



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

## **ENSAIOS EM MODELO FÍSICO DE UMA UNIDADE DE ENERGIA DAS ONDAS**

Maria da Graça Neves, Fernando Marques da Silva, Luís Gabriel Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
gneves@lnec.pt, fms@lnec.pt, lgsilva@lnec.pt

### **RESUMO**

Este artigo apresenta os resultados dos ensaios, realizados no LNEC, em modelo físico tridimensional de uma unidade de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de ar oscilante, com o objectivo de analisar o seu comportamento hidráulico.

Este modelo, à escala de 1:30, corresponde a uma unidade esquemática com características semelhantes ao protótipo que se encontra em estudo pela CONSULMAR para o molhe norte da Foz do Douro, obra sob a jurisdição do IPTM.

Realizou-se um total de 432 ensaios para diferentes condições de agitação incidente (altura de onda significativa, período de pico, ângulo de incidência da onda relativamente à estrutura e nível de maré) e para diferentes condições de passagem do ar para a zona da turbina.

Foram medidos níveis de água e pressão de ar em diferentes pontos no interior da Câmara. Os resultados dos ensaios foram analisados nos domínios do tempo e da frequência. Verificou-se que, em geral, há uma boa resposta do sistema no que respeita a pressões no interior da câmara, para períodos ensaiados, isto é, entre os 8 e os 16s.

### **1. Introdução**

Ao longo dos últimos anos, muito se tem investido no estudo de energias alternativas, sendo de destacar os estudos realizados em Portugal sobre o aproveitamento de energia das ondas com sistemas de coluna de água oscilante.

Dado que a estrutura de suporte da Central é a componente mais dispendiosa do sistema, uma solução de grande interesse económico é a integração de Centrais de aproveitamento da energia das ondas em quebra-mares.

Para estudar a adaptação, o desenvolvimento e a viabilidade económica da tecnologia existente de Centrais de Coluna de ar oscilante de forma a integrá-las em estruturas marítimas, encontra-se neste momento a decorrer um projecto de investigação sobre o tema “Integração de Centrais de aproveitamento da energia das ondas em quebra-mares”, onde participam diferentes entidades (IPTM, Consulmar e CEO). O caso de estudo é a adaptação de uma Central ao molhe Norte do Douro, cuja construção está prevista ocorrer brevemente. Uma das fases deste projecto corresponde ao desenvolvimento de modelo físico hidráulico.

Este artigo descreve os ensaios efectuados, durante o primeiro semestre de 2005, em modelo físico desenvolvido no LNEC, resumizando os resultados obtidos e a sua análise.

Os parâmetros em análise foram: o ângulo de incidência da onda relativamente à estrutura, o período, a altura de onda e os níveis de maré. O modelo foi dotado de todos os dispositivos que permitiram a recolha de dados relativos a pressões de ar e níveis de água no seu interior, não se incluindo a observação do comportamento estrutural do corpo da Central.

## 2. Modelo físico

### 2.1. Características do modelo

A Central de Conversão de Energia das Ondas ensaiada foi reproduzida de acordo com os desenhos e indicações fornecidas pela CONSULMAR, tendo a construção, à escala geométrica de 1:30, e a exploração do modelo sido efectuadas de acordo com a lei de semelhança de Froude.

As características geométricas da Central foram reproduzidas fielmente, incluindo as diferentes zonas em que esta pode ser dividida em: cavidade por onde penetram as ondas, câmara hidro-pneumática, módulo de alojamento da turbina e câmara de ar, que estabelece a ligação entre as duas zonas anteriores (Figura 1).

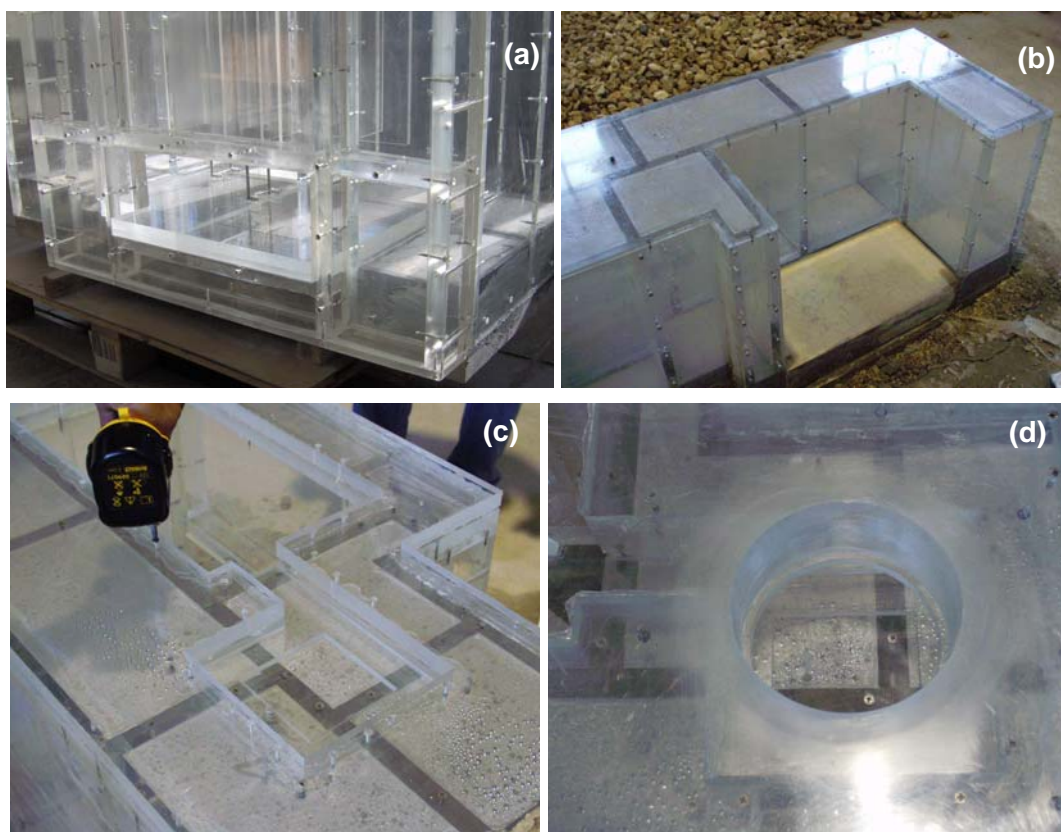


Figura 1 – Zonas da Câmara hidro-pneumática: cavidade por onde penetram as ondas (a), Câmara hidro-pneumática (b), Câmara de ar (c) e módulo de alojamento da turbina (d).

O modelo era constituído por um módulo de base e dois módulos amovíveis, um lateral e um superior. Estes módulos amovíveis permitiam a variação de algumas das suas características geométricas gerais da Central, tais como a altura da abertura por onde penetram as ondas, as suas cotas altimétricas e a altura da Câmara hidro-pneumática.

Toda a Central foi construída em painéis de acrílico, de forma a permitir a observação do comportamento hidráulico no interior da estrutura, tal como se mostra na Figura 2. Como não se pretendia observar o comportamento estrutural da central, a resistência mecânica dos materiais, bem como as ligações entre elementos, não foram reproduzidas à escala.



Figura 2 – Modelo da câmara hidro-pneumática

No interior da câmara hidro-pneumática foi instalada uma grelha (Figura 3), também amovível, com o objectivo de atenuar as oscilações no seu interior.

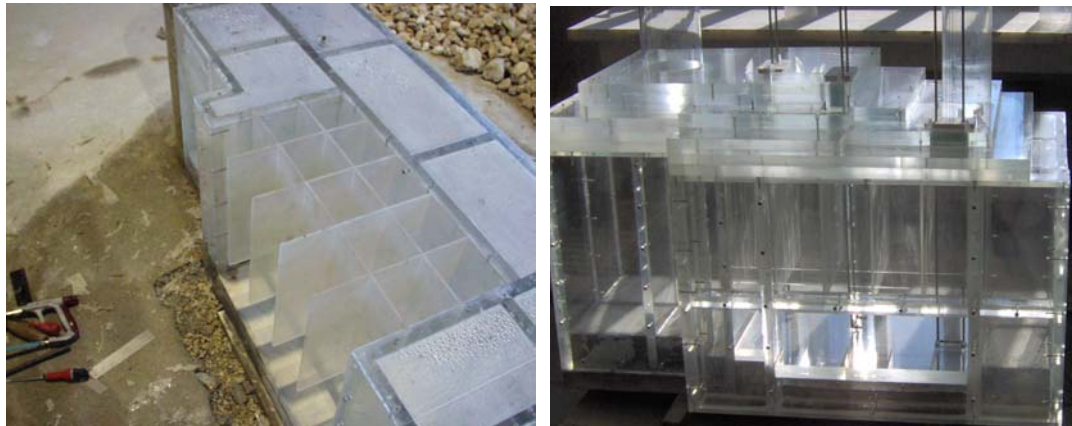


Figura 3 – Grelha instalada no interior da câmara hidro-pneumática.

A conduta de admissão/exaustão de ar ao módulo de alojamento da turbina permite simular das condições de obstrução total e fluxo livre, tal como se mostra na Figura 4.

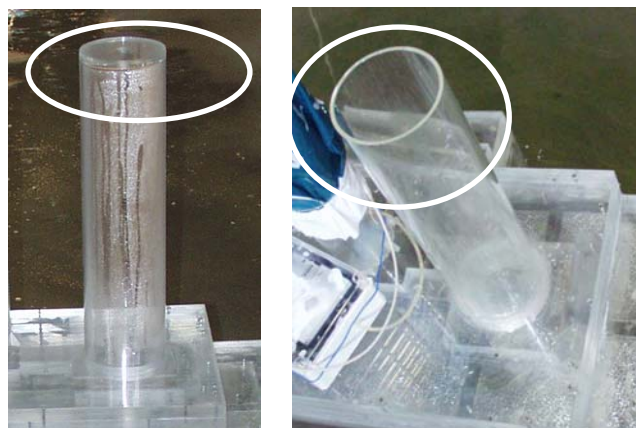


Figura 4 – Passagem de ar obstruída (esquerda) e desobstruída (direita).

O modelo foi implantado no Tanque de Ondas Irregulares do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC, de 8 m por 20m, equipado com um gerador móvel de ondas irregulares, do

tipo pistão, com 6.0 m de comprimento (Figura 5). O fundo em frente à câmara era formado por rampas de inclinações fixas de: 1.5% entre as profundidades, no protótipo, de -10 m (ZH) a -13 m (ZH) e de 7% entre as profundidades de -13 m (ZH) a -17 m (ZH), respectivamente. O batedor encontrava-se numa das extremidades do tanque, a 13 m do modelo, tendo sido construída, na extremidade oposta, uma praia de cascalho de forma a reduzir as reflexões.

O modelo foi colocado sobre um prato rotativo de forma a tornar fácil a alteração do ângulo de incidência da agitação marítima (ver Figura 5). Este prato foi depois revestido com argamassa de modo a não influir no escoamento.



Figura 5 – Tanque de ensaios e prato rotativo onde se encontra modelo da Central.

## 2.2. Instrumentos de medição

A Central foi dotada de todos os dispositivos que permitiam a recolha de dados relativos a pressões de ar e níveis de água no seu interior, como se mostra na Figura 6.

Os instrumentos utilizados nas medições de nível de água no interior da câmara foram sondas de condutância, que permitem a medição de variações rápidas de nível, como se mostra na Figura 7. Foram colocadas três sondas no interior da câmara, uma junto à entrada (S1), outra no centro (S2) e outra mais próxima da câmara de ar (S3). Foram ainda colocadas duas sondas de nível no exterior, uma junto ao batedor para controlo da agitação gerada e outra junto à obra (SE).

Para a medição da pressão do ar no interior da câmara utilizaram-se transdutores de pressão ligados, por tubo flexível, a tomadas de pressão colocadas em dois pontos do tecto da câmara hidro-pneumática: uma no seu interior (SP1) e outra junto ao circuito de saída/entrada de ar nessa câmara (SP2), de acordo com as indicações recebidas do cliente. O comprimento dos tubos de ligação foi reduzido ao mínimo de forma a não introduzir amortecimentos excessivos nas flutuações do sinal.

A colocação das sondas no interior da câmara foi feita de modo a que a medição não fosse afectada pela agitação exterior e a que permitisse a medição da maior amplitude possível do nível. Assim, foram colocadas sondas que distavam 6 a 8 cm do fundo da câmara hidro-pneumática e que registavam variações de nível desde essa altura até ao extremo superior da câmara. Garantiu-se que a estanquidade da Câmara não era afectada pela colocação das sondas, tendo os orifícios de passagem dos respectivos suportes sido devidamente selados.

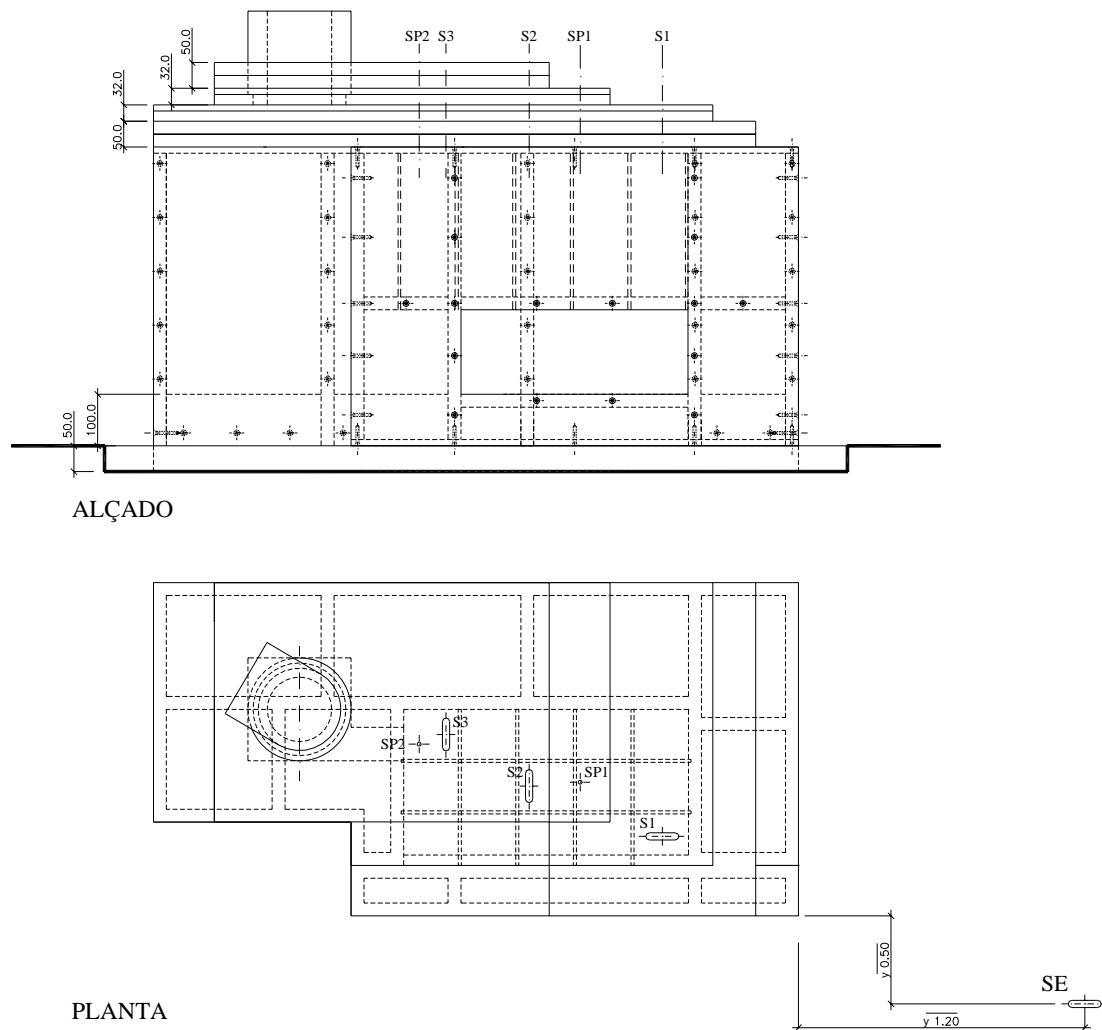


Figura 6 – Localização dos sensores de pressão (SP1 e SP2) e das sondas no interior da Central (S1, S2 e S3) e da sonda colocada junto à obra (SE).

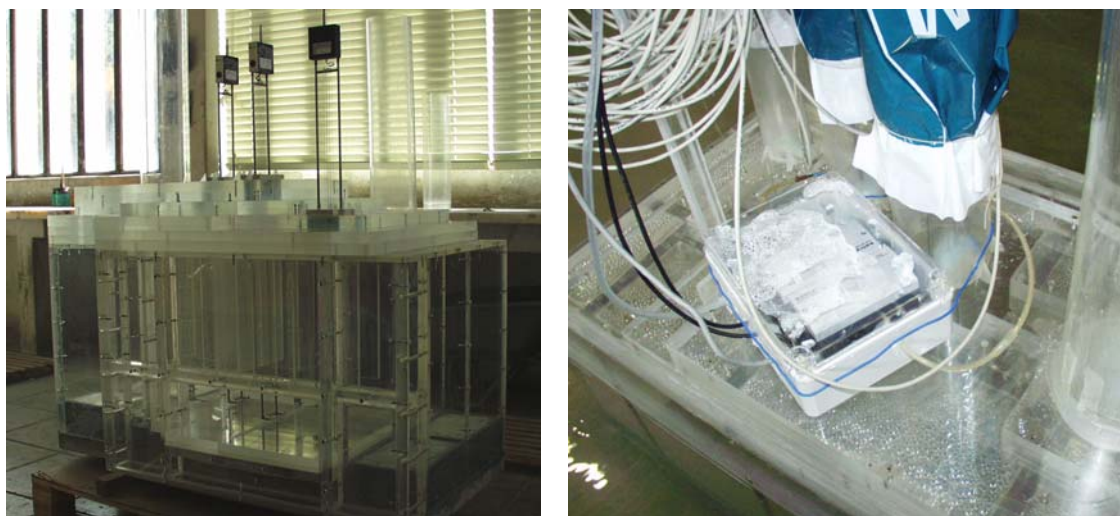


Figura 7 – Aspecto do sistema de sondas e de sensores de pressão no interior do modelo.

### 2.3. Condições de ensaios

As condições reproduzidas nos ensaios foram as seguintes:

- Três níveis de maré:
  - +3,5 m (ZH);
  - +2,0 m (ZH);
  - +0,5 m (ZH);
- Dezoito condições de agitação incidente, correspondente a agitação irregular com espectro empírico de JONSWAP:
  - Três períodos de pico ( $T_p$ ) de 8, 12 e 16 s;
  - Seis alturas de onda significativas ( $H_s$ ) de 1 metro até 6m, de 1 em 1 m;
- Quatro direcções de incidência da agitação (ver Figura 8):
  - 90°;
  - 60°;
  - 30°;
  - 0°;
- Duas condições de passagem de ar da câmara de ar:
  - completamente obstruída;
  - completamente desobstruída.

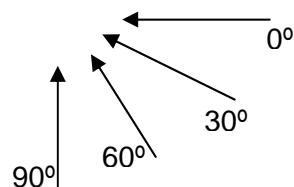
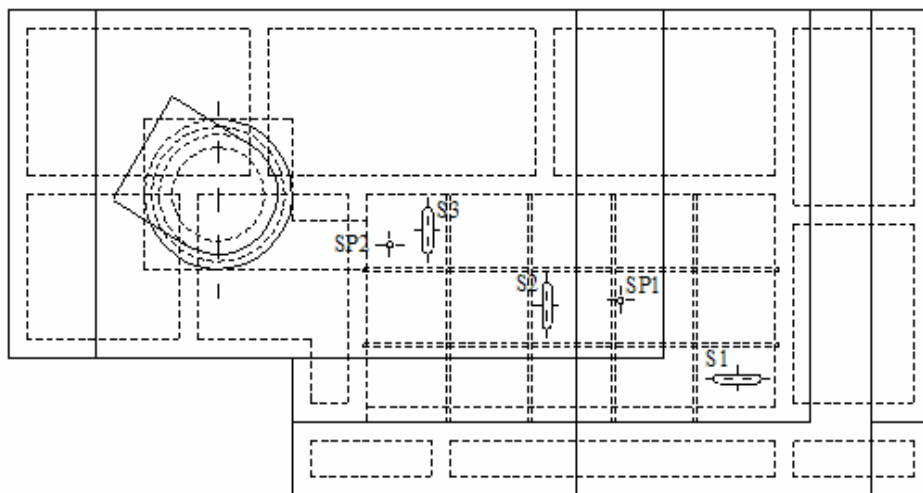


Figura 8 – Rumos ensaiados.

Estas condições de passagem de ar correspondem aos limites de funcionamento da Central. A obstrução total da passagem de ar (no protótipo) é previsível em casos onde possa ocorrer a entrada de água no módulo da turbina.

## 2.4. Procedimento dos ensaios

O procedimento utilizado nos ensaios iniciava-se pela calibração das sondas e colocação do nível de maré a ensaiar. A sequência de ensaio para cada nível, rumo e condições de entrada e saída de ar fixas, iniciava-se pelo período mais curto, varrendo-se todas as alturas de onda significativas. No final de cada ensaio e antes de iniciar o ensaio seguinte, retomava-se a situação de repouso no tanque.

A mudança de direcção de propagação da agitação era feita por rotação do modelo. Normalmente, após a rotação do modelo verificava-se a estanquidade da Central e iniciavam-se os ensaios com a saída e entrada de ar totalmente obstruídas, seguidos dos ensaios com a saída e entrada de ar totalmente desobstruídas.

Cada ensaio teve uma duração de 600s, o que corresponde a aproximadamente 55 minutos no protótipo, à taxa de aquisição de 25 Hz, obtida através do programa SAM. Os sinais eram adquiridos e guardados num ficheiro que continha informação simultânea de todos os instrumentos, isto é, dos dois sensores de pressão e das cinco sondas.

Os resultados dos ensaios foram sendo analisados à medida que estes se realizavam. A análise inicial era feita através da visualização do registo, anotando-se irregularidades, tais como ruído excessivo ou valores espúrios e, caso fosse necessário, procedia-se à repetição dos ensaios.

## 3. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos nos 432 ensaios foram analisados, quer simultaneamente à realização dos ensaios, quer posteriormente. A análise posterior foi feita nos domínios do tempo e da frequência.

### 3.1. ANÁLISE SIMULTÂNEA À REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios com a entrada e saída de ar totalmente obstruída permitiram detectar alguns comportamentos interessantes e não esperados, como a entrada de ar na câmara, que ocorreu em alguns ensaios. Na Figura 9 são visíveis as bolhas de ar que penetravam no meio líquido, após a entrada de ar na câmara.



Figura 9 – Entrada de ar na câmara, num ensaio para o rumo de 90°, baixa-mar,  $T_p = 16$  s e  $H_s = 6$  m, com entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

A verificação do comportamento do modelo permitiu detectar que este fenómeno ocorria sempre que a cava de uma onda descia abaixo do nível superior da entrada da câmara hidro-pneumática e a pressão no seu interior era muito baixa. Nestes casos dava-se a entrada de ar na câmara, que fazia com que o nível no seu interior descesse e a pressão aumentasse,

como é visível na Figura 10, para o tempo de ensaios de aproximadamente 110 s. Isto ocorria especialmente para os menores níveis de maré e para os maiores períodos e maiores altura de onda significativa. Também em alguns ensaios, especialmente para os de maiores alturas de onda, onde a pressão mínima se mostrou limitada inferiormente, correspondendo a um nível mínimo no interior da câmara e não a uma limitação do instrumento de medição. No Quadro 1 apresenta-se um resumo dos valores de alturas de onda significativa a partir dos quais entrou ar pela entrada da câmara hidro-pneumática.

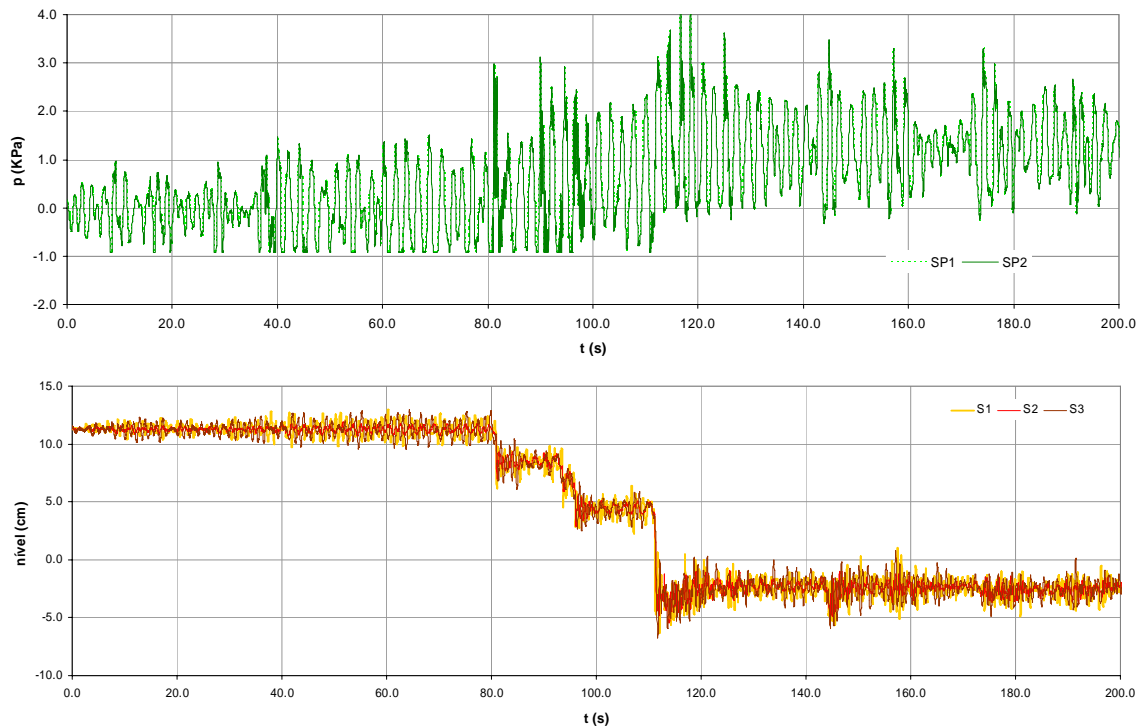


Figura 10 – Registo temporal de um ensaio para o rumo de 90°, nível médio de maré  
 $T_p = 12$  s e  $H_s = 6$  m, com entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

Quadro 1 - Alturas de onda significativa a partir da qual entra ar pela entrada da câmara hidro-pneumática.

Nível de maré	$T_p$ (s)	$H_s$ (m) por cada direcção de propagação			
		90°	60°	30°	0°
BM	8s	3	3	5	6
	12s	3	3	4	5
	16s	3	3	3	5
NM	8s	5	5	-	-
	12s	4	4	-	-
	16s	4	4	-	-
PM	8s	-	5	-	-
	12s	6	4	-	-
	16s	4	5	-	-

Nos ensaios com a entrada e saída de ar totalmente desobstruídas verificou-se que ocorria entrada de água na câmara de ar em alguns ensaios. A verificação do comportamento do modelo permitiu detectar que este fenómeno ocorria não por uma entrada directa de água no

canal de entrada da câmara de ar, devido à elevação do nível no interior da câmara hidro-pneumática, mas sim pela entrada de um borrifo de água e ar, quando o nível na câmara era elevado e havia um forte movimento de ar na parte superior da câmara. Este fenómeno normalmente não se pode detectar pela análise dos sinais medidos, excepto no caso em que a quantidade de água que passava na zona de tomada de pressão era tal que entupia este canal, deixando de se ter medições válidas no sensor de pressão aí localizado (SP2 da Figura 6), tal como se vê na Figura 20 aos 185 s de tempo de ensaio.

Verificou-se que a entrada de água na câmara de ar ocorria especialmente para os ensaios de preia-mar e para os maiores períodos de pico e alturas de onda significativas. No Quadro 2 apresenta-se um resumo dos valores de alturas de onda significativa a partir da qual entrou água, em forma de 'spray' ou lâmina de água, pela entrada da câmara de ar.

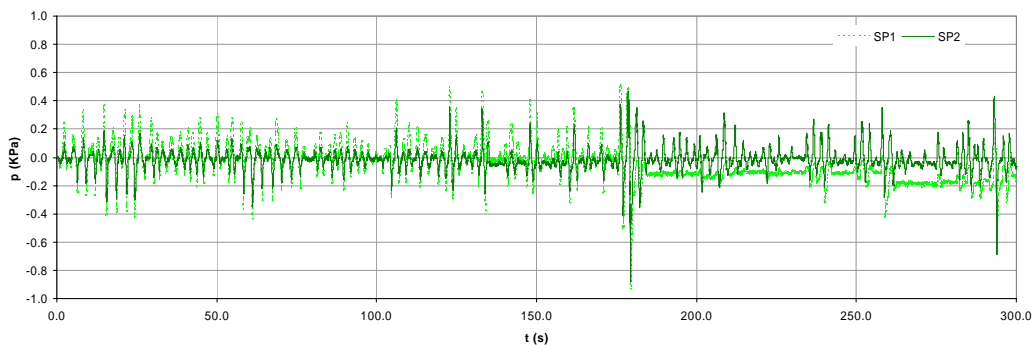


Figura 11 – Registo temporal de um ensaio para o rumo de 90º, baixa-mar,  $T_p = 16$  s e  $H_s = 5$  m, com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas.

Quadro 2 - Alturas de onda significativa a partir da qual entre água em forma de 'spray' ou lâmina de água pela entrada da câmara de ar.

Nível de maré	$T_p$ (s)	$H_s$ (m) por cada direcção de propagação			
		90º	60º	30º	0º
BM	8s	4	5	6	-
	12s	3	4	5	-
	16s	3	4	5	-
NM	8s	5	-	-	-
	12s	4	5	6	-
	16s	3	5	6	-
PM	8s	4	4	-	-
	12s	3	3	4	6
	16s	2	2	3	4

### 3.2. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A análise no domínio do tempo permite avaliar as séries temporais dos sinais medidos e as amplitudes máximas da variação do nível e das pressões no interior da câmara hidro-pneumática.

O valor das amplitudes máximas foi calculado através da média do 1/10 das ondas mais altas, evitando assim que este valor fosse muito influenciado por algum valor espúrio do sinal. Embora estas amplitudes não possibilitem uma análise detalhada da variação dos sinais, permitiram verificar o andamento destas grandezas e identificar problemas nos sinais.

Da análise do valor de amplitude máxima do sinal de pressão e de nível dos ensaios realizados, verificou-se que o comportamento diferia consoante as condições de entrada e saída de ar.

Para passagem de ar totalmente desobstruída, verificou-se que ocorria maior agitação na sonda localizada junto à entrada da câmara de ar, diminuindo com a aproximação à entrada da câmara hidro-pneumática. Ou seja, a sonda S1 foi a que apresentou menor valor da amplitude máxima e a sonda S3 a que apresentou o maior valor. No entanto, a pressão nos dois sensores era da mesma ordem de grandeza. Na Figura 12 apresenta-se uma curva de amplitudes máximas para um ensaio para o rumo de 30°, com nível médio de maré onde se pode observar esse comportamento.

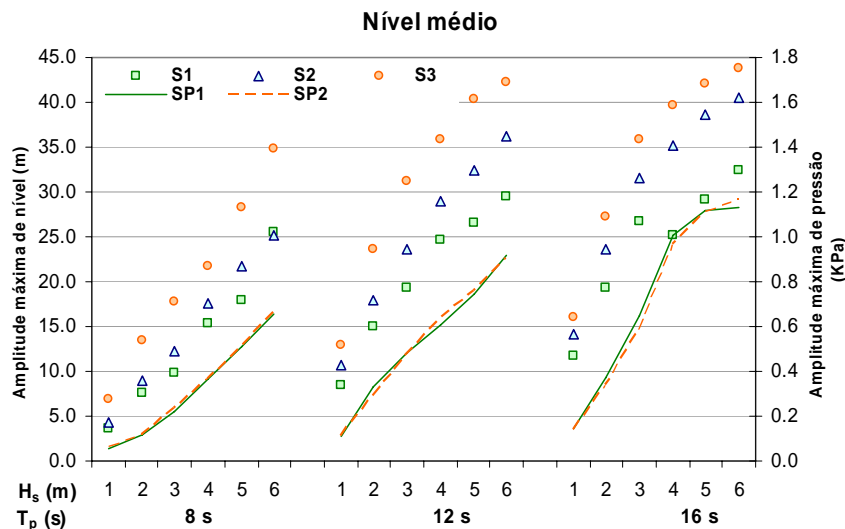


Figura 12 – Amplitudes máximas de nível e pressão no interior da câmara para o rumo de 30°, nível médio e com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas.

Para passagem de ar totalmente obstruída, verificou-se muito menor agitação na sonda localizada no centro da câmara hidro-pneumática do que nas sondas S1 e S3, que apresentam valores semelhantes, como se vê no exemplo representado na Figura 13. Isto ocorria devido aos movimentos ressonantes que ocorriam nas duas direcções perpendiculares da câmara. Pela sua localização, a sonda S2 encontrava-se num nó e apenas sentia os movimentos de êmbolo da Câmara, que eram significativamente menores. Tal como referido, valor da pressão nos dois sensores era exactamente o mesmo.

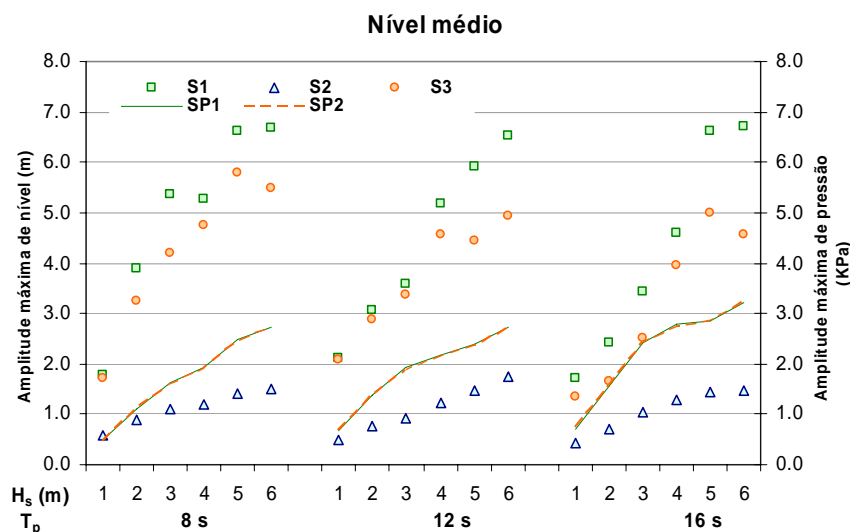


Figura 13 – Amplitudes de nível e pressão no interior da Câmara para o rumo de 30°, nível médio e com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas.

Além do comportamento ressonante, que se observa de forma muito mais acentuada com a entrada e saída de ar totalmente obstruídas, verifica-se uma forte redução do valor de pressão nos ensaios com a entrada e saída de ar totalmente desobstruídas, tal como seria de esperar. O valor da pressão nos dois sensores é exactamente o mesmo para qualquer das duas condições testadas de passagem de ar, o que significa que a Câmara se comportava como um pleno do ponto de vista de pressões.

A fim de analisar a variação do valor da amplitude máxima de sinal de nível e de pressão no interior da Câmara para diferentes níveis e rumos, apresenta-se na Figura 14 e na Figura 15, o valor da amplitude máxima do nível medido na sonda S2 e de pressão medida no sensor de pressão SP1, para o caso de passagem de ar obstruída e desobstruída respectivamente.

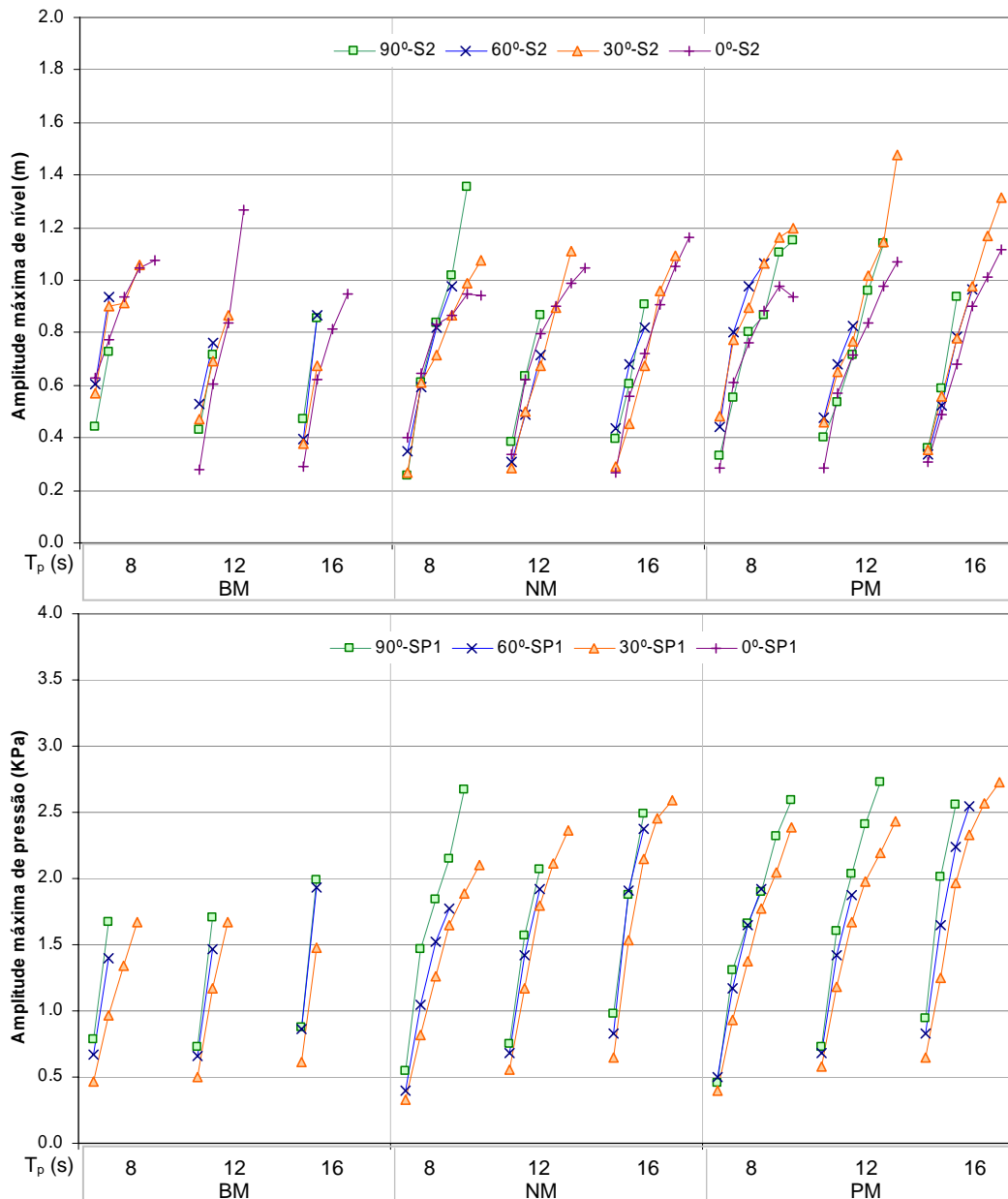


Figura 14 – Amplitudes máximas de nível e pressão no interior da Câmara com entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

Na figura acima apresentam-se apenas os valores correspondentes a ensaios onde não ocorreu entrada de ar na Câmara hidro-pneumática, já que esta entrada leva a um aumento de

pressão e a uma diminuição do nível, tal como foi referido anteriormente, alterando o valor das amplitudes máximas e levando a que esta análise deixe de ter significado físico.

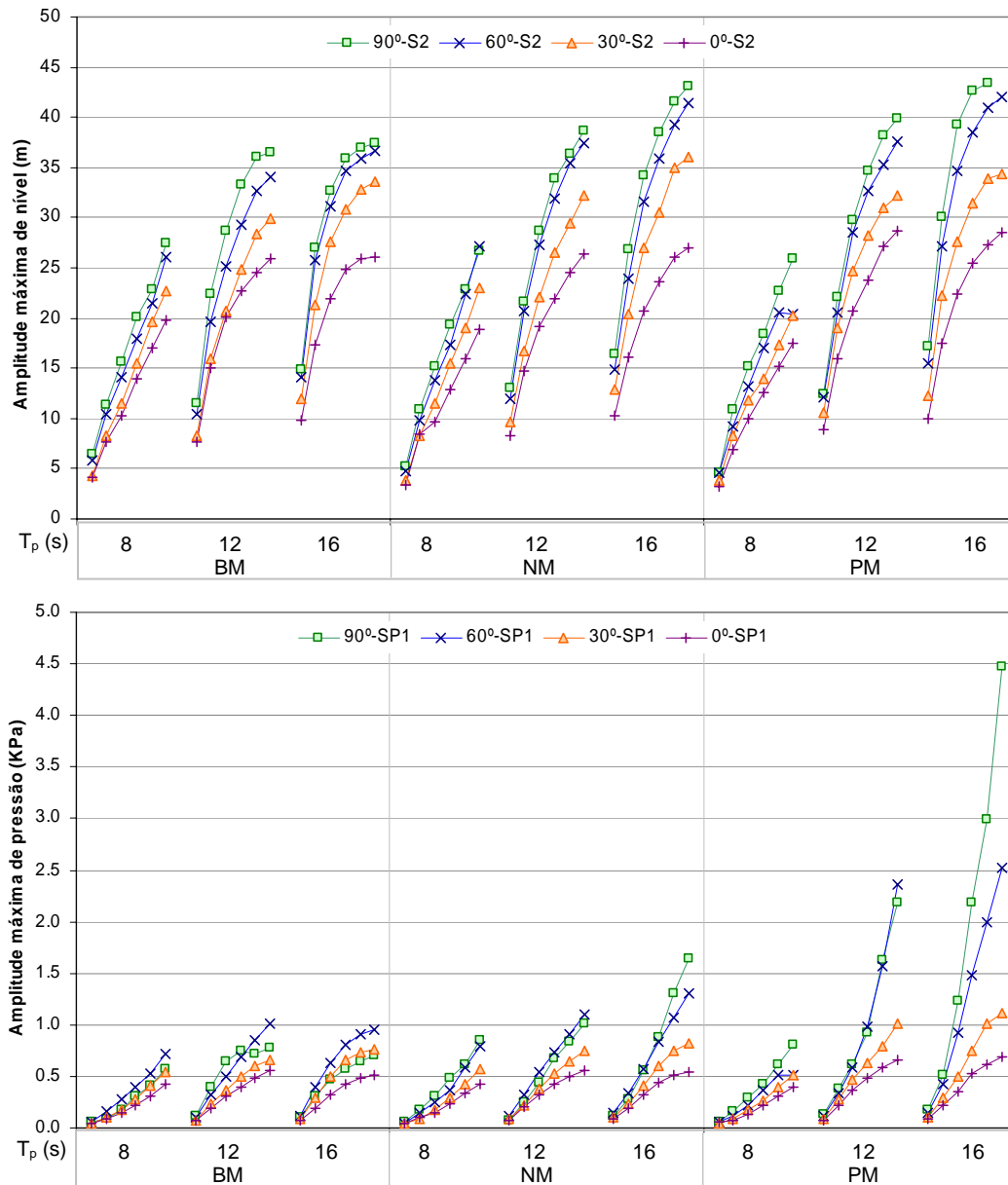


Figura 15 – Amplitudes máximas de nível e pressão no interior da Câmara com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas.

Da análise comparativa do valor da amplitude máxima de sinal de nível e de pressão no interior da Câmara para diferentes condições de agitação incidente, verificou-se que estes valores aumentavam com a altura de onda significativa, o período de pico e o nível de maré.

Verifica-se ainda que estes valores aumentavam com o ângulo de incidência da agitação, excepto para o caso dos rumos de 90° e 60°. Estes rumos apresentam valores muito próximos, e inclusive, para baixa-mar, os valores da amplitude máxima de pressão para o rumo de 60° são superiores. Este comportamento foi observado durante os ensaios, verificando-se que, para alguns ensaios com baixa-mar e com o rumo de 60°, a reflexão da agitação incidente na parede frontal da Central fazia com que a variação da pressão no interior da Câmara fosse superiores às do rumo de 90°.

### 3.3. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A análise no domínio da frequência foi efectuada através da análise dos espectros dos sinais provenientes de cada ensaio e da análise das funções de transferência entre o sinal da agitação no exterior da Câmara e das pressões no seu interior.

Os espectros dos sinais permitiram verificar quais as frequências de maior energia em cada ensaio. Tal como para a análise no tempo, também aqui se verificou que o comportamento diferia consoante as condições de entrada e saída de ar da câmara de ar.

Da análise dos espectros dos sinais provenientes das sondas nos ensaios com entrada e saída de ar totalmente obstruídas, pode observar-se o que foi descrito anteriormente: devido à ressonância na Câmara, as sondas S1 e S3 apresentavam energia significativa em frequências diferentes da agitação incidente. No entanto a sonda S2 e os sensores de pressão tinham a sua maior energia na frequência da onda incidente. Isto leva a concluir que as demais frequências que se instalaram em alguns pontos da Câmara, e que provêm certamente dos seus modos ressonantes, não influem o seu comportamento no que toca a pressões. Este é afectado apenas pelo movimento de subida e descida do nível de água no interior da Câmara e que é medido na sonda S2.

Este comportamento pode ser observado na Figura 16, onde se apresenta o espectro dos sinais medidos nas sondas no interior e exterior da Câmara e nos sensores de pressão num ensaio para o rumo de 90°, 16 s e 2 m de altura de onda significativa, para entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

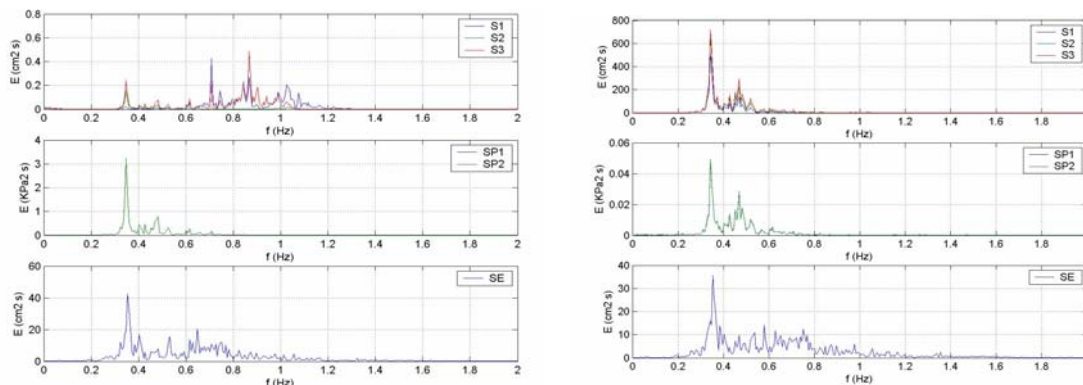


Figura 16 – Espectro em frequência de um ensaio com agitação incidente de preia-mar, rumo de 90°,  $T_p = 16$  s e  $H_s = 2$  m e com entrada e saída de ar totalmente obstruídas (esquerda) e desobstruídas (direita).

Já no caso dos ensaios com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas, os espectros dos sinais provenientes das sondas apresentavam um comportamento semelhante aos dos sensores de pressão, com o pico na frequência da onda incidente. Este comportamento pode ser observado na Figura 16, onde se apresenta o espectro dos sinais medidos nas sondas no interior e exterior da Câmara e nos sensores de pressão num ensaio para as mesmas condições de agitação incidente que o apresentado na Figura 16, mas para entrada e saída de ar totalmente desobstruídas.

Da análise dos espectros dos sinais dos ensaios realizados, verifica-se ainda que aparece uma resposta energética na pressão no interior da câmara no período próximo de 12s (frequência de 0.46 Hz), para os ensaios com o período de pico incidente de 16s (Figura 16) e nos ensaios com período de pico incidente de 8s para passagem de ar desobstruída, como é o caso do exemplo que se apresenta na Figura 17.

As funções de transferência entre o sinal da agitação no exterior da Central e das pressões no seu interior foram feitas considerando que o sistema era linear. Neste caso, a função de transferência é igual à razão entre o espectro cruzado do sinal de entrada e de saída do sistema e o espectro de entrada.

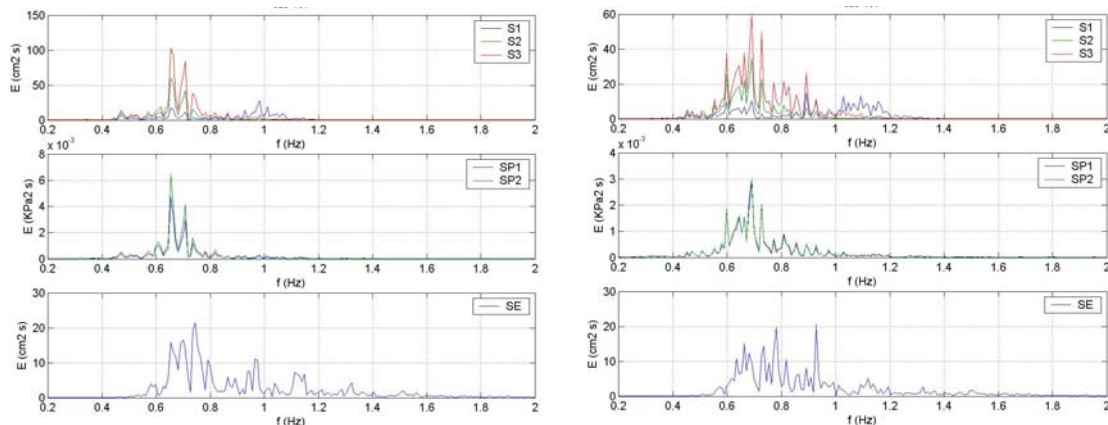


Figura 17 – Espectro em frequência de um ensaio com agitação incidente com entrada e saída de ar totalmente desobstruídas, rumo de 90°,  $T_p = 8$  s,  $H_s = 2$  m e com de preia-mar (esquerda) e nível médio (direita).

Nestes ensaios, o sinal de entrada corresponde à excitação do sistema, ou seja, ao sinal da agitação medida na sonda exterior localizada junto ao modelo. O sinal de saída, que corresponde à resposta do sistema, é, neste caso, a pressão no interior da Câmara.

Da observação do comportamento do modelo durante os ensaios, verificou-se que o sistema em estudo não era linear, como se pressupõe no cálculo da função de transferência. De facto, a agitação medida na sonda colocada na zona exterior do modelo é claramente influenciada por fenómenos não lineares que ocorrem no tanque, tais como a difracção ao redor do modelo e a reflexão das fronteiras. Não sendo o sistema linear, a função de transferência irá apenas permitir analisar qualitativamente a influência de cada parâmetro da agitação na resposta do sistema e verificar quais as frequências que são amplificadas quando o sistema é excitado, o que são resultados suficientemente importantes para justificar esta análise.

Para estudar a influência das características da agitação de onda incidente na resposta do sistema, procedeu-se à comparação das funções de transferência de sinais para diferentes valores de: altura de onda significativa; período de pico; nível de maré; rumo e condição de passagem de ar da câmara hidro-pneumática para a zona da turbina. Da Figura 18 à Figura 22 apresenta-se a comparação de funções de transferência para passagem de ar completamente obstruída e para valores diferentes das variáveis citadas. Nestas figuras indica-se ainda as frequências correspondentes aos valores em protótipo dos períodos de pico ensaiados.

Como se pode observar na Figura 18, a variação da altura de onda significativa da agitação incidente não se repercutiu nos valores obtidos das funções de transferência. Ou seja, a resposta do sistema não parece depender do valor da altura de onda significativa da excitação. Apenas para frequências acima de 0.9 Hz (períodos inferiores a 6s no protótipo), se verifica uma redução da resposta com o aumento da altura de onda.

Observa-se ainda uma amplificação da resposta na gama de frequências de interesse (períodos entre 8s e 16s, que correspondem a frequências entre 0.30 e 0.70 Hz), com o máximo localizado na proximidade dos 12 s (valor no protótipo), excepto para frequências da ordem de 0.40 Hz, 0.60 Hz e 0.65 Hz, para as quais ocorre frequentemente uma diminuição no valor da função de transferência.

O mesmo ocorre com a variação do período de pico (Figura 19) e com a variação do nível de maré (Figura 20), embora o nível leve a pequenas alterações do valor das funções de transferência, que se traduzem por ligeiras alterações das frequências de resposta do sistema. A variação do rumo da agitação incidente (Figura 21) só leva a uma redução da resposta para rumos inferiores a 60°. Para o rumo 0°, além da redução do valor da resposta, leva ainda a um deslocamento dos respectivos picos.

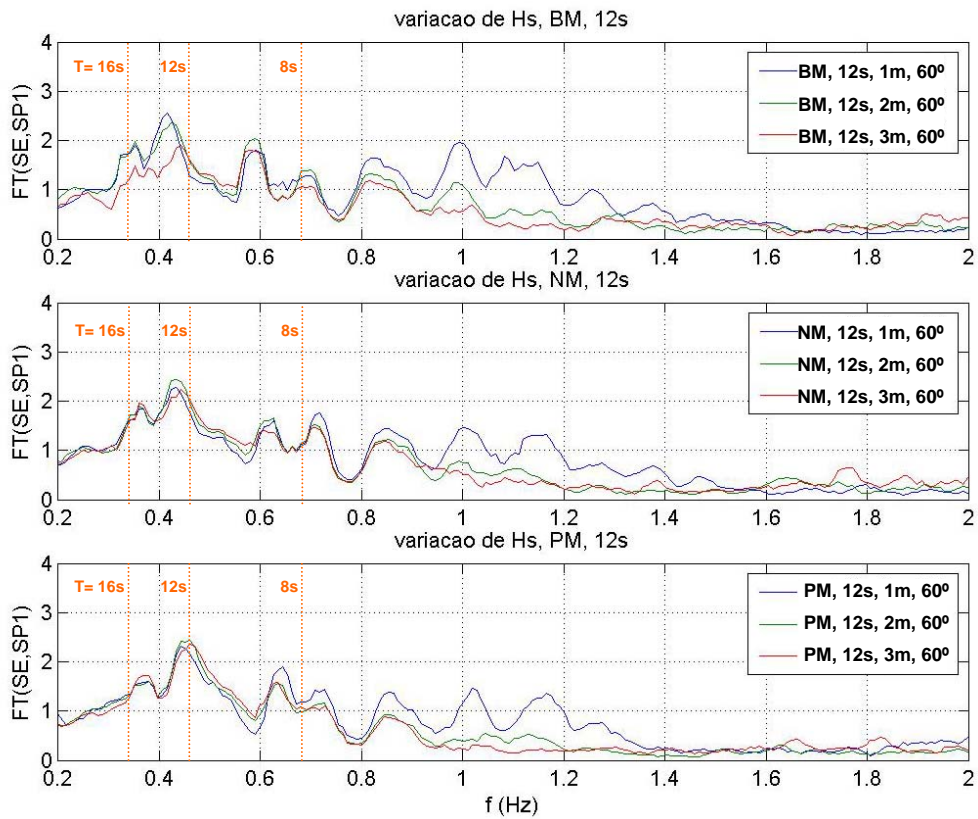


Figura 18 – Função de transferência para diferentes valores de  $H_s$  para rumo de  $60^\circ$  e entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

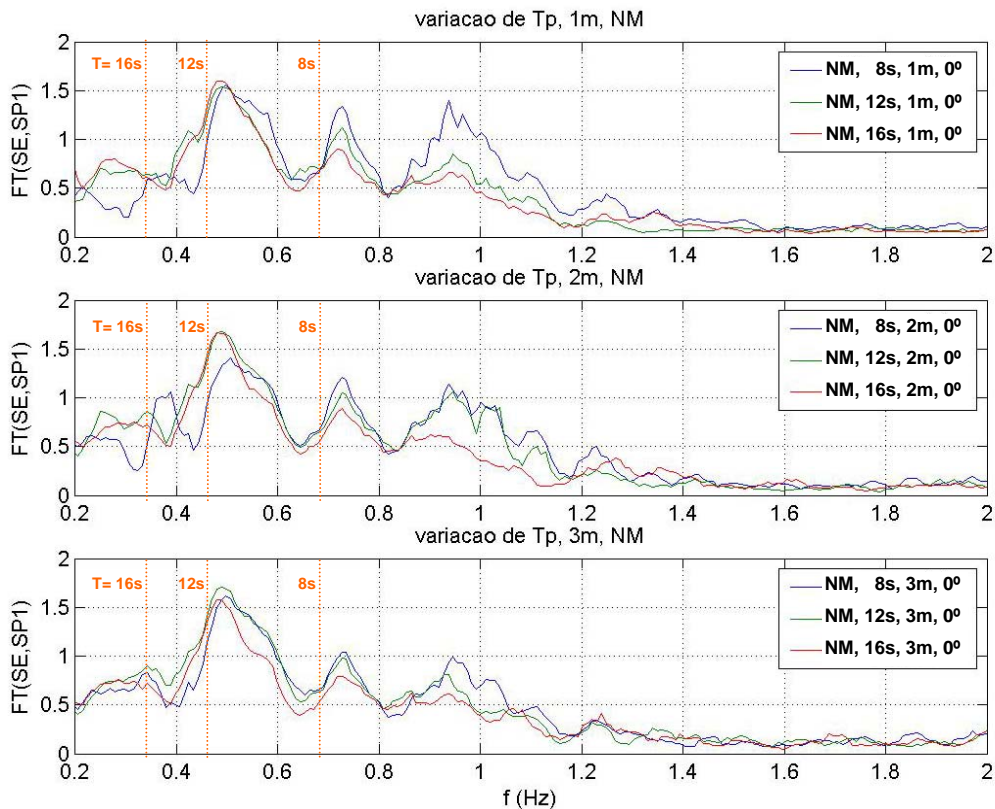


Figura 19 – Função de transferência para diferentes valores de  $T_p$  para rumo de  $0^\circ$  e entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

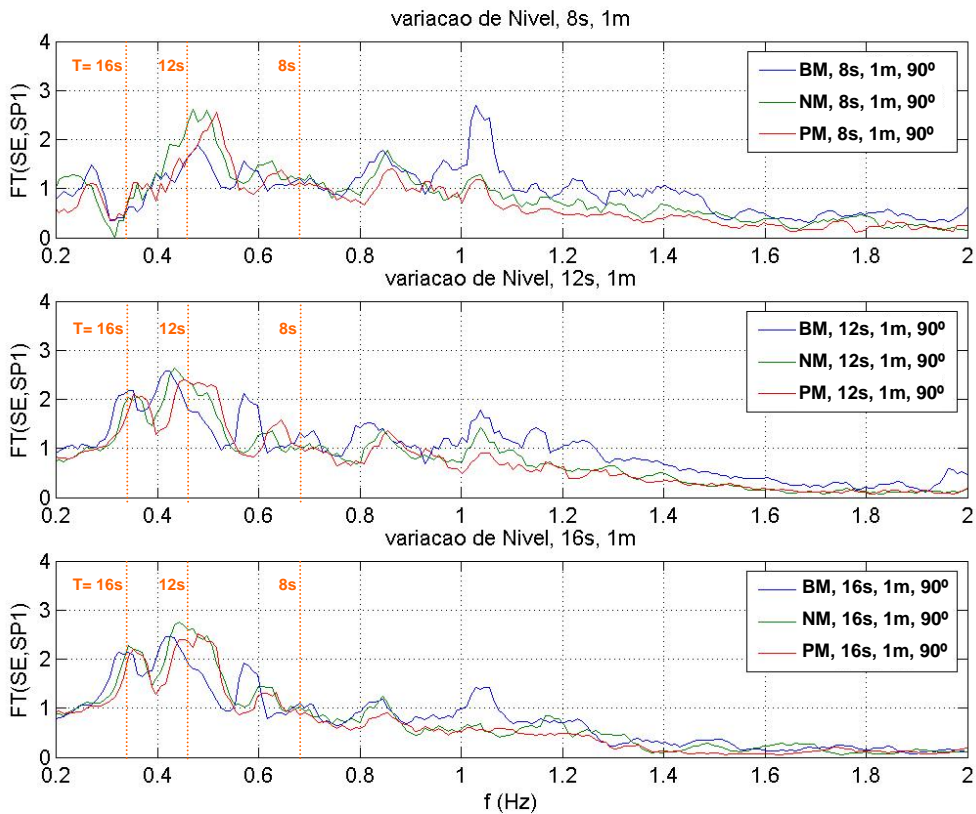


Figura 20 – Função de transferência para diferentes valores de nível de maré para rumo de 90° e entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

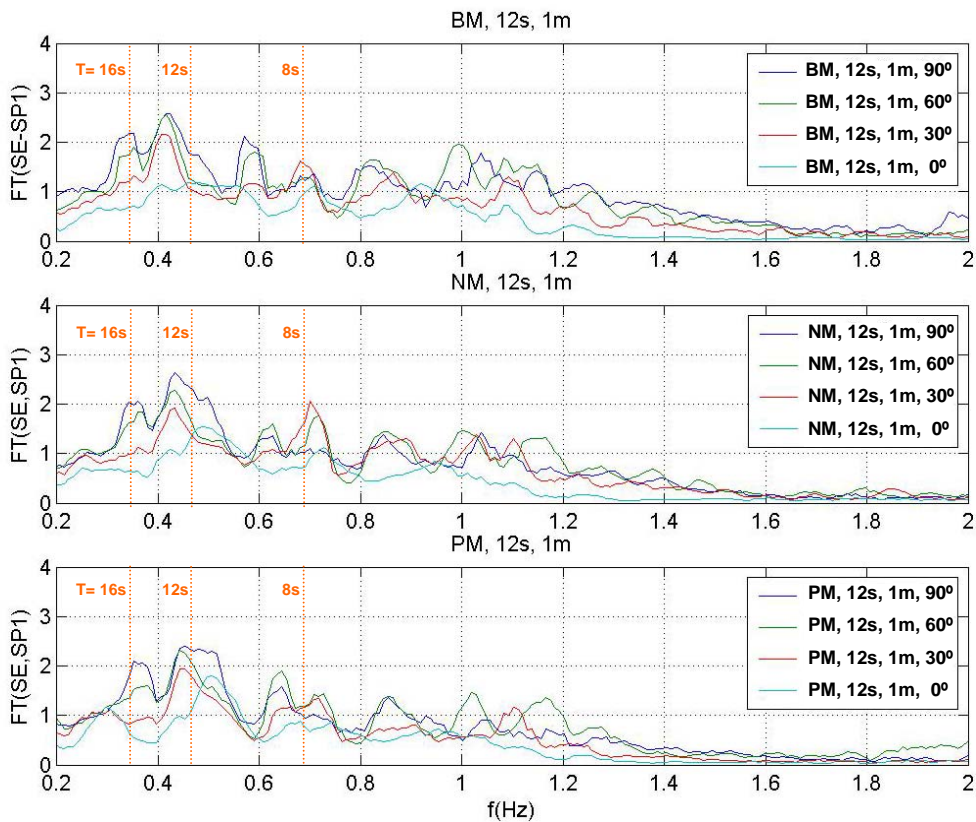


Figura 21 – Função de transferência para diferentes valores de rumo, para  $T_p=12s$  e entrada e saída de ar totalmente obstruídas.

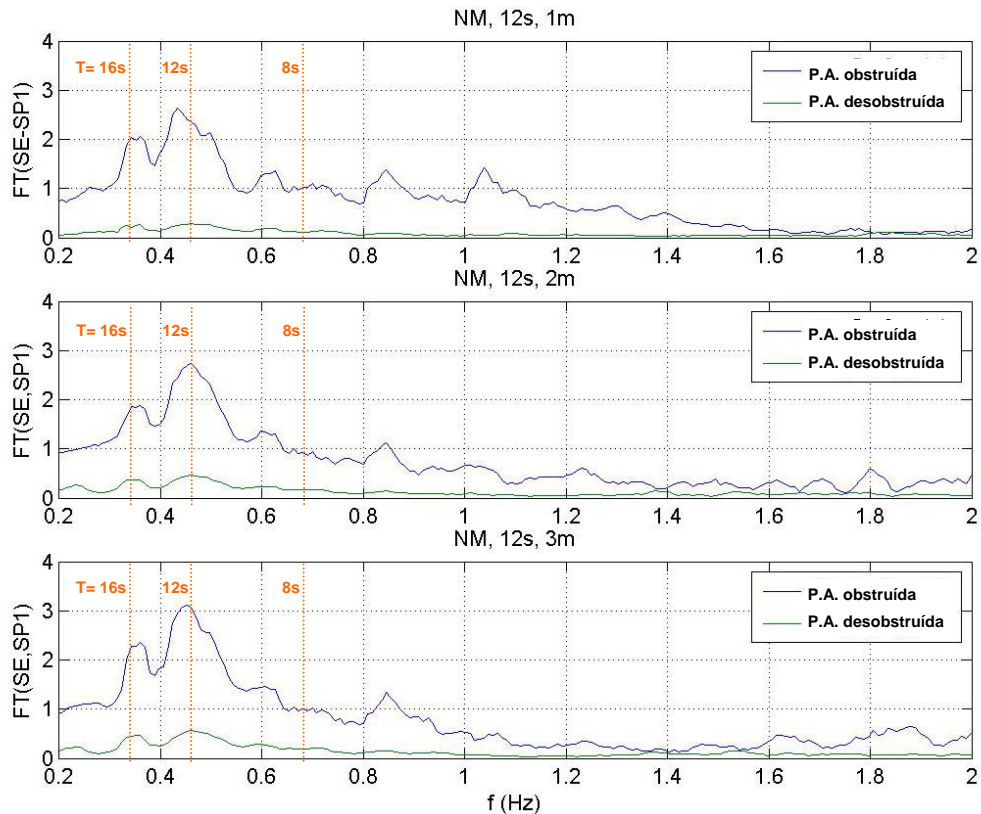


Figura 22 – Função de transferência para diferentes condições de passagem de ar (P.A.) da câmara hidro-pneumática para a zona da turbina, para nível médio de maré, rumo de 90° e  $T_p=12s$ .

A variação da condição de passagem de ar da câmara hidro-pneumática para a zona da turbina de obstruída para desobstruída, leva a uma forte redução da resposta (pressão no interior da câmara), tal como seria de esperar. No entanto, o andamento da curva é em tudo semelhante, ou seja, verifica-se uma amplificação da resposta na gama de frequências de interesse, centrada no período próximo de 12 s (valor referido ao protótipo), excepto para as frequências da ordem de 0.40 Hz, 0.60 Hz e 0.65 Hz, para as quais ocorre frequentemente uma diminuição no valor da função de transferência.

#### 4. CONCLUSÕES

Este artigo descreve os ensaios realizados, em modelo físico tridimensional, de uma Central de Energia das Ondas, do tipo Coluna de ar oscilante, no âmbito do projecto de investigação CEODOURO, com o objectivo de analisar a resposta hidráulica da Central à agitação incidente. Este modelo, à escala de 1:30, corresponde a uma unidade esquemática com características semelhantes ao protótipo que se encontra em estudo pela CONSULMAR para o molhe norte da Foz do Douro, obra sob a jurisdição do IPTM.

Realizaram-se 432 ensaios para diferentes ângulos de incidência da agitação, períodos de pico e alturas de onda significativa e diferentes condições de passagem de ar da câmara hidro-pneumática para a zona da turbina. Nestes ensaios foram medidos níveis de água e pressão de ar em diferentes pontos no interior da Câmara.

Os resultados dos ensaios foram analisados nos domínios do tempo e da frequência. Da análise efectuada, podem retirar-se as seguintes conclusões principais:

- Nos ensaios sem passagem de ar pela turbina ocorria entrada de ar na câmara, com a consequente descida do nível e aumento da pressão do ar no seu interior, especialmente



## 4<sup>a</sup>s Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

para os menores níveis de maré e para os maiores períodos e maiores altura de onda significativa;

- Nos ensaios com a passagem de ar totalmente desobstruídas ocorria entrada de água na zona de acesso à turbina para os ensaios de preia-mar e para os maiores períodos de pico e alturas de onda significativas;
- A resposta ao sistema na gama de frequências de interesse (que corresponde a períodos entre os 8 e os 16s), não parece muito influenciada pela posição dos picos de excitação, ocorrendo amplificação em toda a gama de interesse, com um máximo na proximidade dos 12 s. No entanto, em algumas frequências pontuais, correspondentes aos períodos no protótipo da ordem de 8.5s, 9s e de 14 s, verifica-se frequentemente uma redução da resposta;
- A resposta ao sistema na gama de frequências de interesse (que corresponde a períodos entre os 8 e os 16s), não se altera com a variação da altura de onda significativa e do período de pico e sofre pequenas alterações com a variação do nível de maré. A variação do rumo leva a uma redução da resposta do sistema para rumos inferiores a 60° e para o rumo de 0° verificou-se ainda um deslocamento dos picos de resposta.