



DESENVOLVIMENTO, CONCEPÇÃO, PROJECTO E ENSAIO DE UM ATENUADOR FLUTUANTE DE ONDULAÇÃO

Bernardo Plantier; Patrick Lindley; Luís Vasconcelos Dias

blantier@lindley.pt, patrick@almarin.es, lvdias@lindley.pt

Resumo e Objectivos

A LINDLEY é uma empresa da área marítimo-portuária que tem actividade desde 1930.

Após ter sido um distribuidor de equipamento industrial e portuário, começou a fabricar equipamento em Portugal sob licença de alguns parceiros europeus tendo instalado, entre 1996 e 2016, mais de 12.000m de pontões e atenuadores de ondulação flutuantes em betão reforçado a aço com núcleo de polistireno expandido.

Em 2010, no âmbito do processo de internacionalização iniciado em 2004, deu início ao desenvolvimento dos seus próprios projectos de equipamentos flutuante. Para implementar esse desenvolvimento procedeu a uma reorganização interna criando um departamento técnico onde estabeleceu um programa de R&D, contratou quadros técnicos especializados e estabeleceu algumas parcerias com organismos de projecto, laboratórios e fornecedores de matérias-primas.

Ao longo dos últimos 12 anos investiu mais de 500k€ em investigação e desenvolvimento de modo a fornecer soluções em conformidade com as recomendações e normas do sector cumprindo com as bases de cálculo EUROCODE e AS3692.

O processo de desenvolvimento da gama própria teve início com estruturas em aço galvanizado por imersão a quente e estruturas simples em madeira reforçada a aço, teve como sequência os pontões em betão reforçado a aço e prosseguiu para as estruturas em alumínio extrudido. Devido à complexidade do processo e à imposição de que o mesmo fosse desenvolvido segundo processos estruturados e rigorosos, a gama de atenuadores de ondulação foi deixada para último lugar.

O objectivo principal deste projecto foi desenvolver uma gama de equipamentos destinados a atenuar ondulação de baixo período em zonas estuarinas e bacias semi-abrigadas.

Enquadramento e Decisão

Da experiência de mais de 25 anos a fabricar atenuadores de ondulação sob licença adquirimos uma vasta experiência e conceitos base, compilámos observações acerca do comportamento das unidades instaladas e registámos sugestões de clientes e dos nossos técnicos de montagem e assistência.

Ao decidirmos desenvolver a gama de atenuadores de ondulação, que designamos por QMF (Quebra-Mar Flutuante), quisemos que a mesma fosse feita com base num modelo matemático e algorítmico robusto, um cálculo estrutural bem suportado e validado por ensaios em tanque de ondas com um modelo à escala reduzida. Estes requisitos tinham por directriz comum a necessidade de podermos apresentar aos nossos parceiros e clientes bases rigorosas de selecção e dados objectivos do comportamento expectável das unidades.

Após discussão interna dos objectivos e prioridades, decidimos desenvolver este projecto em parceria com o WavEC (que nos apresentou um programa estruturado usando ferramentas de fiabilidade comprovada, como o OrcaFlex® e Wamit®) e com o LNEC (que nos garantia o rigor, experiência e meios para validar as diversas opções que queríamos testar).



Bases de Desenvolvimento

Para que o projecto pudesse ter uma base de desenvolvimento sustentada e comparável, decidimos desenvolver o projecto em duas fases, usando uma infraestrutura existente como base de validação do modelo matemático e, posteriormente, dos ensaios em tanque de ondas, permitindo depois a extrapolação dos resultados para a gama completa.

Face à importância do modelo matemático sustentado e da validação dos respectivos resultados por comparação com uma infra-estrutura existente, decidimos seleccionar uma instalação da qual tivéssemos informações rigorosas tanto na fase de concepção como nas fases de instalação e manutenção posterior.

A infra-estrutura seleccionada foi o atenuador de ondulação da Marina de Tróia, projecto desenvolvido em 2007, que consiste num conjunto de 240m de comprimento com 4m de largura e 1,8m de altura composto por doze módulos de 20m de comprimento, 4m de largura e 1,8m de altura amarrados por um sistema combinado de correntes de barlavento com troços de corrente de 40mm em elo de estai e corrente de 38mm em elo normal ligados a dois troços de corrente de 28mm em elo normal, e de correntes de sotavento com troços de corrente de 38mm em elo normal ligados a dois troços de corrente de 28mm em elo normal. As ancoragens de barlavento são formadas por duas poitas interligadas com peso seco de 15T cada e as ancoragens de sotavento são formadas por duas poitas interligadas com peso seco de 10T, em ambos os casos em betão armado.

A razão principal da selecção desta infra-estrutura foi o facto de a mesma ter sido concebida no âmbito de um projecto global que envolveu estudos de agitação e avaliação dos efeitos de heave, pitch e surge e estimativa da ondulação gerada por um fetch do quadrante N-NW com distância aproximada de 2,84km. Foi também um factor importante nesta decisão o facto de o sistema de amarração ter sido concebido à data por uma empresa parceira da LINDLEY (Black & Veatch), que calculou todas as cargas através de um algoritmo próprio, o que nos permitiria comparar os resultados do modelo matemático desenvolvido pelo WavEC com os dados reais do comportamento do atenuador existente que, ao cabo de 15 anos de instalação e manutenção adequada, cumpre satisfatoriamente as funções para as quais foi seleccionado.

Etapas do Projecto

Face às limitações orçamentais do projecto e dado que não seria possível realizar todas as tarefas numa única etapa, decidimos separar cronologicamente o projecto em duas fases, a saber:

- FASE I
 - utilizar os dados do projecto existente para validar o modelo matemático desenvolvido pelo WavEC para ondulações incidentes de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, ie. após correr o programa do WavEC para os dados físicos do local, comparar os resultados obtidos com os elementos recolhidos na realidade;
 - ensaiar, em tanque de ondas, um modelo à escala 1:20 construído com base nas cargas definidas pelo programa matemático, e verificar os resultados de atenuação para várias incidências e comprimentos de onda, para além do ensaio de diversas opções de altura dos modelos geométricos com o objectivo de validar os parâmetros teóricos dos modelos matemáticos;
 - utilizar os resultados do modelo matemático, devidamente validado pelos ensaios em tanques de ondas, para fazer o dimensionamento estrutural da nova unidade considerando um módulo de 20x4x1,8m (LxWxH), ie. determinar as características estruturais do novo modelo a partir das cargas produzidas pelo modelo matemático



- FASE II
 - uma vez validadas as várias etapas da FASE I, rever todos os cálculos efectuados, afiná-los e actualizá-los;
 - elaborar ábacos bi-dimensionais que permitam determinar o coeficiente de atenuação dadas as condições locais, assim como as cargas nas amarrações e nas ligações para uma gama abrangente de modelos com comprimentos de 15 e 20m, larguras de 3, 4, 5 e 6m, e alturas de 1,4 e 1,8m;
 - incluir um relatório final do processo que pudesse agregar a todo este projecto a chancela de independência e rigor de uma instituição externa à LINDLEY.

Desenvolvimento dos Trabalhos

O ATENUADOR DA MARINA DE TRÓIA

A Marina de Tróia fica localizada no extremo norte da península de Tróia, junto ao antigo terminal de ferries, e integra-se numa infra-estrutura turística desenvolvida pelo grupo SONAE em 2007. A bacia foi conquistada ao mar, do lado interior dos duques d'alba que serviam de acostagem aos ferries e está exposta a ondulação de período curto proveniente do quadrante N-NW ao longo de um fetch de cerca de duas milhas náuticas e a ondulação de período mais longo, atenuada e difractada pelo cabeço poente da bacia, proveniente do quadrante S-SW.

Considerando ventos médios de 35 nós, a ondulação gerada ao longo do fetch referido atinge valores de H_s de 0,72m. O objectivo do quebra-mar flutuante é atenuar essa ondulação em cerca de 60% de modo que o valor de H_s na bacia não exceda 0,30m. Em complemento, o sistema de amarração seleccionado, por meio de correntes ligadas a poitas de betão, não deve permitir uma deriva em relação ao eixo superior a 1m para evitar a colisão do quebra-mar flutuante com os duques d'alba existente.

Face a estes parâmetros de projecto a solução instalada consistiu em 240m de atenuador de ondulação, em betão reforçado a aço galvanizado com um núcleo de polistireno expandido, composto de 12 módulos com dimensões unitárias de 20x3,5x1,8m (CxLxP) amarrado por meio de troços de correntes de elo de estai com 40mm de diâmetro; o comprimento médio dos troços de corrente é de 65m ligados a poitas de betão de 15T (lado barlavento) e de 40m ligados a poitas de betão com 10T (lado sotavento).

Nas figuras seguintes pode ver-se o aspecto geral da instalação em operação e ainda a implantação e localização com o sistema de amarração.



Figura 1 – Aspecto geral do efeito do atenuador de ondulação de Tróia

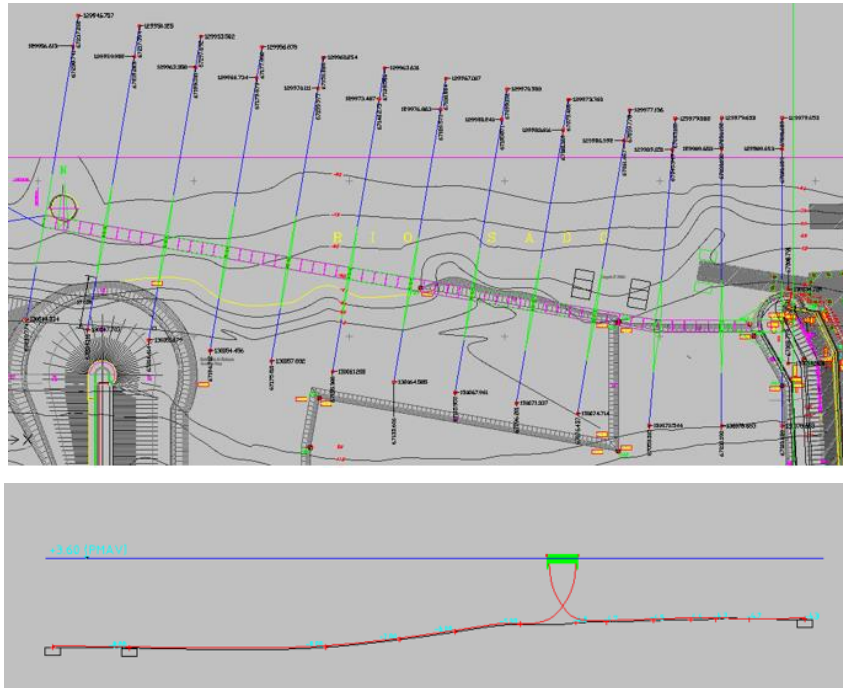


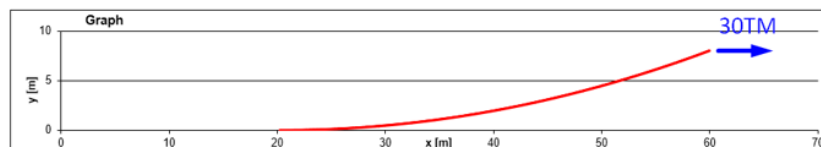
Figura 2 – Implantação do atenuador com a planta e corte das amarrações

O sistema de amarração (barlavento) é constituído por

- 1 x troço de corrente D40mm com 10m (entre poitas)
- 1 x troço de corrente D38mm com 45m
- 1 troço duplo de corrente D28mm com 20m,

perfazendo um comprimento total de 75m.

Para efeitos de simulação do cálculo da catenária assumimos uma corrente única com D40mm.



INPUT PARAMETERS	CATENARY SHAPE CALCULATION
Waterdepth:	8 [m]
Offset:	60 [m]
Anchor Line Type:	Steel Chain
Anchor Line Diameter:	40 [mm]
Anchor Line Density:	8000 [kg/m ³]
Ambiant Density:	1023 [kg/m ³]
Anchor Line Mass:	35,04 [kg/m]
Effective Anchor Line Mas:	30,56 [kg/m]
Lateral Force:	30 [t]

Figura 3 – Resultados do programa de cálculo de catenária em função da carga na amarra

Através do programa de cálculo CCCP (Catenary Chain Calculation Programme) aplicando uma carga de 300kN obtemos com um troço de corrente de fundo com cerca de 20m.

Pode concluir-se que o sistema está sobredimensionado face aos dados de instalação.



Consultando o relatório e nota de cálculo da Black & Veatch verificamos que a carga máxima para cálculo da catenária é de 45,5kN.

Nestas condições, e considerando os comprimentos reais dos troços, a corrente fica assente no fundo em cerca de 31m e em catenária em cerca de 37m.

Foi com os dados acima que alimentámos as directrizes de desenvolvimento do modelo matemático a desenvolver pelo WavEC.

BRIEFING À EQUIPA DE PROJECTO

A equipa de projecto foi constituída por três grupos de trabalho :

- LINDLEY, com a equipa técnica (Bernardo Plantier, Nuno Lopes, Patrick Lindley, Andrew Wheeler), a equipa de desenvolvimento de soluções (Pedro Vieira, Paulo Duarte, Luís Vasconcelos Dias), a equipa de operações (João Simões, Artur Firmino, Sérgio Moreira, Pedro Simões), com a responsabilidade de gestão do processo e preparação de análises, requisitos, informações em coordenação com os restantes grupos de trabalho;
- WAVEC, com as equipas de desenvolvimento e modelação matemática (Miguel Lopes, Marco Alves, Matthieu Guérinel) e testes e ensaios no LNEC (Miguel Lopes, Pedro Pires) sob a orientação do Prof. António Sarmento
- CBN, com a equipa de cálculo estrutural (Rui Fonseca Neves)

Os objectivos de desenvolvimento foram resumidos no briefing abaixo:

WavEC

- Confirmar coeficientes de transmissão (H_{tr}/H_{inc}) usando software Wamit para uma geometria de 20x4x1,8m com bordo livre de 0,6m e peso seco de 48T numa zona com profundidade de 3-10m e ondulação com altura significativa, período e ângulo de incidência a definir
- Dimensionamento do sistema de amarração, com opções em estacas, correntes e amarrações elásticas usando o software OrcaFlex
- Estudar o efeito de utilizar quilhas nas laterais do atenuador (simples, dupla) com alturas de 1,0m e 1,5m
- Calcular as cargas laterais devidas à ondulação considerando duas amarrações por módulo de 20m
- Estudar efeito de larguras diferentes na gama 2,5m a 5m
- Estudar o efeito de propagação das ondas no extremo do atenuador
- Construir um algoritmo numérico que permita determinar os coeficientes de atenuação e as cargas nas amarrações

CBN

- Compilar os dados de cargas estruturais da LINDLEY e de WavEC
- Cargas de trabalho (sobrecarga de 5kN/m², carga pontual de veículo de 20kN, carga de impacto de 2kN/m, carga de cabeço de 100kN aplicada a 90°)
- Cargas da aplicação (vento lateral de 5kN/m, corrente de 2m/s, ondulação a definir por WavEC)
- Cargas de amarração (estacas e amarrações enquanto atenuador a definir por WavEC, idem enquanto pontão de acostagem e amarração de 75kN a centros de 20m)



- Estudar conceitos construtivos estruturais alternativos para acomodar problemas operacionais de montagem e manutenção
- Cálculo estrutural detalhado com base nos parâmetros desenvolvidos por WavEC.

Resultados Numéricos

Os trabalhos desenvolvidos pelo WavEC tiveram uma primeira fase de ensaios de constantes e parâmetros com vista à simulação matemática da geometria do atenuador e do seu comportamento em função dos dados físicos, foram posteriormente corrigidos para ajustar os resultados aos dados reais conhecidos da Marina de Tróia e finalmente foram compilados em tabelas dinâmicas num ficheiro excel que permitia construir gráficos e ábacos simplificados para o desenvolvimento dos cálculos estruturais a executar pela CBN e também dos resultados dos ensaios em tanque de ondas.

Apresentam-se abaixo algumas imagens dos dados obtidos.

Inputs:		Wave statistics:	
Water depth	7 m	Storm duration	T_{return} 3 h
Fatch length	3000 m	Number of waves	N 3707.66
Wind speed at 10m of altitude	25 m/s	Max wave height	Hmax 2,04281 m
g	9,80665 m/s ²		
Breakwater width:	4 m	Initial width (do not modify)	4 m
Breakwater length:	20 m		
Significant wave height H_{sig}	1,01 m	Transmission coeffs:	
Significant wave period T_{sig}	2,913 s		Angle of incidence
Significant wave frequency ω_{sig}	2,1570 rad/s		0° 15° 30° 45°
Wave length λ	13,17 m	No skirt Fixed:	42,64%
		Floating:	72,20% 54,90% 37,60% 20,31%
W/λ	0,3036		
W angle λ	0,0000	With skirt Fixed:	29,38%
		Floating:	50,27% 37,96% 25,65% 13,34%
Forces applying on a single structure for a 0° incident wave:			
No skirt	Maximum wave load (modulus)	Total wave load at t = 0	Force per unit length
F_x	197,94 kN	8,52 kN	0,43 kN/m
F_z	356,85 kN	173,85 kN	8,93 kN/m
M_y	201,56 kN.m	8,52 kN.m	
With skirt	Maximum wave load (modulus)	Total wave load at t = 0	Force per unit length
F_x	318,32 kN	72,78 kN	3,64 kN/m
F_z	293,67 kN	176,04 kN	8,90 kN/m
M_y	15,51 kN.m	1,67 kN.m	

Figura 4 – Folha resumo com dados do local e resultados obtidos

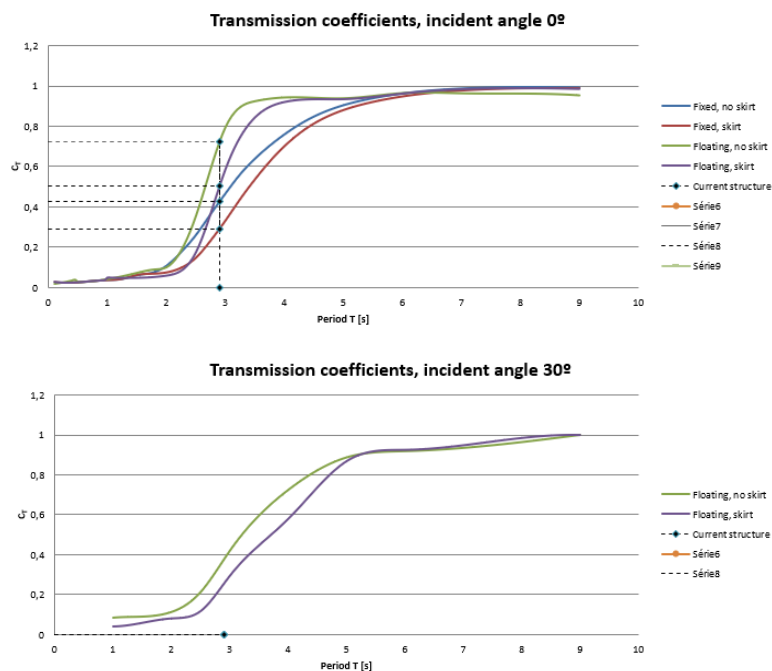


Figura 5 – Gráficos com os coeficientes de transmissão para diferentes ângulos de incidência

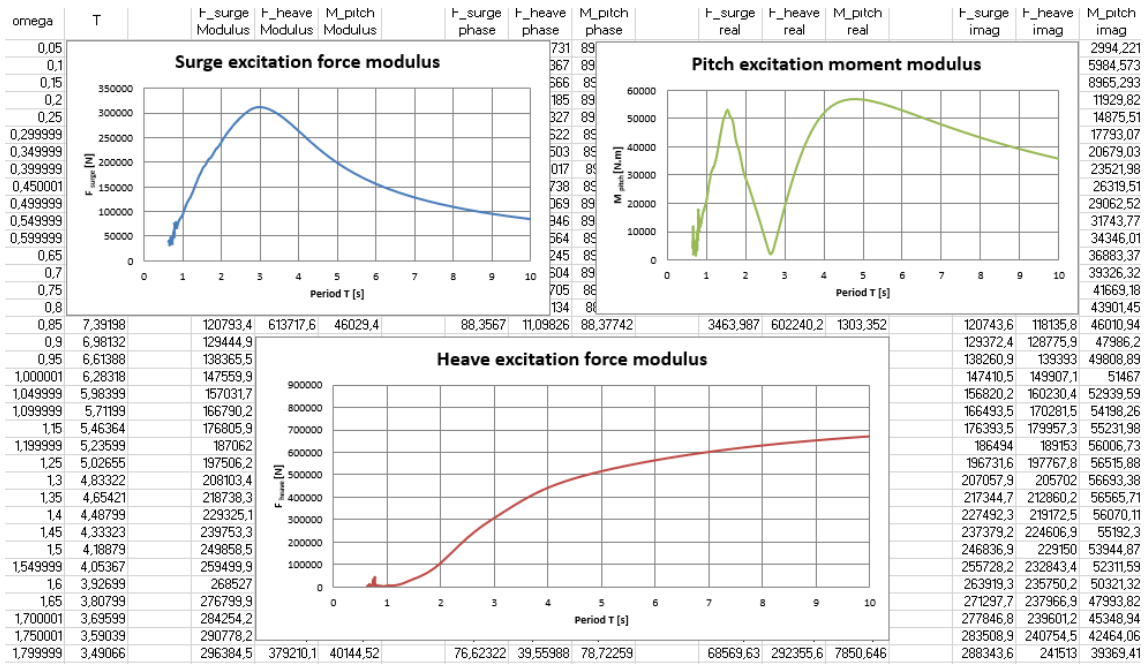
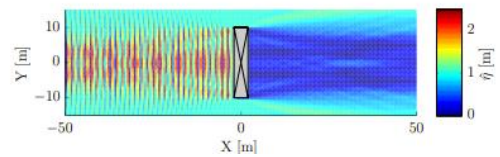
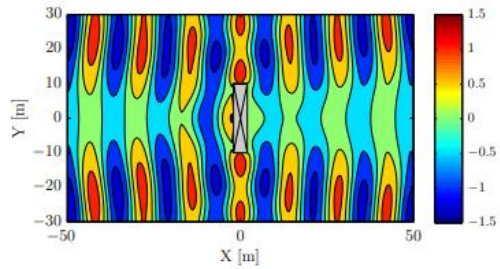
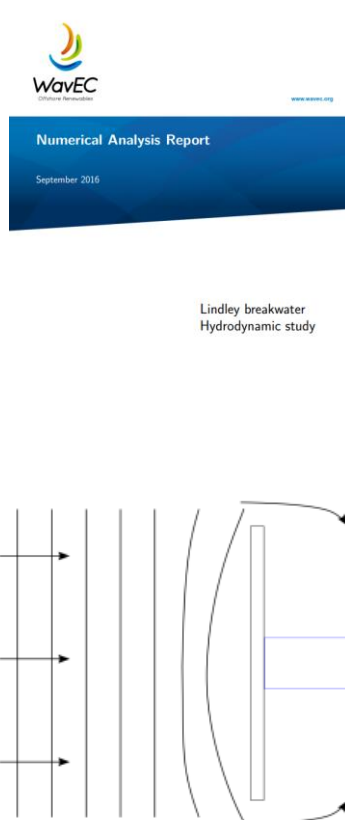


Figura 6 – Base de dados e gráficos com os valores de surge, pitch e heave para vários períodos de onda



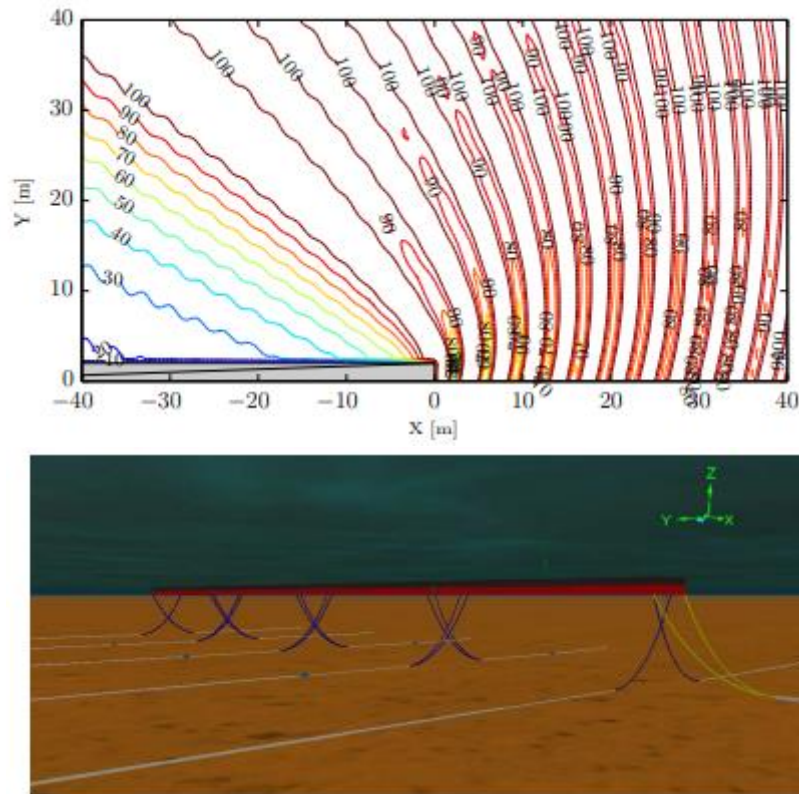


Figura 7 – Capa e elementos gráficos constantes do relatório elaborado pelo WavEC

Resultados Experimentais

Os ensaios em tanques de ondas do LNEC usando um modelo à escala 1/20 do atenuador considerado nos trabalhos de modelação numérica permitiu validar e corrigir alguns dos resultados obtidos pelo WavEC, em complemento da comparação entre os dados conhecidos e os dos novos modelos. Foram realizados vários ensaios (cerca de 50 séries), considerando diversos tipos de ondulação simulando vários ângulos de incidência e os efeitos complementares e opostos da ondulação incidente e reflectida, períodos diferentes e alturas de onda diferentes.

A atenuação (A) provocada por um quebra-mar flutuante é essencialmente determinada pela relação entre o comprimento do quebra-mar (l) medido na direcção da onda e o comprimento de onda (L) ou, em alternativa, entre o comprimento do quebra-mar real (l_0) e a projecção do comprimento de onda na direcção perpendicular ao quebra-mar, dada por $L \cos a$, em que a é o ângulo de incidência da onda.

Desta forma, a atenuação provocada pelo quebra-mar é

$$A = F(l_0/L \cos a).$$

Isto também significa que a atenuação provocada pelo quebra-mar com a incidência a será idêntica à desse quebra-mar quando sujeito a uma onda perpendicular com um comprimento de onda $L_0 = L \cos a$. Como para águas profundas o comprimento de onda é dado por

$$L = \frac{gT^2}{2\pi},$$

em que T é o período, a onda de comprimento de onda L_0 tem um período T_0 dado por

$$L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi}$$



que está relacionado com o período da onda T através de

$$\frac{T_0}{T} = \sqrt{\frac{L_0}{L}} = \sqrt{\cos a}.$$

O que esta expressão diz, é que nos pressupostos indicados acima, o gráfico com a atenuação em função do período para incidência nula permite obter o valor da atenuação para qualquer incidência desde que se utilize o período aparente T_0 em vez do período real T .



Figura 8 – Imagens dos ensaios em tanques de ondas do LNEC



Conclusões

A combinação dos resultados da modelação numérica e dos ensaios experimentais permitiram verificar que

- o comportamento de um atenuador com a geometria considerada é particularmente eficaz para ondulação com período na gama $T = 1,6 - 4,0s$, valores acima dos quais o efeito de amortecimento da onda é muito irregular;
- acima de $T = 5,0s$ a atenuação é quase inexistente e a peça entra em frequência com a ondulação incidente;
- o efeito de atenuação aumenta com o aumento da largura da peça;
- o efeito de atenuação melhora com o aumento da altura (pontal) e redução do bordo livre da peça;
- a atenuação é mais eficaz para ângulos de incidência na gama $15 - 45^\circ$

Face às conclusões acima decidimos que a gama de atenuadores de ondulação teria as seguintes configurações genéricas

- ALTURA : 1,0m – 1,4m – 1,8m
- COMPRIMENTO : 12,0m – 15,0m – 20,0m
- LARGURA : 2,4m – 3,0m – 4,0m – 5,0m – 6,0m

Dado que pudemos verificar que as maiores dimensões produziam melhores resultados, decidimos focar-nos nas configurações com altura de 1,4 e 1,8m, nos comprimentos de 15 e 20m, e nas larguras de 3, 4 e 5m extrapolando em seguida os resultados para as restantes dimensões.

Foram, entretanto, discutidas, e posteriormente introduzidas, algumas modificações estruturais e construtivas nos equipamentos, todas elas justificadas por sugestões de instalação e manutenção, de melhoria do desempenho e de tentativa de normalização no fabrico.

Entre estas merecem destaque as seguintes:

- introdução do conceito de viga perimetral, constituída por uma viga externa contínua nas laterais e topos do pontão, com armadura reforçada em aço (tipo viga estribo) com o objectivo de permitir que a ancoragem de outras peças (tais como guias de parede ou de estaca, tirantes, fingers, outros pontões, cunhos e cabeços) pudesse ser feita sem a necessidade de recorrer a mangas fêmeas ou vigas halfen pré-embutidas, usando em sua vez vareta roscada em aço inoxidável chumbada com bucha química
- incorporação no desenho do pavimento de vigotas longitudinais que permitem melhorar a eficiência da lage superior e a circulação de veículos tipo 'golf-cart'
- reforço das paredes transversais intermédias, criando caixas autónomas estilo cúpula invertida e que permitem ter blocos de polistireno normalizados e ainda ajustar o bordo livre se necessário (versões full-EPS, mid-EPS e basic-EPS)
- alteração das caixas de ligação, que passaram a ter um par de ligações em cada extremo e uma camara de recuo dos pernos permitindo montagem e substituição muito mais eficaz
- eliminação definitiva dos olhais de amarração exteriores nos topos e sua substituição por tubos verticais com entrada em forma de sino, localizadas na zona reforçada intermédia, ligados a uma caixa superior permitindo a montagem, ajuste e fixação de amarrações
- remoção definitiva das mangas de elevação do pavimento superior, tanto pelo facto de estas serem usadas apenas duas vezes como pelo facto de serem no futuro zona de acumulação de detritos; em substituição desta solução, o sistema de elevação passou a ser através de mangas tubulares transversais colocadas durante o fabrico e que permitem a passagem de cintas de elevação



- protecção da face inferior do pontão usando poliureia projectada, evitando com isso a criação de uma lage inferior cujo fabrico seria deficiente e criaria desequilíbrios na reserva de flutuação do equipamento

Usando os dados recolhidos através dos ensaios, confrontando-os com os cálculos estruturais após introdução das reconfigurações e melhorias acima, e aplicando os resultados do modelo matemático desenvolvido construíram-se as seguintes ferramentas de apoio à selecção e validação dos atenuadores de ondulação da nossa gama:

- **Ábaco QALM** (QMF Attenuation Model) para um modelo concreto, obtido através de um ficheiro excel com uma base de dados e várias tabelas dinâmicas, que resumem os dados de projecto para determinadas condições operacionais, indicando os valores de atenuação para os vários ângulos de incidência e calculando as cargas originadas sobre um modelo pré-seleccionado

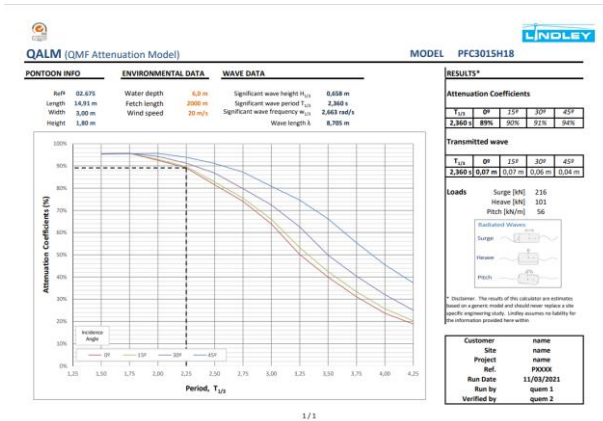


Figura 9 – Ábaco QALM

- **Ábaco PAC** (Pontoon Attenuation Curve) para uma gama definida pela altura do modelo, obtido através de um ficheiro excel com uma base de dados e tabelas dinâmicas, que permitem obter os coeficientes de atenuação para determinadas condições operacionais em função da velocidade do vento, fetch e período para as várias opções de largura disponíveis.

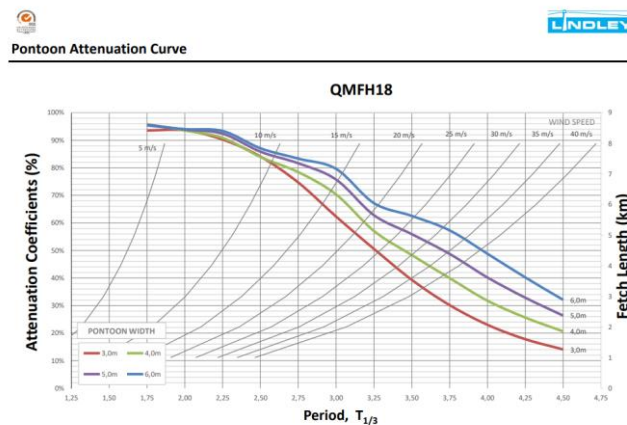


Figura 10 – Ábaco PAC



- **Ficha Técnica PSDS (Pontoon Stability Data Sheet)** para uma gama definida pela altura do modelo, obtido através de um ficheiro excel com uma base de dados e tabelas dinâmicas, que permitem obter os dados técnicos do equipamento.

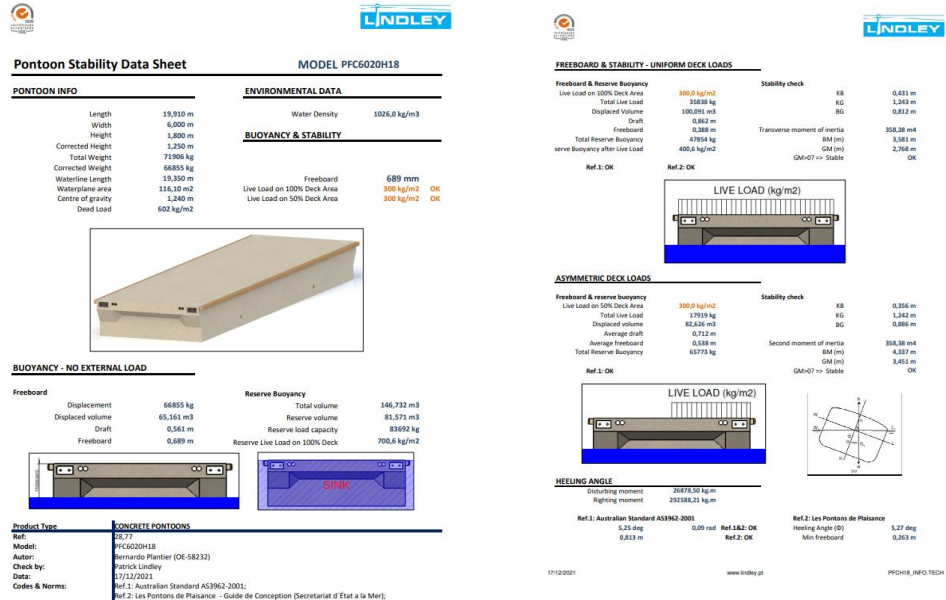


Figura 11 – Ficha Técnica PSDS

- **Desenho Comercial CD (Commercial Drawing)** para uma gama definida pela altura do modelo, obtido através de um ficheiro excel com uma base de dados e tabelas dinâmicas, que permite resumir os dados técnicos do equipamento e mostrar desenho esquemático da peça, ligações, opções e sistema de movimentação.

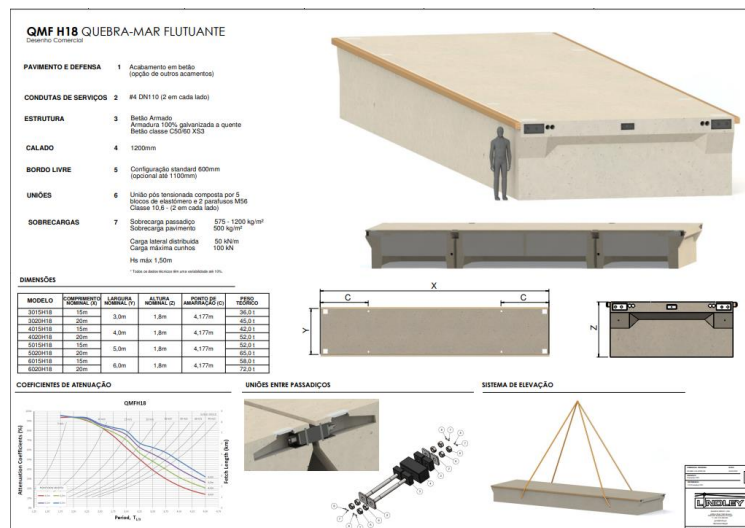


Figura 12 – Desenho Comercial CD