

# AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ONDAS PROVOCADAS POR AÇÃO DO VENTO E DE EMBARCAÇÕES EM ALBUFEIRAS. ESTUDO DE CASO. Evaluation of the Generation of Waves Produced by the Wind and Passing Vessels in Reservoirs. Case Study

DIOGO GOMES <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup> e PAULO ROSA-SANTOS <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec09015@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Catedrático, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Professor Auxiliar Convidado, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjrsantos@fe.up.pt

## Resumo

A formação de ondas em albufeiras pode ocorrer devido à atuação do vento sobre a superfície da massa de água, ou à passagem de embarcações. Estas ondas podem originar a erosão das margens da albufeira bem como galgamentos do coroamento da barragem e daí a importância da sua correta caracterização.

O presente artigo aborda a previsão das condições de agitação que resultam da ação do vento e da passagem de embarcações, através de metodologias paramétricas. No caso das ondas formadas pela ação do vento, foi também aplicado um modelo numérico (Aquavidya).

As metodologias abordadas foram aplicadas à albufeira da barragem de Crestuma-Lever. Os dados das condições de vento utilizados foram recolhidos pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) para a estação de Bustelo e a identificação das embarcações foi feita através de uma lista elaborada pelo Instituto Português e dos Transportes Marítimos (IPTM).

**Palavras-chave:** Ondas, vento, embarcações, albufeiras, modelação numérica.

## Abstract

The generation of waves in a reservoir can occur by wind action over the water surface or by passing vessels. The generated waves may lead to erosion of the reservoir banks, as well as overtopping of the dam crest. Therefore it is important to quantify, in a clear and comprehensive way, those actions.

The present article deals with the prediction of the characteristics of the waves generated by the wind and by passing vessels in reservoirs. This prediction was made using parametric formulas. In the case of wind waves, a numerical model (Aquavidya) was also applied.

The parametric formulas and the numerical model were applied to the reservoir of Crestuma-Lever dam in Douro river. The wind data used was obtained from the "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH)", and the identification of the passing vessels was made by using a list elaborated by the "Instituto Português e dos Transportes Marítimos (IPTM)"

**Keywords:** Waves, wind, vessels, reservoir, numerical modelling.

## 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento

As ondas são normalmente associadas ao mar, no entanto, também podem ocorrer em massas de água de grandes dimensões, como é o caso das albufeiras. Estas ondas podem ser geradas pela ação do vento que atua sobre a água e/ou pela passagem de embarcações que navegam nas albufeiras.

O estudo dessas ondas torna-se ainda mais importante no caso de barragens de terra, uma vez que são de evitar galgamentos neste tipo de barragem.

Para além do galgamento do paramento da barragem, há também que considerar o desgaste provocado nas margens da albufeira pela incidência das ondas.

Tendo em vista a correta definição da cota de coroamento de barragens e o dimensionamento de estruturas de proteção de margens, foram desenvolvidos, ao longo dos anos, métodos para a previsão das características da agitação a partir de parâmetros específicos. Entre estes parâmetros destacam-se, pela sua importância, a extensão do *fetch* e a velocidade do vento, no caso das ondas formadas pela ação do vento, e, no caso das ondas geradas pela passagem de embarcações, as características do casco da embarcação e a velocidade a que esta se movimenta.

Para além das metodologias paramétricas existem também modelos numéricos que permitem estimar, de forma mais precisa e adequada, as condições de agitação, tendo em conta as características do local de formação.

## 1.2. Objetivos

O objetivo central deste trabalho consistiu na estimativa das condições de agitação provocadas pela ação do vento e pela passagem de embarcações em albufeiras, através da utilização de metodologias paramétricas.

No caso das ondas geradas pelo vento, aplicou-se, ainda, um modelo numérico tendo sido comparados os resultados obtidos através desse modelo com os resultados obtidos pela aplicação das metodologias paramétricas, de maneira a verificar se não existiam discrepâncias muito significativas.

As metodologias paramétricas e o modelo numérico foram aplicadas a um caso de estudo – a albufeira da barragem de Crestuma-Lever. As condições de agitação foram estimadas para 2 locais dessa albufeira que apresentavam níveis de erosão elevados.

## 2. Geração de Agitação pela Ação do Vento

### 2.1. Introdução

As características do vento têm uma grande influência no modo como as ondas são geradas e se propagam. Entre essas características, a velocidade e a direção do vento assumem um papel crucial, influenciando os principais parâmetros que caracterizam as ondas, designadamente a altura de onda e o período.

A geração de ondas deve-se à transferência de energia do vento para a água, observando-se um aumento da altura e do período de onda à medida que a onda percorre a zona de *fetch*. Para que as ações do vento atuante sejam sentidas, este tem de apresentar velocidades superiores a 0.23 m/s, para fazer face à tensão superficial da água. A tensão tangencial criada na superfície livre da água tenderá a mover a água em direção à crista, sendo a água proveniente dos dois lados da mesma, ou seja, das duas cavas consecutivas mais próximas da crista que irá ser criada (Kamphuis, 2000).

A geração das ondas pode também ser explicada partindo do princípio que a velocidade dos ventos atuantes cria flutuações de pressão na água. Estas flutuações devem-se, sobretudo, a uma maior exposição das zonas da crista à ação do vento, sendo que as zonas das cavas estão protegidas pelas cristas adjacentes e, como tal, não são zonas onde a ação dos ventos se faça sentir com uma intensidade tão elevada como a que é verificada nas cristas. Esta diferença de pressões na superfície da água irá originar, assim, ondulação. Este modo de formação está em concordância com o Teorema de Bernoulli.

Com efeito, tendo por base o Teorema de Bernoulli e partindo do princípio que dois pontos, o ponto superior da crista e o ponto inferior da cava, possuem a mesma energia, e assumindo que a velocidade do vento na crista é superior pode concluir-se que na crista a pressão é inferior à verificada na cava, onde a velocidade do vento é menor, formando assim elevações pontuais da água, passando-se o oposto nas cavas.

À medida que as ondas percorrem o *fetch*, ganham energia, ou seja, a energia que é transmitida para a água aumenta. O diferencial de pressão que resulta das diferenças de velocidade do vento irá atuar na mesma direção que a tensão tangencial na zona situada a barlavento da onda e, como tal, a soma destas duas componentes na mesma direção será superior à tensão tangencial da zona situada no lado abrigado da ação do vento, o que levará à formação de uma onda com maiores dimensões na direção do vento, Figura 1.

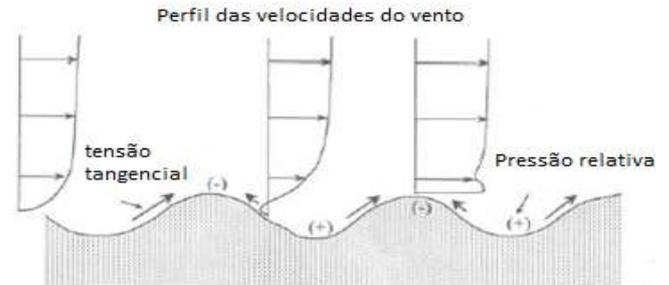


Figura 1. Variação de pressão ao longo das ondas (Kamphuis, 2000).

A energia transferida é maioritariamente geradora de ondas com uma alta frequência, levando a que se formem pequenas ondas na parte superior de ondas já existentes, em vez de aumentar a altura da onda existente. Essas ondas irão transferir, posteriormente, a sua energia para ondas de menor frequência, através da interação entre o movimento de partículas de água. A energia do vento é transferida de forma mais eficaz se o vento e as ondas tiverem a mesma velocidade, situação pouco frequente, uma vez que normalmente a velocidade do vento é superior à das ondas. Para que haja uma aproximação da velocidade do vento à velocidade de propagação das ondas, estas últimas tendem a formar um ângulo com a direção do vento.

Como foi referido, o processo de geração de ondas depende das características do vento atuante sobre a massa de água, designadamente a sua velocidade, duração e direção. Estas características irão influenciar a extensão do *fetch*. O processo de geração irá estar, portanto, dependente de várias condicionantes.

Uma das condicionantes dá-se quando o vento sopra com uma velocidade e direção constantes sobre um determinado *fetch*, durante um período de tempo igual ou superior ao necessário para a onda percorrer toda a extensão desse mesmo *fetch*. Nestas condições, o processo de geração apenas será limitado pela extensão do *fetch*, Kamphuis (2000).

Por outro lado, se a duração de atuação do vento for mais pequena que a necessária para a onda percorrer toda a extensão da zona de geração, então as características das ondas serão limitadas pelo tempo de atuação do vento. Estas condições são designadas como limitadas pela duração de atuação do vento, Kamphuis (2000).

Por fim, quando o vento atua sobre uma zona ilimitada e tem uma duração também ilimitada, dentro dessa zona, originam-se estados de mar completamente desenvolvidos. Nestas condições, a partir de dado momento, a energia transferida pelo vento para a massa de água é equilibrada pela energia dissipada na onda através de turbulência e atrito interno. Nestas condições, as características da agitação gerada são função apenas da velocidade do vento.

## 2.2. Métodos de previsão

Cada uma das metodologias paramétricas existentes tem em consideração diferentes parâmetros na sua formulação, sendo que a intensidade do vento e a extensão do *fetch*, pela sua importância, intervêm em todas as metodologias. Para além dessas variáveis, são também incluídas em algumas formulações, a profundidade de água, a direção e a velocidade do vento em relação à direção do escoamento, e a largura da zona de geração, se esta for limitada.

Estes métodos paramétricos servem, sobretudo, para fazer uma estimativa preliminar das condições de agitação que se poderão encontrar no local em análise. Posteriormente, numa fase de dimensionamento, devem ser aplicados métodos mais complexos e precisos, designadamente modelos numéricos.

## 2.3. Velocidade do vento a utilizar nas metodologias de previsão

Antes da aplicação das metodologias paramétricas é necessário especificar que velocidades do vento devem ser consideradas, uma vez que o local de medição é diferente daquele onde está realmente a atuar, ou seja, à superfície da água.

De maneira a fazer-se a conversão da velocidade do vento medido para a velocidade do vento atuante na superfície da água, foi utilizado o método de Resio e Vincent (1977), apresentado no USACERC (1984). Este método permite fazer uma conversão das velocidades do vento em função da altura do local de medição, relativamente à superfície de água, da diferença de temperatura entre o ar e a água, e do local onde este atua. Este método permite assim fazer, por exemplo, a conversão das características do vento medido em terra para as características do vento atuante numa superfície com menos rugosidade, a superfície da água.

Uma formulação prática para a conversão da velocidade do vento tendo em consideração o efeito da altura é dada pela seguinte expressão,

$$U_{10} = U(z) \left(\frac{10}{z}\right)^{\frac{1}{7}} \quad [1]$$

em que  $U(z)$  representa a velocidade do vento (m/s) medido à altura  $z$  (m), relativamente à superfície de água, e  $U_{10}$  representa a velocidade do vento para uma altura de 10 m. A expressão [1] corresponde a um caso particular, podendo ser aplicada no intervalo entre 8 e 12 m.

O valor da velocidade do vento é normalmente calculado para uma altura de 10 m, relativamente à superfície de água, uma vez que as metodologias paramétricas utilizam esta altura para definir a velocidade do vento nas suas formulações.

Quanto à influência nas características do vento da diferença de temperatura entre o ar e a água sobre a qual o vento atua (condições de estabilidade), a Figura 2 reproduz o método gráfico de Resio e Vincent (1977) e permite fazer a conversão da velocidade do vento através de um coeficiente  $R_T$ , que é função da diferença de temperatura entre a água e o ar à superfície da água.

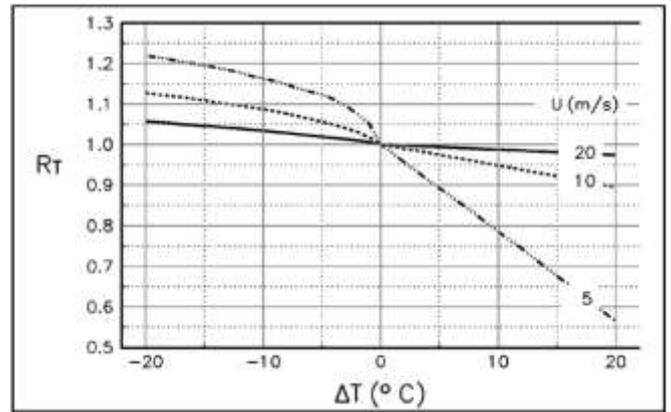


Figura 2. Coeficiente  $R_T$  em função da diferença de temperatura entre o ar e a água (USACERC, 2002).

Através da obtenção de  $R_T$  pode-se estimar a velocidade do vento, tendo em consideração as condições de estabilidade da camada-limite, ou seja,

$$U_T = R_T U \quad [2]$$

em que  $U$  representa a velocidade do vento medida e  $U_T$  a velocidade do vento, tendo em consideração os efeitos de estabilidade.

Caso não sejam conhecidas as condições de temperatura deve-se adotar um coeficiente  $R_T$  igual a 1.1 (USACERC, 2002).

Para a conversão da velocidade do vento medida em terra para uma velocidade do vento à superfície da água foram desenvolvidos dois métodos, aplicáveis quando a massa de água onde o vento atua tem dimensões suficientemente grandes para que este efeito se faça notar. Esses métodos são o método de Resio e Vincent (1977) (apresentado no USACERC, 2002) e o método do SEBJ (1996) (apresentado no SEBJ, 1997). O primeiro método permite fazer a conversão de velocidades do vento medidas em terra para velocidades do vento à superfície da água utilizando o coeficiente  $R_L$ , que pode ser obtido a partir da Figura 3.

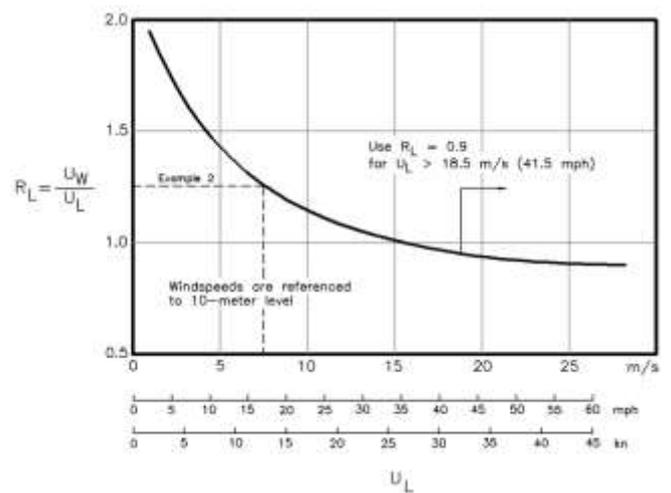


Figura 3. Coeficiente  $R_L$  em função da velocidade do vento em terra (USACERC, 2002).

A velocidade do vento à superfície da água pode então ser obtida através de,

$$U_W = R_L U_L \quad [3]$$

em que  $U_w$  representa a velocidade do vento à superfície da água e  $U_L$  a velocidade do vento medida em terra.

Através da aplicação do método de Resio e Vicent (1977), é possível obter a Figura 4, que relaciona diretamente a velocidade do vento medida em terra com a que se verifica à superfície da água.

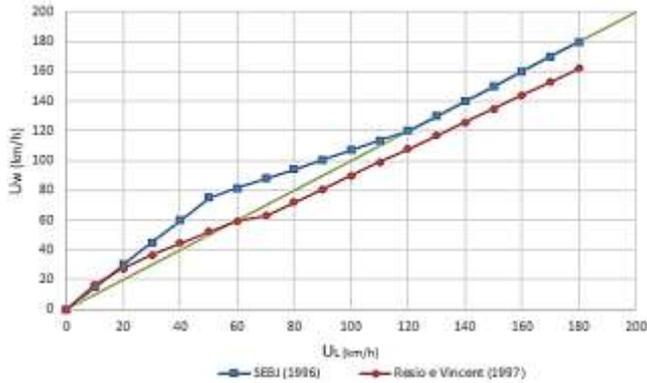


Figura 4. Velocidade do vento sobre a água calculada por aplicação do método de SEBJ (1996) e de Resio e Vincent (1977), em função da velocidade do vento em terra.

Na Figura 4 é ainda feita uma comparação do método de Resio e Vicent (1977) com o método de conversão para os ventos atuantes sobre a água apresentado em Société d'énergie de la Baie James (1997), com base em SEBJ (1996), através das velocidades do vento medidas em terra, através das expressões,

$$U_w = 1.5 U_L \text{ para } U_L \leq 50 \text{ km/h} \quad [4]$$

$$U_w = 0.643U_L + 42.9 \text{ para } 50 \text{ km/h} < U_L < 120 \text{ km/h} \quad [5]$$

$$U_w = U_L \text{ para } U_L \geq 120 \text{ km/h} \quad [6]$$

Após a aplicação dos métodos de conversão referidos às velocidades dos ventos medidas é possível utilizar as metodologias de previsão das características das ondas de forma adequada.

## 2.4. Metodologias de previsão das características das ondas formadas pela ação do vento

### 2.4.1. Método de Hasselman *et al.* (1976)

Para a aplicação do método de Hasselman *et al.* (1976) (apresentado em USACERC, 1984) é necessário calcular o parâmetro  $U_A$ , que corresponde à pressão exercida pelo vento na superfície da água, dado pela seguinte expressão,

$$U_A = 0.71U_{10}^{1.23} \quad [7]$$

Com a definição deste parâmetro é então possível aplicar a formulação estabelecida pelo referido método,

$$\frac{g H_{m0}}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [8]$$

$$T_m = 6.238 \times 10^{-2} (U_A F)^{\frac{1}{3}} \quad [9]$$

em que  $H_{m0}$  representa a altura de onda significativa espectral, que apresenta valores semelhantes aos da altura de onda significativa ( $H_s$ ) para condições de águas profundas,  $T_m$  representa o período de onda espectral e é igual a 1.05 vezes o valores do período de onda significativo ( $T_s$ ) e  $F$  representa a extensão do *fetch*. Este método apresenta limites dados pelas seguintes expressões,

$$\frac{H_{m0} g}{U_A^2} \leq 2.433 \times 10^{-1} \quad [10]$$

$$\frac{g T_m}{U_A} \leq 8.134 \quad [11]$$

Estas limitações devem-se, sobretudo, à necessidade de serem atingidas condições de agitação completamente desenvolvidas.

### 2.4.2. Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider

A aplicação do método de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB) (apresentado em CIRIA, 2007) é feita através das seguintes expressões,

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.283 \tanh \left( 0.0125 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.42} \right) \quad [12]$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}^2} = 7.54 \tanh \left( 0.077 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.25} \right) \quad [13]$$

### 2.4.3. Método de Bhowmik (1976)

A aplicação do método de Bhowmik (1976) (apresentado em Bhowmik *et al.*, 1982) é feita com base na expressão seguinte,

$$\frac{g H_s}{U^2} = 3.23 \times 10^{-3} \left( \frac{g F}{U^2} \right)^{0.435} \quad [14]$$

e apresenta a seguinte limitação, para condições de agitação completamente desenvolvida,

$$\frac{g H_s}{U^2} \leq 3 \times 10^4 \quad [15]$$

Esta metodologia apresenta valores mais próximos dos valores reais no caso de massas de água em que a largura da zona do *fetch* se aproxima do seu comprimento, ou seja, a sua aplicação não é aconselhada para situações em que a massa de água é restringida pela sua largura, como é o caso de lagos e rios.

### 2.4.4. Método de Demirbilek, Bratos e Thompson (1993)

O método de Demirbilek, Bratos e Thompson (1993) (apresentado em USACERC, 2002) estabelece um coeficiente que permite prever o efeito da pressão do vento sobre a superfície de água ( $U_A$ ), que se denomina por coeficiente de arrastamento,  $C_D$ , e é obtido através de,

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035 U_{10}) \quad [16]$$

Com este parâmetro é possível calcular a pressão exercida sobre a superfície de água pela expressão,

$$U_A^2 = U_{10}^2 C_D \quad [17]$$

O valor da altura de onda e do período de onda são depois estimados através de,

$$\frac{g H_{m0}}{U_A^2} = 4.13 \times 10^{-2} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [18]$$

$$\frac{g T_P}{U_A} = 0.751 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [19]$$

Esta metodologia apresenta, ainda, as seguintes limitações para condições de agitação completamente desenvolvida,

$$\frac{g H_{m0}}{U_A^2} \leq 2.115 \times 10^2 \quad [20]$$

$$\frac{g T_P}{U_A} \leq 2.398 \times 10^2 \quad [21]$$

### 2.4.5. Método de Wilson (1965) e Goda (2003)

O método de Wilson (1965) e Goda (2003) (apresentado em CIRIA, 2007) envolve a aplicação das seguintes expressões,

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.3 \left( 1 - \left( 1 + 0.004 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-2} \right) \quad [22]$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = 8.61 \left( 1 - \left( 1 + 0.008 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-5} \right) \quad [23]$$

2.4.6. Método de Khama e Calkoen (1992)

A metodologia de Khama e Calkoen (1992) (apresentada em CIRIA, 2007) permite estimar as características da agitação em função das condições de estabilidade, através da aplicação das seguintes expressões,

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = A \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^B \quad [24]$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = C \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^D \quad [25]$$

sendo as variáveis A, B, C e D definidas no Quadro 1.

Quadro 1. Valores das variáveis A, B, C e D em função das condições de estabilidade.

Coefficiente	A	B	C	D
Condições estáveis	$3.86 \times 10^{-3}$	0.38	0.5236	0.24
Condições instáveis	$2.94 \times 10^{-3}$	0.47	0.4425	0.28
Análise composta	$2.88 \times 10^{-3}$	0.45	0.4587	0.27

2.4.7. Método de Saville (1954)/Carlson e Sayre (1961)

O método de Saville (1954)/Carlson e Sayre (1961) (apresentado em CIRIA, 2007) foi desenvolvido para massas de água com uma largura limitada, sendo aplicável para valores do quociente entre a largura da massa de água e a extensão do fetch compreendidos entre 0.05 e 0.6. O fetch efetivo pode, neste caso, ser obtido por,

$$F_e = 1.054 W^{0.6} F^{0.4} \quad [26]$$

em que W representa a largura da massa de água e F a extensão do fetch. Para além destes parâmetros é ainda definida uma velocidade do vento efetiva ( $U_e$ ) que tem em conta o ângulo de atuação do vento relativamente ao alinhamento do escoamento ( $\Phi$ ) e a velocidade média do escoamento ( $\bar{V}$ ). A velocidade efetiva do vento pode ser obtida pela expressão,

$$U_e = U \cos\Phi + \bar{V} \quad [27]$$

Com a definição destes dois parâmetros é possível estimar a altura de onda significativa através de,

$$\frac{g H_s}{U_e^2} = 3.23 \times 10^{-3} \left( \frac{g F_e}{U_e^2} \right)^{0.435} \quad [28]$$

2.4.8. Método de Donelan (1980)

No método de Donelan (1980) (apresentado em CIRIA (2007)) são definidos três parâmetros diferentes como o ângulo de propagação de onda ( $\theta$ ), a direção do vento ( $\Phi_w$ ) e a extensão do fetch segundo a direção de propagação da onda ( $F_\theta$ ).

Estando definidos estes parâmetros é possível calcular a altura de onda significativa e o período de onda de pico, através de,

$$\frac{g H_s}{(U_{10} \cos(\theta - \Phi_w))^2} = 0.00366 \left( \frac{g F_\theta}{(U_{10} \cos(\theta - \Phi_w))^2} \right)^{0.38} \quad [29]$$

$$\frac{g T_p}{U_{10} \cos(\theta - \Phi_w)} = 0.54 \left( \frac{g F_\theta}{(U_{10} \cos(\theta - \Phi_w))^2} \right)^{0.23} \quad [30]$$

Esta metodologia é aplicável quando se verificam as seguintes condições,

$$\frac{g H_s}{(U_{10} \cos(\theta - \Phi_w))^2} \leq 0.285 \quad [31]$$

$$\frac{g T_p}{U_{10} \cos(\theta - \Phi_w)} \leq 7.56 \quad [32]$$

2.4.9. Método de Young e Verhagen (1996)

O método de Young e Verhagen (1996) (apresentado em CIRIA (2007)), ao contrário dos outros métodos já apresentados, tem em consideração a profundidade de água ( $h$ ), e pode ser aplicado usando as seguintes expressões,

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.241 \left( \tanh(A_1) \tanh\left(\frac{B_1}{\tanh(A_1)}\right) \right)^{0.87} \quad [33]$$

$$\frac{g T_p}{U_{10}} = 7.519 \left( \tanh(A_2) \tanh\left(\frac{B_2}{\tanh(A_2)}\right) \right)^{0.37} \quad [34]$$

em que,

$$A_1 = 0.493 \left( \frac{g h}{U_{10}^2} \right)^{0.75} \quad [35]$$

$$B_1 = 0.00313 \left( \frac{g F}{U_{10}} \right)^{.57} \quad [36]$$

$$A_2 = 0.331 \left( \frac{g h}{U_{10}^2} \right)^{1.01} \quad [37]$$

$$B_2 = 0.0005215 \left( \frac{g F}{U_{10}} \right)^{0.73} \quad [38]$$

2.5. Comparação entre metodologias

Para que fosse possível fazer uma comparação gráfica das diferentes metodologias, os parâmetros envolvidos foram convertidos em parâmetros adimensionais.

No entanto, como nem todas as metodologias consideram os mesmos parâmetros, não foi possível representar todos os métodos no mesmo gráfico. Os parâmetros adimensionais considerados nos gráficos comparativos apresentados nas Figuras 5 e 6 foram,

$$H^* = \frac{g H_s}{U_{10}^2} \quad [39]$$

$$T^* = \frac{g T_s}{U_{10}} \quad [40]$$

$$F^* = \frac{g F}{U_{10}} \quad [41]$$

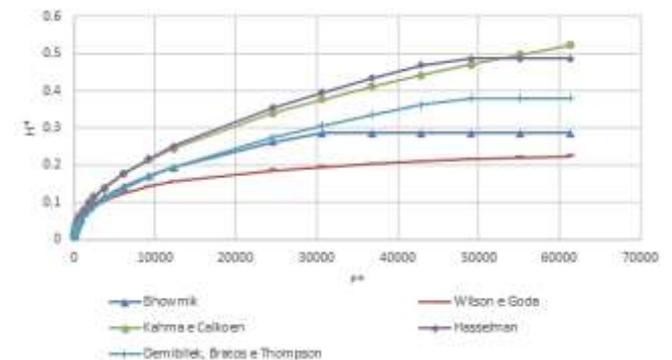


Figura 5. Comparação dos métodos no que diz respeito à previsão da altura de onda.

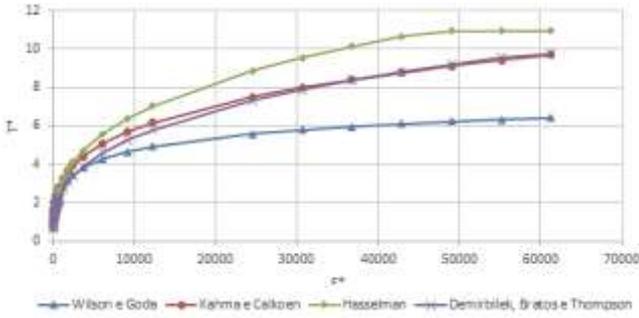


Figura 6. Comparação dos métodos o que diz respeito à previsão do período de onda.

### 3. Formação de Agitação pela Passagem de Embarcações

#### 3.1. Introdução

As ondas geradas pela passagem de embarcações têm uma distribuição complexa, formando-se dois sistemas de agitação: as ondas primárias e as ondas secundárias (Figura 7). As ondas mais facilmente identificáveis, ou seja, aquelas que possuem um período mais curto, são as ondas secundárias. Estas ondas foram alvo de mais estudos, devido ao desgaste que provocam nas zonas em que incidem.



Figura 7. Sistema de ondas primárias e secundárias (Roo *et al.*, 2010).

#### 3.2. Ondas primárias

##### 3.2.1. Depressão do nível da água

O conhecimento da depressão média do nível da água ( $\Delta h$ ) permite calcular o valor da depressão máxima ( $\Delta h_{m\acute{a}x}$ ), CIRIA (2007). A depressão média do nível da água é determinada através de,

$$\Delta h = \frac{V_s^2}{2g} \left( \alpha_s \left( \frac{A_c}{A'_c} \right)^2 - 1 \right) \quad [42]$$

$$\alpha_s = 1.4 - 0.4 \frac{V}{V_L} \quad [43]$$

$$A'_c = b_b(h - \Delta h) + \cot \alpha (h - \Delta h)^2 - A_m \quad [44]$$

$$\frac{V_L}{\sqrt{gh'}} = \left( \frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \left( 1 - \frac{A_m}{A_c} + \frac{V_L^2}{2gh'} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [45]$$

em que,  $V$  representa a velocidade máxima da embarcação (m/s),  $V_L$  a velocidade limite (m/s)  $A_c$  a área da secção do canal a meio da embarcação (m<sup>2</sup>),  $A_m$  área submersa da embarcação (m<sup>2</sup>),  $b_b$  a largura do canal junto ao fundo (m),  $\alpha$  a inclinação dos taludes do canal,  $h$  a profundidade de água (m) e  $h'$  a profundidade fictícia (m) que se obtém dividindo a área da secção do canal a meio da embarcação pela largura do canal ao nível da água.

A utilização desta metodologia está limitada a valores do quociente entre a largura do canal ao nível da superfície livre da água ( $b_w$ ) (m) e a boca da embarcação (m), entre 2 e 12.

Para o cálculo da depressão máxima do nível da água foram definidas as seguintes expressões,

$$\Delta h_{m\acute{a}x} = (1 + 2A'_w)\Delta h \text{ para } \frac{b_w}{L} < 1.5 \quad [46]$$

$$\Delta h_{m\acute{a}x} = (1 + 4A'_w)\Delta h \text{ para } \frac{b_w}{L} \geq 1.5 \quad [47]$$

$$A'_w = x \frac{h}{A_c} \quad [48]$$

em que  $x$  representa a distância à linha de navegação (m) e  $\Delta h_{m\acute{a}x}$  a depressão máxima do nível da água (m).

##### 3.2.2. Ondas frontais e ondas de popa

A altura de onda frontal,  $\Delta h_f$ , pode ser obtida por,

$$\Delta h_f = 0.1\Delta h + \Delta h_{m\acute{a}x} \quad [49]$$

em que o valor da altura de onda de popa,  $Z_{m\acute{a}x}$  é obtido por,

$$Z_{m\acute{a}x} = q\Delta h_{m\acute{a}x} \quad [50]$$

A variável  $q$  apresenta valores diferentes consoante a bibliografia utilizada, podendo tomar valores de 1.5 (CIRIA, 2007) ou de 1.0 (PIANC, 1987).

#### 3.3. Ondas secundárias

O sistema de ondas secundárias inclui ondas transversais e ondas divergentes. A interação entre ambos provoca ondas que podem induzir um desgaste significativo nas margens.

As ondas divergentes caracterizam-se por se propagarem de forma igual nos dois lados da embarcação, caso esta não mude de direção, e, para a parte da proa, ou seja, para a frente do navio. As ondas transversais movem-se no sentido da popa. Estes dois tipos de onda são apresentados na Figura 8.

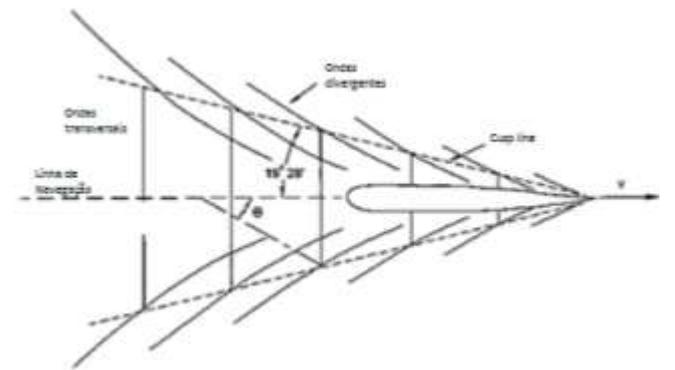


Figura 8. Propagação das ondas secundárias geradas pela passagem de embarcações (adaptado de PIANC, 2003).

A disposição das ondas secundárias apresentada na Figura 8 tende a variar à medida que o número de Froude relativo à profundidade da água varia.

À medida que este número se aproxima de 1, por valores inferiores, as linhas de crista das ondas divergentes tendem a formar um ângulo cada vez mais próximo dos 90° com a linha de navegação e as ondas transversais tendem a desaparecer. Este número de Froude pode ser representado por,

$$Fr_h = \frac{v}{(gh)^{\frac{1}{2}}} \quad [51]$$

As características da agitação gerada podem também ser influenciadas pelo modo de movimentação da embarcação, que pode ser definido com base no número de Froude relativo ao comprimento da embarcação ( $L$ ) e ao volume de água deslocada pela mesma ( $V$ ). Estes números de Froude podem ser obtidos através de,

$$Fr_L = \frac{V}{(g L)^{\frac{1}{2}}} \quad [52]$$

$$Fr_V = \frac{V}{(g V)^{\frac{1}{2}}} \quad [53]$$

O modo de movimentação de uma embarcação pode também ser definido com base na sua velocidade, identificando-se três categorias de movimentação: deslocamento, semi-deslizamento e deslizamento (Figura 9).

Cada um desses modos de movimentação está associado a um intervalo dos números de Froude, Quadro 2.

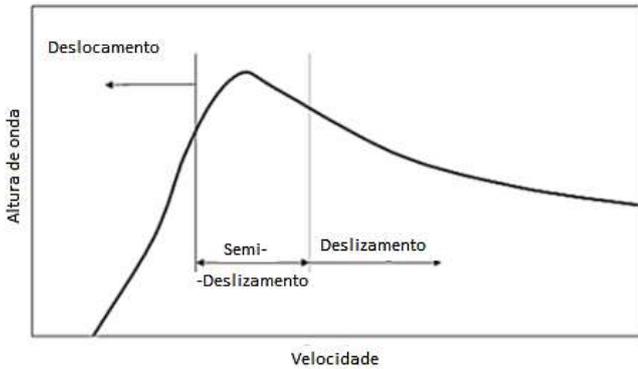


Figura 9. Diferentes modos de movimentação da embarcação em função da sua velocidade (adaptado de Maynard, 2005).

Quadro 2. Modo de movimentação da embarcação em função do número de Froude.

Modo de movimentação	$Fr_L$	$Fr_V$
Deslocamento	< 0.4	< 1.3
Semi-deslizamento	0.4 a 0.9	1.0 a 3.0
Deslizamento	> 0.9	> 2.3

### 3.4. Metodologias de previsão de ondas secundárias

#### 3.4.1. Método de Sorensen e Weggel (1984)

O método Sorensen e Weggel (1984) utiliza os seguintes parâmetros adimensionais para a determinação do valor da onda de interferência ( $H_i$ ),

$$H^* = \frac{H_i}{\frac{1}{\sqrt{3}}} \quad [54]$$

$$x^* = \frac{x}{\frac{1}{\sqrt{3}}} \quad [55]$$

$$h^* = \frac{h}{\frac{1}{\sqrt{3}}} \quad [56]$$

Em que  $x$  representa a distância à linha de navegação (m). Posteriormente é também necessário calcular o valor de  $\Omega$ ,  $\alpha$  e  $n$ , pelas expressões,

$$\Omega = -0.225 Fr_h^{-0.699}, \text{ para } 0.2 \leq Fr_h < 0.55 \quad [57]$$

$$\Omega = -0.342, \text{ para } 0.55 \leq Fr_h < 0.8 \quad [58]$$

$$\delta = -0.118 Fr_h^{-0.356}, \text{ para } 0.2 \leq Fr_h < 0.55 \quad [59]$$

$$\delta = -0.146, \text{ para } 0.55 \leq Fr_h < 0.8 \quad [60]$$

$$n = \Omega (h^*)^\delta \quad [61]$$

$$\log(\alpha) = a + b \log(h^*) + c \log^2(h^*) \quad [62]$$

em que,

$$a = -\frac{0.6}{Fr_h} \quad [63]$$

$$b = 0.75 Fr_h^{-1.125} \quad [64]$$

$$c = 2.6531 Fr_h - 1.95 \quad [65]$$

$$H^* = \alpha x^{*n} \quad [66]$$

Este método define também o ângulo que as ondas divergentes fazem com a margem da massa de água, que pode ser calculado por,

$$\theta = 35,267 (1 - \exp(-12 + 12 Fr_h)) \quad [67]$$

Importa referir que o número de Froude deve estar compreendido entre 0.2 e 1, sendo  $\theta$  dado em graus.

#### 3.4.2. Método de Balanin e Bykov (1965)

A altura de onda de interferência pode também ser estimada pelo método de Balanin e Bykov (1965) (apresentado em Bhowmik *et al.*, 1982), através de,

$$H_i = 2.5 \frac{V^2}{2g} \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{(4.2 + \frac{A_c}{A_m})^{0.5}} \right) \left( \frac{\frac{A_c}{A_m} - 1}{\frac{A_c}{A_m}} \right)^2 \right) \quad [68]$$

em que  $A_c$  e  $A_m$  representam a área da secção transversal do canal e a secção transversal submersa da embarcação a meio do seu comprimento, respetivamente. Esta última é obtida pelo produto do calado pela boca da embarcação (largura). De referir que todas as unidades destas variáveis devem estar em pés.

#### 3.4.3. Método de Hochstein (1980)

A metodologia proposta por Hochstein (1980) (apresentado em Bhowmik *et al.*, 1982) tem como base a seguinte expressão,

$$H_i = 0.0448 V^2 \left( \frac{D}{L} \right)^{0.5} \left( 1 - \frac{BD}{Ac} \right)^{-2.5} \quad [69]$$

em que  $D$  representa o calado,  $L$  o comprimento e  $B$  a largura da embarcação.

#### 3.4.4. Método de Kriebel e Seelig (2005)

A metodologia desenvolvida por Kriebel e Seelig (2005) (apresentado em Ghani *et al.*, 2008) utiliza um número de Froude modificado ( $Fr_*$ ), de maneira a poder ser utilizada em condições de água pouco profunda,

$$Fr_* = Fr_L \exp\left(\varepsilon \frac{D}{h}\right) \quad [70]$$

em que  $\varepsilon$  representa um coeficiente adimensional que varia com a forma do casco da embarcação, podendo ser obtido através de,

$$\varepsilon = 2.5(1 - C_B) \quad [71]$$

sendo,

$$C_B = \frac{V}{LBD} \quad [72]$$

em que  $C_B$  representa o coeficiente de bloco da embarcação. Definido o número de Froude é possível determinar a altura de onda de interferência através de,

$$\frac{g H_i}{V^2} = \psi (Fr_* - 0.1)^2 \left( \frac{x}{L} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad [73]$$

sendo,

$$\psi = 1 + 8 \left( \tanh \left( 0.45 \left( \frac{L}{L_e} - 2 \right) \right) \right)^3 \quad [74]$$

em que  $L_e$  representa o comprimento de entrada da embarcação, ou seja, a extensão entre a proa e a zona onde a boca (largura) da embarcação é máxima.

Esta metodologia deve ser aplicada apenas para valores de  $Fr_L$  compreendidos entre 0.3 e 0.8, e para quocientes entre a distância à linha de navegação e o comprimento de onda compreendidos entre 0.9 e 1.1.

#### 3.4.5. Método de Bhowmik (1975)

O método de Bhowmik (1975) (apresentado em Maynard *et al.* (2005)) tem por base a seguinte expressão,

$$\left(\frac{H_i}{D}\right)^2 = 0.139 V^{1.174} \left(\frac{x}{L}\right)^{-0.915} \quad [75]$$

De referir que esta metodologia deve ser aplicada apenas para os modos de movimentação de deslizamento ou semi-deslizamento.

#### 3.4.6. Método de Bhowmik *et al.* (1991)

A metodologia de Bhowmik *et al.* (1991) baseia-se na seguinte expressão,

$$\frac{H_i g}{v^2} = e^{4.996} \left(\frac{L}{x}\right)^{0.560} \left(\frac{gx}{v^2}\right)^{0.215} \left(\frac{gv}{v^3}\right)^{0.402} \left(\frac{gh}{v^2}\right)^{0.355} \quad [76]$$

em que  $v$  representa o coeficiente de viscosidade cinemática da água. De notar que este método pode apenas ser aplicado para o modo de deslizamento ou semi-deslizamento.

## 4. Aplicação das Metodologias a um Caso de Estudo.

### 4.1. Introdução

As metodologias anteriormente apresentadas foram aplicadas à albufeira da barragem de Crestuma-Lever, localizada no rio Douro. A sua escolha deveu-se, sobretudo, ao elevado número de embarcações que passam nessa albufeira.

No entanto, como se verá adiante, as ondas formadas pela ação do vento não são muito relevantes pois a albufeira de Crestuma tem dimensões reduzidas, sendo a escolha baseada na possibilidade de analisar as duas formas de geração de ondas no mesmo local.

### 4.2. Previsão das ondas geradas pela ação do vento

Para estimar as características das ondas geradas pela ação do vento foram aplicadas as metodologias paramétricas e o modelo numérico Aquavidya (Dupuis *et al.*, 1996) a locais situados nas margens da albufeira.

Os dados de vento utilizados foram obtidos através do site do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, 2014) para a estação de Bustelo, no período compreendido entre 15 de março de 2006 e 26 de abril de 2008. Através da aplicação do modelo numérico Aquavidya, fazendo a delimitação da albufeira e definindo o ponto de análise, é possível obter a extensão dos *fetches* para as diferentes direções, Figura 10.

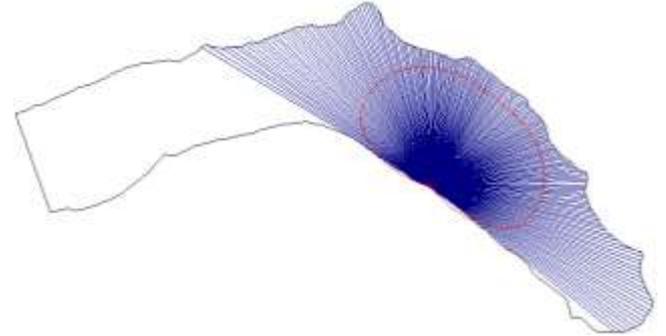


Figura 10. *Fetches* para as diferentes direções de atuação do vento.

Após a definição dos *fetches* possíveis, o modelo numérico fornece a série temporal de alturas de onda significativas ao longo do período de tempo correspondente aos dados de ventos utilizados. Estas alturas de onda estão apresentadas na Figura 11.

Com a aplicação do modelo numérico foram obtidas para o caso de estudo ondas com cerca de 0.3 m de altura significativa, Figura 11.

As metodologias paramétricas foram também aplicadas para o mesmo ponto de análise, tendo-se obtido os valores apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Alturas de onda significativas e períodos obtidos pela aplicação das metodologias paramétricas.

Método	Hs (m)	Ts (s)
Hasselmann (1976)	0.21	1.37
SMB (1970)	0.27	1.90
Bhowmik (1976)	0.27	-
Demirbilek, Bratos e Thompson (1993)	0.17	1.15
Wilson(1965) e Goda (2003)	0.25	1.47
Kahma e Calkoen (1992)	0.25	1.67
Saville (1954)	0.23	-
Donelan (1980)	0.24	1.59
Young e Verhagen (1996)	0.17	1.59

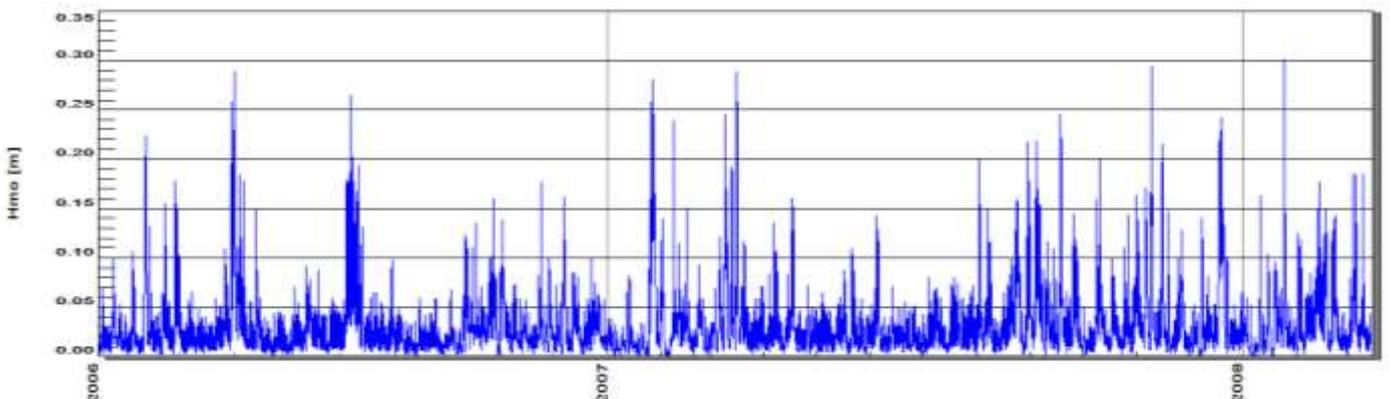


Figura 11. Alturas de onda significativa, obtidas em função dos *fetches* e das velocidades e orientações do vento atuante.

Comparando os resultados obtidos com as metodologias paramétricas e com a utilização do modelo numérico concluiu-se que este último conduz a valores superiores.

#### 4.3. Previsão das ondas geradas pela passagem de embarcações

As metodologias de previsão das características das ondas geradas pela passagem de embarcações foram aplicadas a uma lista de embarcações disponibilizada pelo IPTM para a eclusa da barragem de Crestuma-Lever. A análise dessa lista permitiu verificar que a maioria das embarcações se destinava a fins turísticos.

Das embarcações turísticas analisadas verificou-se que a que originava condições de agitação mais desfavorável (alturas de onda maiores) era a Spirit of Chaterwell. As características da embarcação são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4. Características da embarcação Spirit of Chaterwell.

Comprimento entre perpendiculares (m)	58.51
Comprimento Total (m)	63.78
Boca (m)	6.7
Calado (m)	1
Deslocamento ( $m^3$ )	90
Velocidade máxima (nós)	12

Para estas características obtiveram-se os seguintes números de Froude:  $Fr_L = 0.25$ ;  $Fr_V = 0.21$ . Estes resultados permitem concluir que esta embarcação se movimentava em condições de deslocamento. Os valores de altura de onda para os diferentes métodos abordados são os indicados no Quadro 5,

Quadro 5. Alturas de onda para a embarcação Spirit of Chaterwell.

Método	Hi (m)
Sorensen e Weggel (1984)	0.317
Balanin e Bykov (1965)	0.203
Hochstein (1980)	0.146
Kriebel e Seelig (2005)	-
Bhowmik (1975)	-
Bhowmik <i>et al.</i> (1991)	-

De referir que não foi possível aplicar três dos métodos apresentados anteriormente devido às condições de movimentação (deslocamento) da embarcação e ao facto de o quociente entre a distância à linha de navegação e o comprimento da embarcação não estar entre 0.9 e 1.1, uma vez que foi considerada uma distância de 90 m entre a linha de navegação e a margem.

Para que pudesse ser feita uma análise mais completa das ondas geradas pela passagem de embarcações na albufeira de Crestuma-Lever considerou-se ainda uma embarcação tipo de pequenas dimensões com as características apresentadas no Quadro 6.

Esta embarcação foi escolhida uma vez que apresenta uma movimentação em modo de deslizamento devido aos valores obtidos para os números de Froude ( $Fr_L = 1.1$  e  $Fr_V = 9.18$ ). As alturas de onda obtidas para esta embarcação são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 6. Características da embarcação de recreio tipo.

Comprimento entre perpendiculares (m)	-
Comprimento Total (m)	13.9
Boca (m)	4.35
Calado (m)	1.2
Deslocamento ( $m^3$ )	0.2
Velocidade máxima (nós)	25

Quadro 7. Alturas de onda para embarcação de recreio tipo.

Método	Hi (m)
Sorensen e Weggel (1984)	-
Balanin e Bykov (1965)	0.757
Hochstein (1980)	2.03
Kriebel e Seelig (2005)	-
Bhowmik (1975)	0.853
Bhowmik <i>et al.</i> (1991)	0.453

De referir que embora a metodologia de Hochstein (1980) não possua qualquer limitação em relação às características da embarcação, o valor obtido está muito fora do intervalo esperado e, como tal, foi excluída dos resultados a considerar como válidos.

## 5. Conclusões

Para a previsão das características da agitação formada numa albufeira pela ação do vento foram aplicados métodos paramétricos e um modelo numérico (Aquavidya). Pela aplicação das diferentes metodologias paramétricas foram obtidos valores diferentes de alturas de onda para as mesmas condições de vento e de extensão de *fetch*. O rigor das estimativas apresentadas depende do modo como as várias formulações foram obtidas, das condições em que se testou a sua aplicabilidade e se fez a sua calibração, bem como da sua maior ou menor proximidade às características do caso de estudo. Quanto à aplicação do modelo numérico, este tem em consideração a acumulação e a dissipação de energia na massa de água pela ação do vento, o que leva a concluir que este constitui uma análise mais adaptada às condições do local de aplicação, uma vez que também se definem os limites da massa de água que se pretende analisar.

A comparação entre os resultados obtidos com a aplicação destes dois modos de previsão das condições de agitação permite concluir que, em geral, a altura de onda obtida pela aplicação dos métodos paramétricos é inferior à que é obtida pela aplicação do modelo numérico.

Quanto aos métodos de previsão da agitação originada pela passagem de embarcações, verificou-se que o modo de movimentação das mesmas limita o número de metodologias que se podem aplicar, sendo que para as embarcações que se movimentam em modo de deslocamento existem mais metodologias disponíveis para a previsão das ondas secundárias e primárias. Estas últimas, não são analisadas quando a embarcação se movimenta em modo de deslizamento ou semi-deslizamento, já que as ondas secundárias apresentarão características mais desfavoráveis no que concerne à erosão das margens.

## Agradecimentos

Ao engenheiro Pierre Dupuis, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas relativas ao modelo numérico Aquavidya.

## Referências

- Bhowmik, N., Soong, T. W., Reichelt, W., Seddik, N. (1991). *Waves Generated by Recreational Traffic on the Upper Mississippi River System*. Illinois State Water Survey. Report nº117.
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *Physical Site conditions and data collection*. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). Cap. 4, pp. 301-479, C683, CIRIA, London.
- Dupuis, P., Tournier, J. P. e Caron, O. (1996). *Wave Climate of Large Reservoirs and a Revised Wave Hindcast Formula*. Coastal Engineering, pp. 1333-1246. Ed. Billy Edge. ISBN: 978-078-440-2429.
- Ghani, M., Rahim, M. (2008). *The Prediction of Wake Wash in the towing tank*. Jurnal Mekanikal, Dezembro/2008, nº 26, pp. 129-140.
- Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos. (<http://www.imarpor.pt/>). Maio 2014.
- Kamphuis, J. (2000). *Wave generation*. Introduction to Coastal Engineering and Management, pp. 103-116, Queens University, Canada.
- Maynord, S.. (2005). *Wave height from planing and semi-planing small boats*. Vol. 21, Issue 1, pp.1-17. River Research and Applications.
- PIANC-Permanent International Association of Navigation Congresses. Permanent Technical Committee I, Working Group 4. (1987). *Guidelines for the design and construction flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways*. Brussels.
- Roo, S., Van Crombrugge, W., Troch, P., Van Acker, J. e Maes, E. (2010). *Field Monitoring of ship-induced loads on (alternative) bank protections of non-tidal waterways*. PIANC MMX Congress Liverpool UK 2010.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. (<http://snirh.apambiente.pt/>). Abril 2014
- Société d'énergie de la Baie James (1997). *RipRap sizing*.
- Sorensen, R. e Weggel, J. (1984). Ports'86. (Sorensen, P., ed.).
- USACERC-U.S. Army Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual*. U.S.Government Printing Office. Washington.
- USACERC-U. S. Army Corps of Engineers. (2002). *Water wave mechanics*. In Coastal Engineering Manual. Parte II, Cap. 1, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C.