



DESEMPENHO DE UM DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE INTEGRADO EM TRÊS TIPOS DE ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO PORTUÁRIA

Eric Didier¹ – edidier@lnec.pt

Paulo Teixeira² – pauloteixeira@furg.br

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa, Portugal

²Universidade Federal de Rio Grande – Rio Grande, RS, Brazil

Resumo. Os dispositivos de aproveitamento da energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) podem ser inseridos em proteções portuárias, tais como os quebra-mares verticais e de talude e quebra-mares sobre estacas. Assim, a interação entre a onda incidente e a estrutura na qual o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas é integrado é significativamente diferente, já que, no caso de um quebra-mar vertical, a estrutura é impermeável e que, no caso de um quebra-mar de talude, a estrutura é porosa. O desempenho do dispositivo de CAO para estas três configurações é analisado para um intervalo de período de onda incidente regular entre 6 e 12 s e uma altura de onda de 1 m. O dispositivo de CAO integrado no quebra-mar vertical apresenta o maior desempenho (potência pneumática máxima de 70 kW), sendo que a potência pneumática é globalmente 3 % maior do que a do CAO inserido no quebra-mar de talude (potência pneumática máxima de 67,4 kW). O desempenho do dispositivo de CAO integrado no quebra-mar sobre estacas é similar ao do dispositivo em quebra-mar vertical para os períodos de onda inferiores a 9 s, mas apresenta uma perda de eficiência significativa para períodos de onda maiores.

Palavras-chave: Coluna de água oscilante, Quebra-mar de talude, Quebra-mar vertical, Modelagem numérica, RANS

1. INTRODUÇÃO

O dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) é um sistema que está em desenvolvimento há já algumas décadas. Um dispositivo de CAO é constituído por uma estrutura parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água, dentro da qual fica aprisionada uma bolsa de ar acima da superfície livre. O movimento oscilatório da superfície livre no interior na câmara pneumática, produzido pelas ondas incidentes, faz o ar escoar por uma turbina, que está diretamente acoplada a um gerador eléctrico.

Alguns protótipos foram já construídos no mundo: os dispositivos do Pico (Açores, Portugal) e Limpet (Escócia) estão construídos na linha de costa; os de Sakata (Japão) Mutriku (Espanha) e Civitavecchia (Itália) estão integrados em quebra-mares verticais, aproveitando uma estrutura existente e a energia das ondas incidentes, normalmente maior do que em dispositivos localizados na costa (Falcão e Henriques, 2016).

O desempenho do dispositivo de CAO resulta, em parte, da interação entre a onda incidente e a estrutura na qual o dispositivo é integrado. Na proximidade da costa, há principalmente dois tipos de estruturas portuárias: o quebra-mar vertical, constituído de caixotões impermeáveis, e o quebra-mar de talude, constituído de várias camadas de blocos, naturais e/ou artificiais, sendo assim uma estrutura porosa. Uma terceira estrutura de tipo quebra-mar sobre estacas é também considerado neste estudo e corresponde a uma possível opção de implementação de dispositivos de CAO.

No presente artigo, o desempenho de um dispositivo de CAO integrado em quebra-mares vertical e de talude e sobre estacas é analisado para ondas regulares incidentes com período entre 6 e 12 s e uma altura de 1 m. O estudo é realizado num canal de ondas numérico bidimensional, o que corresponde à uma configuração de cluster de dispositivos de CAO juntos. A variação de altura de água no dispositivo e a potência pneumática são analisadas.

2. DISPOSITIVO DE CAO INTEGRADO EM TRÊS ESTRUTURAS PORTUÁRIAS

Três estruturas de proteção portuária, nas quais o mesmo dispositivo de CAO é integrado, são analisadas: um quebra-mar vertical, um quebra-mar de talude e uma estrutura de tipo quebra-mar sobre estacas (Fig. 1). A câmara do dispositivo tem 10 m de comprimento e 16 m de altura com uma abertura de 5 m de altura entre o mar e o interior do dispositivo. A altura da câmara-de-ar é de 6 m. A parede frontal e o fundo da CAO tem 0,5 m e 0,6 m de espessura, respetivamente. O fundo do dispositivo de CAO é localizado a 10 m de profundidade. O fundo horizontal do canal de ondas é localizado a 25 m de profundidade.

O quebra-mar vertical é impermeável e diretamente assente no fundo (Fig. 1a). O quebra-mar de talude é composto por um manto de enrocamento com declive de 2:3 (Fig. 1b). O manto exterior é composto por duas camadas de blocos de 90 a 120 kN, apresentando um elevado nível de arrumação dos blocos, que resulta numa camada pouco porosa. O manto interior é composto de duas camadas de enrocamento de 10 a 30 kN. As características dos dois mantos são as seguintes: a porosidade é de 0,35 e os parâmetros empíricos determinando as características dos meios porosos, α e β , são para a manto exterior 1000 e 0,7 e para o manto interior 1000 e 1,1 (ver Eq. (15 e 16)). O núcleo, ou filtro, constituído de TOT (material todo-o-tamanho), tem as características seguintes: porosidade 0,25, $\alpha=1000$ e $\beta=0,8$. O quebra-mar sobre estacas (Fig. 1c) é materializado apenas pelo dispositivo de CAO considerando que o efeito das estacas no comportamento do escoamento é insignificante em relação às interações onda-estrutura devido à presença do dispositivo.

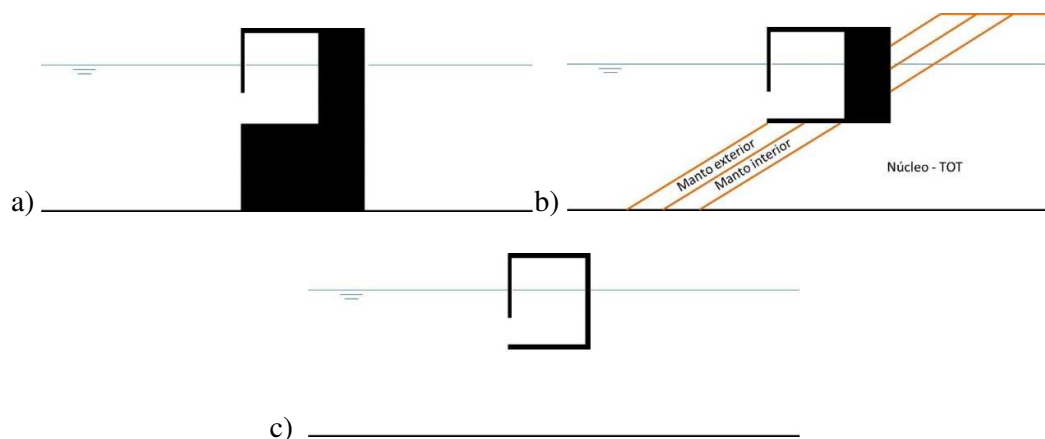


Figura 1- Esquema do dispositivo de CAO integrado em três estruturas de proteção portuária: quebra-mar a) vertical, b) de talude e c) sobre estacas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As equações governantes são apresentadas, seguido do modelo numérico, dos modelos utilizados para a modelagem da turbina e dos meios porosos do quebra-mar de talude, das condições limites e iniciais. A construção da malha é também descrita.

3.1 Equações

As equações governantes são compostas pela equação de continuidade, da quantidade movimento e da energia (Schlichting, 1979) nas quais a água é um fluido incompressível e o ar é um gás ideal compressível:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho e + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_e \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} u_j) \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

onde $i, j, k = 1, 2$, u_i são as componentes i da velocidade, t o tempo, p a pressão, ρ a massa específica, g_i as componentes da aceleração da gravidade e S_i o termo fonte. e é a energia específica e k_e o coeficiente de condutibilidade térmica. τ_{ij} é o tensor das forças viscosas e μ é a viscosidade do fluido. As equações RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) são obtidas a partir da decomposição da velocidade e pressão instantâneas das equações de Navier-Stokes e da energia específica da equação de energia numa componente média e flutuante e da integração no tempo destas equações. A turbulência no escoamento é assim introduzida a partir dos tensores de Reynolds considerando a hipótese de Boussinesq dada por

$$-\rho(\overline{u'_i u'_j}) = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

Um modelo de turbulência permite fechar o sistema de equações e relacionar os tensores de Reynolds com as variáveis médias do escoamento. O modelo k - ε *standard* é o utilizado no presente estudo, em que a energia cinética de turbulência k e a taxa de dissipação ε seguem as equações (Harlow and Nakayama, 1968):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \mu_t (2S_{ij} S_{ij}) - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t (2S_{ij} S_{ij}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + S_\varepsilon \quad (7)$$

com

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (9)$$

e $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$.

O movimento da superfície livre é definido pela técnica VOF (*Volume of Fluid*) proposta por Hirt e Nichols (1981) que consiste em identificar a posição da superfície livre através do transporte da fracção de volume, f , que toma o valor 0 no ar e 1 na água. A posição da superfície livre é definida pelo valor $f=0.5$. A equação de transporte é dada por

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_j \frac{\partial f}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

3.2 Modelo numérico

O modelo numérico RANS da ANSYS Fluent (2016) é utilizado para desenvolver o canal de ondas 2D, o dispositivo de CAO e a estrutura portuária. Uma técnica de volumes finitos (Perić e Ferziger, 1997), na qual as variáveis são definidas no centro dos elementos da malha, é aplicada para resolver as equações RANS e VOF.

A integração no tempo é efetuada com uma formulação implícita e uma discretização no tempo de segunda ordem. O algoritmo SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent*), acoplado velocidade e pressão, é utilizado. Os coeficientes de sub-relaxação são iguais a 1 para a quantidade de movimento, a energia e o VOF e 0,8 para o modelo $k-\varepsilon$. Os termos viscosos são discretizados por um esquema de diferenças centradas de segunda ordem. Os termos convectivos das equações de conservação da quantidade de movimento são determinados pelo esquema MUSCL (*Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws*) de terceira ordem e pelo esquema UPWIND de segunda ordem para a equação de energia e as equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) classicamente utilizado para modelagem de propagação de onda no ANSYS Fluent (2016). A água é um fluido incompressível e o ar é um gás ideal compressível. O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ com os coeficientes padrões é utilizado, pois foi verificado que permite propagar com precisão as ondas tomando em conta os principais efeitos e fenómenos devidos ao escoamento turbulento. No método VOF, a fracção de volume é determinada pelo esquema HRIC (*High Resolution Interface Capturing*) (Perić e Ferziger, 1997).

As condições limites seguintes são impostas: pressão atmosférica no topo do canal de onda; paredes com condição de aderência na estrutura portuária e no dispositivo de CAO; condição de aderência no fundo do canal de ondas; e turbulência quase nula no batedor, no ar e na turbina ($k = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $\varepsilon = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$) (Lin e Liu, 1998; Elhanafi *et al.*, 2016).

A geração das ondas é efectuada à entrada do domínio computacional através de um gerador de ondas estático no qual são impostos o perfil das componentes da velocidade e da fracção de volume. O gerador de ondas inclui uma técnica de absorção activa que permite eliminar as ondas reflectidas que chegam ao batedor. A metodologia é baseada na teoria linear das ondas longas (Dean e Dalrymple, 2000) e consiste em corrigir a velocidade no batedor a partir da altura da onda em frente ao batedor (Didier *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2017).

Uma turbina Wells é instalada no topo da câmara-de-ar do dispositivo de CAO. É caracterizada por uma relação linear entre a perda de pressão, i.e., a diferença entre a pressão dentro da câmara e a pressão atmosférica, Δp , e o caudal, Q , dada por:

$$\Delta p = k_t Q \quad (11)$$

onde k_t é a relação característica da turbina Wells com o valor $k_t = 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$, o que corresponde aproximadamente ao k_t óptimo da turbina Wells da central de energia das ondas do Pico, nos Açores (Portugal), que tem um diâmetro de 2,3 m (Falcão, 2002).

O efeito da turbina Wells, localizada no topo da câmara-de-ar do dispositivo de CAO, é modelado através da perda de carga induzida pela turbina. É imposta na fronteira superior do

dispositivo de CAO usando uma zona porosa com espessura de duas camadas de elementos, ou seja, 0,2 m neste caso. A zona porosa é modelada recorrendo ao termo fonte S_i nas equações de quantidade de movimento, conforme descrito em Gonçalves *et al.* (2020).

No caso do quebra-mar de talude, as camadas porosas são modeladas utilizando a técnica dos meios porosos, Eq. (12), considerando a formulação do gradiente hidráulico definido pela formulação de Darcy-Forchheimer, apropriada para escoamentos transientes e periódicos em meios porosos (van Gent, 1995). O gradiente hidráulico é modelado recorrendo ao termo fonte S_i nas equações de quantidade de movimento:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha_p} u_i\right) - C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i - C_A \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} \quad (12)$$

onde C_A é dado por:

$$C_A = \gamma \frac{(1-n)}{n} \quad (13)$$

onde γ é a massa adicionada empírica determinada por van Gent (1995) com valor 0,34, e n a porosidade do meio poroso. Os coeficientes $1/\alpha_p$ e C_2 são determinados em função da porosidade do meio, n , do diâmetro dos blocos que constituam o meio poroso, D_{50} , definido pela relação $D_{50} = (M_{50}/\rho_r)^{1/3}$ (M_{50} é a massa média dos blocos e ρ_r a massa específica), α e β , que são dois parâmetros empíricos que determinam as características do meio poroso:

$$\frac{1}{\alpha_p} = \frac{\alpha(1-n)^2}{D_p^2 n^3} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{2\beta(1-n)}{D_p n^3} \quad (15)$$

O coeficiente empírico β depende no caso de escoamentos transientes do número de Keulegan-Carpenter, KC , e do valor de β_{St} para escoamentos estacionários (van Gent, 1993):

$$\beta = \beta_{St} \left(1 + \frac{7,5}{KC}\right) \quad (16)$$

onde KC é definido como $U_m T / n D_{50}$, sendo U_m a velocidade máxima e T o período de pico da onda incidente irregular ou o período da onda incidente regular.

No ANSYS Fluent, as equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ não são adaptadas aos meios porosos quando a permeabilidade é pequena e a escala geométrica do meio interage com a escala da turbulência. A formulação desenvolvida por Nakayama e Kuwahara (1999), aplicada às estruturas costeiras porosas por vários autores (Higuera *et al.*, 2014) é utilizada, os termos fontes S_k e S_ε nas equações Eq. (6) e Eq. (7) sendo:

$$S_k = n \varepsilon_\infty \quad (17)$$

$$S_\varepsilon = n C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \quad (18)$$

$$k_\infty = 3,7(1-n)n^{3/2} u_i u_i \quad \text{e} \quad \varepsilon_\infty = 39(1-n)^{5/2} u_i u_i \frac{1}{D_{50}} \quad (19)$$

Finalmente, as condições iniciais são de água parada, com campo de velocidade nulo e pressão hidrostática na água. É considerado que a energia cinética da turbulência e a taxa de dissipação têm valores pequenos e são assim definidas por $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$.

O passo de tempo para as simulações é da ordem de $T/600$ e 6 iterações não-lineares são realizadas a cada passo de tempo para reduzir os resíduos de pelo menos 2 a 3 ordens de grandeza, o que se verifica ser suficiente para assegurar a propagação das ondas com precisão (Didier *et al.*, 2011; Teixeira *et al.*, 2013; Lisboa *et al.*, 2018).

3.3 Malha

As características da malha, quer na direção horizontal quer na direção vertical, são as mesmas para as três configurações. O comprimento do canal entre o gerador de onda e a entrada do dispositivo de CAO é ajustado a três comprimentos de ondas. Estudos anteriores indicam que a propagação das ondas com o modelo numérico é bem simulada com uma malha Cartesiana ortogonal e com discretização da ordem de 70 segmentos por comprimento de onda na direção de propagação e 20 segmentos por altura de onda na direção vertical na zona de deformação da superfície livre (Didier *et al.*, 2011; Teixeira *et al.*, 2013; Lisboa *et al.*, 2018). Um refinamento é realizado perto das paredes sólidas (estruturas e fundo do canal de ondas) e nas proximidades dos batedores, na zona da geração das ondas e de absorção das ondas no final do canal (caso do quebra-mar de talude e sobre estacas). No caso do quebra-mar de talude, no qual são definidas zonas porosas, a malha deve ser ajustada. A melhor opção consiste considerar elementos regulares com relação entre tamanho de arestas perto de 1, ou seja elementos os mais quadrados possíveis (Jacobsen, 2012; Devolver *et al.*, 2018). A Fig. 2 apresenta a malha para as três estruturas para o período de onda incidente 12 s.

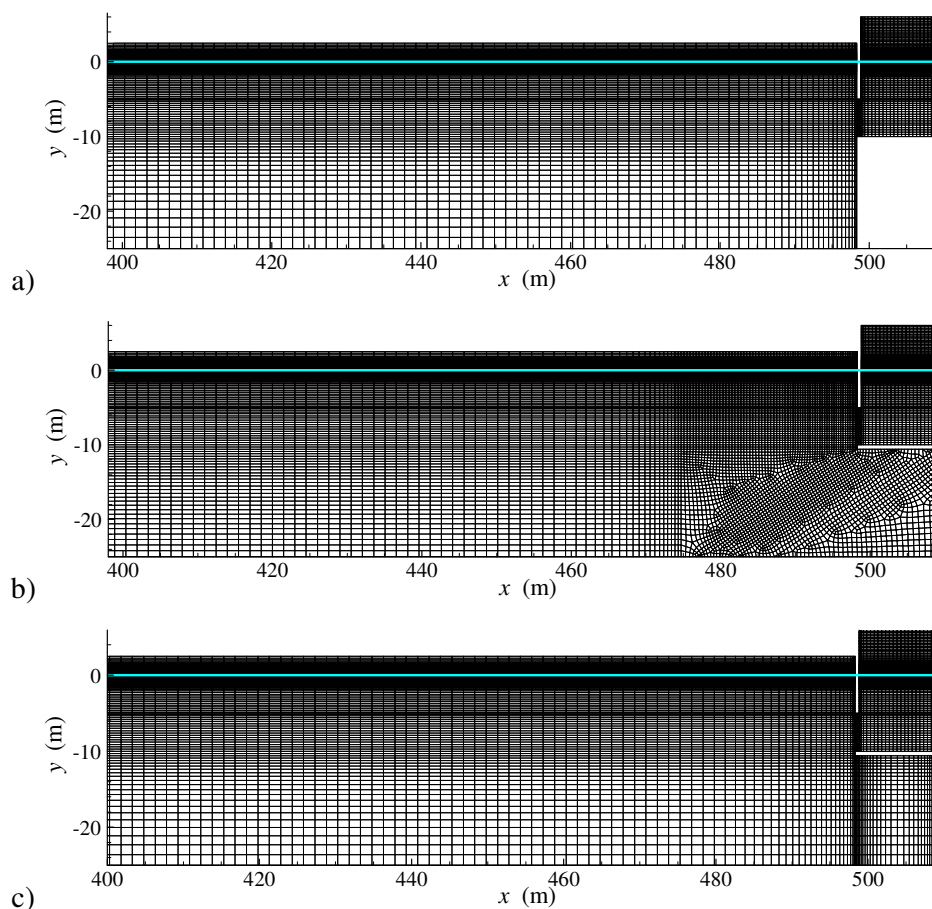


Figura 2- Malha nas proximidades do dispositivo de CAO para as três estruturas para o período de onda incidente 12 s: quebra-mar a) vertical, b) de talude e c) sobre estacas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Fig. 3 e 4 apresentam o módulo da velocidade, U , e as linhas de correntes para as três estruturas portuárias no instante de zero ascendente da elevação de superfície livre média dentro da CAO, para o período de onda incidente 6 e 12 s, respectivamente. Para o período 6 s, o padrão do escoamento nas proximidades e dentro do dispositivo de CAO é relativamente similar e apresenta uma velocidade alta na extremidade da parede frontal e na seção de entrada. Para o período 12 s, verifica-se que o fluxo de energia da onda incidente é favoravelmente dirigido pelo interior do dispositivo no caso do quebra-mar vertical e de talude. Não é o caso do quebra-mar sobre estacas no qual uma parte do fluxo de energia da onda incidente passa por baixo do dispositivo. Assim, o escoamento nas proximidades do dispositivo de CAO depende do tipo de estrutura de proteção portuária e da interação onda-estrutura resultante. O escoamento no interior do dispositivo é relativamente similar, embora se nota algumas diferenças na sua seção de entrada com a presença de um vórtice mais importante no caso do quebra-mar sobre estacas.

O módulo da velocidade abaixo dos 10 m de profundidade tem valores baixos para ondas com período de 6 s, diferentemente das ondas de 12 s. Por essa razão, a influência do tipo de quebra-mar é pequena para os casos de ondas de períodos menores, inferiores a 9 s.

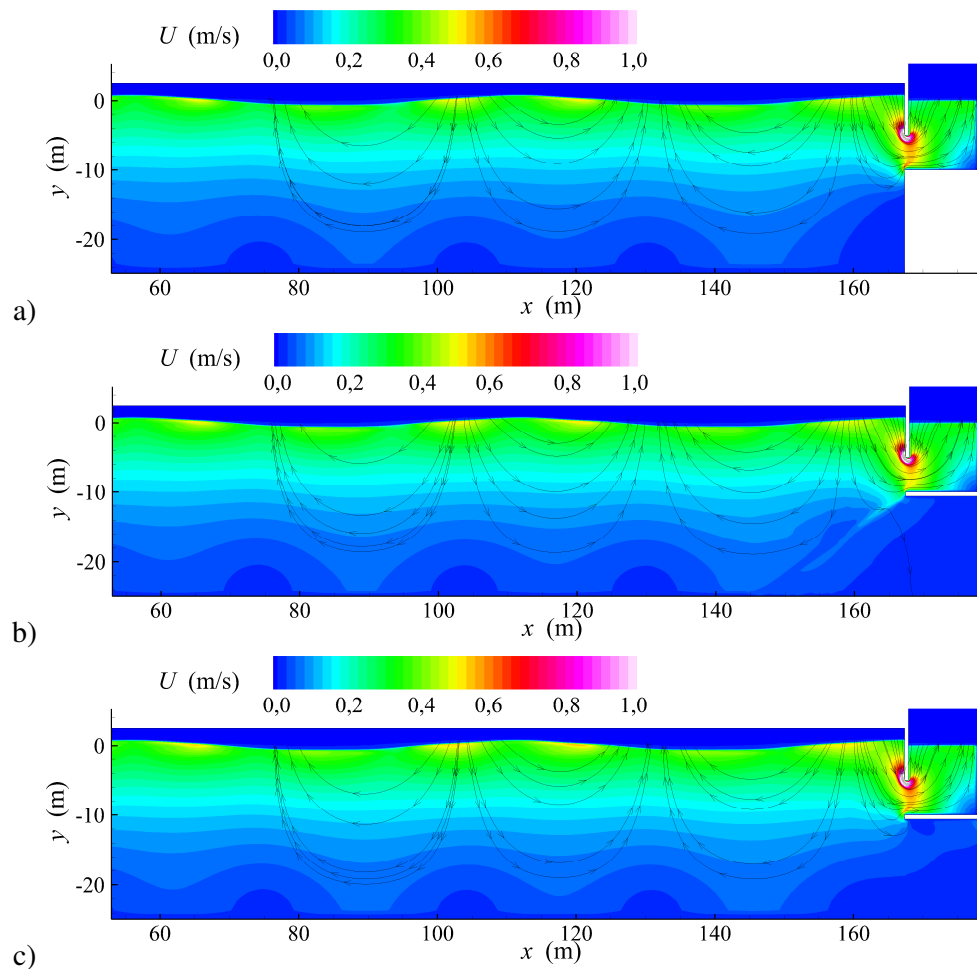


Figura 3- Intensidade da velocidade e linhas de corrente para o instante de zero ascendente da elevação da superfície livre média dentro da CAO, para $T=6$ s: quebra-mar a) vertical, b) de talude e c) sobre estacas.

A Fig. 5 apresenta a elevação, η , e a altura, λ , de superfície livre média dentro do dispositivo de CAO para as três estruturas. O módulo da elevação das cristas e das cavas é muito similar, para as três configurações analisadas, com diferenças máximas da ordem de 4%, indicando uma simetria da amplitude da elevação da superfície livre média dentro da CAO. A altura média de superfície livre no caso do dispositivo de CAO integrado no quebra-mar vertical é sempre maior que nas duas outras configurações. No caso do quebra-mar de talude, esta altura é um pouco inferior à do quebra-mar vertical, mas no caso do quebra-mar sobre estacas pode-se verificar uma redução significativa desta altura para períodos de onda superiores a 9 s. A redução da altura de onda no dispositivo, e redução de potência pneumática associada (Fig. 6) é diretamente ligada ao fluxo de energia disponível entre a superfície livre e a profundidade de 10 m (profundidade de imersão do dispositivo) e à interação entre a onda incidente e a estrutura: para períodos de onda inferiores a 9 s, o fluxo de energia da onda incidente até a profundidade de 10 m é superior a 60 % do fluxo total (88 % para o período de onda de 6 s), sendo apenas de 50 % para o período de onda de 12 s.

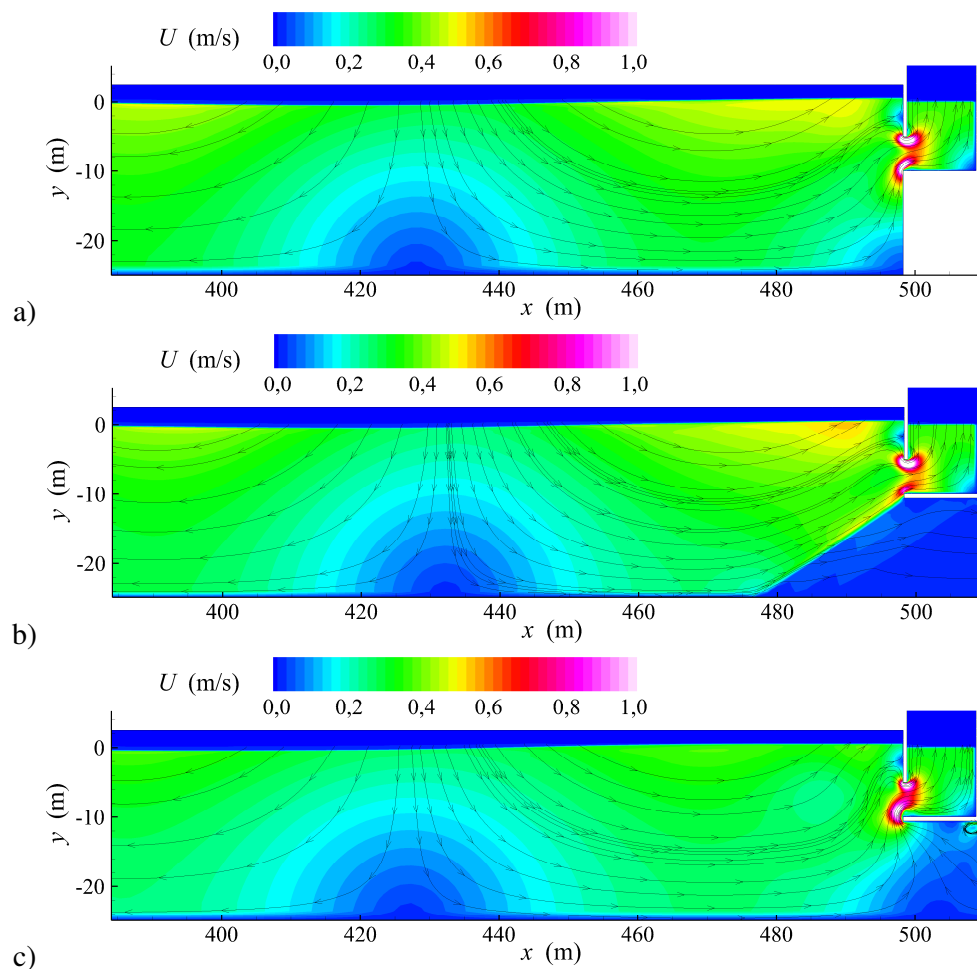


Figura 4- Intensidade da velocidade e linhas de corrente para o instante de zero ascendente da elevação da superfície livre média dentro da CAO, para $T=12$ s: quebra-mar a) vertical, b) de talude e c) sobre estacas.

A potência pneumática média P do dispositivo de CAO, definida por $P = \frac{1}{T} \int_T Q \Delta p dt$, para as três configurações de estruturas de proteção portuária é apresentada na Fig. 6. A

potência P máxima é obtida para o dispositivo de CAO integrado no quebra-mar vertical, independentemente do período de onda incidente. A potência P máxima ocorre em torno do período 10 s, com um valor de 70 kW. No caso do dispositivo de CAO integrado no quebra-mar de talude, a potência P é sistematicamente inferior à potência P obtida na configuração de CAO inserida no quebra-mar vertical, sendo, em média, inferior de 3 % à obtida no caso do quebra-mar vertical. A potência P máxima de 67,4 kW ocorre em torno do período 10,5 s. A configuração na qual o dispositivo de CAO é integrado num quebra-mar sobre estacas apresenta uma variação da potência P similar ao caso da CAO integrada no quebra-mar vertical até o período de onda de 8,5 s. O valor máximo da potência P de 65,8 kW é obtido para o período de 9 s. Depois deste máximo, a diminuição da potência P é relativamente rápida: o valor da potência P para o período de onda 12 s é de 52,4 kW, enquanto é de 67,1 e 65 kW na configuração de quebra-mar vertical e de talude, respetivamente.

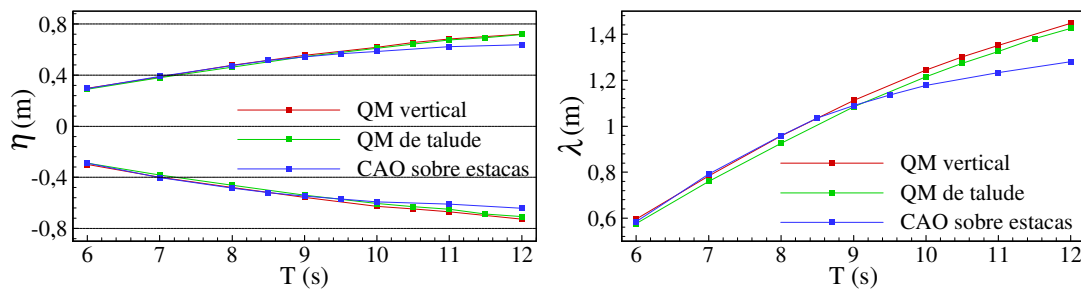


Figura 5- Elevação (esquerda) e altura (direita) de superfície livre média dentro da CAO para as três estruturas e períodos de onda entre 6 e 12 s.

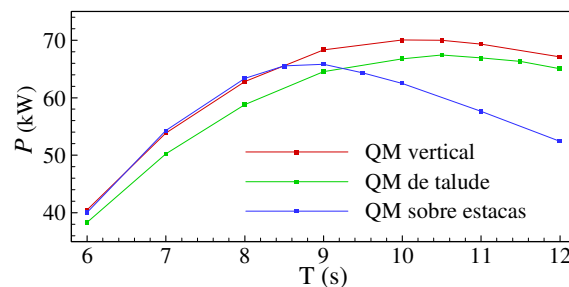


Figura 6- Potência pneumática média P do dispositivo de CAO integrado nas três estruturas para períodos de onda incidente entre 6 e 12 s.

5. CONCLUSÕES

A análise do desempenho de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas de tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) integrado em três estruturas de proteção portuária, para uma onda incidente com altura de 1 m e período de onda entre 6 e 12 s, indica que o quebra-mar vertical permite obter a maior potência pneumática, independentemente do período da onda incidente. O dispositivo de CAO integrado no quebra-mar de talude, com as características das camadas exteriores e do núcleo utilizadas neste estudo, apresenta um desempenho global inferior de apenas 3%, comparando com o dispositivo inserido no quebra-mar vertical. O fluxo de energia da onda incidente é favoravelmente dirigido pelo interior do dispositivo no caso destas duas estruturas. O desempenho do dispositivo de CAO integrado no quebra-mar sobre estacas é similar ao do dispositivo em quebra-mar vertical para os períodos de onda inferiores a 9 s, mas apresenta uma perda de eficiência significativa para períodos de

onda maiores, uma vez que uma parte do fluxo de energia da onda incidente passa por baixo do dispositivo de CAO sem interagir com a estrutura.

Agradecimentos

O Segundo autor agradece os apoios financeiros do CNPq (307546/2921-7) e da FAPERGS (21/2551-0002014-8).

REFERÊNCIAS

- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2000), “*Water wave mechanics for engineers and scientists*”, Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 2, World Scientific.
- Devolver, B., Trough, P. and Rauwoens, P. (2018), Performance of a buoyancy-modified $k-\omega$ and $k-\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®, Coastal Engineering, 138, 49–65.
- Didier, E., Paixão Conde, J.M. and Teixeira, P.R.F. (2011) “Numerical simulation of an oscillation water column wave energy converter with and without damping”, *Fourth International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Lisboa, 206-217.
- Didier, E., Teixeira, P.R.F. and Neves, M.G. (2017), A 3D Numerical Wave Tank for Coastal Engineering Studies, Defect and Diffusion Forum, 372, 1–10.
- Elhanafi, A., Fleming, A., Leong, Z. and Macfarlane, G. (2016), Effect of RANS-based turbulence models on nonlinear wave generation in a two-phase numerical wave tank, Progress in Computational Fluid Dynamics, 17(3), 141–158.
- Falcão, A.F.O. (2002), Control of an oscillating-water-column wave power plant for maximum energy production, Applied Ocean Research, 24, 73-82.
- Falcão, A.F.O. and Henriques, J.C.C. (2016) Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review, Renewable Energy, 85, 1391–1424.
- FLUENT, 2016. User’s Guide, ANSYS Inc.
- Gonçalves, R.A.A.C., Teixeira, P.R.F., Didier, E. and Torres, F.R. (2020) Numerical analysis of the influence of air compressibility effects on an oscillating water column wave energy converter chamber, Renewable Energy, 153, 1183-1193.
- Harlow, F.H. and Nakayama, P. (1968), “*Transport of turbulence energy decay rate*”, Los Alamos Science Lab., University California Report LA-3854.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2014), Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. Coastal Engineering, 83, 243-258.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid VOF method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computers and Physics, 39 (1), 201–225.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsoe, J. (2012), A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM(R), International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, 1073–1088.
- Lin, P.Z. and Liu, P.L.F. (1998), A numerical study of breaking waves in the surf zone, Journal of Fluid Mechanics, 359, 239–264
- Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F., Torres, F.R. and Didier, E. (2018), Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the Southern Brazilian coast, Energy, 162, 1115-1124.
- Nakayama, A. and Kuwahara, F. (1999), A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium, Journal of Fluids Engineering, 121, 427-433.
- Peric, M. and Ferziger, J.H. (1997) “*Computational Methods for Fluid Dynamics*”, Second edition, Berlin, Springer.
- Schlichting, H. (1979) “*Boundary-layer theory*”, McGraw-Hill, New York.
- Teixeira, P. R. F., Davyt, D. P., Didier, E. and Ramalhais, R. (2013), Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier Stokes equations, Energy, 61(1), 513–530.
- Teixeira, P.R.F., Didier, E. and Neves, M.G. (2017), “A 3D RANS-VOF wave tank for oscillating water column device studies”, *VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017*, Nantes, France, 710-721.
- Van Gent, M.R.A. (1993), “*Stationary and oscillatory flow through coarse porous media*”, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report N° 93-9, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology.
- Van Gent, M.R.A. (1995), Porous flow through rubble-mound material. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 121 (3), 176-181.

APÊNDICE A

PERFORMANCE OF AN OSCILLATING WATER COLUMN WAVE ENERGY CONVERTER INTEGRATED IN THREE HARBOUR PROTECTION STRUCTURES

Abstract. *Oscillating water column (OWC) wave energy converters can be integrated in harbor protection structures, such as vertical and rubble mound breakwaters and piled breakwaters. Besides, the interaction between the incident wave and the structure, in which the OWC device is integrated, is significantly different, since in case of the vertical breakwater, the structure is impermeable, while for the rubble mound breakwater the structure is porous. The performance of the OWC device for the three configurations is analysed for a range of wave period between 6 and 12 s and a wave height of 1 m. The OWC device integrated in the vertical breakwater shows the best performance (maximum mean pneumatic power of 70 kW), and the mean pneumatic power is globally 3 % greater than the OWC device integrated in the rubble mound breakwater (maximum mean pneumatic power of 67.4 kW). The performance of the OWC device integrated in the piled breakwater shows a similar trend than the OWC device integrated in the vertical breakwater for wave period smaller than 9 s, but exhibits a significant loss of performance for larger wave period.*

Palavras-chave: *Oscillating water column, Rubble mound breakwater, Vertical breakwater, Numerical simulation, RANS*