

## O NOVO SISTEMA DE GERAÇÃO E AQUISIÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA DO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA FEUP The New Multi-Element Wave Generation System in FEUP's Hydraulics Laboratory

FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(1)</sup>, FERNANDO VELOSO-GOMES <sup>(2)</sup>, RAQUEL SILVA <sup>(3)</sup>, LUCIANA DAS NEVES <sup>(4)</sup>,  
PAULO ROSA SANTOS <sup>(5)</sup>, HUGO GUEDES LOPES <sup>(6)</sup> & ANA CRISTINA NEVES <sup>(7)</sup>

<sup>(1)</sup> Prof. Associado, FEUP,

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

<sup>(2)</sup> Prof. Catedrático, FEUP,

Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, vgommes@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup> <sup>(7)</sup> Estudante de Doutoramento, IHRH/FEUP,

Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, rcsilva@fe.up.pt, lpneves@fe.up.pt, pjrs@fe.up.pt, hglopes@fe.up.pt, acneves@fe.up.pt

### Resumo

O tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) foi recentemente reequipado (Maio de 2007, no âmbito do Projecto de *Financiamento Programático do CEHRA*<sup>1</sup>) com um sistema de geração de agitação marítima do tipo multielemento, que incorpora um sistema activo de absorção da reflexão (*HR Wallingford, UK*) e que permite a simulação de vários tipos de estados de mar 2D e 3D. O potencial do tanque de ondas fica assim alargado, permitindo a realização de ensaios em modelo reduzido com aplicação em diversos domínios da Engenharia Costeira e Portuária, tanto ao nível da investigação científica e do ensino, como de apoio a outros projectos de extensão universitária. O sistema encontra-se actualmente operacional e em utilização. Neste artigo, são sumariamente apresentadas as especificações do sistema e das suas componentes, bem como os processos de geração da agitação marítima, calibração das sondas de níveis hidrodinâmicos e medição e análise de dados, recorrendo a software próprio. São também apresentados exemplos de algumas aplicações correspondentes a estudos já realizados no tanque de ondas, e de trabalhos em curso e em perspectiva. É ainda apresentada uma breve resenha histórica do Laboratório de Hidráulica.

**Palavras-chave:** Resenha Histórica, Absorção Activa, Aquisição de Dados, Análise de Dados, Sonda de Níveis Hidrodinâmicos.

### Abstract

The Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering - University of Porto (FEUP) has been recently reequipped (May 2007, with funds from the Project: *Financiamento Programático CEHRA*<sup>1</sup>) with a Multi-Element Wave Generation System incorporating Dynamic Wave Absorption (*HR Wallingford, UK*), which allows the simulation of several kinds of 2D and 3D sea wave states. This way, the wave basin acquired extended capabilities for a wider range of physical modelling applications in Port and Coastal Engineering studies, namely for research, education and to support other projects. The system has already been tested, being presently operational and in use. In this paper, the system specifications and description is presented together with the processes of wave generation, hydrodynamic probes calibration and wave data acquisition and analysis. Furthermore, application examples, namely, concluded studies as well as undergoing and planned works are also pointed out. In addition a brief historical review of Hydraulics Laboratory will be performed.

**Keywords:** Historical Review, Active Wave Absorption, Data Acquisition and Analysis, Hydrodynamic Probes, Wave Maker.

### 1. Introdução

O Laboratório de Hidráulica da FEUP é anterior ao actual campus desta Faculdade, existindo já nas suas antigas instalações, na Rua dos Bragas, no Porto.

De 1965 até à actualidade este laboratório foi sofrendo diversas modificações e adaptações, sendo de destacar três épocas, durante as quais apresentou características marcadamente distintas.

---

<sup>1</sup> Projecto da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, atribuído ao Centro de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, cujo coordenador é o Prof. Fernando Veloso Gomes.

A primeira época terminou em 1992 com a instalação de um novo sistema de geração de agitação marítima.

A segunda inicia-se em 2000, com a mudança de instalações integrada na mudança de toda a FEUP para o Pólo da Asprela, no Porto, e termina em 2007 com a aquisição de um inovador sistema de geração de agitação marítima.

Neste artigo, é feita uma breve descrição histórica do Laboratório de Hidráulica da FEUP, em particular no que diz respeito ao seu potencial para a realização de trabalhos experimentais na área da hidráulica marítima e costeira. Segue-se a descrição do novo equipamento recentemente instalado no tanque de ondas deste laboratório e das novas perspectivas de trabalho em termos de modelação física.

## 2. O Laboratório de Hidráulica da FEUP de 1965 a 2000

A preservação de alguns elementos, quase relíquias, ao longo do tempo, permite ter hoje uma ideia de como era o Laboratório de Hidráulica da FEUP há mais de 30 anos. A Figura 1 apresenta uma parte de uma planta geral, datada de 1970, permitindo identificar o posicionamento e as dimensões relativas das infra-estruturas então existentes, para a realização de trabalhos experimentais em diferentes áreas da hidráulica.

Destas infra-estruturas destaca-se um canal hidráulico fixo, construído em betão, com 46,3 m de comprimento, 80 cm de largura e 90 cm de profundidade (Perspectiva 2 na Figura 1 e Figura 2). Destaca-se também um pequeno tanque utilizado na realização de modelos fluviais 3D (Perspectiva 3 na Figura 1 e Figura 3).



Figura 2. Canal hidráulico em betão nas instalações da Rua dos Bragas (Perspectiva 2 na Figura 1).

Na Figura 3 pode ver-se também uma turbina *Francis*, um freio de *Prony* e regulador, bem como um canal hidráulico metálico com paredes de vidro, que é apresentado em mais detalhe na Figura 4 (Perspectiva 4 na Figura 1), juntamente com uma turbina *Pelton*. Trata-se de um canal de inclinação variável com um comprimento de 17 m, uma largura de 40 cm e uma profundidade de 60 cm.

Este canal foi reabilitado e transferido para as actuais instalações do Laboratório de Hidráulica da FEUP, e está a ser a utilizado no âmbito de um Doutoramento (Eng.<sup>a</sup> Elsa Carvalho) em hidráulica fluvial que se intitula '*Sedimentação e Transporte: Novas Perspectivas de Análise*'.

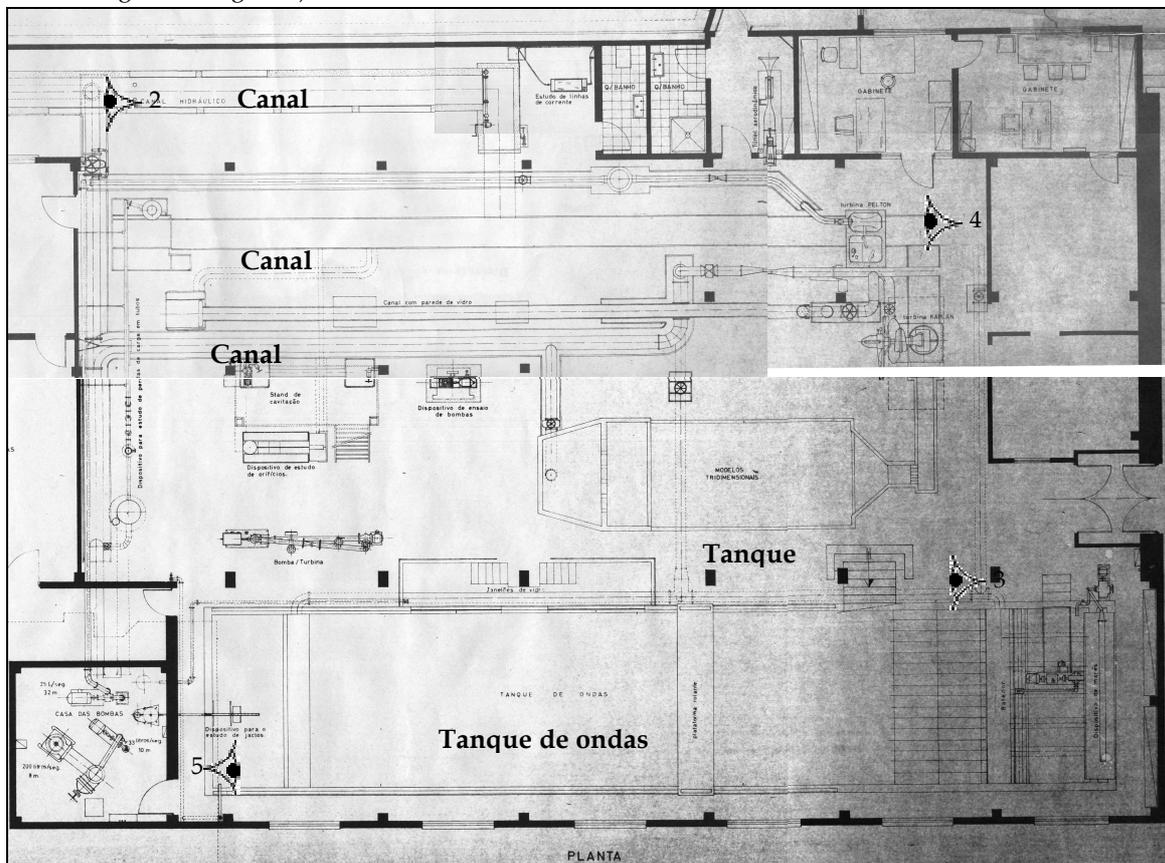


Figura 1. Parte da planta geral do Laboratório de Hidráulica da FEUP (na Rua dos Bragas, Porto) [08.10.1970, à escala 1:50 no papel].



Figura 3. Turbina *Francis*, freio de *Prony* e regulador, e tanque para modelos reduzidos 3D (Perspectiva 3 na Figura 1).



Figura 4. Canal de vidro de inclinação variável e turbina *Pelton* (Perspectiva 4 na Figura 1).

Na Figura 5 (Perspectiva 5 na Figura 1) apresenta-se uma fotografia tirada em 1973 durante uma aula prática de *Trabalhos Fluviais e Marítimos*, que dá uma ideia geral do tanque de ondas da altura.

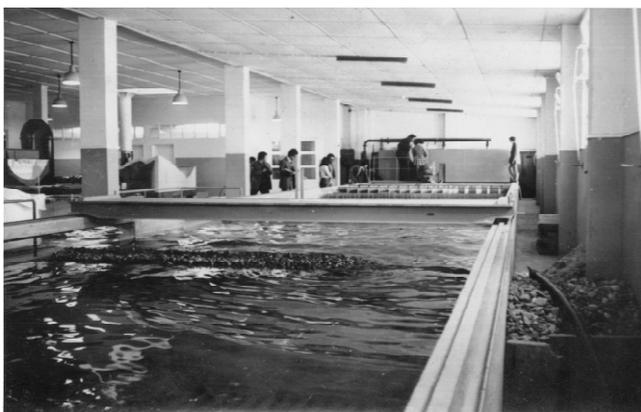


Figura 5. Aula prática de *Trabalhos Fluviais e Marítimos* (04.04.1973): vista geral do tanque de ondas (Perspectiva 5 na Figura 1).

As Figuras 6 a 8 foram retiradas do relatório de um trabalho experimental, realizado no laboratório durante o ano lectivo 1976/77. Neste trabalho, foram efectuados ensaios experimentais em modelo reduzido com fundos fixos e móveis, que tiveram como principal objectivo testar a eficiência de blocos de betão inovadores, com cavidades, e de paramentos com diferentes rugosidades e porosidades, na dissipação da energia das ondas.

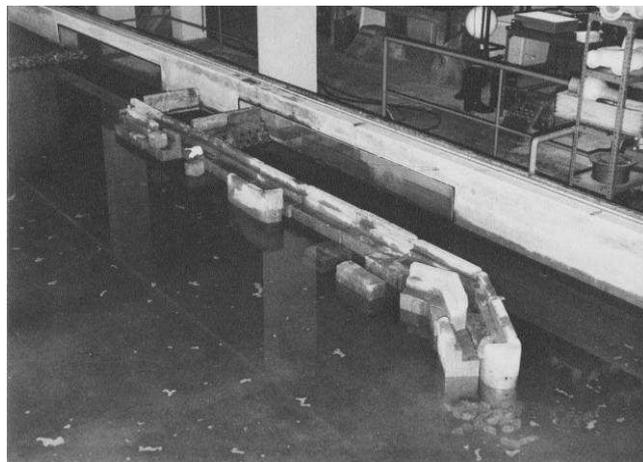


Figura 6. Ensaio em modelo reduzido com fundos móveis no canal de ondas [de um trabalho realizado no ano lectivo de 1976/77].

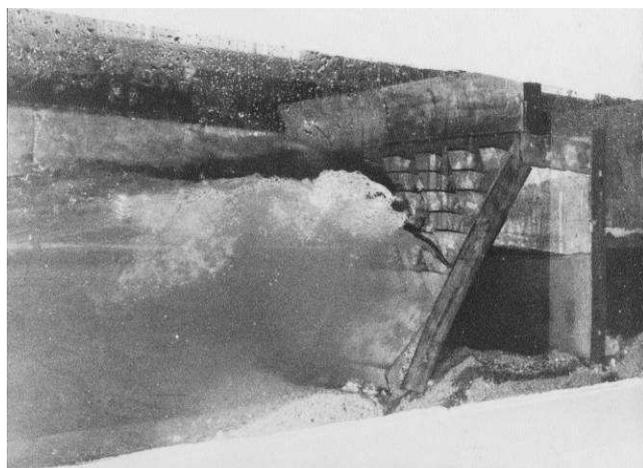


Figura 7. Dissipação da energia das ondas no ensaio em modelo reduzido [de um trabalho realizado no ano lectivo de 1976/77].

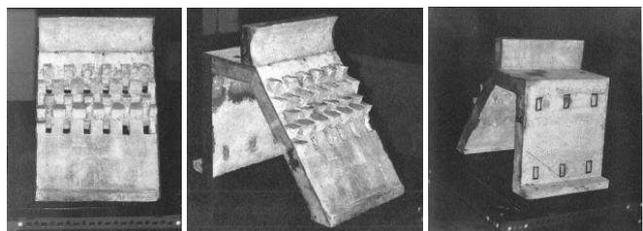
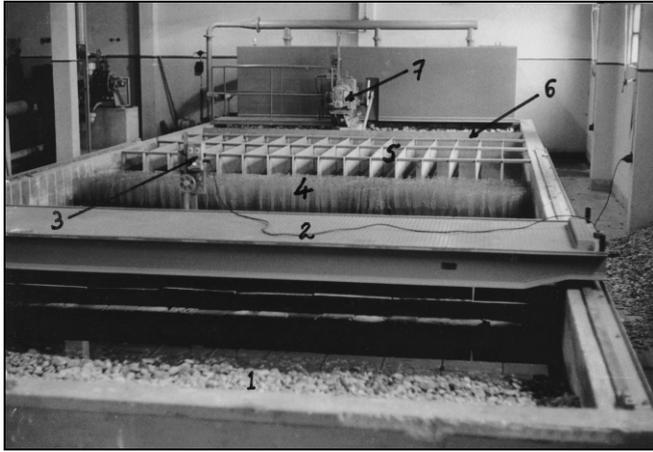


Figura 8. Blocos utilizados no ensaio em modelo reduzido: paramento exposto (esquerda e centro) e paramento vertical (direita) [de um trabalho realizado no ano lectivo de 1976/77].

## 2.1. O Tanque de Ondas de 1965 a 1992

A descrição de algumas características e forma de operação do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica nas antigas instalações da FEUP (Rua dos Bragas) constam de um relatório de estágio, entregue em Maio de 1965, do qual foram retiradas algumas fotografias ilustrativas. Nessa época, o tanque tinha as dimensões de 24,5 m de comprimento, 4,8 m de largura e uma profundidade variável entre 80 cm, junto ao batedor, e 60 cm na área de trabalho. A figura 9 ilustra o tanque de ondas dessa altura, onde se identificam os seus principais elementos constituintes. Na Figura 10 com mais detalhe, também numeradas e legendadas, evidenciam-se as componentes centrais do sistema de geração de ondas.



1. Praia absorvente de cascalho;
2. Ponte rolante;
3. Sonda de medida com olho catódico (Figura 13);
4. Filtros em favos de rede (Ponto 1, Figura 12);
5. Placas paralelas de fibrocimento (Ponto 2, Figura 12);
6. Placa do batedor (Ponto 3, Figura 12);
7. Aparelho motor do batedor (Figura 10).

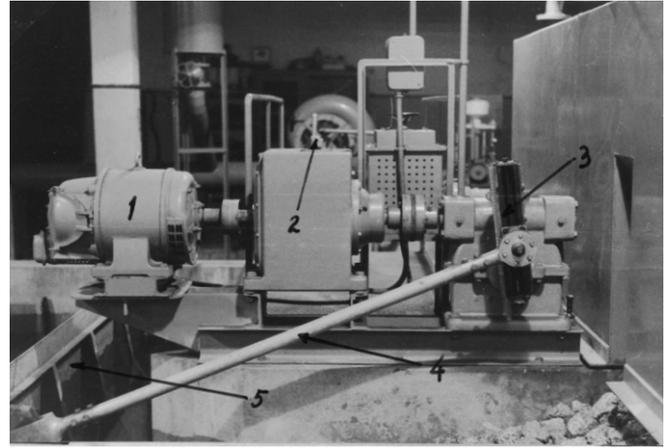
Figura 9. Vista geral do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP [de um relatório de estágio entregue em Maio de 1965].

Na Figura 11 apresentam-se os esquemas dos tipos de batedores utilizados internacionalmente em sistemas de geração de agitação marítima.

Na altura, os sistemas geradores de agitação marítima (ou de vagas como eram então designados) dividiam-se em dois grandes grupos, conforme era originada a oscilação: pelo deslocamento de um fluido ou pelo deslocamento de um batedor. Nos primeiros incluíam-se geradores com injeção periódica de água ou ar comprimido e geradores em que as ondas eram geradas por acção de um vento horizontal persistente. Estes últimos eram bastante mais complexos em termos de instrumentação, mas tinham a potencial vantagem de utilizarem, como princípio de funcionamento, o processo de geração de agitação marítima tal como ocorre na natureza. Os segundos actuavam por meio do deslocamento de um batedor deformável ou rígido. Os que consistiam no deslocamento de um batedor indeformável eram reforçados para terem uma suficiente resistência à torção.

O batedor do sistema de geração de agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP era de simples articulação e fundo levantado. Este tinha sobre o de fundo plano, a vantagem de originar um movimento oscilatório das partículas junto ao fundo.

Para que os ensaios realizados fossem suficientemente rigorosos para permitirem o estudo, muitas vezes comparativo, das características das ondas geradas, era importante que estas fossem tão regulares quanto possível. Como principais precauções para que tal acontecesse deviam tentar manter-se constantes: a frequência do motor que accionava o gerador, para que o período da onda fosse constante, e a excentricidade da biela do gerador. Desta forma a amplitude da onda gerada também se manteria constante.



1. Motor eléctrico;
2. Reóstato regulador da velocidade do motor (manual);
3. Excêntrico regulável da biela do batedor (manual);
4. Biela do batedor;
5. Placa do batedor.

Figura 10. Aparelho motor do batedor [de um relatório de estágio entregue em Maio de 1965].

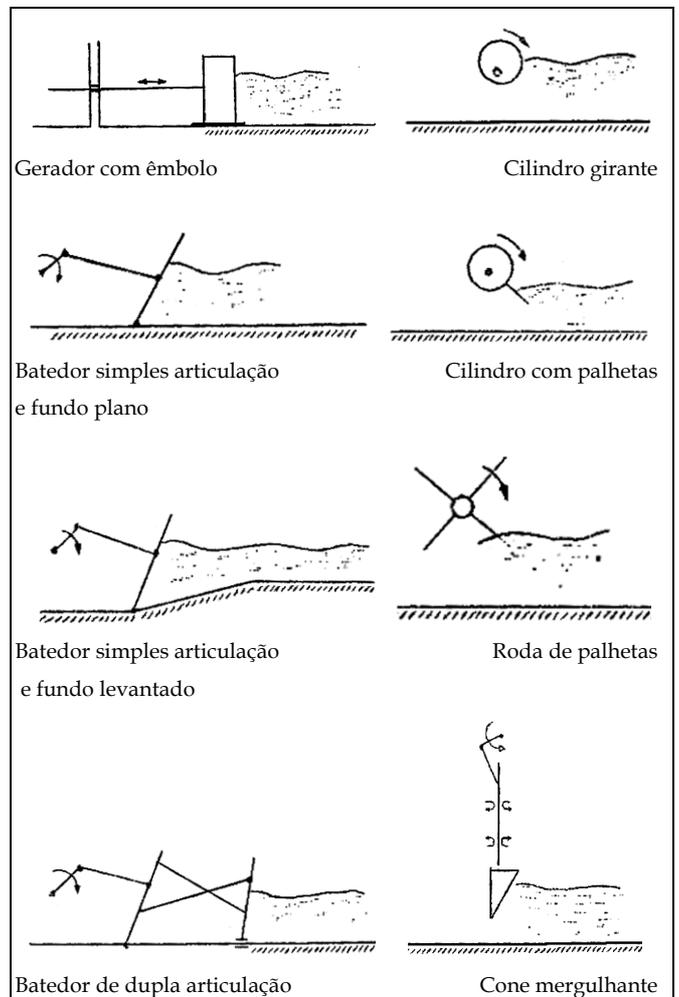


Figura 11. Esquemas dos principais tipos de batedores de geração de agitação marítima.

Uma vez que a face da placa do batedor era lisa, havia uma certa tendência para um balanceamento transversal, o que resultava na introdução de perturbações às ondas geradas.

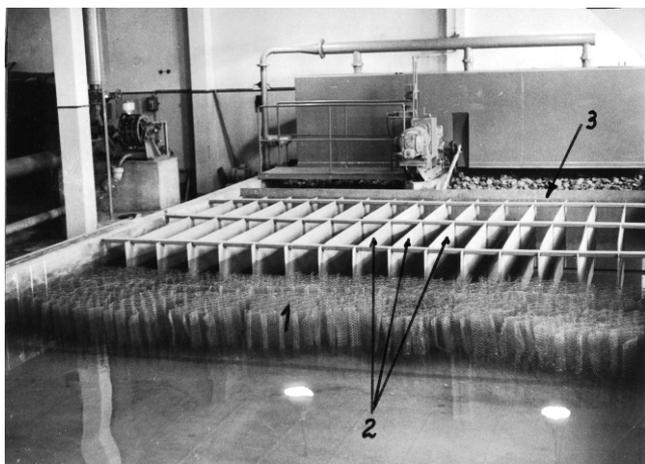


Figura 12. Vista parcial do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP [de um relatório de estágio entregue em Maio de 1965].

Para tentar minimizar este efeito existiam umas placas longitudinais paralelas em fibrocimento (Ponto 2, Figura 12), que serviam para “guiar” as ondas. Na sua propagação em direcção à praia dissipadora, as ondas passavam ainda por uns filtros em favos de rede, cuja função seria de eliminar harmónicas indesejadas (Ponto 1, Figura 12).

Para a medição da altura da onda gerada utilizava-se uma sonda de medida com olho catódico, Figura 13. Este dispositivo consistia numa base com um olho catódico, à qual estava adaptada uma régua metálica graduada que se deslocava verticalmente por meio de uma cremalheira, sendo estes deslocamentos medidos num nónio que lhe estava acoplado. Na extremidade inferior da haste havia uma ponta que ao tocar a água fazia com que o olho catódico se iluminasse. O nível da crista era medido baixando de forma manual e lentamente a haste graduada, até se verificar uma iluminação do olho catódico, enquanto o da cava era medido por subida lenta da haste graduada até que o olho catódico se apagasse por instantes à passagem da onda. A altura da onda era igual à diferença entre os dois níveis medidos. Tratava-se de um processo de medição extremamente moroso e só possível de utilizar com agitação regular.

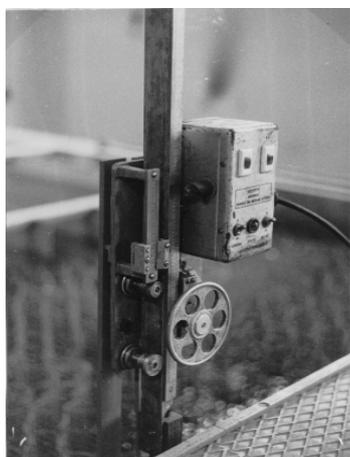


Figura 13. Sonda de medida com olho catódico [de um relatório de estágio entregue em Maio de 1965].

O relatório de estágio do qual foram extraídos os elementos visuais apresentados, referia-se a um trabalho que consistiu numa série de ensaios para estabelecer a relação entre as características de regulação do gerador de ondas e as características das ondas de oscilação geradas, progressivas e estacionárias (curva de calibração). Nas Figuras 14 a 16 apresentam-se fotografias que registaram alguns dos ensaios realizados.



Figura 14. Onda progressiva (esquerda) e sua rebentação parcial (direita) [de um relatório entregue em Maio de 1965].

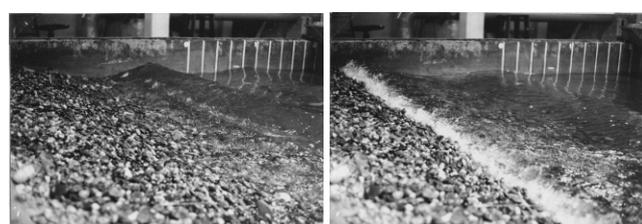


Figura 15. Empolamento (esquerda) e rebentação (direita) da onda progressiva [de um relatório entregue em Maio de 1965].

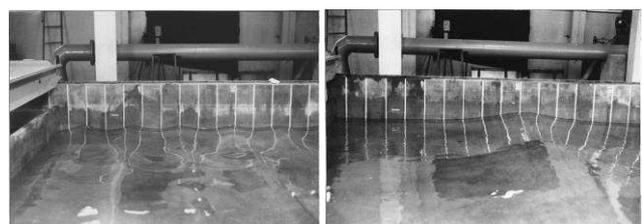


Figura 16. Ondas estacionárias com diferentes períodos [de um relatório entregue em Maio de 1965].

## 2.2. O Equipamento no Tanque de Ondas de 1992 a 2000

Em 1992, no âmbito do *Programa Ciência*, foi instalado um novo sistema de geração e aquisição de agitação marítima (*Hydraulics Research, Wallingford, UK*), destinado a ser utilizado em projectos de investigação nos domínios da hidráulica marítima e costeira. Na mesma ocasião, foi também adquirida uma unidade de anemometria laser, para medição de velocidades no escoamento oscilatório com superfície livre gerado.

O novo sistema de geração de agitação marítima, incluía a máquina de geração propriamente dita (que incorporava batedores do tipo pistão), software de geração e controlo de sinal, sondas de níveis hidrodinâmicos e software de aquisição e análise de dados.

As componentes do novo sistema foram distribuídas pela área do laboratório dedicada aos estudos em hidráulica marítima, de acordo com a planta e corte apresentados na Figura 17. Desta distribuição destaca-se a localização da nova sala de controlo sobre o tanque que, dessa forma, permitia a observação directa das condições geradas, Figura 18, e melhores condições de trabalho para os investigadores.

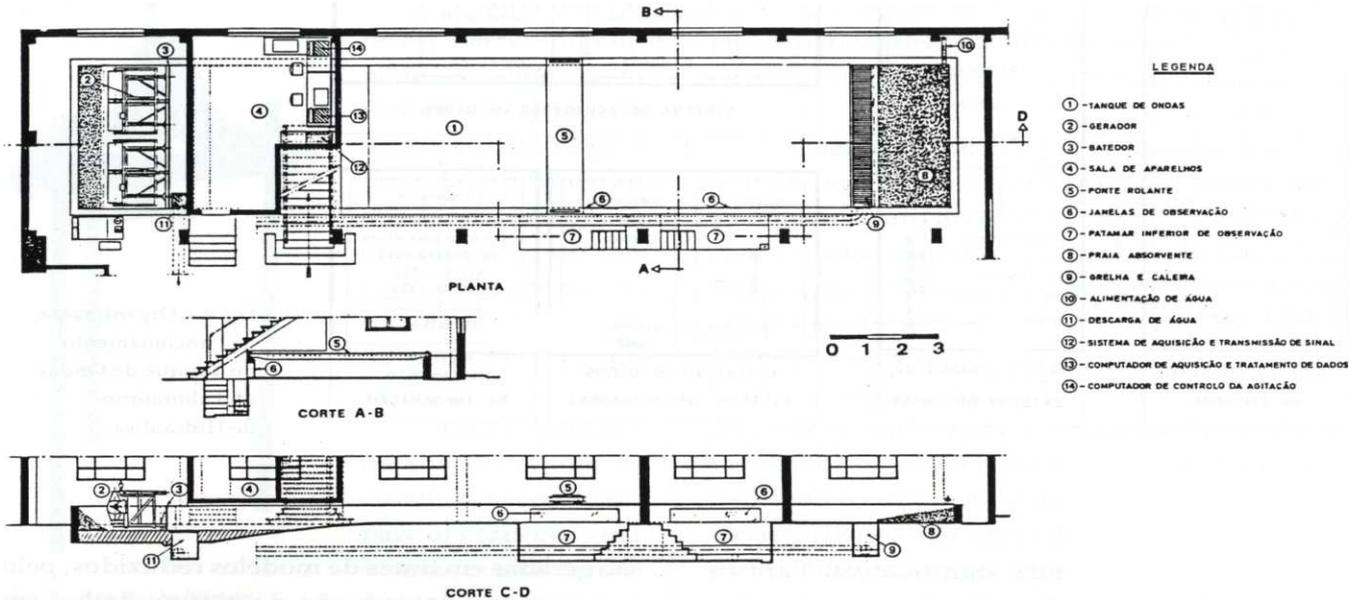


Figura 17. Planta e corte do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica [Taveira-Pinto, 1995].



Figura 18. Vista geral do tanque de ondas (esquerda) e sala de controlo do sistema de geração de agitação marítima (direita) no Laboratório de Hidráulica da FEUP em 1992 (respectivamente, Pontos 1 e 4 na Figura 17) [Taveira-Pinto, 1995].



Figura 19. Batedores do tipo pistão, parte do sistema de geração de agitação marítima adquirido em 1992 (Ponto 3 na Figura 17) [Taveira-Pinto, 1995].

O sistema batedor era constituído por dois módulos idênticos e amovíveis, de funcionamento síncrono e assíncrono, Figura 19. Já na altura em que o sistema foi adquirido, existia o conhecimento da possibilidade de associar módulos de batedores que colocados em série lado a lado, e funcionando com o desfasamento adequado poderiam gerar ondas provenientes de uma vasta gama de rumos (*batedores serpente*).

Os níveis instantâneos verificados no interior do tanque eram registados com recurso a sondas de níveis hidrodinâmicos, Figura 20. Trata-se de um aparelho simples que mede a diferença de potencial entre um par de condutores paralelos e muito finos, em arame de aço.



Figura 20. Sondas de níveis hidrodinâmicos existentes no Laboratório de Hidráulica em 1992 (esquerda) e mais recentemente (direita).

A medição instantânea desta diferença de potencial, por ser proporcional à profundidade de imersão dos condutores, é convertível em valores instantâneos de nível de água. Através da calibração das sondas é possível a obtenção de séries temporais de elevação da superfície livre.

Após a instalação do equipamento, o tanque de ondas viu o seu potencial de aplicação à investigação alargado. O novo sistema permitiu que se concretizassem os trabalhos conducentes à preparação de uma Tese de Doutoramento em hidráulica marítima: *Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades, nas proximidades de Quebramares Submersos, sob Acção da Agitação Marítima* (Taveira-Pinto, 2001).

### 3. O Laboratório de Hidráulica da FEUP de 2000 a 2007

Em 2000, a FEUP mudou-se para as novas instalações no Pólo da Asprela, Porto, onde foi construído um tanque de ondas com 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1 m de profundidade. O Laboratório de Hidráulica foi também transferido e o sistema de geração e medição de agitação marítima foi colocado no novo tanque, Figura 21. Entre 2000 e 2007 foram realizados diversos estudos nestas instalações, de entre os quais se destacam os três que a seguir se descrevem de forma sucinta.

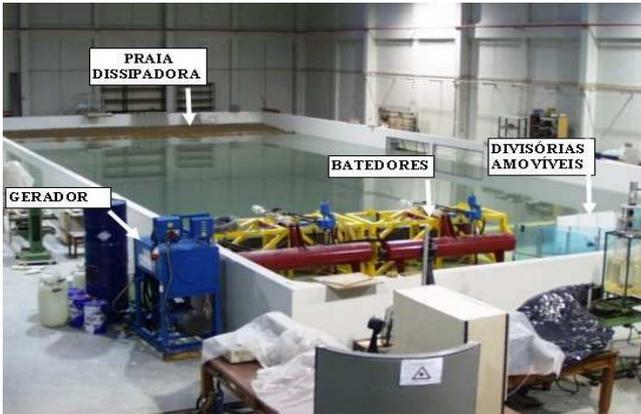


Figura 21. Vista geral do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP em 2000.

*Análise do Campo de Pressões em Quebramares Submersos*, um estudo realizado no âmbito de um Projecto de Investigação (POCTI/ECM/36949/99), cujo investigador responsável foi a Prof.<sup>a</sup> Maria Fernanda Proença, e que conduziu a uma tese de Doutoramento (Neves, 2007). O estudo teve como principal objectivo a análise da variação do campo de pressões em quebramares submersos, com diferentes geometrias, rugosidades e porosidades, sob a acção de diferentes condições de agitação marítima incidente. A medição das pressões foi efectuada através de tomadas de pressão situadas no coroamento e taludes dos diferentes modelos, Figura 22.

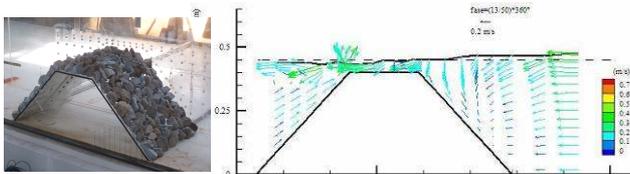


Figura 22. *Análise do Campo de Pressões em Quebramares Submersos*. Modelo de um quebra-mar submerso (esquerda) e campo de velocidades medido (direita) [de Neves, 2007].

Foram efectuadas igualmente medições de velocidades na vizinhança das estruturas, recorrendo à técnica de anemometria laser por efeito de *Doppler*, Figura 23, e da elevação da superfície livre da água, usando sondas de níveis hidrodinâmicos, em várias secções da estrutura, para quantificação da influência dos modelos nos campos de velocidades junto à superfície livre. Neste estudo pretendeu-se também identificar as zonas críticas em termos de pressões dinâmicas e velocidades que poderiam influenciar a estabilidade das estruturas.

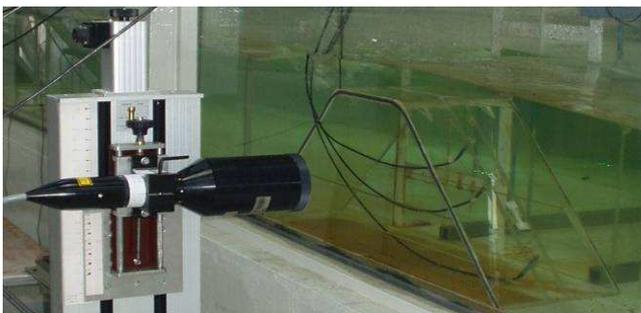


Figura 23. Sistema laser para aplicação da técnica de anemometria por efeito de *Doppler*.

O Projecto resultante de um contrato de assessoria com a Administração dos Portos do Douro e Leixões incluiu um outro estudo realizado no tanque de ondas da FEUP: *Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petrolífero do Porto de Leixões* (IHRH/FEUP, 2004). A operacionalidade do terminal petrolífero do porto de Leixões está fortemente dependente da eficiência do quebra-mar norte, nomeadamente, no que respeita a níveis de galgamento e transmissão da agitação marítima para o interior da área portuária, tendo sido efectuados diversos ensaios em modelo físico, que conduziram a uma Tese de Mestrado (Guedes-Lopes, 2005). Numa fase inicial foram realizados ensaios 2D com o actual perfil transversal do quebra-mar e 10 outras soluções alternativas, de forma a testar as configurações do quebra-mar que permitissem uma melhoria dessa operacionalidade. Nestes ensaios, foram adquiridas séries temporais da elevação da superfície livre nas imediações da estrutura, efectuados registos fotográficos e vídeos, e medido o volume de água que galgou a estrutura, Figura 24. Numa segunda fase testaram-se, com agitação irregular e blocos de alta densidade, as hipóteses que se tinham mostrado mais eficientes durante a primeira fase.

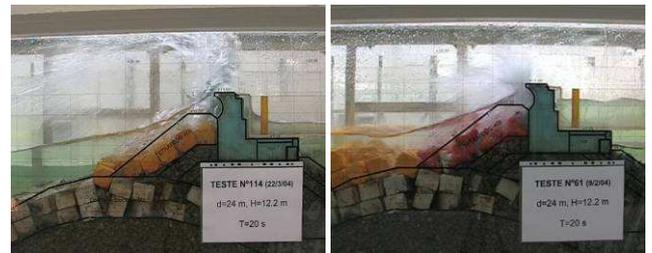


Figura 24. Exemplos de testes realizados em modelo físico, realizados no âmbito do *Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petrolífero do Porto de Leixões*.

Um outro estudo surge na sequência do projecto de construção de um terminal multiusos no intradorso do molhe sul do porto de Leixões, que será constituído por três cais acostáveis, *Estudo em modelo físico da eficiência hidráulica dos blocos NOREF relativamente à reflexão da agitação* (IHRH/FEUP, 2007), Figura 25. A solução estrutural seleccionada em concurso para os cais deste novo terminal é materializada pela sobreposição de blocos prefabricados de betão simples, designados por blocos NOREF (Non Reflection Blocks, solução patenteada). Estes blocos inovadores permitem a constituição de um paramento vertical acostável perfurado, que se supõe menos reflector, e que tem como finalidade a melhoria das condições de agitação no interior da bacia portuária.



Figura 25. Fotografias tiradas durante ensaios experimentais realizados no âmbito do *Estudo em modelo físico da eficiência hidráulica dos blocos NOREF relativamente à reflexão da agitação*.

Partindo da geometria dos blocos NOREF, previamente definida em projecto de execução e adaptada às condições locais, foram realizados ensaios em modelo físico à escala 1:30, de forma a averiguar a influência das características das ondas na eficiência hidráulica à reflexão dos blocos.

Entre 2000 e 2007 foram diversas as intervenções de melhoramento do laboratório, que incluíram, a criação de uma sala para controlo do sistema de geração de agitação, a instalação de uma ponte rolante de grande porte que abrange toda a área de trabalho do laboratório, facilitando, assim, o manuseamento de equipamentos e materiais, e a elevação em 20 cm de altura, do tanque de ondas. Em 2007 surge um novo marco para o Laboratório de Hidráulica da FEUP, Figura 26, com a aquisição de um inovador sistema de geração de agitação marítima, no âmbito do Projecto *Financiamento Programático CEHRA*.

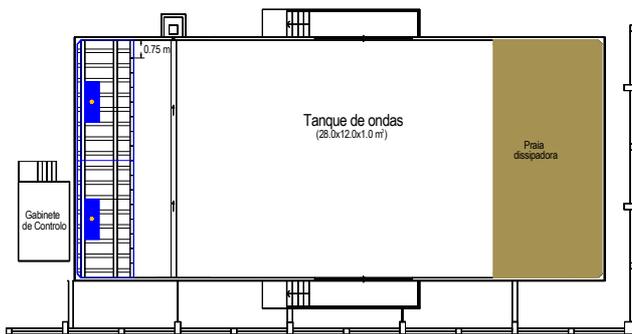


Figura 26. Vista em planta do actual tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, equipado com o novo sistema de geração de agitação marítima (azul).

#### 4. O Actual Sistema de Geração de Agitação Marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP

O novo sistema de geração de agitação marítima, adquirido para o Laboratório de Hidráulica da FEUP, é um inovador sistema multielemento, que incorpora um sistema activo de absorção da reflexão.

O sistema foi concebido pela *HR Wallingford (UK)* e permite a simulação de vários tipos de estados de mar 2D e 3D.

Este sistema foi adquirido ao abrigo de um concurso público internacional com financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

##### 4.1. Descrição

O equipamento é composto por: uma unidade de controlo que se encontra no gabinete de controlo, juntamente com os sistemas informáticos onde estão instalados os softwares de geração e de aquisição e análise de sinal; pela máquina de geração propriamente dita, colocada no interior do tanque; e por sondas de níveis hidrodinâmicos para medição instantânea da elevação da superfície livre, Figura 20.

As suas principais características são:

- é movido por acção de motores eléctricos;
- opera em profundidades até 1 m;
- tem incorporado um sistema activo de absorção da reflexão;
- permite a geração de ondas de crista larga (2D) ou curta (3D), para estados de mar regulares e irregulares;
- possui um software de aquisição e análise de dados que permite que sejam efectuadas análises espectrais, estatísticas e de reflexão, e além disso, permite a fácil exportação de dados para posterior tratamento.

Sendo composto por duas unidades modulares, com oito elementos estreitos cada, a máquina de geração torna-se bastante versátil, podendo ser movimentada no interior do tanque, Figura 27.

Cada uma das unidades agrega oito pás batedoras revestidas a fibra de vidro, com movimento independente entre si, podendo funcionar como um batedor serpente, permitindo a geração de ondas provenientes de uma vasta gama de rumos.

As pás encontram-se montadas sobre uma estrutura comum em aço, na qual as componentes electrónicas e de precisão se encontram sempre acima do nível de água. Todas as componentes são revestidas a aço anticorrosão o que assegura que a manutenção do equipamento seja bastante simples.



Figura 27. Módulo do gerador de agitação marítima, composto por oito pás de 75 cm cada, perfazendo uma largura de 6 m.

O movimento de cada uma das pás é accionado por um motor eléctrico e a possibilidade de movimentação lateral das pás foi minimizada de forma a prevenir fenómenos de interferência nos movimentos oscilatórios gerados.

O controle dos motores é feito por aparelhos digitais inteligentes que podem ser interrogados para a obtenção de parâmetros como a velocidade do motor, a corrente e a temperatura. Os controladores dos motores e toda a electrónica associada ao sistema encontram-se encerrados numa cabine montada no respectivo módulo de ondas. Por trás das pás existe um material plástico reticulado, esponjoso, que tem como função absorver ondas indesejadas. O tempo de vida do gerador está estimado em cerca de 25 anos, mas tal dependerá da utilização que lhe for dada.

#### 4.2. Funcionamento

Através do software *HR Wave Generation Control* o estado de mar pretendido é pedido sob a forma de um sinal que é posteriormente convertido, através de uma função de transferência, em movimentos das pás. De acordo com uma outra função de transferência (quociente entre a altura da onda e a excursão da pá em função da profundidade), os movimentos das pás são convertidos em agitação marítima no interior do tanque. As sondas de níveis hidrodinâmicos aí colocadas adquirem séries temporais de valores de voltagens que, por calibração, são convertidos em registos instantâneos da elevação da superfície livre, permitindo a obtenção das características da agitação no interior do tanque, Figura 28.

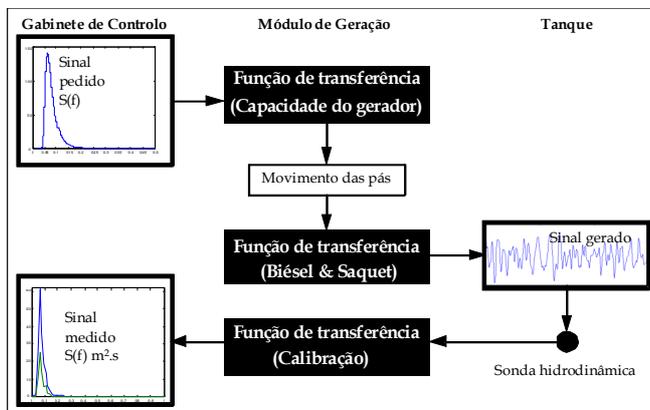


Figura 28. Representação esquemática do funcionamento do sistema de geração e aquisição de agitação marítima.

#### 4.3. Especificações

##### 4.3.1. Altura máxima da onda

A altura de onda máxima que pode ser gerada é limitada por um de dois factores: a rebentação ou o limite de desempenho do gerador. O desempenho do gerador é determinado pela sua excursão (80 cm), velocidade máxima (87 cm/s) e força (1,5 kN).

Para períodos pequenos, o critério de rebentação das ondas é o mais limitativo, primeiro devido ao período e depois à profundidade. Para ondas longas, de grande período, é o limite do desempenho do gerador que impõe o valor máximo para a altura da onda, Figura 29.

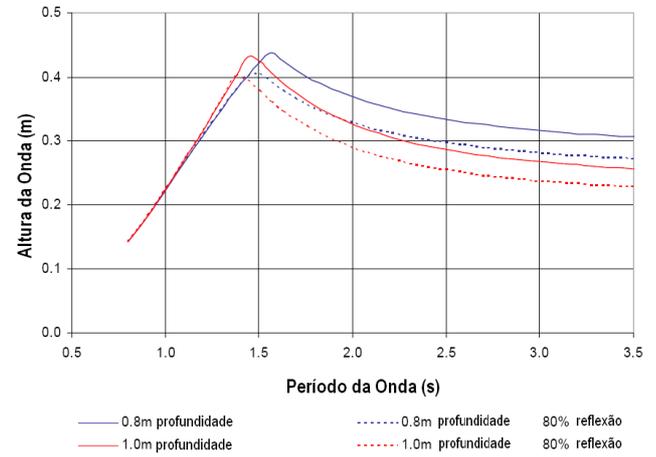


Figura 29. Altura máxima permitida com absorção activa (vermelho) e sem absorção activa (azul) [de HR Wallingford, 2007].

##### 4.3.2. Direcção da onda

Este sistema multielemento tem a capacidade de produzir ondas que se propagam segundo uma direcção diferente da direcção longitudinal principal. Contudo, em regimes de altas-frequências podem ser geradas adicionalmente ondas indesejadas, pelo que o ângulo de inclinação, relativamente à direcção longitudinal principal é limitado, em função da frequência das ondas geradas, Figura 30.

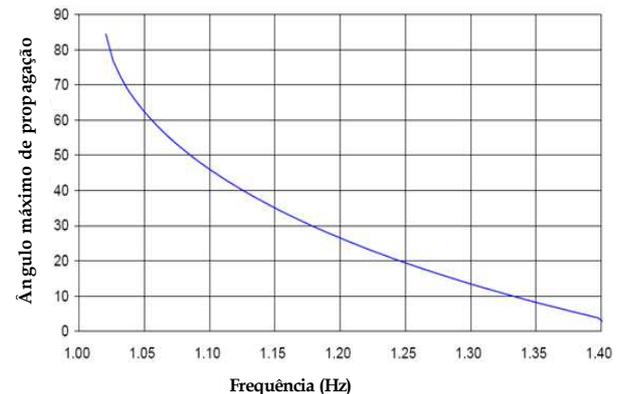


Figura 30. Máxima inclinação em relação à direcção longitudinal principal para a direcção de propagação das ondas geradas em função da frequência, entre 1 Hz e 1,4 Hz [de HR Wallingford, 2007].

Para frequências superiores a 1,4 Hz não é possível gerar ondas que se propaguem segundo uma direcção inclinada relativamente à direcção longitudinal principal, sem que se gerem ondas indesejadas. Por exemplo, para ondas com 1,08 Hz podem gerar-se ângulos de propagação da onda até cerca de 50° com a direcção longitudinal principal.

As características do tanque e a função de transferência das pás determinam os limites em frequência das ondas geradas. No tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP o intervalo de frequências que foi fixado varia entre 0,1 e 3 Hz, frequências características da agitação marítima à escala de protótipo, Figura 31. Usando o critério de Froude, num modelo reduzido à escala 1:100 podem ser geradas ondas que no protótipo correspondem a ondas infragravíticas (frequências entre 0,01 e 0,3 Hz).

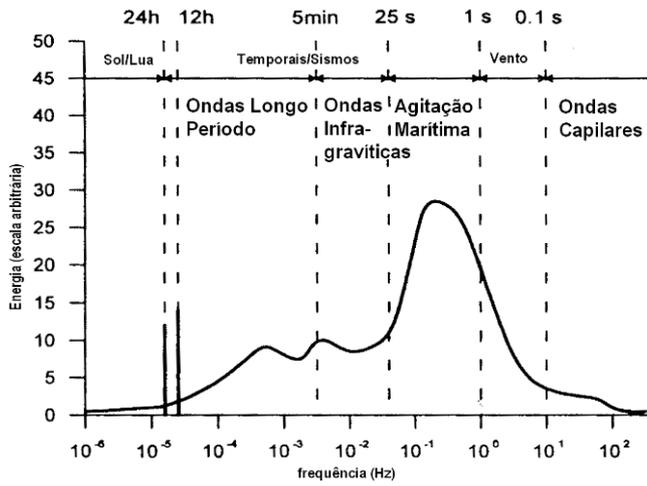


Figura 31. Espectro da energia das ondas do oceano [adaptado de Massel, 1996].

**4.4. Absorção Activa da Reflexão**

A reflexão das ondas geradas nas paredes do tanque pode ser significativa. Se as ondas reflectidas atingem o gerador, as ondas geradas podem vir amplificadas, pela interacção destas, com as reflectidas nas pás. Este processo pode resultar em instabilidades das ondas no interior do tanque e consequente invalidação de ensaios.

No caso de serem esperadas reflexões significativas no interior do tanque, o sistema de absorção activo deve ser accionado. A forma de actuação deste sistema pode ser descrita esquematicamente como está indicado na Figura 32.

De uma forma simplificada, a onda a ser gerada, quando o sistema de absorção activa é accionado no sistema de controlo das pás, deve corresponder à diferença entre a onda pedida e a onda reflectida. Esta última é determinada pela diferença entre a onda medida junto às pás e a onda gerada. Corrigindo desta forma a onda gerada, a onda no interior do tanque será sensivelmente igual à onda pedida.

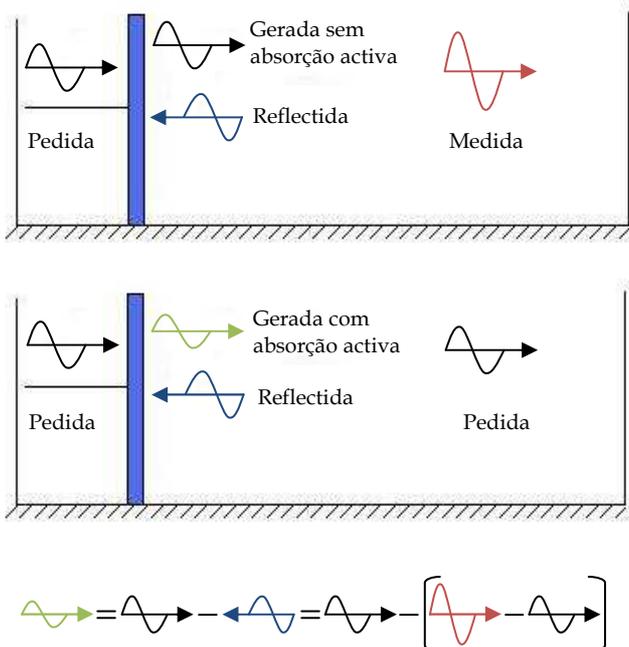


Figura 32. Representação esquemática da forma de actuação do sistema de absorção activa.

**4.5. Geração de Estados de Mar HR Wave Generation Control Program**

O sistema permite a geração de diversos tipos de estados de mar, para o que existem diferentes métodos de geração acessíveis através do software sintetizador de ondas: *HR Wave Generation Control Program*. No Quadro 1 indicam-se os métodos disponíveis e os tipos de estados de mar correspondentes.

Quadro 1. Tipos de estados de mar gerados e métodos de geração.

Método	Estado de mar		
	Tipo	Direcção	Crista
Ruído branco filtrado	Irregular	Normal	2D Longa
			3D Curta
Soma de senos	Irregular	Oblíqua	2D Longa
			3D Curta
Regular	Regular	Bidireccional	2D Longa
			Normal
A partir de ficheiro de séries temporais de posição das pás		Repetição de estados de mar	

Quando se utiliza o método do “ruído branco filtrado” é criada uma fonte de ruído branco, à qual é aplicado um filtro digital, cujas características são obtidas por FFT (Fast Fourier Transform) a partir da forma espectral escolhida, de forma a produzir o sinal pretendido para o movimento das pás. Este método apresenta como principais vantagens:

- a possibilidade de geração de sequências longas não repetidas (importante no teste de modelos com respostas não lineares);
- a possibilidade de geração da mesma sequência aleatória em diferentes ensaios (importante em testes comparativos);
- a produção de um espectro sem descontinuidades;
- o agrupamento de ondas faz-se naturalmente da mesma forma que na realidade;
- a simulação do efeito de set-down é realista;
- a utilização da reflexão nas paredes do tanque para alargar a área de homogeneidade de estados de mar 3D.

O método da “soma de senos” permite a geração de 4000 ondas do tipo seno em tempo real. A forma do espectro pode ser inteiramente definida pelo utilizador ou seleccionada entre uma das formas teóricas disponíveis. Cada onda seno pode ser inteiramente definida pelo utilizador em termos de densidade espectral, frequência e fase, permitindo uma geração unidireccional e multidireccional, com direcção média segundo a direcção longitudinal principal ou segundo um ângulo oblíquo em relação a esta. Através deste método é também possível gerar ondas bidireccionais. Cada um dos módulos produzirá diferentes estados de mar (e.g. diferentes direcções predominantes, frequências de pico, energia).

A “repetição de estados de mar” é também possível a partir da importação de séries temporais de posições das pás, guardadas em ficheiros ASCII, que também incluem o nº de pás, a profundidade e a duração do teste.

O software de geração de sinal é acedido pelo utilizador através de uma interface gráfica. Num projecto de geração de ondas deve ser indicada a escala do modelo e a profundidade da água, e a interacção pode passar a ser feita em termos de unidades de protótipo. De forma a evitar estragos no equipamento podem ser efectuados testes aos movimentos das pás (corridas a “seco”), que podem ser gravados em ficheiro. A forma espectral representativa do estado de mar que se pretende gerar é seleccionada pelo utilizador (Jonswap, Pierson-Moskovitz, definido). Existe também um parâmetro de ganho, que pode ser utilizado como ajuste fino entre a altura das ondas geradas e a medida. Para a geração de sinais que exijam muito processamento, como pode acontecer, quando se utiliza o método da soma de senos com elevada resolução espectral, este pode ser efectuado previamente, sendo criados ficheiros e a geração executada a partir destes. Para qualquer estado de mar gerado podem ser guardadas em ficheiros deste tipo séries temporais de posições das pás, para posterior repetição do estado de mar gerado.

#### 4.6. Aquisição e Análise de Dados HR WaveData

O sistema de aquisição de dados é composto por um computador, que comunica com as sondas de níveis hidrodinâmicos colocadas no interior do tanque, através de um módulo de interface e por um software de aquisição e análise de dados *HR WaveData*. Este sistema permite o balanceamento dos cabos de ligação às sondas e a sua calibração, aquisição, monitorização e análise de dados, relativos aos estados de mar gerados.

Calibração das sondas de níveis hidrodinâmicos: este processo consiste na criação de ficheiros de calibração, que convertem voltagens medidas no modelo físico em valores instantâneos de elevação da superfície livre à escala real, para serem utilizados na aquisição e análise de dados.

A aquisição de dados é efectuada em blocos de 256 registos armazenados em formato de texto. A frequência de amostragem deve ser pelo menos quatro vezes a frequência máxima que interessa medir, para assegurar que o sinal amostrado reproduz o sinal que se pretende medir. Por outro lado, a frequência máxima deve ser dupla da frequência de pico, pelo que a frequência de amostragem deve ser pelo menos oito vezes a frequência de pico, recomendando-se um valor que pode ir até 40 vezes, para também permitir a adequada análise estatística dos dados. A resolução espectral corresponde ao inverso da duração da série temporal utilizada na análise. A duração do registo a considerar deve ser determinada da seguinte forma: no caso de ser incluído o efeito de set-down, devem ser considerados no mínimo 4096 pontos para uma adequada estimativa espectral; noutras situações deve permitir a inclusão do número de ondas desejado e o número de pontos deve ser uma potência de dois, para uma adequada utilização da FFT.

A monitorização dos ensaios permite a avaliação do seu andamento; é também efectuada uma análise estatística cumulativa do número e alturas das ondas; são apresentados gráficos de dados recolhidos em dois dos canais de medição; e para controlo dos ensaios são também apresentados parâmetros estatísticos.

Análise de dados: o software permite que seja feita uma análise espectral e de contagem de ondas, a partir da qual são determinados os parâmetros que caracterizam os estados de mar gerados. Esta análise pode ser feita de forma independente para cada canal de medição, existindo possibilidade de aplicação de diversas técnicas de suavização espectral, eliminação de tendências nas séries temporais e truncação.

Na Figura 33 apresenta-se uma comparação entre o espectro do estado de mar pedido pelo utilizador e o espectro estimado a partir das medições efectuadas por uma sonda de níveis hidrodinâmicos colocada no interior do tanque.

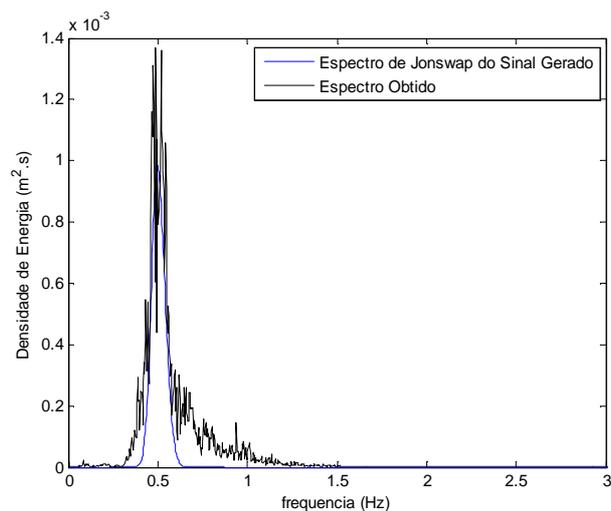


Figura 33. Espectro do estado de mar pedido vs espectro estimado a partir das medições efectuadas por uma sonda de níveis hidrodinâmicos colocada no interior do tanque.

## 5. Investigações em Curso e Estudos Planeados

As características inovadoras do sistema de geração de agitação marítima adquirido vieram potenciar a realização de trabalhos de investigação, pedagógicos e de apoio a outros projectos.

No âmbito de um Plano de Doutoramento (Eng.º Paulo Rosa Santos) estão presentemente em curso trabalhos experimentais que recorrem já ao novo sistema de geração de agitação marítima para a *Análise da Concepção e Dimensionamento de Dispositivos de Acostagem e Amarração em Pontes-Cais. Acções Hidrodinâmicas e de Impacto Específico*. O Projecto (PTDC/ECM/72835/2006) *DOLPHIN – Análise do Comportamento Hidrodinâmico de Dispositivos de Acostagem e Amarração: o Caso Crítico do Terminal Petrolero do Porto de Leixões*, cujo investigador responsável é o Prof. Francisco Taveira-Pinto, foi recentemente aprovado e tem o objectivo de complementar e dar continuidade aos trabalhos referidos. Este estudo deve-se ao facto de as condições de operacionalidade e de segurança num terminal portuário estarem intimamente relacionadas com o comportamento dos navios amarrados ao cais, nomeadamente com a amplitude dos movimentos do navio e com o valor dos esforços nos cabos de amarração e nas defensas. Dada a diversidade e a complexidade dos fenómenos hidrodinâmicos envolvidos, a modelação física constitui uma ferramenta fundamental.

O modelo físico (incluindo os dispositivos de acostagem e amarração, o modelo do navio petroleiro, e a estrutura de acostagem) foi já construído e submetido a ensaios de calibração, Figura 34.



Figura 34. Instalação no tanque de ondas para a *Análise da Concepção e Dimensionamento de Dispositivos de Acostagem e Amarração em Pontes-Cais. Acções Hidrodinâmicas e de Impacto Específico*.

Existe também a perspectiva de realização de outros trabalhos experimentais. Por exemplo, o estudo a realizar no âmbito de um Plano de Doutoramento (Eng.º Hugo Guedes Lopes): *Análise Experimental do Campo de Velocidades e dos Galgamentos em Quebramares de Taludes Protegidos por Quebramares Submersos, através da técnica da Velocimetria por Processamento de Imagens de Partículas (PIV)*. O Caso do Porto de Leixões.

Recorrendo a um programa experimental em modelo reduzido, pretende-se avaliar os campos de velocidades e os galgamentos, na interacção de um quebramar submerso com um quebramar de taludes.

Para tal, será testado o modelo reduzido do quebramar norte do porto de Leixões, Figura 35, sob acção de agitação regular e irregular, recorrendo à técnica PIV para a análise do campo de velocidades, Figura 36.



Figura 35. *Análise Experimental do Campo de Velocidades e dos Galgamentos em Quebramares de Taludes Protegidos por Quebramares Submersos, através da técnica PIV*.



Figura 36. Equipamento para aplicação da técnica da Velocimetria por Processamento de Imagens de Partículas (PIV).

Está também em curso o projecto experimental *GeoWAVE – Stability Analysis of Geocontainers Under Wave Loading* (POCI/ECM/60807/2004), cujo investigador responsável é a Prof. Maria de Lurdes Lopes, no âmbito do qual será feita a *Análise Experimental da Estabilidade de Geocontentores sob a Acção da Agitação Marítima*, para investigação do comportamento hidráulico e da estabilidade global de sistemas de controlo de erosão utilizando sacos geotêxteis cheios com areia, quando sujeitos a acções hidrodinâmicas oscilatórias de elevada energia, de acordo com um Plano de Doutoramento (Eng.ª Luciana das Neves).

Foi também já iniciado um outro Projecto de investigação, *Desenvolvimento Experimental de Sistemas Offshore de Energia das Ondas* (PTDC/EME-MFE/66999/2006), coordenado pelo Instituto Superior Técnico, que tem por objectivo a modelação da cadeia de conversão de energia das ondas e do sistema de amarração, e a sua validação por testes em modelo físico.

As ondas marítimas constituem um importante recurso energético a nível mundial, em particular, em Portugal, onde existem condições muito favoráveis para o seu aproveitamento.

A investigação de efeitos não lineares, que se sabe serem relevantes em estados de mar mais energéticos e quando se trata de pequenos dispositivos offshore de conversão de energia, cuja amplitude de oscilação é grande, é normalmente feita recorrendo a ensaios em tanque de ondas, com modelos a escalas entre 1:80 e 1:10.

No âmbito de um outro Projecto, *FEMWAVE – Finite Element Methods for 2DH Non Linear Dispersive Wave Models* (POCTI/ECM/41800/2001), cujo investigador responsável é o Prof. Paulo Avilez Valente, serão efectuadas medições das três componentes da velocidade a diversas profundidades, sob o efeito da agitação marítima.

O estudo será realizado recorrendo a três anemómetros acústicos por efeito de *Doppler* recentemente adquiridos e que se destinam a fornecer uma base de dados para futura validação de modelos numéricos de propagação de ondas.

## Referências

- Guedes-Lopes, H. (2005). *Comportamento Hidráulico e Estrutural de Quebramares Ensaios em Modelo Físico do Quebramar de Leixões*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- HR Wallingford (2007). *Multi-element Wave Generation System with AC Drives and Dynamic Wave Absorption, User Manual*, CQR.4104.
- IHRH/FEUP (2004). Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petrolero do Porto de Leixões, projecto resultante de um contrato de assessoria com a Administração dos Portos do Douro e Leixões. Relatório Final, Relatório Síntese, 72 pp.
- IHRH/FEUP (2007). Estudo em modelo físico da eficiência hidráulica dos blocos NOREF relativamente à reflexão da agitação. Relatório Técnico.
- Massel, S.R. (1996). *Ocean Surface Waves: their physics and predictions*, Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 11, 491 p., World Scientific Singapore, ISBN 9810216866.
- Neves, A.C. (2007). *Análise do Campo de Pressões em Quebramares Submersos*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- POCTI/ECM/36949/99 (2001-2004). *Análise das Pressões e da Turbulência Gerada por Quebramares Submersos*. Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Parceiros: IHRH-FEUP.
- POCTI/ECM/41800/2001 (2003-2007). *Finite Element Methods for 2DH non Linear Dispersive Wave Models*, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Parceiros: FEUP.
- POCI/ECM/60807/2004 (2005-2008). *Experimental stability analysis of GEOcontainers under WAVE loading (GeoWAVE)*, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Parceiros: IHRH-FEUP (Instituto de Hidráulica e recursos Hídricos) e Universidade da Corunha.
- PTDC/ECM/72835/2006 (2008-2011). *DOLPHIN - Análise do Comportamento Hidrodinâmico de Dispositivos de Acostagem e Amarração: o Caso Crítico do Terminal Petrolero do Porto de Leixões*. Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Parceiros: FEUP-IHRH (Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos) e ISR-FEUP (Instituto de Sistemas e Robótica), LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e IST (Instituto Superior Técnico).
- PTDC/EME-MFE/66999/2006 (2007-2010). *Desenvolvimento Experimental de Sistemas Offshore de Energia das Ondas*, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Parceiros: IST (Instituto Superior Técnico), FEUP, FFCT (Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia), INETI (Instituto Nacional de Engenharia, tecnologia e Inovação) e IDMEC (Instituto de Engenharia Mecânica) - Lisboa.
- Taveira-Pinto, F. (2001). *Análise das Oscilações e dos Campos de velocidades, nas proximidades de Quebramares Submersos, sob Acção da Agitação Marítima*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Taveira-Pinto, F. e Veloso-Gomes, F. (1995). *Sistema de Geração de Ondas e Aquisição de Dados do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Revista "Engenharia", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Investigação e Desenvolvimento, p. 28-33.