

ESTUDO EXPERIMENTAL DO CORPO FLUTUANTE DE UM MODELO DE UM SISTEMA OFFSHORE PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS *Experimental Study of the Floating Body of an Offshore Wave Energy Converter*

GUILHERME PAREDES ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾, MIGUEL LOPES ⁽³⁾, RUI GOMES ⁽⁴⁾ e LUÍS GATO ⁽⁵⁾

(1) Bolseiro, FEUP,

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, gparedess@fe.up.pt

(2) Professor Associado com Agregação, FEUP,

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

(3) Aluno de Doutoramento, IDMEC, Instituto Superior Técnico,

Pav. de Mecânica IV, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, mlopes@hidro1.ist.utl.pt

(4) Aluno de Doutoramento, IDMEC, Instituto Superior Técnico,

Pav. de Mecânica IV, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, rgomes@hidro1.ist.utl.pt

(5) Professor Associado, IDMEC, Instituto Superior Técnico,

Pav. de Mecânica IV, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, lgato@hidro1.ist.utl.pt

Resumo

Apresenta-se a análise de resultados dos ensaios experimentais, em tanque de ondas, de um modelo à escala reduzida do flutuador de um dispositivo em desenvolvimento no IST. De forma a introduzir o tema apresenta-se uma curta pesquisa das tecnologias existentes para a conversão de energia das ondas em energia eléctrica. Para permitir a análise dos resultados é demonstrada a formulação das equações de movimento, para um corpo flutuante axissimétrico, com seis graus de liberdade. Nos ensaios experimentais foram determinadas as frequências de oscilação natural, coeficientes de amortecimento e curva do factor de amplificação dinâmica do corpo flutuando livremente, para movimentos de arfagem e cabeceio. Com as características do modelo experimental, foi criado um modelo numérico para calcular, no domínio das frequências, os coeficientes de massa adicionada, amortecimento e força de excitação, assim como a resposta em amplitude e fase para os movimentos de avanço, arfagem e cabeceio. Os resultados experimentais para arfagem adequam-se aos da simulação numérica, excepto para frequências próximas da ressonância. Para o movimento de cabeceio, os resultados experimentais apresentam desvios mais significativos face aos previstos numericamente.

Este artigo representa o trabalho realizado no âmbito de uma tese de mestrado em Engenharia Civil realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), inserida num projecto de investigação coordenado pelo Instituto Superior Técnico (IST) e financiado pelo projecto FCT PTCD/EME – MFE /66999/2006 da Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Palavras-chave: Dispositivo de conversão de energia das ondas; ensaio experimental; frequência de ressonância; validação numérica.

Abstract

Some background information about the technologies of wave energy conversion into electrical energy is presented as an introduction to the topic. In order to allow the analysis of the results, the formulation of the equations of motion for a six degree of freedom axissymmetric floating body is presented. In the experimental tests, natural oscillation frequencies, damping coefficients and response amplitude operator curves were computed for the free-floating body in heave and pitch motions. A numerical model, based on the experimental model characteristics, was created to determine the added mass, damping and excitation force coefficients, as well as the response in the frequency domain for the surge, heave and pitch motions. For heave motion, the experimental results were in agreement with those obtained from numerical simulation, except those close to resonance. For pitch motion, the experimental results revealed a significant deviation from those obtained numerically.

This paper represents the work done in the context of a Civil Engineering MSc thesis by Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), integrated on a research project coordinated by Instituto Superior Técnico (IST) funded by Fundação para a Ciência e Tecnologia through project FCT PTCD/EME – MFE /66999/2006 .

Keywords: Wave energy converter; experimental test; resonance frequency; numerical validation.

1. Introdução

O aumento do preço do petróleo devido à especulação e à aproximação do fim das suas reservas, bem como os efeitos nefastos que a sua utilização (e dos restantes combustíveis fósseis) tem no meio ambiente levou à necessidade de desenvolver fontes de energia não poluidoras e renováveis, entre as quais a energia das ondas.

Com uma extensa linha de costa e situado numa zona relativamente energética, Portugal tem condições ideais para o aproveitamento desta forma de energia. Este trabalho é a primeira iniciativa laboratorial da FEUP no aproveitamento desta forma de energia, realizado em parceria com o IST, no âmbito do projecto FCT - PTCD/EME - MFE /66999/2006.

2. Os Dispositivos de Aproveitamento de Energia das Ondas

2.1. Introdução

Os primeiros esforços para explorar esta forma de energia começaram na década de setenta, mas está-se, ainda assim, num estado inicial de desenvolvimento. Existem diversas soluções, não se encontrando a tecnologia estabilizada, ao contrário do que acontece, por exemplo, com a energia eólica ou hídrica.

De uma forma geral, os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser divididos em cinco categorias fundamentais quanto ao seu modo de funcionamento:

- Coluna de água oscilante (CAO);
- Placa articulada no fundo;
- Dispositivos alongados;
- Dispositivos de galgamento;
- Point-absorbers.

2.2. Coluna de água oscilante

Este sistema é constituído por três componentes principais: a câmara, a turbina e o gerador, figura 1. A câmara, aberta na base, está semi-submersa até um determinado nível, contendo ar na parte superior. O gerador é accionado pela turbina, ligada, numa extremidade, à câmara e na outra à atmosfera. Quando uma onda atinge as imediações da câmara, o nível de água interior sobe (funcionando como um oscilador forçado) e o ar no seu interior é comprimido, forçando o seu escoamento pela turbina.

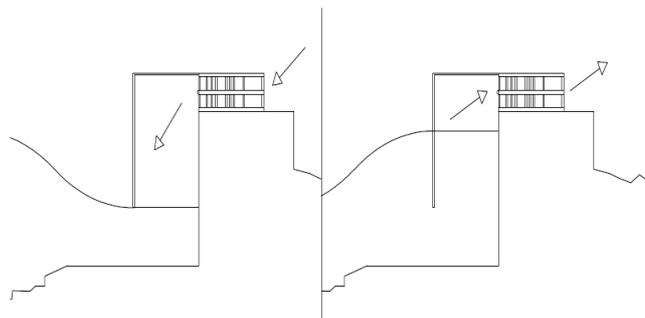


Figura 1. Esquema de uma CAO.

Quando o nível de água diminui, a pressão na câmara desce e o ar exterior é aspirado para a câmara, passando, mais uma vez, através da turbina.

As turbinas são projectadas para que o seu sentido de rotação seja sempre o mesmo, independentemente do sentido do escoamento. O escoamento de ar na turbina produz movimento no rotor, que, estando ligado ao gerador, produz electricidade, IEA-OES (2003), figura 1.

2.3. Placa articulada no fundo

Este sistema é constituído por uma placa, total ou parcialmente submersa, vertical quando em repouso, que roda em torno de um eixo horizontal junto ao fundo, figura 2. A passagem de uma onda pelo dispositivo cria um campo de velocidades na sua envólveca que causa a sua rotação, EMEC (2007). Como este dispositivo tira sobretudo partido da componente horizontal da velocidade, é vantajosa a sua instalação em águas pouco profundas, logo a pequenas distâncias da costa. Nestas condições, as órbitas das partículas excitadas pela onda tendem a achatar-se e a ficar elípticas e, portanto, com componente horizontal dominante. A rotação da placa faz actuar um sistema de produção de energia, accionando, geralmente, mecanismos hidráulicos que bombeiam óleo sob pressão para turbinas (quer em terra, quer nas imediações do dispositivo), que accionam um gerador eléctrico.

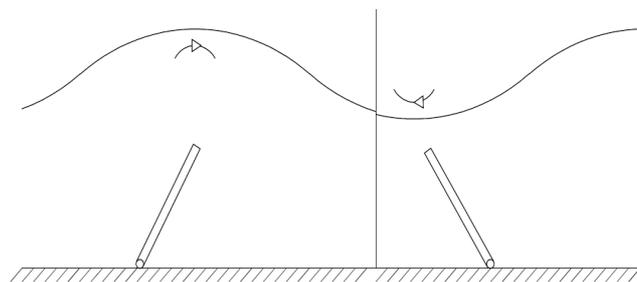


Figura 2. Dispositivo de placa articulada no fundo.

2.4. Dispositivos alongados

Os dispositivos alongados têm a maior dimensão da mesma ordem de grandeza que o comprimento da onda incidente, estando orientados perpendicularmente à frente de onda. O seu funcionamento está associado ao movimento relativo entre os seus componentes alongados. Quando a ondulação move as diferentes partes do dispositivo, devido à sua (elevada) dimensão, este fica sujeito a diferentes acções ao longo do seu desenvolvimento, conforme cada secção esteja sob acção de uma crista ou de uma cava, figura 3. Esta diferença de sollicitação entre as várias secções do dispositivo é utilizada para recolher energia nos nós (entre as partes rígidas), provocando deslocamentos angulares relativos entre as mesmas, que fazem actuar geradores eléctricos.

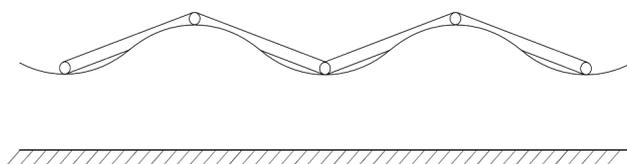


Figura 3. Esquema de um dispositivo alongado.

2.5. Dispositivos por galgamento

Os dispositivos por galgamento recolhem energia das ondas através da circulação da água por turbinas, do mesmo modo que se verifica em centrais hidroeléctricas, isto é, transformando energia potencial gravítica em electricidade. A designação de dispositivos de galgamento vem do facto de, para transformar a energia da onda em energia potencial gravítica (e seguidamente em electricidade) parte, ou toda a estrutura, ter de ser galgada pela onda. Geralmente, estes sistemas têm uma rampa, ou algo semelhante, que recolhe a onda incidente, figura 4. Ao atingir a rampa, a onda espalha e sobe-a, sendo a massa de água conduzida a um reservatório elevado. A energia da onda, quer potencial, quer cinética, é assim convertida em energia potencial gravítica. O reservatório alimenta, por sua vez, uma turbina que produz electricidade e descarrega no mar.

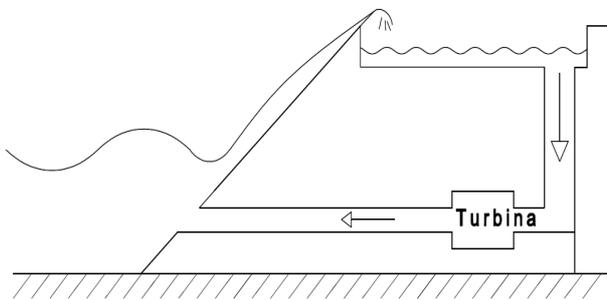


Figura 4. Esquema de um dispositivo por galgamento.

2.6. Corpos oscilantes

Este tipo de dispositivos apresenta diferentes morfologias. O princípio de funcionamento baseia-se no movimento relativo entre um corpo flutuante (cuja dimensão característica é muito inferior ao comprimento de onda) e uma referência, que pode ser um corpo submerso, flutuante, ou mesmo o fundo do mar. O corpo flutuante comporta-se como um oscilador forçado, pelo que se tenta tomar partido dos fenómenos de ressonância, ajustando a frequência de oscilação natural do sistema aos estados de mar. Também é possível melhorar o rendimento do sistema quer por ajuste da energia extraída em cada estado de mar, quer pela aplicação de sistemas de controlo específicos. Estes dispositivos têm a capacidade de captar energia da onda, numa extensão maior do que a largura do próprio dispositivo.

3. Descrição do Problema em Estudo

O trabalho experimental realizado teve como objectivo a determinação das características hidrodinâmicas de um modelo, à escala reduzida, da parte flutuante de um dispositivo em desenvolvimento no IST, Figura 5, para comparação com os resultados obtidos em modelo numérico. A bóia utilizada nos ensaios experimentais é composta por um cilindro com 0,15 m de diâmetro e 0,225 m de altura, na parte inferior do qual está acoplada uma semiesfera com o mesmo diâmetro. No topo da bóia instalou-se um conjunto de hastes ortogonais nas quais foram instalados os alvos reflectores infravermelhos para o sistema de aquisição de movimentos.

Com este trabalho, pretendeu-se determinar as frequências de oscilação natural, o coeficiente de amortecimento e a curva do factor de amplificação dinâmica (FAD) para os graus de liberdade de arfagem (movimento de oscilação vertical) e cabeceio (movimento de oscilação de rotação em torno do eixo horizontal transversal). O comportamento de um corpo flutuante é semelhante ao de um oscilador mecânico típico. A agitação marítima constitui a força de excitação e a impulsão a força de restituição. A massa do oscilador é constituída pela massa do corpo acrescida da massa de água que este arrasta no seu movimento oscilatório (denominada massa adicional), que depende da frequência do movimento. Quanto ao amortecimento, este é constituído por duas parcelas: amortecimento por radiação e amortecimento viscoso. Devido ao seu movimento de oscilação, o corpo radia ondas e, para isso despende energia, pelo que o seu movimento é amortecido. O amortecimento causado pelas forças viscosas apenas é significativo, habitualmente, para ondas de maior dimensão e para escalas de simulação menores. As parcelas de amortecimento são, em geral, função da velocidade.

Para o cálculo numérico do movimento da bóia adoptou-se um modelo linear, isto é, partiu-se do princípio de que é pequena tanto a amplitude da onda, como a oscilação do corpo, comparativamente com o comprimento de onda.



Figura 5. Modelo experimental da parte flutuante.

Se se considerar um corpo com seis graus de liberdade (três de translação e três de rotação), o movimento do corpo rígido em cada grau de liberdade x_j é dado pela equação de movimento:

$$M_{ij}\ddot{x}_j(t) = f_{e,i}(t) + f_{r,i}(t) + f_{hs,i}(t), \quad [1]$$

em que M_{ij} representa a matriz de inércia do corpo e as três forças ou momentos no segundo membro da equação correspondem à força ou momento hidrodinâmico total aplicado pela água sobre o corpo. O ponto sobre-escrito representa uma derivada em ordem ao tempo t . A força, ou momento, de excitação $f_{e,i}(t)$ corresponde à força, ou momento, aplicada pela onda incidente no corpo fixo. A força, ou momento, de radiação $f_{r,i}(t)$ é a força, ou momento, devida ao movimento oscilatório do corpo na ausência de ondas incidentes.

A força, ou momento, hidrostático $f_{hs,i}(t)$ é a força, ou momento, de restituição do corpo.

Se considerarmos um modelo no domínio da frequência, partindo do princípio de que o sistema é totalmente linear e x_j , $f_{e,i}(t)$ e $f_{r,i}(t)$ são funções sinusoidais no tempo com frequência angular ω , a posição do corpo pode ser dada por

$$x_j(t) = \text{Re}\{\xi_j e^{i\omega t}\}, \quad [2]$$

em que ξ_j representa a amplitude complexa da posição do corpo. A força de excitação pode ser escrita da seguinte forma

$$f_{e,i}(t) = \text{Re}\{F_{e,i} e^{i\omega t}\}, \quad [3]$$

em que $F_{e,i}$ representa o coeficiente complexo da força de excitação ou momento. Para facilitar a apresentação dos resultados no domínio das frequências considerou-se que $|F_{e,i}| = \Gamma_i(\omega)A_w$, em que Γ_i representa um coeficiente (real e positivo) da força de excitação e A_w é a amplitude da onda incidente. A força, ou momento, de radiação $f_{r,i}(t)$ é representada através de

$$f_{r,i}(t) = -a_{ij}\ddot{x}_j(t) - b_{ij}\dot{x}_j(t), \quad [4]$$

em que a_{ij} representa a matriz dos coeficientes de massa adicionada (massa de água arrastada pelo corpo) e b_{ij} a matriz dos coeficientes de amortecimento por radiação das ondas. Finalmente, a força ou momento hidrostático pode ser dada pela seguinte expressão

$$f_{hs,i}(t) = c_{ij}x_j(t), \quad [5]$$

em que c_{ij} representa a matriz dos coeficientes de restituição.

Reorganizando as equações anteriores, temos um sistema linear de seis equações, válido para uma análise no domínio das frequências:

$$\sum_{i=1}^6 \xi_j \left[-\omega^2(M_{ij} + a_{ij}) + i\omega b_{ij} + c_{ij} \right] = F_{e,i}. \quad [6]$$

Note-se que, nesta expressão linearizada, o amortecimento viscoso não é considerado, Newman (1977). Para calcular os movimentos do corpo nos diferentes graus de liberdade é necessário determinar a matriz de inércia. Para determinar esta matriz é necessário conhecer a geometria de todo o corpo de forma a determinar os momentos de inércia e a posição do centro de gravidade. Nesta matriz M_{ij} , i e j correspondem aos seis graus de liberdade do corpo.

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m.z_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -m.z_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m.z_G & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ m.z_G & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad [7]$$

Utiliza-se um referencial direito $\{x,y,z\}$, em que x é a direcção de propagação da onda z é vertical, com sentido positivo para o exterior da água ($z=0$ na superfície livre) e y é horizontal e transversal à direcção de propagação da onda.

Os modos 1 e 2, avanço e deriva (*surge* e *sway* em inglês) correspondem às translações respectivamente no eixo x e y .

As rotações em relação a estes mesmos eixos denominam-se balanço e cabeceio (*roll* e *pitch* em inglês).

O modo 3, denominado arfagem (*heave* em inglês) corresponde a uma translação segundo o eixo vertical z . A rotação em relação a este eixo denomina-se guinada (*yaw* em inglês) e corresponde ao modo 6.

Se a origem do referencial coincidir com o centro de gravidade ($x_G = y_G = 0$), a matriz M_{ij} toma a forma indicada na Eq. [2]. A massa (m) do corpo em estudo, determinada tendo em conta todos os elementos é de 2,272kg.

Os momentos de inércia I foram calculados para a geometria e distribuição de massas do modelo. Uma vez que este é axissimétrico, tem-se:

$$I_{xy} = I_{yx} = I_{xz} = I_{zx} = I_{yz} = I_{zy} = 0. \quad [8]$$

Os valores obtidos para o modelo em estudo, em kg/m², foram os seguintes: $I_{xx} = 0,03212$ kgm², $I_{yy} = 0,0308$ kgm²,

$$I_{zz} = 0,05139$$
 kgm².

Para um corpo axissimétrico e em equilíbrio na ausência de ondas, a matriz com os coeficientes de restituição tem os seguintes termos não nulos:

$$\begin{aligned} c_{33} &= \rho g S, \\ c_{44} &= \rho g S_{22} + \rho g \nabla (z_B - z_G), \\ c_{55} &= c_{44}, \end{aligned} \quad [9]$$

em que S representa a área do corpo no plano da superfície não perturbada da água, S_{22} é o momento de inércia desta secção em relação ao eixo dos xx e ∇ é o volume do corpo submerso:

$$S_{22} = \iint_S y^2 dS, \quad [10]$$

em que y representa a coordenada em yy dos pontos na superfície S . No caso do modelo temos $S_{22} = 2,45 \times 10^{-5}$ m⁴.

As coordenadas z_B e z_G são as coordenadas verticais do centro de impulsão e do centro de gravidade, respectivamente. No modelo estas tomam os seguintes valores:

$$z_B = -0,0616 \text{ m}; \quad z_G = -0,0759 \text{ m}.$$

Para um corpo axissimétrico, em que o eixo de simetria é vertical, anula-se o termo associado ao modo 6 da matriz de coeficientes de massa adicionada a_{ij} , bem como alguns dos termos cruzados, obtendo-se a seguinte matriz:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad [11]$$

Para o caso axissimétrico, existem ainda as seguintes relações:

$$\begin{cases} a_{11} = a_{22} \\ a_{44} = a_{55} \\ a_{24} = a_{42} = -a_{15} = -a_{51} \end{cases}. \quad [12]$$

No caso de a onda incidente ter exclusivamente o sentido do eixo dos XX , os coeficientes relacionados com 2 e 4 não serão utilizados para o cálculo da resposta no domínio das frequências, Eq. [6], pelo que o estudo se centra nos restantes (a_{11} , a_{33} , a_{55} , a_{15}). Pode ser feita uma dedução semelhante para a matriz de amortecimento por radiação, ficando como incógnitas os coeficientes b_{ij} com os mesmos índices que os coeficientes a_{ij} anteriores. Estes coeficientes são função da frequência de excitação e, para a generalidade das geometrias, têm de ser calculados numericamente, por não existir solução analítica conhecida.

4. Cálculo dos Coeficientes Hidrodinâmicos

Neste trabalho, foi utilizado o código WAMIT, Lee (2004), para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos a_{ij} e b_{ij} . O código utiliza o Método dos Elementos de Fronteira (*Boundary Element Method* - BEM), que calcula o escoamento sobre um corpo tendo como base a teoria do escoamento potencial e a teoria linear das ondas de superfície. O corpo é discretizado por uma malha de superfície. Tanto a altura da onda incidente como os movimentos do corpo são considerados suficientemente pequenos para que sejam desprezáveis em relação ao comprimento de onda.

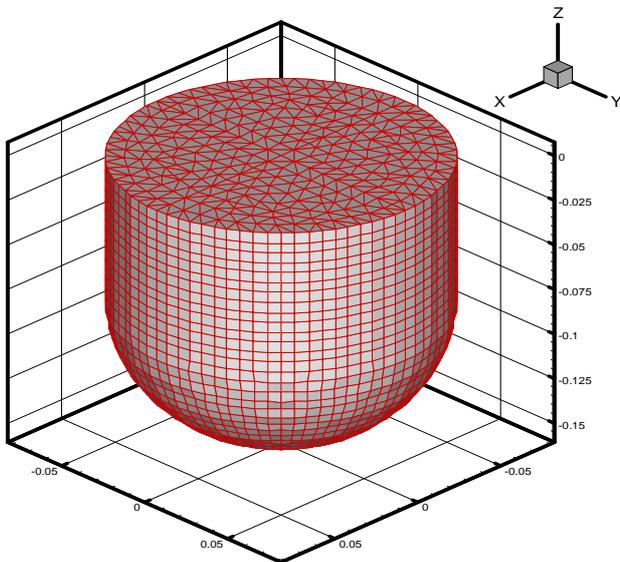


Figura 6. Representação da malha utilizada para os cálculos no WAMIT.

Os efeitos viscosos são considerados desprezáveis, uma vez que são tipicamente dependentes do quadrado da velocidade do fluido, resultando, portanto, um infinitesimal de segunda ordem neste tipo de cálculos.

A superfície do corpo em estudo foi representada por um conjunto de 2040 painéis planos (usando, portanto, uma discretização de primeira ordem), tal como se mostra na figura 6.

As geometrias axissimétricas são geradas a partir de um gerador de malha, que a cria através das equações analíticas da geometria.

Os coeficientes de massa adicionada e amortecimento são apresentados sob a forma adimensional. Utilizou-se esta representação para que os resultados possam ser aplicados para um corpo com a mesma geometria, mas a qualquer escala, ou para qualquer frequência de onda incidente.

No presente caso, os ensaios foram feitos para uma profundidade de 0,35 m.

Uma vez que se pretendem estudar ondas cujo comprimento é superior a duas vezes a profundidade, não se está em situação de águas profundas.

Logo, é necessário especificar a condição fronteira de fundo. Verificou-se que a introdução do fundo tem maior influência nos coeficientes para as frequências mais baixas.

Na figura 6, as abcissas representam a frequência na forma adimensional, $\omega^2 d / g$, em que g representa a aceleração da gravidade e d o diâmetro da bóia.

Nas figuras 7 e 8, a massa adicionada e o amortecimento por radiação são adimensionalizados com a massa específica da água ρ , uma potência do diâmetro da bóia d^k e a frequência angular (no segundo caso):

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\rho d^k} \quad [13]$$

$$b_{ij}^* = \frac{b_{ij}}{\rho d^k \omega} \quad [14]$$

em que:

$$k = 3 \text{ para } i, j = 1, 2, 3;$$

$$k = 4 \text{ para } i = 1, 2, 3 \text{ e } j = 3, 4, 5 \text{ ou}$$

$$i = 4, 5, 6 \text{ e } j = 1, 2, 3$$

$$k = 5 \text{ para } i, j = 4, 5, 6.$$

Como se pode verificar, a variação da massa adicionada e do amortecimento por radiação com a frequência é significativa. A consideração desta variação é, portanto, essencial para o cálculo das características dinâmicas do corpo oscilante.

Como se pode ver pela análise das figuras 7 e 8, os coeficientes cruzados entre arfagem e avanço são negativos, tanto para a massa adicionada, como para o amortecimento por radiação. Isto significa que a ocorrência simultânea destes modos provoca tanto um arrastamento de fluido, como uma radiação de ondas, inferior ao que se obteria no caso destes modos ocorrerem isoladamente.

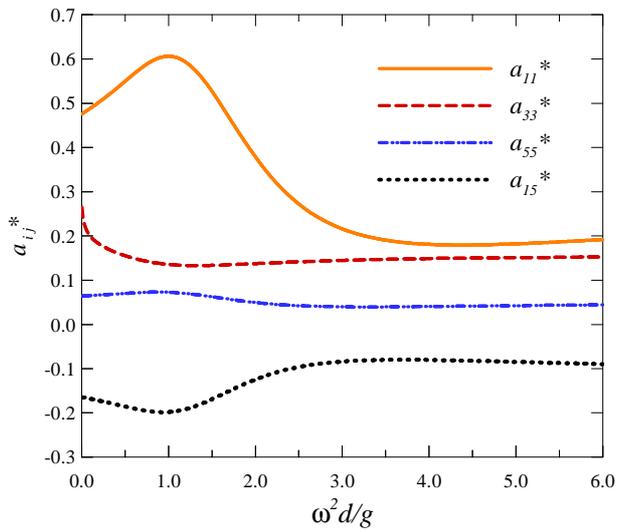


Figura 7. Coeficientes adimensionais de massa adicionada a_{ij}^* para os diferentes graus de liberdade em estudo: 1 - Avanço; 3 - Arfagem; 5 - Cabeceio.

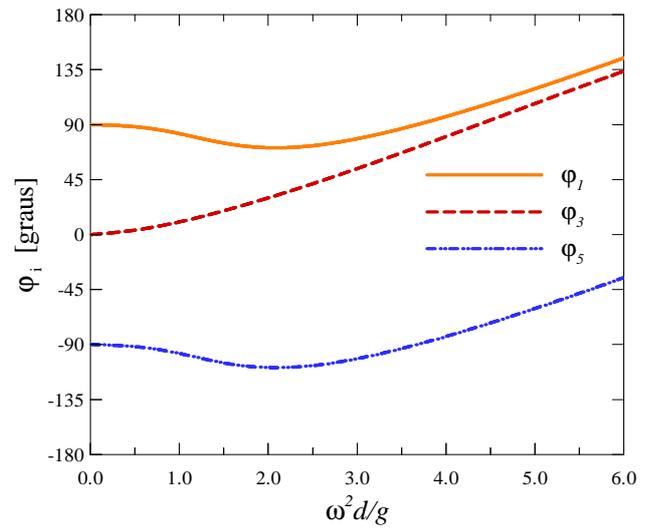


Figura 10. Fase entre a força de excitação, φ_i e a amplitude da onda incidente, para os diferentes graus de liberdade em estudo.

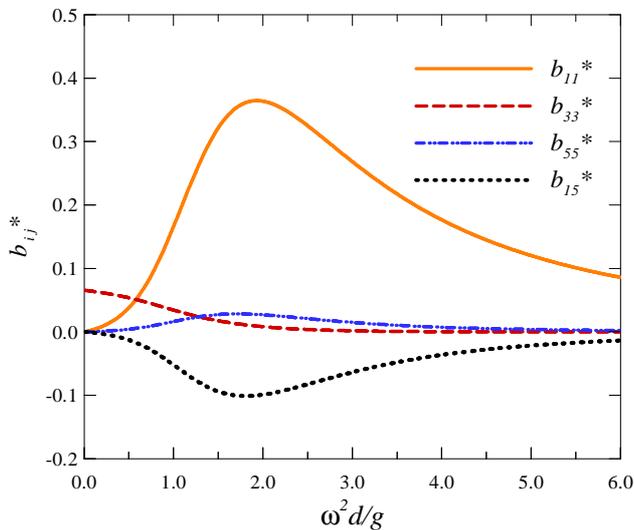


Figura 8. Coeficientes adimensionais de amortecimento por radiação, b_{ij}^* relevantes para o estudo.

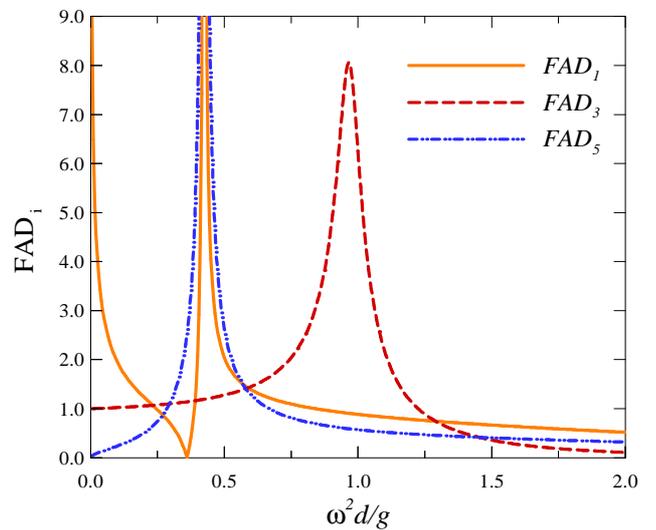


Figura 11. Factor de amplificação dinâmica nos diferentes graus de liberdade em estudo.

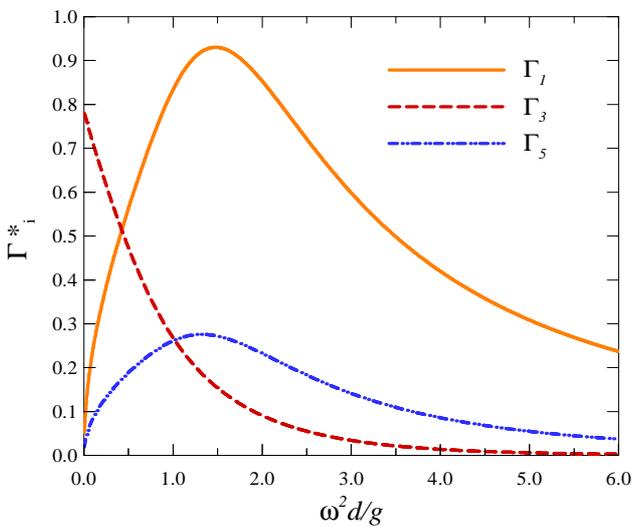


Figura 9. Coeficientes adimensionais do módulo da força de excitação, Γ_i^* , para os diferentes graus de liberdade em estudo.

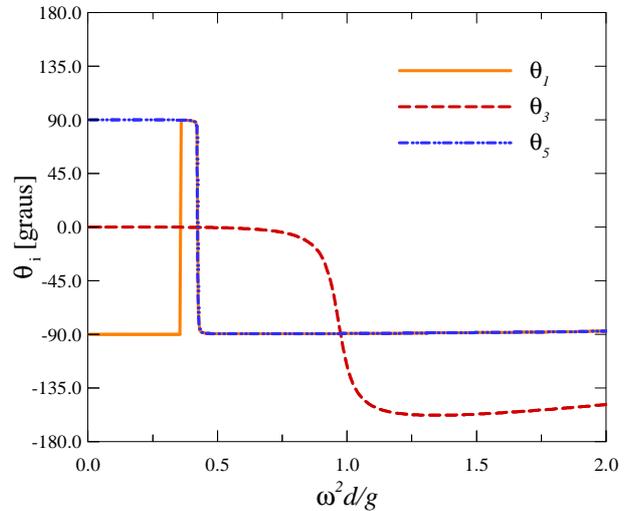


Figura 12. Fase entre a resposta e a onda incidente θ_i , para os diferentes graus de liberdade em estudo.

Existe uma razão adicional pela qual o conhecimento dos coeficientes de amortecimento por radiação é importante no caso dos sistemas de energia das ondas: uma geometria com boas características de absorção de ondas tem, necessariamente, uma boa capacidade de radiação de ondas - que corresponde a um amortecimento por radiação elevado.

Tomando o exemplo de se ter a bóia em estudo ligada ao fundo e de se estar a extrair energia do movimento vertical em relação ao fundo, a energia máxima a extrair em condições óptimas é igual à dissipada por radiação.

Na Figura 9, a força de excitação é adimensionalizada com uma força de referência dada por:

$$\Gamma^*_i = \frac{\Gamma_i}{\rho g d^m} \quad [15]$$

em que:

$$m = 2 \text{ para } i = 1, 2, 3;$$

$$m = 3 \text{ para } i = 4, 5, 6;$$

e d é o diâmetro da bóia.

Na figura 11, o factor de amplificação dinâmica para o grau de liberdade i é dado por:

$$FAD_i = \frac{\xi_i}{A_w / d^n}, \quad [16]$$

m que:

$$n = 0 \text{ para } i = 1, 2, 3 \text{ (translação);}$$

$$n = 1 \text{ para } i = 4, 5, 6 \text{ (rotação);}$$

Da análise da Figura 11 pode verificar-se que a ressonância em arfagem se dá para uma frequência adimensional de 0,965 (correspondendo a 1,264 Hz no modelo em estudo). Em cabeceio a ressonância dá-se para a frequência adimensional de 0,425 (0,839 Hz no modelo), associada a uma resposta de amplitude significativa em avanço e a uma mudança de 180° da fase de ambos os modos.

A resposta em avanço é igualmente muito significativa para a zona das baixas frequências, uma vez que o corpo é arrastado com as ondas de comprimento elevado. Para uma frequência adimensional de 0,360 (0,772 Hz no modelo) a resposta em avanço anula-se mudando a fase de 180°.

5. Procedimento Experimental

Foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de extinção (sem ondas), para determinação das frequências de oscilação natural e do coeficiente de amortecimento e ensaios com ondas regulares, para construção da curva de FAD. Os ensaios foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, figura 13. O tanque tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1 de profundidade.

Nos ensaios sem ondas, o corpo foi colocado a oscilar livremente no tanque, com 0,35 m de profundidade de água, no grau de liberdade em estudo, até à extinção do movimento, que foi registado com um sistema de aquisição por infravermelhos (IV).



Figura 13. Tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

O decaimento da amplitude dos movimentos foi utilizado para determinação do coeficiente de amortecimento e o intervalo de tempo entre oscilações utilizado para determinação das frequências de oscilação natural. Foram realizados dez ensaios para cada grau de liberdade.

Os valores finais dos parâmetros foram obtidos pela média dos resultados obtidos em cada ensaio.

Nos ensaios com ondas o corpo foi colocado a oscilar de forma forçada, sob acção da agitação gerada no tanque, com 0,35 m de profundidade de água, sendo os movimentos do corpo registados com o sistema de aquisição por IV e o nível instantâneo de água registado com uma sonda de nível. Foram geradas ondas com diferentes frequências com uma altura de 0,03 m, durante 200 s cada ensaio. Definiu-se, para arfagem, o FAD como sendo a razão entre a amplitude média do deslocamento e a amplitude média da onda gerada e para cabeceio como sendo a razão entre o produto da amplitude média do deslocamento pelo diâmetro da bóia e o quociente da amplitude média da onda gerada.

6. Resultados

6.1. Coeficiente de amortecimento

Para determinação do coeficiente de amortecimento foi utilizada a seguinte expressão:

$$b_i = -2 \frac{(a_{ij} + M_{ij})}{\Delta T} \ln \left(\frac{x_{k+1}}{x_k} \right), \quad [17]$$

em que b_i representa o coeficiente de amortecimento, a_{ij} a massa adicional (massa de água arrastada pelo corpo, determinada numericamente), M a massa do corpo e x_i e x_{i+1} , os valores de dois extremos consecutivos do registo de movimento com o mesmo sinal, espaçados de um intervalo de tempo ΔT . Na análise apenas foram utilizados os seis primeiros intervalos de cada registo (três positivos e três negativos) de modo a evitar perturbações existentes no movimento do corpo, que se tornam aparentes no final do registo. Este método considera que o amortecimento é linear e constante o que não é rigoroso, uma vez que o amortecimento viscoso depende de forma não linear da velocidade. Os resultados dos coeficientes de amortecimento são apresentados NO Quadro 1.

Quadro 1. Valores do coeficiente de amortecimento.

	ARFAGEM (kg/s)	CABECEIO (kg.m ² /s)
VALOR EXPERIMENTAL	1,343	3.558×10^{-3}
VALOR NUMÉRICO	0,9697	6.187×10^{-4}
ERRO RELATIVO	27,8%	82,6%

Em ambos os casos o valor experimental é superior ao numérico, que apenas contabiliza o amortecimento por radiação. É de referir que, ainda assim, em arfagem os valores são bastante próximos, enquanto em cabeceio existe uma diferença significativa.

O facto de o coeficiente de amortecimento experimental ser, em ambos os casos, superior ao numérico deve-se ao facto do modelo numérico não considerar o amortecimento viscoso.

Os valores em arfagem são bastante mais próximos do que em cabeceio, devido ao facto de, em arfagem, o volume submerso do corpo variar muito rapidamente, logo o amortecimento por radiação ser dominante face ao viscoso. Isto é uma indicação de que a capacidade de radiar ondas deste corpo é significativa. Pelo contrário, em cabeceio, o volume submerso do corpo é praticamente constante e há uma grande superfície do corpo a opor-se ao escoamento no seu deslocamento pela água, sendo o amortecimento viscoso, então, dominante.

Nas figuras 14 e 15 estão representadas as curvas de decaimento calculadas utilizando o coeficiente de amortecimento determinado experimentalmente, bem como um exemplo dos registos do movimento do corpo.

Repare-se que, em ambos os casos, a curva de decaimento se adequa bastante bem aos registos, a não ser na zona final. Isto deve-se às perturbações do movimento já referidas e ao facto do coeficiente de amortecimento ter sido determinado com base nos ciclos iniciais, em que o amortecimento é mais intenso, conduzindo a um decaimento mais rápido do que o real.

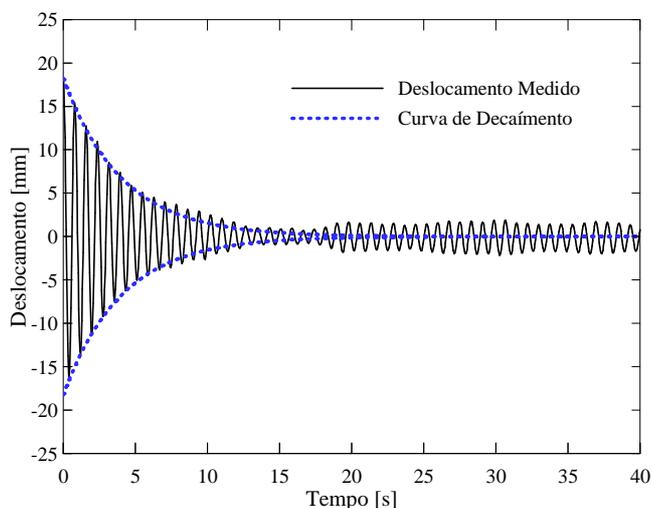


Figura 14. Curva de decaimento de arfagem.

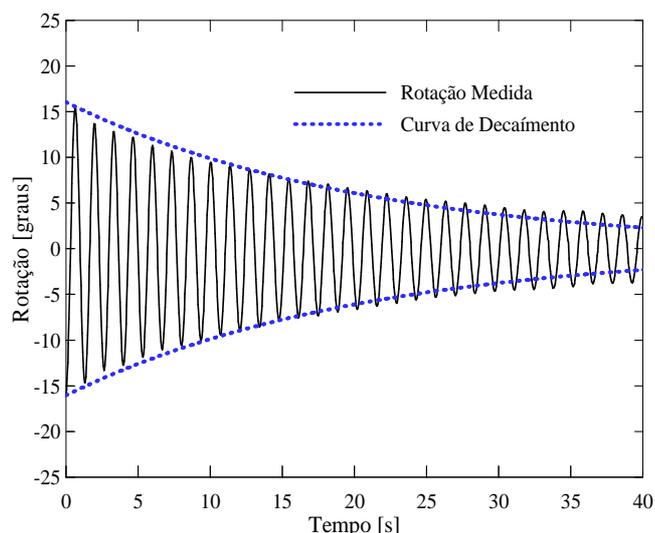


Figura 15. Curva de decaimento de cabeceio.

6.2. Frequências de oscilação natural

Os resultados dos ensaios para determinação das frequências de oscilação natural são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Valores das frequências de oscilação natural.

	ARFAGEM	CABECEIO
VALOR EXPERIMENTAL (Hz)	1,2732	0,7301
VALOR NUMÉRICO (Hz)	1,2793	0,8453
ERRO RELATIVO	0,5%	15,8%

Repare-se que em ambos os casos a frequência experimental é inferior à numérica, mas em arfagem os dois valores são praticamente coincidentes, enquanto que em cabeceio a diferença é significativa.

O resultado pode ser compreendido pela análise da seguinte equação:

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{b}{b_c}\right)^2}, \quad [18]$$

em que ω_a representa a frequência de oscilação com amortecimento, ω_0 a frequência de oscilação não amortecida, ξ o coeficiente de amortecimento e ξ_c o coeficiente de amortecimento crítico. Mantendo todos os parâmetros constantes tem-se que, quanto maior for ξ , menor será ω_a .

Assim, coeficientes de amortecimento reais superiores aos numéricos, conduzirão a frequências de oscilação experimentais inferiores às numéricas.

6.3. Resposta a ondas regulares

As curvas do factor de amplificação dinâmica obtidas são as apresentadas nas figuras 16 e 17.

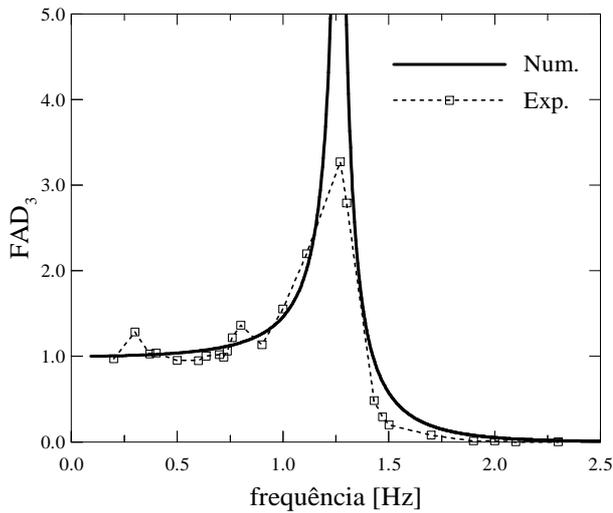


Figura 16. Curvas do FAD de arfagem.

No caso da arfagem, verifica-se que as duas curvas são praticamente coincidentes, com exceção da zona de ressonância. Isto deve-se ao facto do modelo numérico considerar apenas amortecimento por radiação e o amortecimento experimental ser superior ao numérico, o que conduz a amplitudes inferiores às teóricas.

Em relação às curvas de cabeceio, as diferenças são mais significativas. A diferença de amplitude em ressonância terá as mesmas causas apresentadas em relação à arfagem. O desvio entre a frequência de resposta máxima deverá ter como causa a significativa diferença entre os coeficientes de amortecimento. Uma análise de casos semelhantes pode ser encontrada em Payne *et al.* (2008) e Saulnier (2003).

Assim, no caso do pico verificado para 0,76 Hz, as diferenças entre os valores experimentais e numéricos poderiam ser justificadas pela influência do efeito viscoso na amplitude e na frequência de ressonância, Eq. [18].

O pico verificado para 0,40 Hz está relacionado com a resposta em harmónicas superiores. Mais concretamente, a resposta para esta frequência tem uma frequência dupla da suposta frequência de excitação, ou seja, o corpo oscila duas vezes por cada ciclo de ondas (Lopes *et al.*, 2007).

Repare-se que a frequência dupla corresponde à ressonância do sistema em cabeceio. Repare-se também que as ondas incidentes contêm uma parcela de harmónicas superiores, de frequência dupla ou tripla da principal (especialmente as ondas de baixa frequência).

O sistema responde, assim, linearmente à harmónica dupla, que é próxima da frequência de ressonância, com uma amplitude significativa e a frequência dessa mesma harmónica. É ainda possível que este efeito seja mais significativo para maiores amplitudes de oscilação do corpo. Estas hipóteses poderiam ser verificadas diminuindo a altura da onda incidente e observando se este pico de resposta se manteria.

Foi ainda analisado o movimento em avanço, verificando-se que a oscilação horizontal é uma ordem de grandeza inferior aos valores numéricos. Este resultado está de acordo com o esperado uma vez que a translação da bóia em causa em fluido real provoca um efeito viscoso significativo (incluindo uma esteira de grandes dimensões).

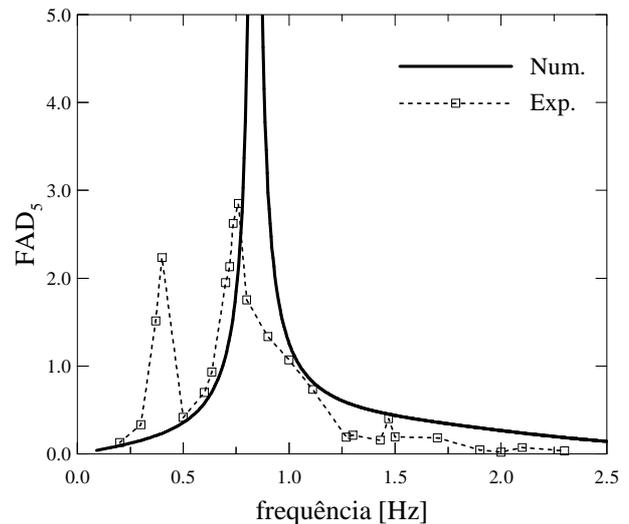


Figura 17. Curva do FAD de cabeceio.

Verificou-se ainda que, para as frequências mais elevadas testadas, o corpo se deslocou notoriamente na direcção da propagação das ondas a uma velocidade aproximadamente constante ao longo do ensaio. Este efeito, conhecido como deriva (*drift*, em inglês), é igualmente um efeito de segunda ordem, que é mais significativo para frequências e alturas de onda mais altas (ver Chakrabarti, 1990). Devido a este efeito o corpo pode ficar, em média, desviado da posição de equilíbrio, podendo ocorrer outros modos de oscilação não previstos para frequências mais altas.

7. Conclusões

Neste trabalho foi feita uma análise numérica e experimental das características hidrodinâmicas de um corpo flutuante axissimétrico.

A geometria em estudo foi analisada e calculada numericamente utilizando o código WAMIT. Deste cálculo resultaram os valores do coeficiente e fase da força de excitação, massa adicionada e amortecimento por radiação e amplitude e fase da resposta, nas condições da teoria linear das ondas.

Os valores da frequência de ressonância foram comparados com os obtidos em ensaios de decaimento, verificando-se que o valor numérico para arfagem foi estimado com precisão, enquanto no caso do cabeceio se observou um desvio significativo.

Através de ensaios com ondas regulares, foram obtidos valores dos factores de amplificação dinâmica para arfagem e cabeceio. Verificou-se a esperada redução da resposta na zona do pico de ressonância, devido aos efeitos de fluido real (amortecimento viscoso), que não é previsto numericamente.

Verificou-se igualmente nos ensaios de cabeceio a reduzida precisão da determinação da frequência de ressonância, bem como a ocorrência de um pico de resposta secundária a metade da frequência de ressonância, que deverá ter origem num efeito de segunda ordem.

Como trabalho futuro irá desenvolver-se o estudo do comportamento do corpo quando sujeito a um sistema de amarrações.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia: projecto FCT PTCD/EME – MFE /66999/2006 e bolsas de doutoramento SFRH/BD/35295/2007 (programa MIT-Portugal) e SFRH/BD/29275/2006.

Referências

Chakrabarti, S. K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publication, UK, 1987.

EMEC, EMEC: European Marine Energy Center. Disponível: <http://www.emec.org.uk> [10-9-2007].

IEA-OES (2003). *Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Current Energy*, Crown Copyright, 84 pp.

Lee C. H., *WAMIT manual V.6.2 PC*, 2004 www.wamit.com.

Lopes, M.F.P., Ricci, P., Gato L. M. C. e Falcão A. F. de O. (2007). Experimental and Numerical Analysis of the Oscillating Water Column inside a Surface Piercing Cylinder in Regular Waves. Proceedings da 7ª European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.

Newman, J. (1977). *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, London, 402 páginas. ISBN 0-262-14026-8.

Payne, G. S.; Taylor, J.; Bruce T.; Parkin, P. (2008) – *Assessment of boundary-element method for modelling a free-floating sloped wave energy device. Part 2: experimental validation*. *Ocean Engineering*, 35, pp. 342-357.

Saulnier J. B. (2003) *Analysis of an OWC buoy (wave energy converter)*. Tese de mestrado, UCC, Cork.