

Nesta equação, quando o índice $m=1$, $r_m = r$, isto é, trata-se do coeficiente de correlação entre alturas de onda sucessivas, que pode ser calculado se se tiver acesso ao registo de ondas. Os valores de r_m obtidos com esta equação, na prática, estão longe de ser próximos de zero. Por isso, o método dos chorrilhos, tal como foi proposto por Goda, 1976, tem de ser rejeitado.

Dadas as limitações do método dos chorrilhos, surgiu um seu refinamento através de Kimura, 1980, o qual considera não nula a correlação entre alturas de onda sucessivas e envolve as designadas *cadeias de Markov*. Neste método, é calculado o chamado *parâmetro (de correlação) de Kimura*, κ , através da seguinte equação implícita entre r e κ :

$$r = r_1 = \frac{E(\kappa) - \frac{(1-\kappa^2)K(\kappa)}{2} - \frac{\pi}{4}}{1 - \frac{\pi}{4}} \quad (4)$$

em que $E()$ e $K()$ são os integrais elípticos completos de 1ª e 2ª espécie, respectivamente.

Nesta teoria, $E[J]$ e $E[G]$ são calculados de acordo com as seguintes fórmulas:

$$E[J] = \frac{1}{1 - p_{22}} \quad (5)$$

$$E[G] = \frac{1}{p_{22}(1 - p_{22})} \quad (6)$$

em que p_{22} é a probabilidade condicional de que a altura de onda, H_{k+1} , exceda a altura H_c , sabendo que a altura anterior, H_k , já excede esse valor. De acordo com o método de Kimura, p_{22} é calculada de acordo com:

$$p_{22} = \frac{\int_{H_c}^{+\infty} \int_{H_c}^{+\infty} f(x, y) dx dy}{\int_{H_c}^{+\infty} f(x) dx} \quad (7)$$

Nesta fórmula, onde se assume que o espectro do registo das elevações da superfície da água é estreito, os integrandos do denominador e do numerador são, respectivamente, as densidades das distribuições “univariada” e “bivariada” de Rayleigh, cujas fórmulas se apresentam a seguir:

$$f(x) = \frac{x}{4m_0} \exp\left(-\frac{x^2}{8m_0}\right) \quad (8)$$

$$f(x, y) = \frac{xy}{16m_0^2(1-\kappa^2)} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{8m_0(1-\kappa^2)}\right) \cdot I_0\left(\frac{\kappa xy}{4m_0(1-\kappa^2)}\right) \quad (9)$$

Nestas fórmulas, $I_0()$ é a função de Bessel modificada de ordem zero e m_0 é o momento de ordem 0 do espectro $S(f)$, cuja expressão geral é dada por:

$$m_n = \int_0^{+\infty} f^n S(f) df \cong \sum_{k=1}^N f_k^n S(f_k) \Delta f \quad (10)$$

Como se vê, uma desvantagem do método de Kimura, tal como foi apresentado inicialmente, é o facto de o parâmetro que define as características do agrupamento não se encontrar estabelecido em termos do espectro de energia do processo em estudo. Realmente, não é habitual possuir-se o registo das alturas de onda dum certo estado de mar. O coeficiente de correlação r , Eq. (3) com $m=1$, e o parâmetro κ , calculado a partir daquele através da utilização da Eq. (4), são, nessas circunstâncias, impossíveis de determinar. Torna-se, portanto, necessário determinar outros parâmetros que possam caracterizar os grupos de ondas em função das características do espectro.

Assim, Battjes e Vledder, 1984, através do recurso a algumas fórmulas espectrais de Battjes (Battjes, 1974), propuseram o cálculo de κ a partir da informação espectral. Deste modo, o método de Kimura passou a ser conhecido por método de *Kimura Espectral*.

$$\kappa = \frac{1}{m_0} \sqrt{\left[\int_0^{+\infty} S(f) \cos(2\pi f \tau) df \right]^2 + \left[\int_0^{+\infty} S(f) \sin(2\pi f \tau) df \right]^2} \quad (11)$$

onde τ é o intervalo médio de tempo entre ondas sucessivas, calculado, aproximadamente, de

$$\tau \approx T_Z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (12)$$

Por outro lado, segundo Battjes, 1974, a Eq. (4) é bem aproximada por

$$r = \frac{\pi}{16 - 4\pi} \left(\kappa^2 + \frac{\kappa^4}{16} + \frac{\kappa^6}{64} \right) \quad (13)$$

com erro menor que 0.1 %, para $\kappa \in (0, 0.7)$, e menor que 1 %, para $\kappa \in (0.7, 0.95)$, segundo Vledder, 1992.

Notar que, para o cálculo de p_{22} , da Eq. (7), a partir de um registo, não é necessário calcular r , mas poderá haver utilidade em conhecê-lo por outros motivos e, por isso, a Eq. (13) tem interesse.

Em Battjes e Vledder, 1984, analisam-se as distribuições de J em registos provenientes do Mar do Norte obtidos em condições de mar severas. Estes autores verificaram que as estimativas de $E[J]$ pelo método de Kimura Espectral concordam muito bem com as observações.

Nesta comunicação será feito uso da Eq. (5), para o cálculo dos valores de $E[J]$, utilizando o método de Kimura Espectral. Este valor será mais à frente designado pela sigla JKE.

2.3 Caracterização de grupos de ondas através da envolvente

Nesta secção, aborda-se sumariamente um dos métodos de caracterização de grupos de ondas que adoptam a noção de envolvente de um registo.

Assim, a partir da noção de envolvente, é possível obter para o valor médio de J a seguinte fórmula aproximada, adaptada de Longuet-Higgins, 1984,

$$E[J] \cong \frac{1}{v} \sqrt{\frac{m_0(4\pi^2 + 1 - \kappa^2)}{2\pi(1 - \kappa^2)}} \quad (14)$$

É de notar que este método de cálculo de $E[J]$, apesar de ter sido desenvolvido a partir da teoria da envolvente, não necessita do cálculo duma função envolvente, $R(t)$, do registo (Figura 7). No entanto, há outros métodos que compreendem o uso da função envolvente, para os quais esta tem que ser calculada. Entre esses métodos, saliente-se os métodos da *envolvente de Rice* e da *envolvente de Hilbert*, o método SIWEH, Funke e Mansard, 1979, e o método REIA, Capitão, 2001.

Neste trabalho, a Eq. (14) é designada por *fórmula de Longuet-Higgins*. Os valores de $E[J]$ resultantes desta equação serão à frente designados pela sigla JLH.

2.3 Caracterização de grupos de ondas através de parâmetros espectrais

É sabido que a largura espectral correspondente a um certo registo tem, em média, relação com as características de agrupamento de ondas desse registo e, portanto, é natural que parâmetros caracterizadores da largura do espectro (parâmetros espectrais) sejam por vezes também utilizados como métodos de caracterização de grupos de ondas. Há vários destes parâmetros, dos quais se destacam os seguintes: (a) o parâmetro de Goda, 1970, Q_p (b) o parâmetro de Medina & Hudspeth, 1987, Q_e , (c) o Parâmetro de Longuet-Higgins, 1984, ν (d) o parâmetro de Battjes e Vledder, 1984, κ e (e) a aproximação de Battjes, 1974, do coeficiente de correlação entre ondas consecutivas, r . Estes parâmetros, adimensionais, são calculados com base na informação espectral do registo de ondas e são definidos a seguir:

(a) Q_p - parâmetro de Goda, 1970

$$Q_p = \frac{2 \int_b^{\infty} f S^2(f) df}{m_0^2} \quad (15)$$

(b) Q_e - parâmetro de Medina e Hudspeth, 1987

$$Q_e = \frac{2m_1}{m_0^3} \int_b^{\infty} S^2(f) df \quad (16)$$

(c) ν - parâmetro de Longuet-Higgins, 1984

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (17)$$

(d) κ - parâmetro de Battjes e Vledder, 1984, já definido na Eq. (11)

(e) r - aproximação do coeficiente de correlação entre alturas de onda sucessivas de Battjes, 1974, também já definida na Eq. (13).

Destes parâmetros, só κ tem uma base teórica aceitável. Todos os outros têm um carácter empírico, ou mesmo intuitivo, na sua génese, pelo que se devem usar estes parâmetros com algum cuidado. Porém, mesmo assim, é sabido que o parâmetro κ tende a subestimar a intensidade dos grupos de onda quando usado para calcular o valor de $E[J]$ na Eq. (5), como se vai ver mais à frente.

Notar também que o parâmetro ν , de Longuet-Higgins, 1984, só é válido para espectros estreitos para os quais a banda passante é $\nu^2 \ll 1$. Longuet-Higgins, 1984, verificou que para registos de ondas de vento típicos deverá ser aplicado um filtro de banda passante com frequências inferior e superior de corte de, respectivamente, 0.5 e 1.5 vezes a frequência de pico (Masson e Chandler, 1993).

O parâmetro GF de Funke e Mansard, 1979, não é considerado neste trabalho, por ser “incapaz de identificar correctamente as características do agrupamento de ondas” (Medina e Hudspeth, 1987). A variação de valores de GF que se observa em cálculos feitos com

diferentes registos é devida, segundo estes autores, ou às “janelas” usadas, ou a efeitos não-lineares.

É também de referir que Vledder e Battjes, 1992, e Vledder, 1992, consideram que Q_p e Q_e não são adequados para caracterizar a largura de espectro, mesmo no que diz respeito aos grupos de onda. Segundo estes autores, na estimação de espectros, estes parâmetros dão apenas uma indicação dos valores de ordenada máxima dos espectros (correspondentes à frequência de pico) e da variabilidade amostral. Como se sabe, há uma assinalável variabilidade amostral quando se estima a densidade espectral $S(f)$ a partir de um único registo de onda. Tal variabilidade pode ser reduzida através de alisamento, muito embora se perca resolução. No caso do cálculo de ν e κ , a excentricidade (*bias*) é sempre reduzida, mesmo quando há muito alisamento. Contudo, Q_p e Q_e são proporcionais ao integral do quadrado de $S(f)$. Como tal, a variabilidade amostral em $S(f)$ provoca uma excentricidade positiva na estimação de Q_p e Q_e . Por outro lado, Vledder, 1992, mostrou que ν e κ não sofrem excentricidade assinalável à medida que o alisamento aumenta, ao passo que os outros sofrem excentricidades fortes. Em Vledder, 1992, foi também avaliado qual o efeito da variação do limite superior de integração na determinação dos parâmetros. Utilizando um espectro de JONSWAP, verificou-se que o parâmetro mais estável é κ se a frequência de corte, f_c , for pelo menos dupla da de pico, f_p ; o parâmetro ν cresce sempre, mesmo para valores de $f_c/f_p = 4$; Q_e e Q_p comportam-se de forma semelhante a κ , embora estabilizem mais perto de $f_c/f_p = 2.5$.

Também a duração dos registos influencia a variabilidade na estimação dos parâmetros. Nelson, 1987, e Medina e Hudspeth, 1990, consideram que quanto maiores os registos, melhor a estimação desses parâmetros. Nakamura, 1996, chama a atenção para o facto de se dever utilizar registos da natureza com mais de 60 minutos para uma caracterização mais fiável dos grupos de ondas. Na costa portuguesa, as séries temporais medidas têm a duração de 20 minutos e, em caso de temporal, de aproximadamente 33 minutos (200 s).

Battjes e Vledder, 1984, e Masson e Chandler, 1993, referem também que o coeficiente de correlação entre alturas de onda calculado através do espectro é consistentemente inferior ao mesmo coeficiente calculado directamente do registo temporal.

Nesta comunicação será feito uso da Eq. (15), para o cálculo do parâmetro Q_p ; da Eq. (16), para o cálculo do parâmetro Q_e ; da Eq. (17), para o cálculo do parâmetro ν ; da Eq. (11), para o cálculo do parâmetro κ , e da Eq. (13), para o cálculo de r ,

4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

4.1. Dados utilizados

Com o objectivo de obter valores de referência para os parâmetros calculados pelos diferentes métodos, calcularam-se os valores dos parâmetros mencionados na secção anterior para vários registos com diferentes agrupamentos de ondas. Os registos escolhidos foram, quer registos simulados numericamente, a partir de um certo espectro empírico, quer registos reais.

As simulações numéricas dos registos foram efectuadas mediante utilização do módulo “SAM MOD 1 (Simulação Numérica)”, o qual foi realizado em linguagem gráfica G, em ambiente LabVIEW. Este programa é um módulo do pacote de software SAM (Simulação da agitação Marítima) descrito em Capitão, 2001. Utilizaram-se 4 registos simulados numericamente com os espectros JONSWAP, com diferentes larguras de espectro, γ , e Pierson-Moskowitz.

Os sete registos reais correspondem a quatro registos medidos em 1992 numa bóia-ondógrafo direccional fundeada em Sines, a uma profundidade aproximada de 93 m (ZH) e por três registos medidos por uma bóia-ondógrafo direccional fundeada ao largo de Faro, a uma profundidade aproximada de 90 m (ZH). Os dados medidos pelas bóias-ondógrafo

constam de séries temporais de elevações, resultantes de dupla integração da aceleração vertical do movimento da superfície livre e das séries temporais de declives, segundo os eixos N-S e E-W. A aquisição de dados foi efectuada de 3 em 3 horas, durante 20 minutos em condições normais e de 30 em 30 minutos, durante 200 s, quando a altura de onda significativa, H_s , é superior a 3 m. A taxa de digitalização dos dados, f_d , é de 1.28 amostras/s.

Descrevem-se em seguida as características desses registos utilizados. No Quadro 4, observam-se as características principais dos registos analisados, em que H_s , T_p , f_d e T_R , são, respectivamente, a altura significativa, o período de pico do espectro, a frequência de digitalização e a duração total correspondentes a cada registo.

As características dos espectros dos registos acima descritos podem ser observadas na Figura 8 (para os registos simulados numericamente) e na Figura 9 (para os registos reais provenientes de Sines e Faro).

Como se pode observar da análise da Figura 8, o espectro do registo pm0312 é muito semelhante ao do registo j0312a. Isto reflectir-se-á nos parâmetros de agrupamento que se irão calcular. O espectro correspondente ao registo g81s02 é um espectro bimodal, correspondente à soma de duas harmónicas de frequências diferentes.

Quadro 4 – Características dos registos simulados e reais a caracterizar sob o ponto de vista de grupos de onda

| Tipo de registos | | Ficheiro | Características | | |
|-------------------------|-------|----------------|---|--|------------------|
| | | | comuns | Distintivas | |
| Simulados numericamente | | j0312.rgt | $H_s=3\text{ m}$ $T_p=12\text{ s}$ $f_d=30\text{ Hz}$ $T_R=4500\text{ s}$ | JONSWAP | $\gamma = 3.30$ |
| | | j0312a.rgt | | | $\gamma = 1.00$ |
| | | j0312b.rgt | | | $\gamma = 10.00$ |
| | | pm0312.rgt | | Pierson-Moskovitz | $\gamma = 3.30$ |
| | | g81s02 | $H_s=0.15\text{ m}$ $T_p=1\text{ s} + 1.5\text{ s}$ $f_d=20\text{ Hz}$ $T_R=78.8\text{ s}$ | | |
| Reais | Sines | 92032218.dw2 | $f_d=1.28\text{ Hz}$ $T_R=1200\text{ s}$ | $H_s=2.58\text{ m}, T_p=13.3\text{ s}$ | |
| | | 92032021.dw2 | | $H_s=1.06\text{ m}, T_p=12.3\text{ s}$ | |
| | | 92032321.dw2 | | $H_s=2.65\text{ m}, T_p=12.2\text{ s}$ | |
| | | 92032000.dw2 | | $H_s=1.43\text{ m}, T_p=11.2\text{ s}$ | |
| | Faro | 95051518.dw2 | | $H_s=1.11\text{ m}, T_p=4.5\text{ s}$ | |
| | | 97031418.dw2 | | $H_s=1.37\text{ m}, T_p=12.5\text{ s}$ | |
| | | 0102080600.dw2 | | $H_s=3.01\text{ m}, T_p=12.3\text{ s}$ | |

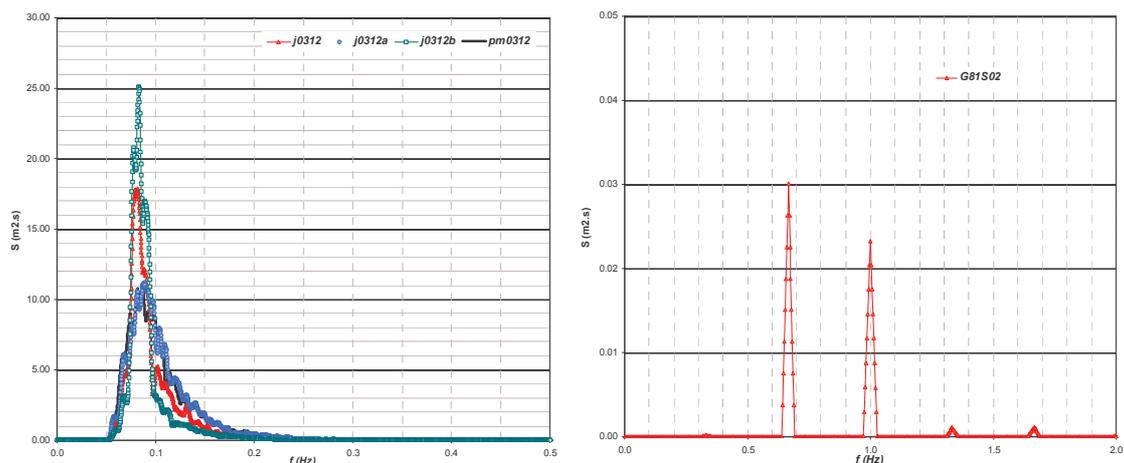


Figura 8 – Espectro dos registos simulados numericamente

Da análise da Figura 9, pode verificar-se que aos registos 92032218, 92032000 e 97031418 correspondem espectros estreitos, com diferentes níveis de energia associada, enquanto que aos registos 92032321 e 01020806 correspondem espectros largos mas não unimodais. O registo 95051518 é um registo de espectro claramente bimodal a que corresponde estados de mar com ondas provenientes de duas direcções, o que corresponde a uma situação que ocorre frequentemente na zona de Faro.

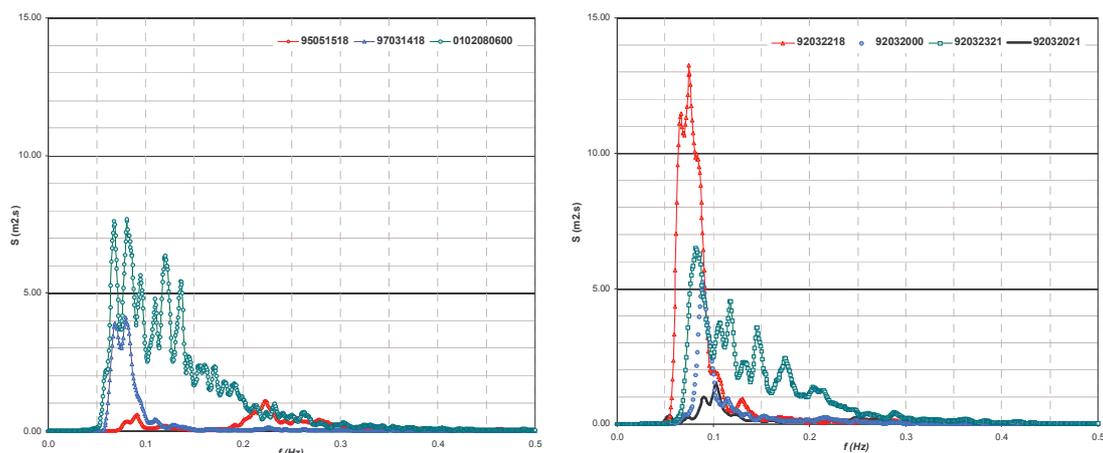


Figura 9 – Espectro dos registos medidos em Faro e Sines

4.2 Agrupamento

De forma a realizar as comparações dos métodos descritos, foi utilizado o módulo “SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Ondas)”, também realizado em linguagem gráfica G, em ambiente LabVIEW. Este programa permite a análise de registos de onda, simulados numericamente ou reais, e a obtenção de parâmetros espectrais e de agrupamento de ondas, através do cálculo de $E[J]$ para níveis pré-especificados, v .

Apresentam-se a seguir, no Quadro 5, resultados destes parâmetros para vários tipos de registos de onda, com $H_c = H_s/1.6$. Neste quadro podem ser observadas as características principais dos registos analisados, em que H_c (m) é a altura de onda do nível de agrupamento v , correspondente a cada registo. Assim, além das características de cada registo, aparecem no Quadro 5 as características do respectivo espectro, em termos dos parâmetros Q_p , Q_e , v , k e r e estimativas de $E[J]$ obtidas pelos vários métodos atrás mencionados.

Quadro 5 – Características dos registos simulados e reais sob o ponto de vista de grupos de onda

| Ficheiro | T_p (m) | H_s (m) | H_c (m) | JKE Eq. (5) (nº ondas) | JLH Eq. (14) (nº ondas) | Q_p Eq. (15) (adim.) | Q_e Eq. (16) (adim.) | ν Eq. (17) (adim.) | κ Eq. (11) (adim.) | r Eq. (13) (adim.) |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| j0312 | 12.00 | 2.89 | 1.81 | 2.23 | 2.43 | 3.042 | 3.557 | 0.438 | 0.553 | 0.285 |
| j0312a | 12.00 | 3.05 | 1.90 | 2.06 | 2.26 | 2.136 | 2.465 | 0.454 | 0.441 | 0.180 |
| j0312b | 12.00 | 2.91 | 1.82 | 2.67 | 2.85 | 4.636 | 5.136 | 0.399 | 0.705 | 0.471 |
| pm0312 | 12.00 | 3.02 | 0.89 | 2.05 | 2.25 | 2.057 | 2.404 | 0.428 | 0.434 | 0.174 |
| g81s02 | 1.50 | 0.15 | 0.09 | 1.99 | 2.18 | 18.421 | 19.590 | 0.277 | 0.368 | 0.125 |
| 95051518 | 4.48 | 1.11 | 0.70 | 1.91 | 2.10 | 2.208 | 2.422 | 0.396 | 0.259 | 0.062 |
| 97031418 | 12.50 | 1.37 | 0.86 | 2.53 | 2.72 | 3.281 | 4.000 | 0.545 | 0.669 | 0.422 |
| 0102080600 | 12.33 | 3.01 | 1.88 | 1.92 | 2.11 | 1.416 | 1.807 | 0.527 | 0.278 | 0.071 |
| 92032218 | 13.33 | 2.58 | 1.61 | 2.54 | 2.72 | 2.961 | 3.669 | 0.613 | 0.670 | 0.421 |
| 92032021 | 9.68 | 1.06 | 0.66 | 2.11 | 2.31 | 1.611 | 2.378 | 0.650 | 0.480 | 0.214 |
| 92032321 | 12.24 | 2.65 | 1.65 | 1.92 | 2.11 | 1.484 | 1.941 | 0.505 | 0.281 | 0.072 |
| 92032000 | 11.21 | 1.43 | 0.89 | 2.45 | 2.64 | 3.411 | 4.549 | 0.580 | 0.644 | 0.390 |

Na Figura 10 apresenta-se a relação entre o coeficiente de correlação, r , e o valor de $E[J]$ calculado através da envolvente (Eq. (14)), JLH , e através das alturas de onda (Eq. (5)), JKE .

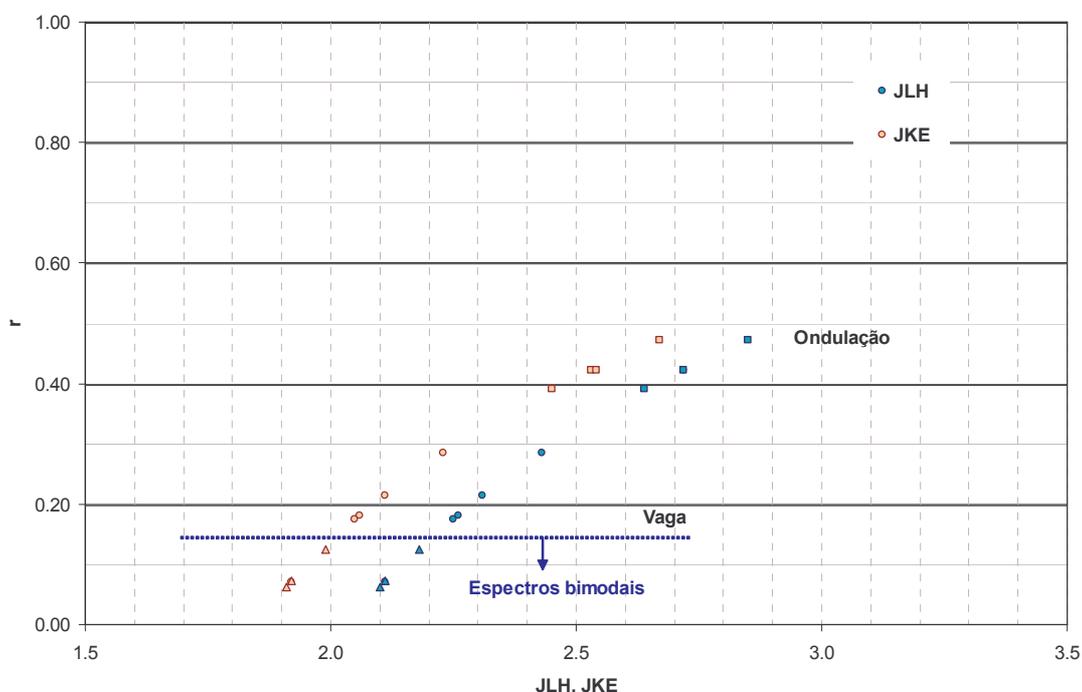


Figura 10 – Relação entre r e JKE e JLH

Como se pode observar na Figura 10, os dois parâmetros têm um comportamento muito semelhante: para registos com espectro de banda larga, que correspondem normalmente a

condições de agitação do tipo “vaga” (ou *sea*, na terminologia anglo-saxónica), os valores de JLH e JKE são pequenos, próximos de 2.0, e vão crescendo até atingirem valores próximos de 3.0 para registos com espectros de banda estreita, que correspondem a agitação do tipo “ondulação” (*swell*). Verifica-se que o parâmetro JLH apresenta valores sistematicamente superiores aos do parâmetro JKE , mas quer um método quer outro produzem valores de $E[J]$ muito baixos para espectros que apresentam vários picos ($g81S02$, 95051518, 92032321 e 0102080600). O mesmo acontece com o parâmetro r , cujos valores são da ordem de 0.15 para agitação tipo “vaga” e da ordem de 0.50 para agitação do tipo “ondulação”. No entanto, os registos, a que correspondem espectros não unimodais, apresentam valores de r inferiores a 0.125, embora se observe visualmente um claro agrupamento na série temporal destes registos.

Na Figura 11 apresenta-se a relação entre o coeficiente de correlação, r , e os parâmetros adimensionais definidos por Goda, Q_p , e por Medina e Hudspeth, Q_e . Estes parâmetros dão indicação da largura do espectro, o que levaria indirectamente a uma indicação do agrupamento, já que é expectável que a um registo com espectro largo esteja associado um menor agrupamento de ondas que a um registo com espectro mais estreito.

Como se pode observar na Figura 11, os dois parâmetros Q_p e Q_e têm um comportamento muito semelhante, o que aliás era de esperar visto que o segundo é baseado no primeiro: para registos com espectro largo, os valores de Q_p e Q_e são pequenos, próximos de 2.0 e vão crescendo até atingir valores próximos de 5.0 para registos de espectro estreito. No entanto, Q_p apresenta valores sistematicamente inferiores aos de Q_e . Os dois parâmetros apresentam valores muito baixos para espectros reais que apresentam vários picos (95051518, 92032321 e 0102080600). No entanto, para o espectro do registo $g81S02$, que apresenta dois picos isolados, os valores destes parâmetros são muito superiores ao dos outros registos. Isto permite concluir que talvez estes parâmetros não sejam os mais adequados para caracterizar o agrupamento, especialmente para espectros que não sejam unimodais, concordando com o que tinham referido Vledder e Battjes, 1992 (ver Secção 3.4).

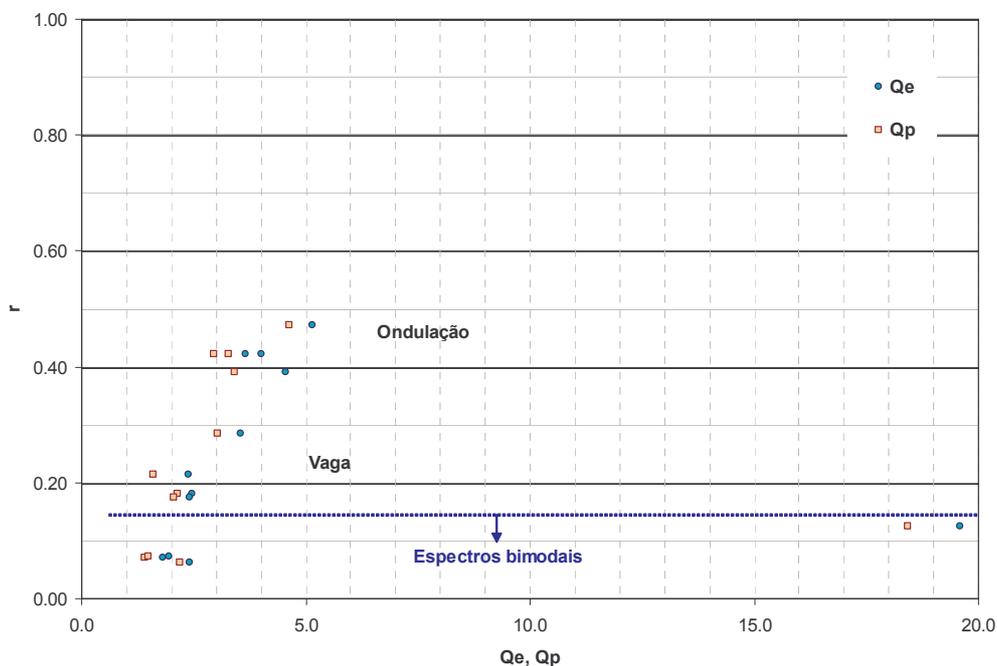


Figura 11 – Relação entre r e Q_e e Q_p

Na Figura 12 apresenta-se a relação entre a aproximação de Battjes, 1974, do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, r , e os parâmetros adimensionais devido a Battjes (calculado através das alturas de onda), κ , e a Longuet-Higgins (calculado através da teoria da envolvente), ν . Estes parâmetros dão indicação da largura do espectro, o que levaria

indirectamente a uma indicação do agrupamento, tal como nos parâmetros Q_p e Q_e , mas, como foi referido anteriormente, sem sofrer excentricidade à medida que o espectro é alisado.

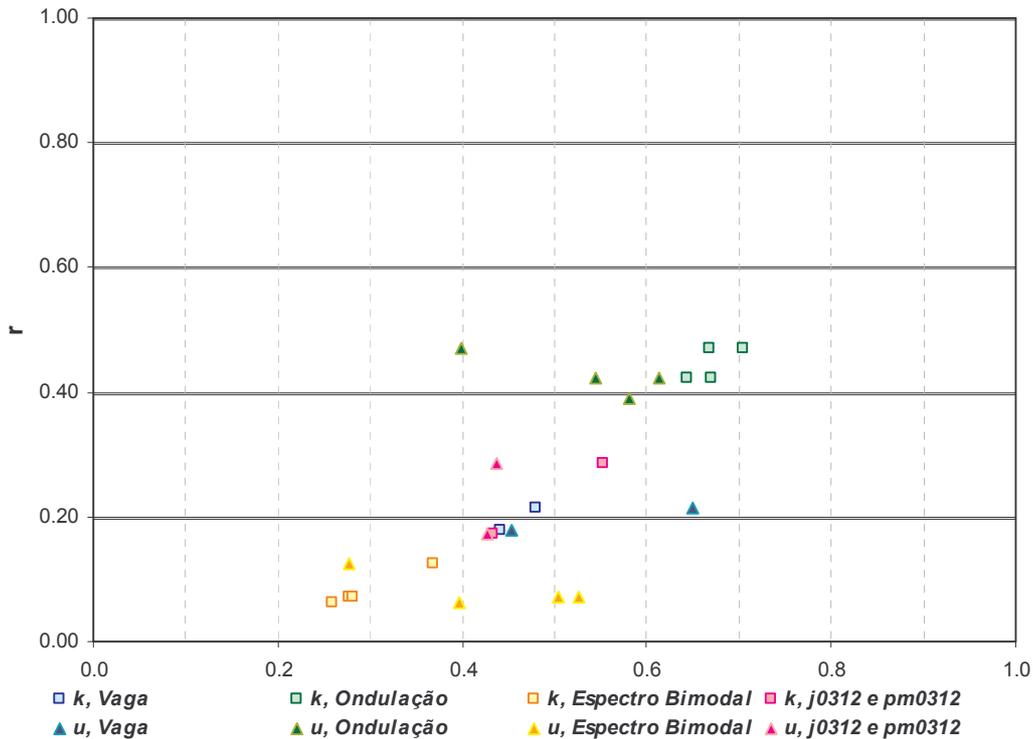


Figura 12 – Relação entre r e v e κ (no gráfico, v e κ são representados por u e k)

Verifica-se, na Figura 12, que o comportamento de κ é muito semelhante ao de r , isto é, para registos de espectro largo, os valores de κ são pequenos, próximos de 0.4, e vão crescendo até atingirem valores próximos de 0.7 para registos de espectro estreito. Novamente se verifica que para espectros com vários picos este parâmetro dá valores excessivamente baixos, indicando baixo agrupamento em registos onde a presença de agrupamento é notória.

No entanto, no que respeita ao parâmetro v , não se observa nenhuma relação significativa entre este parâmetro e r . Isto poderia levar a supor que não existe relação entre forma do espectro, expressa pelo parâmetro v de Longuet-Higgins, 1984, dado pela Eq. (17), e a maior ou menor dependência entre ondas sucessivas (que indica o maior ou menor agrupamento de ondas, respectivamente) dada pelo parâmetro r , Eq. (13). Porém, verifica-se que o cálculo de v enferma de algumas deficiências. Efectivamente, como se referiu atrás, o parâmetro v só é válido para espectros estreitos para os quais a banda passante é $v^2 \ll 1$, o que não é o caso principalmente para os espectros largos e espectros bimodais. A limitação de frequências através de um filtro de banda passante referida por Longuet-Higgins, 1984, com frequências de corte inferior e superior de, respectivamente, 0.5 e 1.5 vezes a frequência de pico, não foi efectuada neste estudo uma vez que se chegou à conclusão de que a série temporal sintetizada após a aplicação do filtro ao espectro apresentaria poucas semelhanças com a série original de que se partiu, o que está de acordo com a opinião de Liu *et al.*, 1993. Do exposto, o parâmetro v não oferece muita confiança na caracterização de agrupamento de ondas em registos dos tipos apresentados nesta comunicação.

Refira-se também que, segundo Liu *et al.*, 1993, há uma subestimação de JKE (cerca de 15% quando o parâmetro $\kappa \cong 0.65$) em relação ao valor real obtido pelo método directo quando o espectro do registo é muito estreito, uma vez que o método de Kimura Espectral é baseado nas hipóteses de que as alturas de onda têm a distribuição de Rayleigh e de que alturas sucessivas têm correlação não nula. Por isso, para os casos de registos tipicamente de ondulação aqui estudados (j0312b e 97031418) os valores de JKE obtidos poderão estar algo

(cerca de 15%) subestimados, visto que para esses casos κ apresenta valores da ordem dos 0.6-0.7. Nesses casos, se se corrigisse esse desvio nos valores de JKE, estes seriam ainda mais concordantes com os correspondentes valores de JLH (ver Figura 10).

Outra conclusão importante é a de que os parâmetros considerados neste estudo, contemplados no módulo SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Ondas), não se mostram adequados para caracterizar registos de espectros com mais do que um pico (no caso em estudo, espectros bimodais). Realmente, contrariamente ao que seria de esperar, os parâmetros de agrupamento de onda considerados apresentam valores muito reduzidos mesmo quando o agrupamento é claramente visível. Há pois que investigar novas formas de caracterização indirecta de grupos de ondas mais adequadas a registos com este tipo de espectros.

De entre os parâmetros apresentados, o parâmetro r destaca-se por ser o melhor parâmetro para caracterizar o agrupamento de um registo, apresentando valores da ordem de 0.15 para agitação tipo “vaga” e da ordem de 0.50 para agitação do tipo “ondulação”.

Finalmente, verifica-se que, em geral, dos resultados obtidos, os parâmetros espectrais dependem da forma do espectro. Esta conclusão está de acordo com a ideia geral de que o espectro dum registo determina, em média, as características de agrupamento de onda desse registo.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação pretendeu-se demonstrar a importância dos grupos de ondas nos estudos de caracterização da agitação marítima considerados no dimensionamento de obras marítimas e portuárias. Efectivamente, este fenómeno tem importância fulcral na geração de oscilações de longo período, muitas vezes responsáveis pelas oscilações de ressonância de bacias dos portos, e consequentes ressonâncias de navios aí amarrados. Daí que, nesta comunicação, a importância dos grupos de ondas seja exemplificada com o estudo da influência da presença de grupos no comportamento de navios amarrados.

Apresentaram-se diferentes métodos de caracterização de grupos de ondas e aplicaram-se esses métodos a um conjunto de registos, quer simulados numericamente quer registos reais medidos na costa portuguesa (Faro e Sines). A análise dos resultados produzidos pelos métodos apresentados permitiu coligir um conjunto de comentários críticos sobre a sua aplicação a registos de ondas típicos.

Assim, verificou-se que os métodos apresentados são adequados para caracterizar registos unimodais. No entanto, para registos com espectros bimodais ou multimodais, todos os métodos produzem valores dos parâmetros de agrupamento muito baixos, o que não parece representar correspondência com a realidade, nomeadamente com a que decorre numa análise visual de registos desta natureza. De entre os parâmetros testados, o parâmetro r parece ser o que reúne mais potencial para caracterizar correctamente o agrupamento de um registo, apresentando valores da ordem de 0.15 para agitação tipo “vaga” e da ordem de 0.50 para agitação do tipo “ondulação”.

Também se verificou que o parâmetro ν oferece pouca confiança na caracterização de agrupamento de ondas em registos dos tipos apresentados nesta comunicação devido a um conjunto de circunstâncias de aplicação do método exposto por Longuet-Higgins, 1984, nomeadamente no que diz respeito à limitação de frequências do espectro do registo.

Finalmente, neste trabalho foi mais uma vez confirmada a ideia de que o espectro dum registo determina, em média, as características de agrupamento de onda desse registo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Hidrográfico e à Administração do Porto de Sines as autorizações concedidas para a utilização dos registos medidos em Faro e Sines, respectivamente, bem como o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do projecto PDCTM / P / MAR / 15239 / 1999.

BIBLIOGRAFIA

- Battjes, J.A. (1974) – *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*, Thesis, Delft.
- Battjes, J.A.; Vledder, G. (1984) – *Verification of Kimura's theory for wave group statistics*, 19th ICCE, Houston.
- Burcharth, H.F. (1979) – *The Effect of Wave Grouping on On-Shore Structures*. Coastal Engineering - Vol. 2, pp. 189-199.
- Capitão, R. (2001) – *Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Junho de 2001.
- Capitão, R.; Carvalho, M.M. (1997) – *Numerical and Physical Tests on Wave Group Characteristics*. Paper presented on the 3rd International Conference on Ocean Wave Measurement and Analysis – WAVES 97. Virginia Beach, VA, USA, Dezembro de 1997.
- Carvalho, M.M. (1989) – *Sea wave simulation*, in “Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling”, R. Martins Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 447-502.
- Cummins, W.E. (1962) – *Impulse response functions and ship motions*. Schifftechnik, 9, pp. 101-109.
- Funke, E.R.; Mansard, E.P.D. (1979) – *On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume*, Technical Report, Canada, LTR-Hy-66. 54 p.
- Goda, Y. (1970) – *Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral Simulation*. Report Port and Harbour Research Institute, 9(3), pp. 3-57.
- Goda, Y. (1976) – *On wave groups*. 1st Conference on Behaviour of Offshore Structures, (BOSS'76), The Norwegian Institute of Technology.
- Kimura, A. (1980) – *Statistical properties of random wave groups*. Proc. 17th ICCE, Sydney, pp. 2955-2973.
- Liu, Z.; Elgar, S; Guza, R.T. (1993) – *Groups of Ocean Waves: Linear theory, approximations to linear theory, and observations*. JWPCOE, Vol. 119, No. 2, pp. 144-159.
- Longuet-Higgins, M.S. (1984) – *Statistical properties of wave groups in a random sea state*. Phil. Trans. Royal Soc. London, A312, pp. 219-250.
- Masson, D.; Chandler, P. (1993) – *Wave Groups: A Closer Look at Spectral Methods*. Coastal Engineering - pp. 249-275.
- Medina, J.R.; Hudspeth, R.T. (1987) – *Sea states defined by wave height and period functions*. 22nd IAHR Conf., Lausanne, pp. 249-259.
- Medina, J.R.; Hudspeth, R.T. (1990) – *A Review of the Analyses of Ocean Wave Groups*. Coastal Engineering - Vol. 14, pp. 515-542.
- Mynett, A.E.; Keuning, P.J.; Vis, F.C. (1985) – *The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration*. Intl. Conf. on Numeric and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, pp. 211-220.
- Nakamura, S. (1996) – *Estimation of Wave Groups Parameter from Wave Climate Statistics*. Proc. ICCE 96 - Chap. 117, pp. 1503-1514.
- Nelson, R.C. (1987) – *Wave groups – The length of a piece of string*. Proc. 8th Australasian Conf. On Coastal and Ocean Eng., Launceston, 1-4.
- Newman, J.N.; Sclavounos, P.D. (1988) – *The computation of wave loads on large offshore structures*. Boss 88 Conference, Norway.
- Rye (1974) - *Wave group formation among storm waves*, 14th ICCE., Copenhagen.

Santos, J.A. (2000) – *Porto da Figueira da Foz. Estudo do melhoramento das condições actuais de navegabilidade: Comportamento de navios amarrados ao cais comercial*. Relatório 228/00-NPP, LNEC, Lisboa.

Tucker, M.J. (1991) – *Waves in Ocean Engineering - Measurement, Analysis, Interpretation*. Ellis Horwood Series in Marine Science.

Vledder, G.P. (1983) – *Verification of Kimura model for the description of wave groups*. Report R/1983/6/H, Delft University of Technology.

Vledder, G.P. (1992) – *Statistics of wave group parameters*, 23rd ICCE., Venice.

Vledder, G.P.; Battjes, J.A. (1992) – *Discussion of "List of sea-state parameters"*. JWPCOE, 118(2), pp. 226-230.