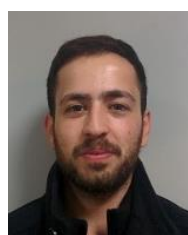


RECENTES AVANÇOS E PERSPETIVAS FUTURAS NA MODELAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA APLICADAS A ESTUDOS DE SISTEMAS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA DO MAR

RECENT ADVANCES AND FUTURE PERSPECTIVES IN PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING APPLIED TO THE STUDY OF MARINE ENERGY CONVERSION SYSTEMS

Francisco A. Taveira-Pinto; Paulo J. Rosa-Santos; Tiago J. Fazeres-Ferradosa; Mário López Gallego; Guilherme Moura Paredes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Núcleo de Estudos da Energia do Mar



RESUMO

As energias renováveis marítimas (ERM) apresentam um enorme potencial e terão um papel de destaque numa economia azul e sustentável. As ondas e o vento offshore são recursos estratégicos para Portugal. Contudo, o seu desenvolvimento coloca importantes desafios ao nível da experimentação. O presente artigo aborda alguns exemplos de desafios e oportunidades mais relevantes ao nível da investigação, em curso ou recentemente concluída, no domínio das ERM, na Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ABSTRACT

Marine renewable energies (ERM) present a huge potential and will play a key role in a blue and sustainable economy. Waves and offshore wind are strategic resources to Portugal. However, their development brings relevant challenges to the physical modelling. This paper deals with some examples of challenges and opportunities related to ERM research, on the basis of concluded and ongoing works, at the Hydraulics, Water Resources and Environment Division (SHRHA) of the Civil Engineering Department of the Faculty of Engineering, University of Porto.

Palavras-chave: Energias Renováveis, Modelação Física, Modelação Numérica, Fundações Offshore, Energia das Ondas, Estruturas Flutuantes.

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis marítimas apresentam um enorme potencial e terão, cada vez mais, um papel de destaque numa economia azul e sustentável, contribuindo para o cumprimento das metas definidas para a cota das renováveis no *mix*

energético global e, naturalmente, para reduzir a produção de gases com efeito de estufa e os consequentes impactos ao nível das alterações climáticas.

Importa frisar que o potencial teórico total disponível nos oceanos é claramente superior ao consumo mundial de energia

primária (Taveira Pinto *et al.*, 2015). As ondas e o vento *offshore* são recursos estratégicos para a Europa e para Portugal, dada a sua posição geográfica e as suas condições naturais. Porém, o desenvolvimento desses sectores coloca importantes desafios ao nível da experimentação, devido à dificuldade de reproduzir fielmente as estruturas e os sistemas de extração de energia, que estão expostos a um ambiente marítimo agressivo e variável, mas também pelo facto de as suas fundações se localizarem usualmente em leitos móveis.

A experimentação de processos hidráulicos relacionados com a dinâmica de sedimentos e a sua interação com estruturas implantadas em ambiente marítimo continua a ser um tema de elevada complexidade, onde se tornam evidentes diversos problemas inerentes às técnicas de modelação física, as quais, no entanto, têm registado uma evolução muito significativa.

Algumas dessas técnicas evoluíram como resultado da experiência, outras disseminaram-se entre os diversos laboratórios, sendo que a comunidade científica tem atualmente ao seu dispor um conjunto significativo de métodos, instrumentos, procedimentos e abordagens.

A experimentação no âmbito da análise da estabilidade e da avaliação de erosões localizadas em fundações *offshore* e outras estruturas sujeitas à ação da agitação marítima e das correntes, por exemplo, depara-se, atualmente, com diversos problemas (Fazerres-Ferradosa, 2012), nomeadamente no que concerne aos efeitos de escala, modelação de rugosidades, tecnologias e instrumentação para medição da batimetria, modelação e técnicas de experimentação com sedimentos coesivos, instrumentação não intrusiva e de baixo custo, para a medição de características do escoamento, entre outros. Ainda no âmbito da instrumentação e medição de processos hidráulico-sedimentares, são vários os desafios, que vão desde a fiabilidade dos equipamentos até às questões mais práticas, relacionadas com a necessidade de interrupção dos testes em modelo físico,

para se poderem executar as medições desejadas (*e.g.*, De Schoesitter *et al.*, 2014; Fazerres-Ferradosa e Taveira-Pinto, 2015; Fazerres-Ferradosa *et al.*, 2016).

Acresce ainda a diversidade de procedimentos experimentais, por exemplo, para levantamento de perfis batimétricos ou para a modelação de rugosidades. Por outro lado, a especificidade de certos estudos tem conduzido à obtenção, por parte de cada laboratório, de soluções particulares para alguns destes problemas, facto que nem sempre facilita a comparação e a uniformização de resultados e conclusões.

No estudo de sistemas flutuantes associados a tecnologias para a conversão da energia das ondas e do vento, é importante a correta reprodução do seu comportamento hidrodinâmico. Uma vez que a dinâmica dos mesmos está intimamente relacionada com a do seu sistema de amarração (Paredes *et al.*, 2016), *i.e.* os movimentos da plataforma flutuante dependem das características do sistema de amarração e *vice-versa*, é essencial uma análise dinâmica acoplada onde também esteja incluído o sistema de extração de energia (PTO), o qual deve permitir a simulação de diferentes condições de extração de energia e a medição rigorosa da potência absorvida (Rosa-Santos *et al.*, 2015), o que nem sempre é viável em modelos à escala.

Atendendo à dificuldade de reproduzir o PTO a escalas reduzidas, é fundamental acompanhar os trabalhos de modelação física com simulações numéricas, mesmo nos Technology Readiness Levels (TRL) iniciais.

Os modelos numéricos mais utilizados recorrem a duas abordagens: à mecânica de fluídos computacional e à teoria dos escoamentos potenciais, com modelos de painéis baseados no método dos elementos de fronteira. Importa ainda acrescentar que a incorporação de dispositivos de extração da energia das ondas em estruturas costeiras e portuárias (Oliveira *et al.*, 2016) apresenta importantes vantagens, mas também introduz novos desafios ao nível da modelação física.

2. ESTRUTURAS OFFSHORE COM FUNDAÇÕES FIXAS DO TIPO MONOPILAR

2.1. Introdução

A utilização de fundações *offshore* do tipo monopilar é já frequente. No final de 2014, estas fundações representavam 78.8% das soluções adotadas nos parques eólicos *offshore* europeus, podendo ser utilizadas, ainda, noutros sistemas de aproveitamento de energia em ambiente marítimo.

Um dos principais problemas deste tipo de fundações consiste na ocorrência de erosões localizadas, geradas pelo efeito combinado das correntes e ondas, que tende a incrementar a frequência natural de vibração do sistema, conduzindo à sua instabilidade estrutural. Esses problemas tornam-se mais evidentes nos casos em que nenhum tipo de proteção é usado (Sørensen e Ibsen, 2013).

Presentemente, a SHRHA tem-se dedicado ao estudo deste fenómeno, nomeadamente no que concerne ao dimensionamento e à otimização de proteções contra erosões localizadas.

Se por um lado têm sido identificados vários desafios experimentais, relacionados com a modelação de fundações fixas, utilizadas na extração de energia eólica *offshore*, por outro lado são evidentes as oportunidades para o desenvolvimento de técnicas inovadoras e eficazes, que possam melhorar a qualidade da modelação realizada.

2.2. Modelação física de proteções dinâmicas em monopilares

O estudo de proteções contra erosões localizadas em monopilares depara-se, atualmente, com a necessidade de testar conceitos de dimensionamento inovadores, como é o caso do uso de proteções sem camada de filtro e mantos de uma só camada com granulometria extensa (*e.g.*, Schendel *et al.*, 2016) ou a utilização de mantos resistentes com blocos cuja movimentação é permitida, inspirados no conceito do *Icelandic-type Berm Breakwater*.

As proteções dinâmicas de monopilares permitem a movimentação dos blocos do manto resistente desde que a sua estabilidade global não seja afetada.

A SHRHA tem vindo a desenvolver estudos sobre a fiabilidade e risco deste tipo de soluções inovadoras, sendo de referir os ensaios realizados em modelo físico na Universidade de Aalborg, Dinamarca, e na SHRHA da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, que conduziram a vários tipos de configurações com equilíbrio dinâmico (Figura 1).

Com efeito, tendo a construção do modelo que ser feita a seco para evitar a suspensão dos sedimentos usados, não se respeitam as condições de campo, dado que a implementação da proteção é efetuada em alto mar, com recurso a *pipe vessels*.

Assim, os modelos à escala reduzida apresentam uma disposição de blocos bastante homogénea, que nem sempre se consegue atingir em obra.

O fenómeno de erosões localizadas reveste-se de um grau de incerteza considerável (Negro *et al.*, 2014), ao qual acresce ainda a própria incerteza da construção do modelo físico da fundação *offshore* e respetiva proteção.

2.3. Instrumentação e medição de perfis batimétricos

São diversos os equipamentos e as técnicas que têm vindo a ser utilizados na medi-

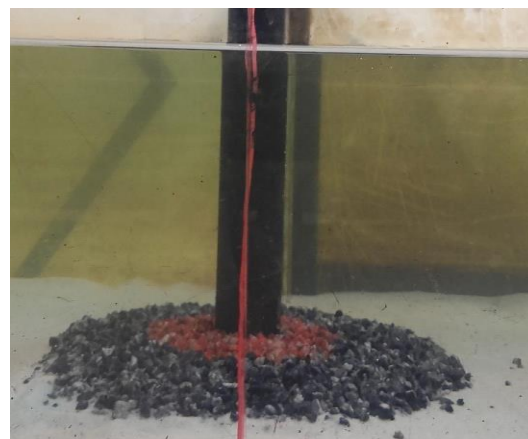


Fig 1 – Estudo em modelo físico de proteções dinâmicas de fundações offshore: modelo à escala 1:100 testado na Universidade do Porto.

ção de perfis batimétricos, e respetiva evolução temporal, quando sujeitos à ação das correntes e das ondas, *e.g.*, perfiladores de contacto, laser *scanners*, fotogrametria digital, técnicas óticas, sondas acústicas ou pinos com régua de marcação.

Nos modelos físicos de maiores dimensões, os perfiladores com sonda de contacto ou com rolamento surgem como opções viáveis para a medição de perfis batimétricos, principalmente pelo facto de a sua utilização ser independente de variáveis como o nível e a temperatura da água ou a quantidade de sedimentos em suspensão.

A estas características acresce, também, a facilidade com que se pode efetuar medições, tanto nas zonas de solo sedimentar, como nas zonas mais rígidas do fundo, *i.e.* no manto resistente da proteção.

Contudo, devido ao peso do instrumento, ou em situações de mau funcionamento, nas quais a sonda ultrapassa a superfície do solo, este tipo de perfilador pode danificar o perfil batimétrico, invalidando medições posteriores ou até mesmo as experiências em curso na sua totalidade.

A possibilidade de utilizar equipamentos menos intrusivos, como é o caso dos *scanners* a laser, tende a evitar danos na batimetria. Recentemente, a SHRHA da FEUP participou num estudo relativo à otimização de proteções contra erosões localizadas em estruturas de suporte de sistemas de extração de energia, no qual foi utilizado um laser *scanner* perfilador 3D com o software EPro (MARINET, 2013; Whitehouse *et al.*, 2014).

Os ensaios foram efetuados na Universidade de Aalborg, à escala 1:50, para diversos níveis de água e diferentes estados de agitação marítima, combinados com correntes, tendo-se testado diversas configurações de proteções com equilíbrio dinâmico do manto resistente.

A Figura 2 reporta-se a um pilar cuja falhado manto resistente ocorre a jusante do mesmo (zonal central superior a azul). O estudo permitiu obter configurações compatíveis com o equilíbrio dinâmico (Whitehouse *et al.*, 2014; Schoesitter *et al.*, 2014).

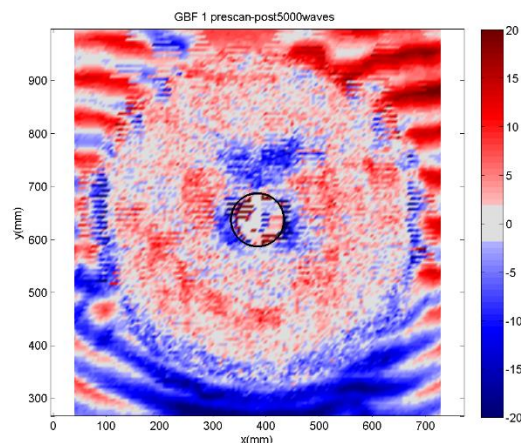


Fig 2 – Erosões localizadas em fundações do tipo monopilar ao fim de 5000 ondas (MARINET, 2013).

Os perfis batimétricos foram obtidos com uma precisão de 2 mm, numa grelha com células de 5x5 mm, contudo, cada perfil demorou, em média, 1 hora a ser realizado, totalizando um total de 4 a 5 horas por teste (perfis ao fim de 0, 1000, 3000, 5000 e 7000 ondas). A duração da medição constitui uma das desvantagens deste tipo de sistemas.

Note-se que a uma série de 1000 ondas correspondiam cerca de 25 min de ensaio laboratorial, pelo que a medição dos perfis demorava mais do que os próprios ensaios.

Outra possibilidade no âmbito das medições batimétricas, passa por utilizar instrumentos mais simples, como é o caso das sondas acústicas 2D ou 3D. Em 2012, em parceria com a *University College London*, Inglaterra, realizou-se igualmente um estudo relativo a erosões localizadas em torno de monopilares sujeitos a correntes unidirecionais, sem proteção e com fundações em solos sedimentares estratificados.

Face às reduzidas proporções do canal (secção transversal com 0.25 m de largura e 0.26 m de altura), os perfis longitudinais foram medidos com uma sonda acústica, modelo da *General Acustics, UltraLab UWS*, com precisão de 1 mm e erro associado de $\pm 1\%$.

Os perfis batimétricos obtidos permitiram a monitorização adequada das erosões localizadas (Fazeres-Ferradosa, 2012), mas como o diâmetro da sonda (D_{sonda}) era de 35 mm, não foi possível obter dados fiáveis da profundidade

máxima imediatamente na face do pilar, dado que a primeira medição era obtida a $D_{\text{sonda}}/2$ da face, o que levou à utilização de equipamentos complementares para este efeito, que incluíam pinos de marcação e marcações no próprio corpo do monopilar.

No âmbito da medição de batimetrias, as técnicas de fotogrametria e as técnicas óticas têm-se revelado como as alternativas menos intrusivas. A sua utilização tem-se estendido, gradualmente, da medição de erosões localizadas para outros fenómenos, também eles importantes na modelação física, como é o caso da monitorização de dunas ou a avaliação de danos no manto resistente de estruturas de defesa costeira e de quebramares (Hofland *et al.*, 2014).

A maior dificuldade relacionada com essas técnicas prende-se com a reflexão gerada pela superfície livre da água, que pode ser corrigida quando as medições são efetuadas através de paredes de vidro, nas zonas laterais da instalação experimental. O seu esvaziamento entre testes, para facilitar a medição, sendo também uma alternativa, levanta problemas operacionais.

Mais recentemente tem sido explorada a hipótese de utilizar equipamentos óticos à prova de água, que transportam a fonte de luz e o sistema de aquisição de imagem para baixo do nível da água (Paredes e Taveira Pinto, 2016).

3. DISPOSITIVOS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

3.1. Introdução

A absorção da energia das ondas é um processo de elevada complexidade. Por um lado, o comportamento da maioria dos conversores da energia das ondas, a nível hidrodinâmico e de absorção de energia, depende do sistema de extração de energia (PTO) e do sistema de amarração (se existir). Assim, é necessário incluir o PTO nos trabalhos de modelação, logo nas fases iniciais de desenvolvimento, tal como foi realizado nos estudos de desenvolvimento do dispositivo CECO na SHRHA, através da introdução de um PTO simplificado

(Marinheiro *et al.*, 2015). Por outro lado, o fluxo de energia das ondas apresenta grande variabilidade em várias escalas temporais: onda a onda (segundos), estados de mar (horas) e variações intra-anuais (meses).

É, portanto, necessário otimizar os conversores da energia das ondas para uma gama muito ampla de estados de agitação, para se conseguir a máxima produção da energia para as condições reais de operação (Falcão, 2010).

Importa ainda acrescentar que muitas das tecnologias de extração de energia que são adequadas à escala do protótipo não podem ser reproduzidas, com facilidade, às escalas usualmente aplicadas na construção dos modelos físicos (Payne *et al.*, 2008).

Tendo em consideração a complexidade dos sistemas de conversão da energia das ondas, tanto os modelos numéricos como os modelos físicos são fundamentais para o seu estudo e desenvolvimento. Enquanto os modelos numéricos possibilitam o estudo de diferentes configurações e cenários com reduzidos requisitos a nível de custo, tempo e recursos, os modelos físicos fornecem dados para a calibração dos modelos numéricos e permitem a validação de conceitos e a reprodução de fenómenos que ainda não podem ser reproduzidos com suficiente precisão nos modelos numéricos, como as condições de sobrevivência de alguns dispositivos.

Ambas as técnicas têm sido aplicadas de uma forma complementar na SHRHA, no desenvolvimento e na otimização de conversores da energia das ondas, como o CECO, Figura 4.

3.2. Modelação física

Os estudos em modelo físico de dispositivos de conversão da energia das ondas podem ser realizados em canais e em tanques de ondas. A escala do modelo físico dependerá do TRL da tecnologia e das suas características: para TRLs de 1 e 3, uma escala entre 1:100 e 1:25 é suficiente, mas para TRLs superiores é recomendável uma escala maior (Ruehl e Bull, 2012).

Nestes estudos é também importante controlar a reflexão das ondas dentro da insta-

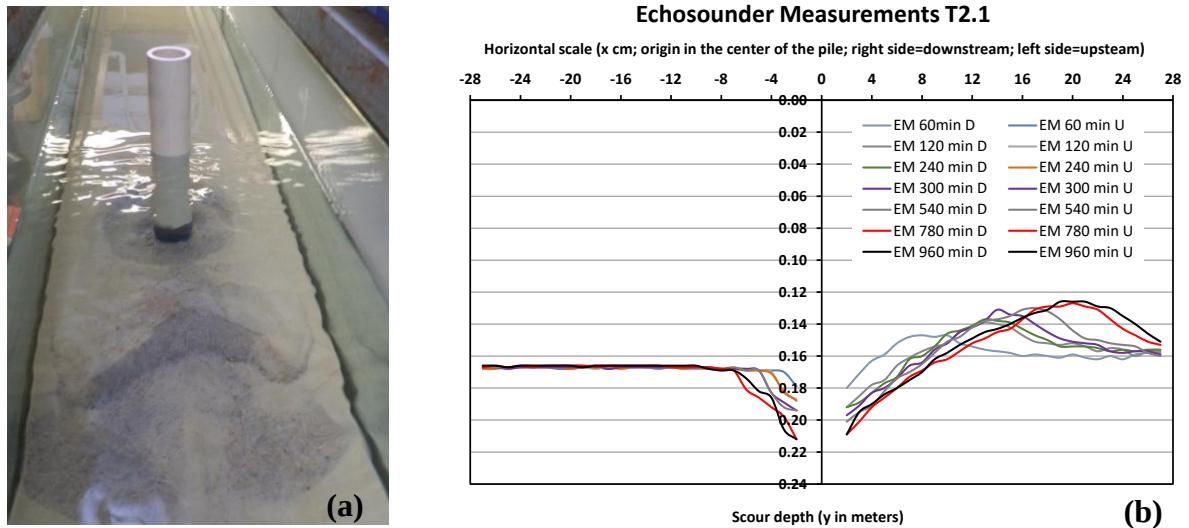


Fig 3 – Ensaios de erosões localizadas em solos estratificados: (a) registo fotográfico de erosões a jusante do pilar; (b) exemplo de perfil batimétrico (Fazeres-Ferradosa, 2012).

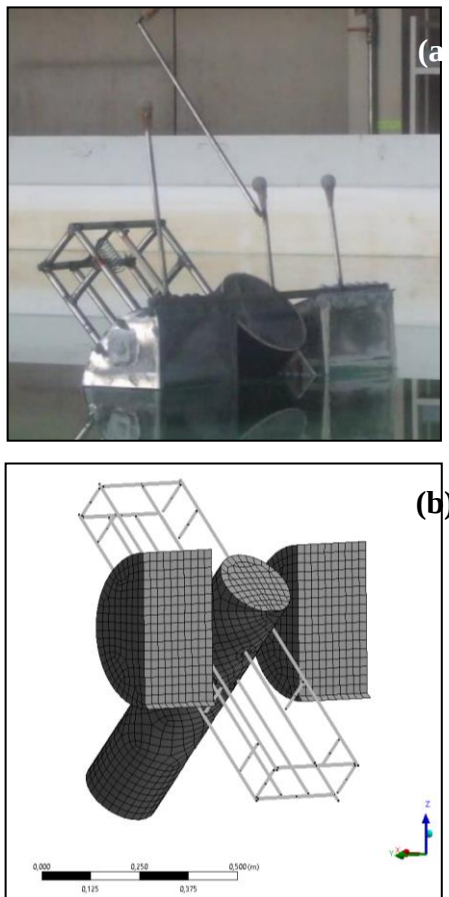


Fig 4 – Conversor da energia das ondas CECO: (a) modelo físico no tanque de ondas e (b) malha computacional usada no modelo numérico.

lação experimental, quer através do uso de sistemas de absorção passivos, *e.g.* praias dissipadoras, quer através de sistemas de absorção ativa incorporados no próprio sistema de geração de ondas.

Se o conversor da energia das ondas tem características que permitem um estudo a 2D e está nos primeiros TRLs, os canais são uma solução económica. Por exemplo, alguns sistemas que podem ser integrados em quebra-mares portuários e outras estruturas costeiras, como os baseados no princípio da coluna de água oscilante (López *et al.*, 2010) e no galgamento (Oliveira *et al.*, 2016), podem, em princípio, ser estudados em canal.

Se o dispositivo tiver um comportamento 3D (como a maioria dos sistemas baseados em corpos oscilantes), ou estiver num TRL elevado, os testes devem ser realizados num tanque de ondas para que a direccionalidade da agitação marítima e a sua interação com o dispositivo possam ser reproduzidas. Nestes casos, o sistema de geração de ondas deve ser multidireccional, permitindo variar a direcção de propagação das ondas e criar estados de agitação de crista curta.

O tipo de PTO a utilizar é determinado pelas características do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, existindo várias possibilidades: turbina de ar, turbina hidráulica, gerador elétrico de rotação ou linear, sistema hidráulico, entre outros. A forma de reproduzir e monitorizar o desempenho desse tipo de sistemas nos estudos em modelo físico é muito variável.

Os dispositivos que funcionam por galga-

mento, nos quais a água é armazenada em reservatórios para depois ser turbinada ao passar por turbinas de baixa queda, representam, talvez, o caso mais simples. Nestes modelos, pode-se medir a variação do volume de água armazenada nos reservatórios para, posteriormente, com base na eficiência da turbina e do gerador elétrico, se poder estimar a potência gerada (Fernandez *et al.*, 2012).

Este procedimento foi também seguido por Oliveira *et al.* (2016) que estudaram, no tanque de ondas da SHRHA, o efeito da aplicação de concentradores da energia das ondas no dispositivo *Sea-wave Slot-cone Generator* (SSG) quando integrado num que-bramar portuário, Figura 5, tendo concluído que esses elementos permitem capturar uma maior frente da onda incidente e aumentar o volume de água recolhido por galgamento da estrutura.

Nos sistemas baseados no princípio da coluna de água oscilante, a turbina (do tipo Wells ou de impulso) pode ser simulada por meio de uma ranhura na câmara-de-ar do dispositivo (López *et al.*, 2010). Para estimar a potência gerada é preciso registar, durante os testes, a pressão na câmara e o caudal de ar que passa através dessa ranhura, e conhecer a curva de desempenho da turbina e a eficiência do gerador. Nos sistemas baseados na oscilação de corpos flutuantes, o PTO é reproduzido usualmente por meio de um sistema que permite introduzir uma força entre os elementos movidos pelas ondas e os elementos reativos do PTO (Payne, 2008; Rosa-Santos *et al.*, 2015). O uso de geradores elétricos, geralmente de corrente contínua, permite a exploração de técnicas de maximização da captura de energia variando a força aplicada.

Para caracterizar as perdas no PTO (por fricção entre elementos mecânicos, na caixa de velocidades ou no gerador elétrico), pode-se usar um sistema idêntico ao “*linear test bed*” desenvolvido na *Wallace Energy Systems and Renewables Facility, Oregon State University, USA* (Bosma *et al.*, 2015), que permite testar um PTO a seco, mas para condições realistas, idênticas às encontradas no mar.

Na medição de movimentos devem ser utilizados sistemas não intrusivos, *i.e.*, que não

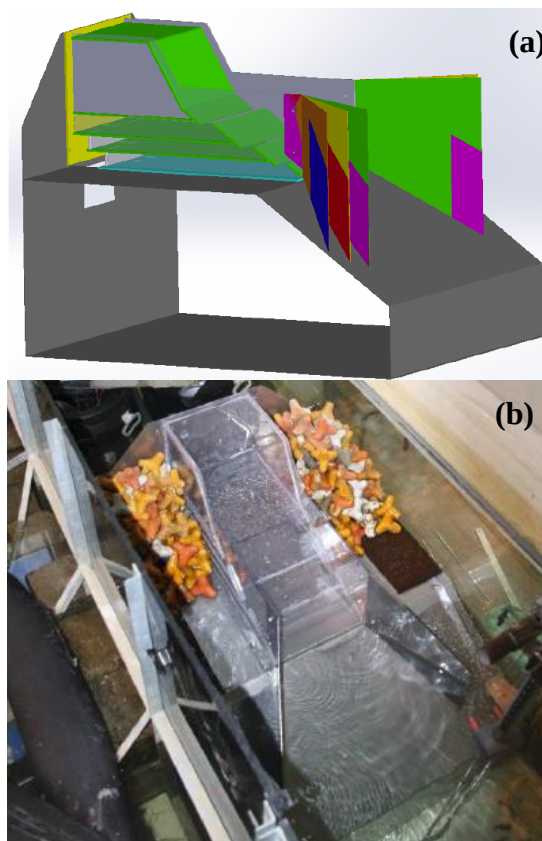


Fig 5 – *Sea-wave Slot-cone Generator*: (a) representação 3D do dispositivo com os três concentradores estudados, (b) modelo físico testado.

perturbem a dinâmica do dispositivo cuja resposta se pretende estudar (Rosa-Santos *et al.*, 2015b). A monitorização do movimento de cabos de amarração em laboratório apresenta também dificuldades, em parte pelo facto de os mesmos se encontrarem dentro de água. Paredes e Taveira-Pinto (2016) desenvolveram e testaram uma ferramenta que utiliza registos de vídeo, obtidos por câmaras submersas, e técnicas de processamento de imagem, para realizar a monitorização de cabos de amarração submersos.

Por último, importa referir que uma das problemáticas mais importantes na modelação dos conversores da energia das ondas é a que resulta da escala da potência segundo o critério de semelhança de *Froude* (Payne *et al.*, 2008). A um PTO com 1 MW de potência nominal no protótipo corresponde, para uma escala geométrica entre 1:30 e 1:100, um PTO com uma potência entre 7.0 e 0.1W no modelo físico, respetivamente. Isto implica que para a correta simulação do comportamento desses dispositivos, a dissipação devida a perdas por atrito deve ser da ordem dos mili-watts ou inferior.

A construção de modelos com perdas de energia por atrito tão baixas, nomeadamente nos rolamentos entre as peças móveis, é um importante desafio.

3.3. Modelação numérica

Devido à dificuldade de reproduzir no laboratório o sistema PTO dos conversores da energia das ondas, e ao grande número de condições ambientais para as quais os mesmos devem ser estudados, é essencial complementar a modelação física com simulações numéricas, mesmo nos primeiros níveis de TRL. Para o efeito, é usual assumir que o PTO se comporta como um sistema linear, ou seja, como um sistema de mola e/ou de amortecedor. Esta abordagem é comum quando o PTO é elétrico. No entanto, quando o PTO é do tipo pneumático, pode ser necessário incluir alguns efeitos não lineares, como a compressibilidade do ar, o que requer modelos mais complexos.

Os modelos numéricos dos conversores da energia das ondas que incluem a hidrodinâmica e os sistemas PTO são chamados, usualmente, modelos “*wave-to-wire*”. Em TRL iniciais, esses modelos permitem realizar provas de conceito e obter um conhecimento detalhado da dinâmica dos conversores, de uma forma rápida. Em TRL avançados, os modelos *wave-to-wire* permitem estimar o desempenho dos conversores da energia das ondas para um amplo conjunto de condições de operação, caracterizado, usualmente, por uma matriz de potência que expressa a potência média absorvida em função do período e da altura de onda.

Os modelos numéricos mais utilizados baseiam-se em duas abordagens distintas: a da mecânica de fluídos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) e a da teoria dos escoamentos potenciais, com modelos de painéis baseados no método dos elementos de fronteira (*BEM - Boundary Element Method*). Entre os primeiros, os mais comuns são os modelos baseados nas equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), nos quais a superfície livre da água é modelada usando o método VOF

(*Volume Of Fluid*). Apesar de os modelos CFD poderem resolver situações complexas associadas, por exemplo, a não-linearidades hidrodinâmicas, como a rebentação da onda e o galgamento, os seus requisitos a nível computacional são muito elevados (Li e Yu, 2012). Outra desvantagem destes modelos é a dificuldade que apresenta a modelação de turbinas e outros elementos oscilantes, ou quando há interfaces entre malhas fixas e móveis. Neste sentido, é de salientar que nos últimos anos se começaram a utilizar modelos do tipo SPH (*Smoothed-Particle Hydrodynamics*), que não utilizam malha computacional.

A aplicação de modelos numéricos do tipo CFD tem estado restrita à análise de tecnologias com um comportamento 2D e fixas (*e.g.*, Zhang *et al.*, 2012).

Os modelos baseados no BEM podem apresentar maiores discrepâncias com a realidade, devido à dificuldade em resolver determinadas não-linearidades e aos efeitos viscosos. No entanto, devido ao bom compromisso entre precisão e tempo computacional, a abordagem baseada na teoria dos escoamentos potenciais é a mais apropriada para o estudo das condições de operação dos conversores de energia das ondas nos primeiros TRL, e quando o sistema for baseado na oscilação de corpos flutuantes.

Os modelos baseados na abordagem BEM foram aplicados, nos últimos anos, para simular uma grande variedade de tecnologias de conversão da energia das ondas, incluindo colunas de água oscilantes (Bosma *et al.*, 2014) e, especialmente, dispositivos baseados no movimento de corpos oscilantes (Pastor e Liu, 2014).

Aplicando a teoria dos escoamentos potenciais para a hidrodinâmica do dispositivo e assumindo um PTO linear, podem-se obter rapidamente resultados no domínio da frequência. Contudo, é fundamental passar para uma análise no domínio do tempo para incluir efeitos não-lineares, nomeadamente os que são introduzidos pelo sistema de amarração, pelo PTO e pelo sistema de controlo que lhe está associado.

Atualmente, a modelação numérica é um complemento viável à modelação física de conceitos inovadores para a conversão da energia das ondas, sistemas de amarração e outros componentes (*e.g.*, Pinheiro *et al.*, 2016; Rosa-Santos *et al.*, 2016). Por outro lado, é também uma ferramenta importante e indispensável para a avaliação do recurso energético disponível no mar (Carballo *et al.*, 2014).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de sistemas para a extração da energia do mar e do vento *offshore* envolve, normalmente, a realização de estudos experimentais onde é fundamental reproduzir com rigor os processos hidráulicos relacionados com a interação “onda-estrutura”, com a dinâmica de sedimentos e seus efeitos nas estruturas implantadas em ambiente marítimo, bem como as características dos próprios sistemas de extração de energia e de amarração (no caso das plataformas flutuantes amarradas).

Estes temas apresentam complexidade elevada e colocam desafios importantes ao nível das técnicas de experimentação, as quais têm registado uma evolução notável. Neste artigo foram abordados alguns desses desafios e oportunidades, tendo como referência trabalhos de investigação em curso ou recentemente concluídos pelos autores.

REFERÊNCIAS

- Bosma, B., Lewis, T., Brekken, T. e von Jouanne, A. (2015). Wave Tank Testing and Model Validation of an Autonomous Wave Energy Converter. *Energies*, 8(8), p. 8857-8872.
- Cruz, J. (2007). Ocean wave energy: current status and future perspectives. Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, ISBN 978-3-540-74895-3.
- Carballo, R., Sánchez, M., Ramos, V., Taveira-Pinto, F., Iglesias, G. (2014). A high resolution geospatial database for wave energy exploitation, *Energy*, 68, 572-583, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.093 ISSN: 0360-5442
- De Schoesitter, P., Audenaert, S., Baelus, L., Bolle, A., Brown, A., das Neves, L., Ferradosa, T., Haerens, P., Pinto, F., Troch, P. e Whitehouse, R. (2014). Feasibility of a dynamically stable rock armour layer scour protection for offshore wind farms. Proc. of 33rd Inter. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014, June 8th – 13th, San Francisco, USA.
- Falcão, A. F. 2010. *Wave energy utilization: A review of the technologies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3), p. 899-918.
- Fazeres-Ferradosa, T. (2012). Scour around marine foundations in mixed and layered sediments. Dissertação de Mestrado. Dep. de Eng. Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Fazeres-Ferradosa, T. e Taveira-Pinto, F. (2015). Pre-assessing the feasibility of a design performance function for scour protection systems in offshore foundations. Proc. of 36th World IAHR Congress, IAHR, July 2015, The Hague, Netherlands.
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Das Neves, L., Reis, T., M. (2016). Design of scour protections and structural reliability techniques. 4th IAHR Europe Congress, Brussels, Belgium.
- Fernandez, H., Iglesias, G., Carballo, R., Castro, A., Fragueta, J.A., Taveira-Pinto, F., Sanchez, M. (2012). The new wave energy converter WaveCat: Concept and laboratory tests. *Marine Structures*; 29:58-70. doi: 10.1016/j.marstruc.2012.10.002
- Hofland, B., Disco, M. e Van Gent, M. (2014). Damage characterization of rubble mound roundheads. 5th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port & Coastal Protection. Coastlab14 (ed. V. Penchev & F. Taveira Pinto), Vol. 2, p. 326-335.
- Li, Y. e Yu, Y.-H. (2012). A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6), p. 4352-4364.
- Lopez, I., Iglesias, G., Lopez, M., Ramos, V. e Carballo, R. (2012). Physical modelling of an OWC wave energy converter. Proceedings of the 4th international conference on the application of physical modelling to port and coastal protection (CoastLab), Ghent, Bélgica, p. 91-92.
- MARINET (2013). Optimising the design of dynamic scour protection around offshore foundations. Marinet proposal 61, Technical

- Report, International Marine & Dredging Consultants, Antwerp, Belgium.
- Marinheiro, J.; Rosa-Santos, P.; Taveira-Pinto e F.; Ribeiro J. (2015). Feasibility study of the CECO wave energy converter. *Maritime Technology and Engineering*, CRC Press (Taylor and Francis Group), pp.1259-1267, Ch.134. doi: 10.1201/b17494-170, ISBN: 978-1-138-02727-5
- Oliveira, P., Taveira-Pinto, F., Morais, T. e Rosa-Santos, P. (2016). Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator. *Energy Conversion and Management*, 110, 165-175, doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.071.
- Paredes, G.M. e Taveira-Pinto, F. (2016). An experimental technique to track mooring cables in small scale models using image processing. *Ocean Engineering*, 111, p. 439-448, ISSN 0029-8018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.11.014>
- Paredes, G.M., Palm, J., Eskilsson, C., Bergdahl, L. e Taveira-Pinto, F. (2016). Experimental investigation of mooring configurations for wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*, ISSN 2214-1669, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2016.04.009>
- Pastor, J., Liu, Y. (2014). Frequency and time domain modeling and power output for a heaving point absorber wave energy converter. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. Vol. 5:101. Doi:10.1007/s40095-014-0101-9.
- Payne, G.S., Taylor J.R., Bruce, T. e Parkin P. (2008). Assessment of boundary-element method for modelling a free-floating sloped wave energy device. Part 1: Numerical modelling. *Ocean Engineering*, 35(3), p. 333-41.
- Payne, G. (2008). Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters. The University of Edinburgh: Newington, Edinburgh, UK.
- Pinheiro, L., Fortes, C.J., Santos, J.A., & Rosa-Santos, P. (2016). Numerical simulation of the motions and forces of a moored ship in Leixões harbour. *Maritime Technology and Engineering III* (ed: C. Guedes Soares & T. A. Santos), CRC Press (Taylor & Francis Group), Vol.1, pp.217-223, Ch.26. doi: 10.1201/b21890-31, ISBN978-1-138-030008.
- Rosa-Santos, P., López-Gallego, M., Taveira-Pinto, F., Perdigão, D., & Pinho-Ribeiro, J. (2016). Numerical simulation and validation of CECO wave energy converter. *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change: Advances in Water Engineering and Research*, Chapter 43, pp. 254-260. CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-138-02977-4.
- Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Teixeira, L. e Ribeiro J. (2015). CECO wave energy converter: Experimental proof of concept. *Journal of Renewable and Sustainable Energy (AIP Publishing LLC)* 7, 061704, ISSN: 1941-7012, doi: 10.1063/1.4938179.
- Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Pinho-Ribeiro, J., Teixeira, L. e Marinheiro, J. (2015b). Harnessing the kinetic and potential wave energy: design and development of a new wave energy converter. *Renewable Energies Offshore* (ed: C. Guedes Soares), CRC Press 2015(Taylor and Francis Group), pp.367-374, Ch.46, doi: 10.1201/b18973-52.
- Schendel, A., Goseberg, N., Schlurmann, T. (2016). Erosion Stability of Wide-Graded Quarry-Stone Material Under Unidirectional Current. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol. 142, issue 3, p. 1-19.
- Sørensen, S. e Ibsen, L. (2013). Assessment of foundation design for offshore monopiles unprotected against scour. *Ocean Engineering*, Vol. 63, pp. 17-25.
- Sutherland, J., Obhrai, C., Whitehouse, R., e Pearce, A. (2006). Laboratory tests of scour at a seawall. *Proceedings of the 3rd International Conference on Scour and Erosion*. Gouda, The Netherlands: CURNET. Technical University of Denmark.
- Taveira-Pinto, F., Iglesias, G., Rosa-Santos, P. e Deng, Z.D. (2015). “Preface to Special Topic: Marine Renewable Energy”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy (AIP Publishing LLC)*, 7, 061601, ISSN: 1941-7012, doi:10.1063/1.4939086.
- Zhang, Y., Zou, Q. P. e Greaves, D. (2012). Air–water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device. *Renewable Energy*, 41, p. 159-170.