

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS PORTUÁRIAS VERTICAIS PERFURADAS Experimental Performance Evaluation of Perforated Vertical Harbor Structures

SARA PINTO ⁽¹⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec07274@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

As estruturas marítimas verticais, desde os cais portuários aos quebra-mares, apresentam numerosas vantagens, como o melhor aproveitamento do espaço marítimo, diminuição dos custos relativos a materiais e otimização dos prazos de execução (se as condições meteorológicas e marítimas o permitirem), através do recurso de caixotões. Porém, o inconveniente da solução vertical é a reflexão quase total da agitação incidente, provocando um aumento significativo das condições de agitação, as quais se revelam extremamente importantes no interior de uma baía portuária, provocando o aumento das alturas de onda máximas e por conseguinte o aumento das forças sobre a estrutura. Assim, tornou-se um desafio para a Engenharia Marítima o desenvolvimento e a criação de estruturas marítimas que permitissem a redução da energia refletida por estas, tendo sido propostas numerosas estruturas porosas, ao longo das últimas 5 décadas, baseadas no conceito inovador, de quebramar perfurado com câmara dissipadora de energia, desenvolvido por Jarlan em 1961. No entanto, o comportamento hidrodinâmico que intervém no fenómeno da reflexão sobre as estruturas perfuradas é complexo e o seu conhecimento é ainda limitado, apesar de existirem vários modelos empíricos e teóricos. Deste modo, é necessário que exista um conhecimento mais preciso das relações não-lineares entre as diversas variáveis intervenientes que influenciam a capacidade de absorção da energia proveniente da agitação incidente, para que deste modo, seja possível projetar esta tipologia de estruturas de modo a satisfazer todos os requisitos de cada caso prático.

O presente estudo pretendeu analisar o comportamento à reflexão dos blocos NOREF, complementando estudos anteriores apresentam-se três casos de aplicação destes blocos, tendo dois deles sido sujeitos a ensaios laboratoriais, com o intuito de avaliar a eficiência hidráulica da estrutura (entre outros objetivos, no caso do Porto de São Roque), para condições de agitação marítima intensas, que em geral não se verificam no interior de bacias portuárias, e que até à data não tinham sido estudadas.

Palavras-chave: Blocos NOREF, dissipação da energia incidente, estruturas verticais, quebra-mares verticais perfurados, reflexão.

Abstract

The vertical offshore structures, from quay-walls to breakwaters, have numerous advantages, such as better use of maritime space, lower costs with materials and optimization of execution time (if the weather and sea conditions allow), through the use of coffins. However, the drawback of this kind of vertical solution is the quasi total reflection of the incident sea waves, causing a significant increase in the wave conditions, which prove to be critically important within a harbour basin, leading to an increment of maximum wave heights and thus the increment of forces on the structure. Thereby, it has become a challenge to the Maritime Engineering the development and creation of offshore structures that allow a reduction of the reflected energy, so there have been a numerous proposals for porous structures, over the past five decades, based on the innovative concept of perforated breakwater with dissipating energy chambers, developed by Jarlan in 1961. However, the hydrodynamic behaviour that intervenes in the reflection phenomenon on the perforated structures is complex and knowledge is still limited, although there are several empirical and theoretical models. Thus, there must be more precise knowledge of the nonlinear relationships between the many variables that influence the energy absorption capacity of these structures, in order to possible to design this type of structures to meet all the requirements of each case study.

This study means to analyze the reflection behavior of the NOREF blocks, complementing previous studies by presenting three cases of application of these blocks, two of which were subjected to laboratory tests in order to evaluate the hydraulic efficiency of the structure (specifically, in the case of the Port of San Roque), for intense maritime agitation conditions, which generally do not occur within harbor basins, and that have not been studied so far.

Keywords: NOREF blocks, wave energy dissipation, vertical structures, perforated vertical breakwaters, reflection.

1. Introdução

O transporte marítimo moderno é cada vez mais global o que exige navios com maior capacidade, com maiores calados, o que obriga a que os portos passem a abrigar zonas cada vez mais profundas.

Por outro lado, também se assiste a intervenções portuárias com o objetivo de ampliar as áreas portuárias existentes. Contudo, estas intervenções devem ser realizadas recorrendo a estruturas que minimizem o fenómeno da reflexão no interior das bacias portuárias.

As estruturas verticais oferecem à agitação uma face impermeável, pelo que se caracterizam por possuírem uma reflexão quase total da agitação marítima incidente.

A elevada reflexão dos quebramares verticais introduz importantes inconvenientes devido à interação das ondas incidentes e refletidas, que criam ondas mais instáveis, que podem fazer com que a altura de onda incidente seja amplamente ultrapassada.

Assim, podem inviabilizar as condições de operacionalidade de um porto, colocando em causa as condições de acostagem, amarração, operação dos navios e carga/descarga destes. Podem ainda induzir outros problemas como o aumento dos galgamentos, das forças atuantes sobre a estrutura, erosões locais devido à concentração de energia no interior da área portuária, etc.

A necessidade de se encontrarem novas estruturas verticais que permitam a absorção da energia incidente proveniente da agitação marítima, constitui um novo desafio para a engenharia costeira.

Como consequência, várias estruturas inovadoras para quebramares e cais foram propostas com esse objetivo. Em 1961, Jarlan introduziu o conceito de quebramar perfurado, que consiste num quebramar que dispõe da sua parede de barlar perfurada, à qual se segue uma câmara dissipadora de energia, com uma parede posterior impermeável.

Assim, várias novas estruturas, baseadas na ideia original de Jarlan e dispondo de uma parede de barlar perfurada, que permite a entrada da água do mar no interior da câmara dissipadora, foram propostas e testadas.

O presente trabalho centra-se na análise de estruturas portuárias verticais perfuradas, sendo dada particular atenção ao comportamento à reflexão das estruturas constituídas pela sobreposição de blocos de betão simples de geometria inovadora e patenteada, os blocos NOREF.

2. Estruturas Verticais Perfuradas

É comum recorrer-se a blocos de betão pré-fabricados, com geometria especial, para se construir em estruturas perfuradas para cais, através da sobreposição e justaposição destes. Várias patentes deste tipo de blocos foram desenvolvidas, tendo a maioria delas sido aplicada em casos reais. Assim, destaca-se, por exemplo, os blocos BARA ou os blocos MONOBAR, Figura 1.

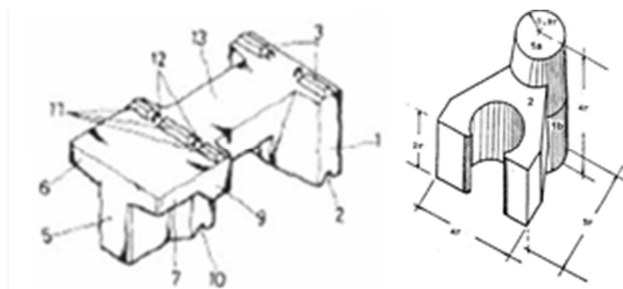


Figura 1. Bloco BARA à esquerda; Bloco MONOBAR à direita.

Para além dos exemplos supracitados, destacam-se ainda os blocos NOREF (*Non Reflection Blocks*), que serão, mais adiante, alvo de uma descrição mais aprofundada.

O fenómeno da reflexão, que se caracteriza por um retorno das ondas incidentes, resulta num movimento ondulatório gerado pela sobreposição das ondas incidentes com as refletidas e que em determinadas circunstâncias a amplitude do movimento pode duplicar em relação à altura de onda incidente.

Como consequência deste fenómeno advém o aumento das perturbações no interior das bacias portuárias e, consequentemente, um agravamento das condições de abrigo e segurança das embarcações e ainda a possibilidade de ocorrência de galgamentos das estruturas envolventes, colocando em causa a operacionalidade dos cais e também o alagamento dos terraços adjacentes.

A dissipação da energia das ondas incidentes que ocorre dentro das câmaras das estruturas perfuradas resulta de diversos mecanismos, como a ressonância e a turbulência que ocorrem no interior dessas câmaras (Oumeraci *et al.*, 2001).

Desta forma, a eficiência hidráulica das estruturas em causa é avaliada através da determinação do coeficiente de reflexão, igual ao cociente entre a altura de onda refletida (H_r) e da altura de onda incidente (H_i), isto é $C_r = H_r/H_i$.

O coeficiente de reflexão depende de vários parâmetros que estão relacionados com as características da onda, com as características do meio físico envolvente e ainda com as características da estrutura em causa.

Relativamente aos parâmetros relacionados com as características da onda incidente destacam-se seguidamente os mais importantes:

- Altura da onda - H ;
- Comprimento de onda - L ;
- Período da onda - T ;
- Direção da onda em relação à estrutura.

Os parâmetros referentes ao meio físico que mais importância têm no fenómeno da reflexão são:

- Profundidade - d ;
- Inclinação do fundo - i .

Por último, o coeficiente de reflexão também é influenciado pela capacidade dissipadora de energia, que em grande medida depende da porosidade da estrutura e da configuração e volume de vazios.

Contudo, ainda se realça a relevância dos parâmetros adimensionais que se seguem, uma vez que estes são os que melhor traduzem a geometria da onda:

- Declividade da onda - H/L ;
- Profundidade relativa - d/L .

É comum encontrar-se na bibliografia da especialidade valores de referência para o coeficiente de reflexão de estruturas verticais perfuradas entre 0.3 e 0.7.

De acordo com Oumeraci *et al.* (2001), as estruturas perfuradas só são eficientes do ponto de vista hidráulico se a sua porosidade estiver no intervalo [15% a 40%] e também se o comprimento da câmara variar de $1/10$ a $1/4$ do comprimento da onda local (L).

Oumeraci *et al.* (2001) propuseram uma nova fórmula para a determinação do coeficiente de reflexão das estruturas perfuradas (Equação 1). Assim, pode-se concluir que o coeficiente de reflexão é dependente do comprimento das câmaras de dissipação (B), que por sua vez se relaciona com o período das ondas incidentes ($L=f(T)$).

$$C_R = 18.6 \left(\frac{B}{L}\right)^2 - 7.3 \left(\frac{B}{L}\right) + 0.98 \quad [1]$$

Por sua vez, pode-se observar na Figura 2 que a relação $B/L = 0.20$, em que L representa o comprimento de onda à profundidade (d) junto à estrutura, é a que conduz a menores coeficientes de reflexão.

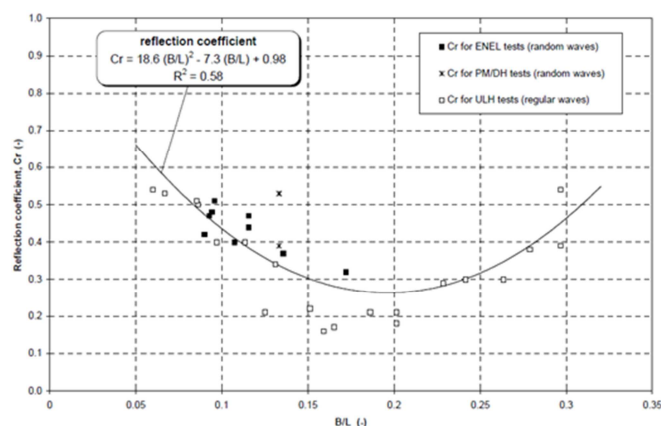


Figura 2. Coeficientes de reflexão em função do comprimento relativo das câmaras (Oumeraci *et al.*, 2001).

Assim, através da Figura 2 pode-se constatar que o comprimento relativo das câmaras deve variar entre 0.10 e 0.25 para que a estrutura seja eficiente do ponto de vista hidráulico à reflexão.

Como se pode observar pela Equação 1, para um determinado valor do coeficiente de reflexão, o comprimento das câmaras de dissipação aumenta à medida que o comprimento de onda junto à estrutura também aumenta, ou seja, à medida que o período das ondas aumenta.

Ora, compreende-se que à medida que o período de onda aumenta, a extensão das câmaras dissipadoras também deverá aumentar, para que desse modo os blocos constituintes da estrutura vertical perfurada sejam eficientes do ponto de vista hidráulico.

3. Blocos NOREF

Os blocos NOREF são de betão simples e possuem uma geometria inovadora e patenteada pela CONSULMAR em 2002 (Marca Nacional Nº 364 163 – “NOREF”).

As estruturas formadas pelos blocos NOREF têm sido aplicadas em vários projectos, como no Novo Terminal Multiusos do Porto de Leixões, no Cais de Recepção do novo Núcleo Náutico e no cais de Controlo do Núcleo Náutico existente do Terminal Marítimo de Ponta Delgada, na estrutura de atenuação do efeito das ondas no Interface do Terreiro do Paço e na Doca de Pesca Local do Porto da Madelena.

O primeiro muro-cais em blocos NOREF foi construído no cais de Pesca da Afurada, na foz do Douro, em 2005. Recentemente, está a ser desenvolvida uma nova aplicação destes blocos no intradorso do novo Terminal de Passageiros do Porto de São Roque do Pico, na Ilha do Pico, Açores.

O projecto que desencadeou o aparecimento destes blocos foi o estudo de Soluções Variantes para a estrutura do Cais de Atracação de Ferries no porto de Vila do Porto, na Ilha de Santa Maria, Açores. A solução variante proposta pela Consulmar Lda destinava-se a alterar a estrutura do cais acostável apresentada na Proposta Base, eliminando os seus aspectos menos positivos, quer ao nível estrutural, quer ao nível funcional e propondo uma nova solução mais vantajosa do ponto de vista económico, técnico, do processo construtivo e de manutenção.

Um dos modelos clássicos de construção de cais é utilizando os chamados blocos “I”, sendo nessa geometria que os blocos NOREF se inspiram, apresentando, porém, as diferenças necessárias de forma a criarem estruturas hidráulicas acostáveis e pouco refletoras.

A particularidade que distingue os blocos “I” tradicionais dos blocos NOREF é que o banzo situado na frente de acostagem é mais estreito do que o de tardoz. Assim, após a justaposição e sobreposição de todos os blocos, verifica-se que a estrutura vertical resultante é constituída por colunas contíguas, formando uma superfície vertical descontínua, com câmaras que lhe confere uma porosidade e, consequentemente, uma elevada capacidade de dissipação de energia. Permite também a redução do coeficiente de reflexão e dos galgamentos, essencialmente para as ondas de baixo período.

A Consulmar Lda patenteou três tipos diferentes de blocos NOREF com geometrias diferentes, NOREF N (Normal), NOREF S (Siamese) e NOREF D (Double), sendo que os blocos NOREF S e D resultam de uma composição dos blocos NOREF N. Isto é, os blocos tipo S resultam de uma ligação topo a topo de dois blocos tipo N e os de tipo D nascem de uma composição lado a lado de dois blocos tipo N.

No que diz respeito à geometria do bloco tipo N (bloco “base”) é possível distinguir-se três partes: a cabeça, a alma e o tardoz.

A alma possui uma representação em planta retangular e permite a ligação entre a cabeça e o tardo, sendo que estes últimos possuem uma representação em planta trapezoidal. Porém, a cabeça possui dimensões inferiores em relação ao tardo e corresponde ainda à parte exterior do bloco, ao passo que em oposição, o tardo corresponde à parte interior do bloco. Na Figura 3 é possível observar o previamente descrito.

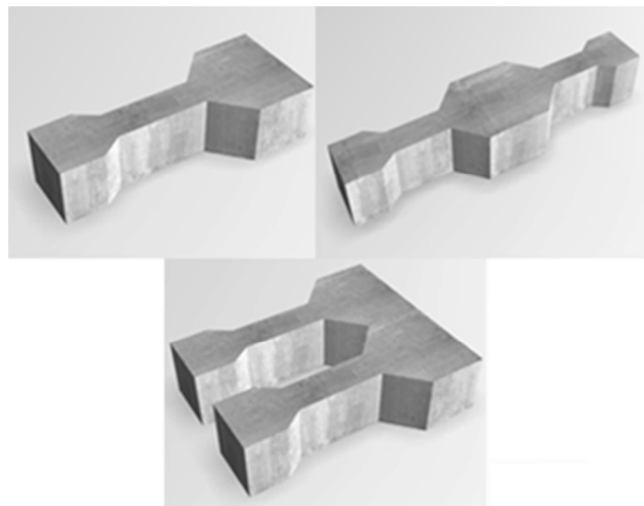


Figura 3. Blocos NOREF N (em cima à esquerda); Blocos NOREF S (em cima à direita); Blocos NOREF D (em baixo) (Brogueira-Dias *et al.*, 2007).

No Quadro 1 podem observar-se as gamas de variação corrente das principais dimensões da forma prismática envolvente dos blocos NOREF.

Quadro 1. Dimensões correntes dos vários tipos de blocos NOREF (Brogueira-Dias *et al.*, 2007).

Tipos de estrutura NOREF	Dimensões correntes (m)		Tipo de bloco NOREF
	Altura total	Comprimento do maior bloco	
Retenções marginais (P)	3 a 7	2 a 5	N ou D
Cais aderentes (Q)	5 a 12	3 a 9	N ou D
Pontes-cais (J)	4 a 10	5 a 10	N, D ou S

Por sua vez, a Consulmar Lda também patenteou as estruturas verticais que advêm da sobreposição dos distintos tipos de blocos NOREF, anteriormente caracterizados.

Portanto, estas estruturas verticais porosas resultam da sobreposição dos blocos NOREF, onde a descontinuidade do paramento é obtida a partir das aberturas na face exposta, sendo que estas se prolongam e alargam para o interior, permitindo a formação de câmaras, onde se dissipará a energia da agitação incidente, e que se desenvolvem desde o fundo.

É facilmente perceptível que as dimensões das câmaras e das aberturas dependem unicamente das dimensões dos blocos que constituem a estrutura vertical.

Desta forma existem também três tipos de estruturas NOREF, as quais podem ser distinguidas em função das suas características funcionais e do seu objetivo.

Se a estrutura vertical em causa possuir a função de cais aderente designa-se de estrutura NOREF Q (Quay). Por sua vez, se assumir funções de retenção marginal, designa-se de estrutura NOREF P (Protective Bank).

Por último, se a estrutura vertical tiver funções de pontes-cais, designa-se de estrutura NOREF J (Jetty) (Brogueira-Dias *et al.*, 2007). A Figura 4 apresenta esquemas das diferentes estruturas constituídas com blocos NOREF.

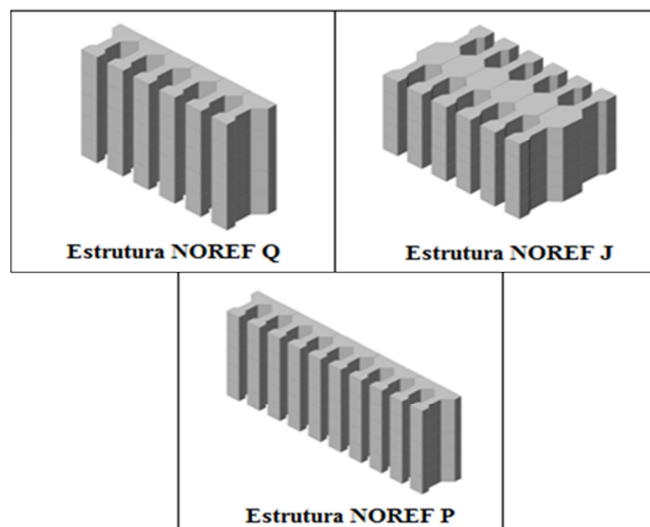


Figura 4. Diferentes tipos de Estruturas NOREF, adaptado de Brogueira-Dias *et al.*, 2007.

Nas estruturas NOREF o bloco da base apresenta uma laje na face inferior e para além desta existe ainda uma superestrutura, também ela betonada “*in-situ*”, que se destina a interligar superiormente as várias colunas de blocos, sendo também, na maioria das vezes em betão armado.

Deve-se acrescentar que qualquer uma destas estruturas pode ser concretizada com qualquer um dos tipos de blocos NOREF descritos.

4. Aplicações dos Blocos NOREF

4.1. Cais da Afurada: aplicação dos blocos NOREF “N” a uma estrutura NOREF “Q”

O cais da Afurada ocupa uma faixa com uma extensão aproximada de 110 m, sendo a sua estrutura contínua formada por três blocos de betão simples, que assentam sobre um prisma de fundação constituído por enrocamento selecionado (Figura 5) à cota -3.00 m (Z.H.).

A superestrutura foi concretizada através de uma laje de betão armado construída “*in situ*”, onde foram criadas as reentrâncias para as escadas e também onde se fixaram as defensas, argolas e cabeços de amarração (Luís *et al.*, 2005).

A face acostável do cais contínuo é formada por cavidades que permitem a redução das reflexões, através do elevado grau de porosidade que lhe conferem.

As cavidades são conseguidas através da redução da largura do banzo exterior e da alma dos blocos NOREF, Figura 5.

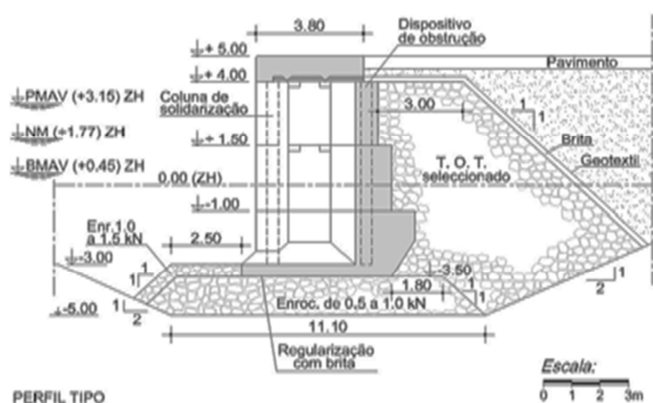


Figura 5. Perfil tipo do muro-cais do porto da Afurada (Luís *et al.*, 2005).

O dimensionamento das cavidades foi feito de forma a atribuir à estrutura uma porosidade de 38%. Assim, a largura das cavidades cresce de 1.0 m (junto à entrada) até 1.70 m (no interior do cais).

Estas cavidades desenvolvem-se ao longo de toda a altura do cais, ou seja desde o fundo à cota -3.0 m (Z.H.) até à cota +4.0m, onde se inicia a superestrutura.

A razão de se prolongarem as câmaras a uma cota superior ao nível da água tem o intuito de facilitar a fuga do ar “aprisionado” pela massa de água, causando o alívio das pressões que atuam sobre a estrutura.

A existência de rasgos na alma dos blocos tem igualmente como objetivo o alívio das pressões através da fuga do ar ou água. As câmaras apresentam um comprimento de 3.50 m [Luís *et al.*, 2005].

O comprimento das câmaras de dissipação foi dimensionado através da Equação 1. Atendendo às características de agitação locais, isto é, sabendo que a agitação é gerada maioritariamente no local pelos ventos, foi estimada uma variação de períodos característicos de 2 a 4s. As profundidades de água variam com os ciclos de maré entre 3.5 a 6.5 m (Luís *et al.*, 2005).

O gráfico apresentado na Figura 6 permite concluir que para a gama de variações de profundidades apresentadas no parágrafo anterior e para um período de onda de 4 s, o coeficiente de reflexão da estrutura não é superior a 0.31.

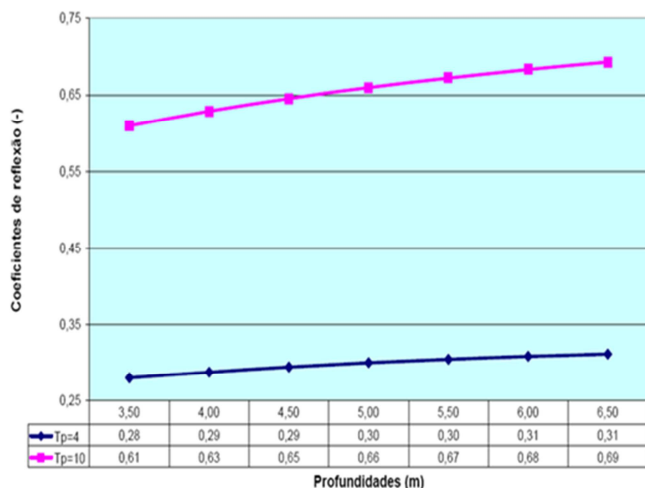


Figura 6. Relação entre o coeficiente de reflexão e a profundidade (Luís *et al.*, 2005).

De forma comparativa, também foram realizados cálculos para um período de 10 s (típico das ondas gravíticas) e pode-se concluir que a estrutura é menos eficiente, uma vez que o coeficiente de reflexão varia entre 0.60 a 0.70.

Porém, de acordo com o anteriormente mencionado, esta perda de eficiência, no presente caso não é alarmante, uma vez que a zona não será atingida frequentemente por este tipo de agitação.

4.2. Cais do novo terminal multiusos do porto de Leixões: aplicação dos blocos NOREF “N” a uma estrutura NOREF “Q”

O Porto de Leixões localiza-se na costa noroeste portuguesa, na foz do rio Leça, a cerca de 4,5 km a Norte da embocadura do Rio Douro, dispondo de dois quebramares cuja função se destina a proporcionar condições de abrigo ao porto.

O quebramar norte tem cerca de 1800 m e o molhe sul tem aproximadamente 950 m.

O Porto de Leixões dispõe de um Terminal Petrolífero, um Terminal Ro/Ro e um Terminal de Contentores. Também dispõe de cais convencionais de Carga Geral e Granéis Sólidos, cais de movimentação de Granéis Líquidos, sector de pesca com três pontes-cais e Doca de Recreio (Marina Porto Atlântico). Dispõe ainda do Novo Terminal Multiusos e do Terminal de Passageiros.

A construção do novo terminal multiusos (assinalado a amarelo na Figura 7) resultou da necessidade de ampliar o espaço portuário existente, criando, ao mesmo tempo melhores condições para o desenvolvimento do segmento Ro/Ro [Brogueira-Dias *et al.*, 2007].

O terminal em questão localiza-se no intradorso do molhe Sul, sendo constituído por três cais acostáveis:

1. Estrutura de avanço do Cais do Molhe Sul, com 308 m de comprimento;
2. Novo Cais com 184 m de comprimento e fundos de serviço de -8.5 m (ZH);
3. Novo Cais com 55 m de comprimento e fundos de serviço de -5 m (ZH).

Como a generalidade das estruturas construídas no porto de Leixões possuem como característica comum o facto de apresentarem paramentos verticais, ou seja, tratam-se de estruturas bastante refletoras, de acordo com o projetista, a construção de estruturas semelhantes agravaria as condições de abrigo no interior do porto, pelo que se optou pela solução em blocos NOREF (assinalados a vermelho na Figura 7). O dimensionamento das câmaras de dissipação foi igualmente realizado através da fórmula 1.

A agitação incidente mais frequente será gerada pelo vento e pela passagem de embarcações (pequenos períodos), logo o dimensionamento da estrutura baseou-se no pressuposto de que a eficiência hidráulica da estrutura proposta, em relação à reflexão teria de ser elevada.

Como já foi anteriormente referido, no que diz respeito ao dimensionamento das câmaras de dissipação da agitação incidente, não existem métodos completamente consolidados.

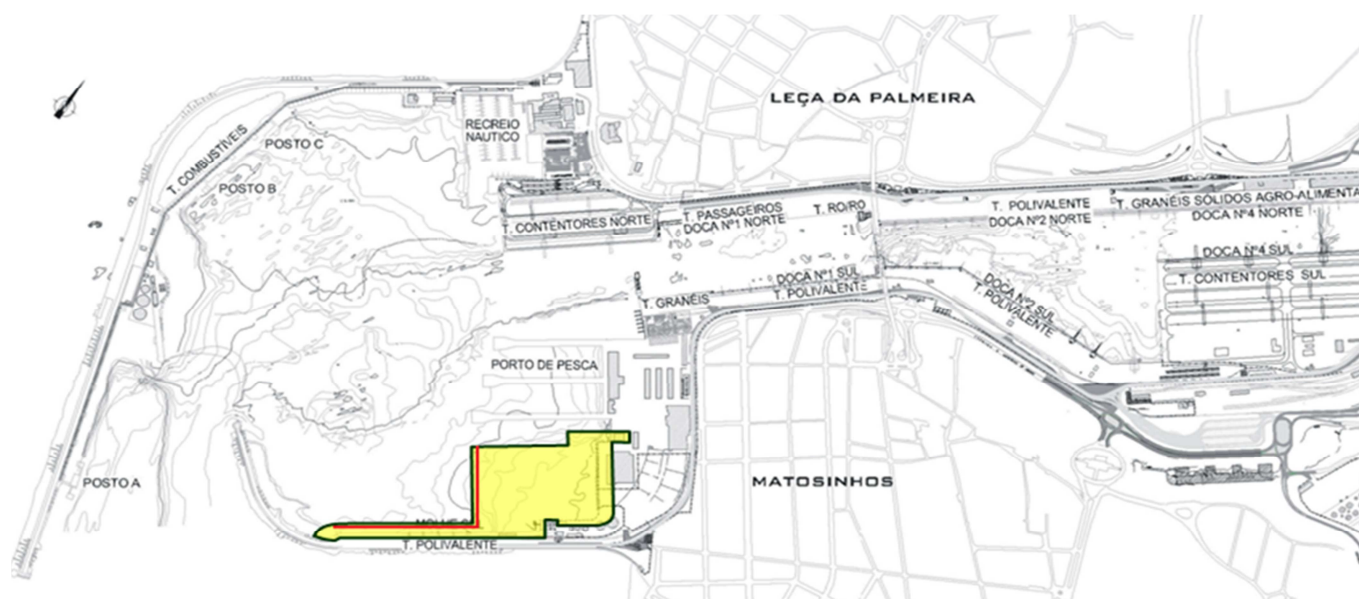


Figura 7. Local de implantação do novo Terminal Multiusos do Porto de Leixões (Brogueira-Dias *et al.*, 2007).

Assim, desta forma, com o intuito de avaliar a eficiência hidráulica da estrutura constituída por blocos NOREF, foram realizados ensaios em modelo reduzido no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O modelo testado constituiu uma versão simplificada do protótipo, embora as câmaras de dissipação da energia tenham sido reproduzidas com precisão.

As condições de ensaio foram as seguintes:

- Alturas de ondas significativas: 0,5 m; 0,75 m; 1 m e 1,5 m;
- Períodos: 3 s; 4 s; 5 s e 6 s;
- Direção da agitação: normal à estrutura;
- Níveis de maré: +1,9 m (ZH) correspondente à maré média e 3,8m (ZH) correspondente a uma preia-mar;
- Larguras estudadas: 60 m e 15 m no protótipo (corresponde a 2 m e 0,5 m no modelo).

É necessário acrescentar que para além do estudo do cais NOREF foi também analisada a situação equivalente a um cais totalmente vertical. Tal tinha como objetivo validar os resultados obtidos para os ensaios correspondentes ao cais NOREF, uma vez que se sabe que o coeficiente de reflexão de uma estrutura vertical (e lisa) é aproximadamente igual à unidade.

Para além disso, é ainda conveniente referir que a consideração de duas larguras distintas de cais tem como objetivo despistar a existência de efeitos tridimensionais que pudessem influenciar a credibilidade dos resultados.

Na Figura 8 apresentam-se alguns resultados obtidos para os vários períodos de onda (T), para um nível de preia-mar, correspondentes à largura de cais de 0,5 m.

Com base no estudo realizado, após uma análise de todos os resultados obtidos, foi possível obter as seguintes conclusões:

- O coeficiente de reflexão aumenta quando o período aumenta;

- O coeficiente de reflexão diminui com o aumento da altura de onda;
- A estrutura apresenta uma maior eficiência hidráulica para os períodos de onda de 3 s e 4 s;
- Para períodos elevados (6 s) os valores do coeficiente de reflexão da estrutura perfurada são elevados, aproximando-se dos valores do coeficiente de reflexão de um cais totalmente vertical;
- O coeficiente de reflexão é menor para o nível máximo de água para os diferentes períodos testados.

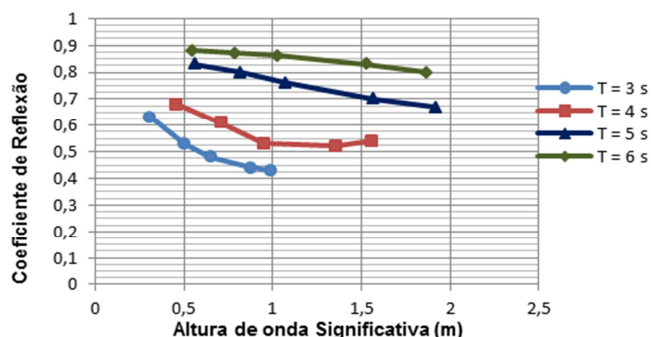


Figura 8. Coeficientes de reflexão obtidos para os diferentes períodos de onda (T) e alturas de onda significativas (H_s) testados para uma largura de cais de 0,5 m (15 m no protótipo), para o nível de água máximo, adaptado de Veloso Gomes *et al.*, 2007.

4.3. Porto de São Roque

O Porto de São Roque localiza-se na costa norte da Ilha do Pico, Açores, numa faixa virada a nordeste. A sua construção foi realizada aproximadamente há 30 anos e de forma a aproveitar uma ligeira reentrância da linha de costa existente nessa zona.

O porto encontra-se construído ao longo de uma costa rochosa e de águas profundas, em que a batimétrica dos -50 m (Z.H.) se encontra a cerca de 250 m da costa.

¹ Menor coeficiente de reflexão.

De acordo com a Memória Descritiva do Projeto, a obra portuária existente é composta por um molhe com uma extensão de 400 m que se subdivide em dois alinhamentos retos (Figura 9) com 200 m de comprimento cada. Assim, o troço mais recuado do molhe tem como função proteger os terraplenos do porto, que dispõem de uma área de 2,85 ha.

O troço mais avançado foi alvo de obras de reabilitação e de reforço estrutural recentemente. Através destas obras, reconstruiu-se a cabeça do troço do molhe, com recurso a uma estrutura em gravidade constituída por caixotões de betão armado, assentes num prisma de enrocamento, fundado à cota -50.0 m (Z.H.), sendo acostável na face interior e dispondo de 20 m de largura de serviço. O cais comercial possui uma extensão total de 180 m, sendo que cerca de 140 m deste possui fundos de serviço a -7.5 m (Z.H.) e os restantes 40 m a -4.5 m (Z.H.).



Figura 9. Localização da infraestrutura existente e local de implantação do Terminal de passageiros, a vermelho ("Google Earth").

Devido à sua localização, o porto de São Roque encontra-se relativamente exposto à agitação ao largo mais frequente e intensa, ou seja, aquela que é proveniente do quadrante compreendido entre W (Oeste) e N (Norte). Existe ainda agitação proveniente do rumo E-ESE, apesar de ser menos frequente e intensa, mas que conduz a condições de instabilidade no interior do porto. Ao molhe do cais comercial já existente vão adicionar-se novas obras marítimas com o objetivo de construir um Terminal de Passageiros. As obras marítimas associadas a este novo terminal contemplam a construção de um molhe-cais, com aproximadamente 373 m de comprimento, paralelo à linha da costa Sul da baía, estando ligado a terra através de um travessão, enraizado a nascente do cais comercial já existente e que divide o molhe-cais a meio. A implantação deste molhe-cais teve em atenção a exigência de minimizar o agravamento das condições de tranquilidade na bacia e no cais comercial, causadas por reflexão da agitação incidente no novo molhe e ainda de ocupação do espaço necessário à manobra dos navios na bacia do sector comercial. Pode-se observar na Figura 9 o local de implantação do novo Terminal de passageiros.

Como se pode observar pela Figura 10, o travessão cria duas bacias, ambas abertas e abrigadas pelo novo molhe-cais, estando uma localizada a nascente (inferior) e outra a poente (superior).

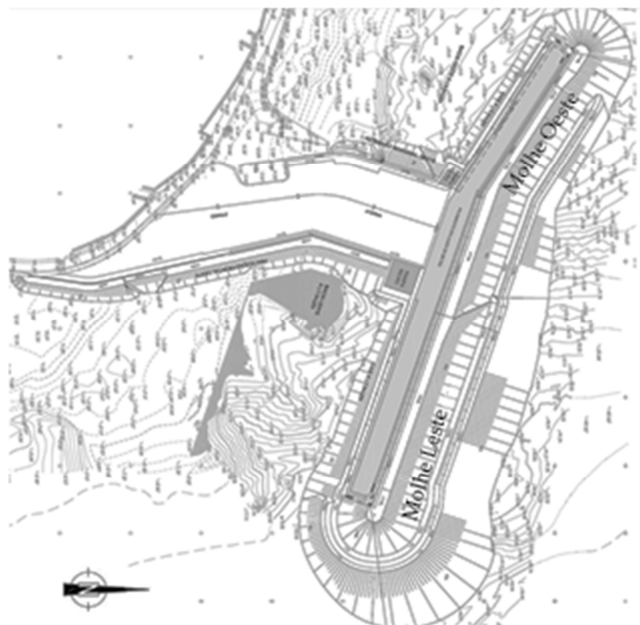


Figura 10. Representação do novo molhe-cais do Terminal de passageiros (Consulmar, 2011).

O cais aderente ao molhe da bacia de nascente dispõe de uma extensão de 152 m e de uma cota de serviço de -7.0 m (Z.H.). Esta bacia aberta apenas beneficia do abrigo conferido pelo novo molhe-cais, sendo, por isso expectável, que as condições de tranquilidade dela sejam semelhantes às atualmente existentes no porto comercial, quer para os rumos mais intensos e frequentes NW, quer para os rumos menos intensos e frequentes de E e SE, os quais são praticamente paralelos ao cais, podendo tal facto ter interferência na eficiência hidráulica à reflexão do cais. Porém, esta situação não é considerada como muito preocupante, uma vez que, como já foi referido, este rumo para além de ser pouco intenso é pouco frequente.

O muro-cais Leste é constituído por pilares independentes de blocos prefabricados de betão simples, os blocos NOREF. Os pilares assentam à cota -7.7 m sobre um prisma de enrocamento TOT, de altura variável e são solidarizados no topo por uma viga à cota +3.60 m (Z.H.). Os blocos possuem alturas de 2.25 m, 2.50 m, 2.20 m e 1.75 m, respetivamente.

A extensão das câmaras dissipadoras de energia varia ao longo da altura do cais, sendo que se verifica uma extensão máxima de 6 m e uma extensão mínima de 4.5 m.

A extensão do cais aderente ao molhe da bacia de poente é de 117.5 m possuindo uma cota de serviço de -5.0 m (Z.H.). A proteção à agitação proveniente do quadrante de NW, mais frequente e intensa é assegurada pela conjugação do molhe existente com o troço de poente do novo molhe.

Para a agitação proveniente do rumo NE, pode existir uma certa perturbação da tranquilidade apesar de a ocorrência desta agitação ser baixa e de possuir uma baixa intensidade.

O muro-cais é também constituído por pilares independentes de blocos NOREF. Os pilares assentam à cota -5.5 m sobre um prisma de enrocamento TOT, de altura variável e são solidarizados no topo por uma viga à cota +3.60 m (Z.H.). Os blocos possuem alturas de 2.25 m, 2.50 m e 1.75 m, respetivamente.

A largura máxima dos blocos é de 3.00 m. A extensão das câmaras dissipadoras varia ao longo da altura do cais. Entre as cotas -5.50 m (Z.H) e -3.75 m (Z.H) o comprimento da câmara é de 5 m, decrescendo linearmente até à cota -1.25 m (Z.H) onde atinge 4.5 m de extensão.

A zona encontra-se sujeita essencialmente a períodos de onda que variam entre 5 s a 9 s, sendo que as alturas de onda que atingem o local são inferiores a 2 m.

O novo Terminal de Passageiros do Porto de São Roque do Pico foi sujeito a ensaios tridimensionais no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

O modelo físico foi testado à escala de 1:60. Os níveis de água testados foram de +2.00m (Z.H) correspondente ao nível de preia-mar e 0.00 m (Z.H.) correspondente ao nível de baixa-mar.

Os rumos ensaiados foram NW (mais frequente e intenso) e o rumo ESE (menos frequente e menos intenso), o qual é praticamente paralelo aos cais.

Os ensaios foram realizados para as condições de agitação que se verificam no local com uma frequência mais significativa, podendo-se encontrar no Quadro 2 as condições hidráulicas dos ensaios de agitação.

Quadro 2. Condições hidráulicas dos ensaios de agitação.

Nível de água	Rumo	Período de pico T_p (s)	Altura de Onda Significativa (m)
0	NW	8	3 e 5
		10	3 e 5
		12	3 e 5
		14	3 e 5
+2	NW	8	3 e 5
		10	3 e 5
		12	3 e 5
		14	3 e 5
0	ESE	6	2 e 3
		8	2 e 3
		10	2 e 3
		12	2 e 3
+2	ESE	6	2 e 3
		8	2 e 3
		10	2 e 3
		12	2 e 3

Com o objetivo de avaliar a eficiência hidráulica dos cais constituídos por blocos NOREF, foi decidido realizar testes, para ambos os rumos e para as condições de agitação marítima descritas no Quadro 2, em que se simulava, para além do cais NOREF, a existência de um cais vertical contínuo na bacia de nascente. Deste modo, comparando os índices de agitação para o cais de nascente com os blocos NOREF e para a situação de cais vertical contínuo é possível avaliar a eficiência hidráulica à reflexão da solução perfurada projetada.

A simulação de cais vertical contínuo apenas foi realizada para a bacia de Leste, uma vez que esta, embora beneficie do abrigo conferido pelo molhe comercial existente e pelo novo molhe de Leste, face à agitação mais frequente e intensa do sector NW, apresenta-se quase diretamente exposta aos rumos menos frequentes e intensos do sector Leste, sendo por isso importante avaliar o seu comportamento à reflexão.

Através dos ensaios realizados no LNEC foi possível calcular para diversos pontos os índices de agitação², para as diferentes condições de agitação marítima testadas.

Para a análise do comportamento à reflexão dos blocos NOREF, foram escolhidos apenas 3 dos pontos testados pelo LNEC, sendo esses os mais relevantes para o estudo em causa.

Não foi possível converter os dados obtidos dos ensaios em coeficientes de reflexão, uma vez, que os índices de agitação encerram em si, para além do fenómeno da reflexão, a difração e a refração. Deste modo, não poderá ser realizada uma comparação direta entre os resultados obtidos através dos ensaios realizados no LNEC com outros estudos realizados de modo a identificar um padrão comum do comportamento à reflexão das estruturas NOREF.

De modo a avaliar a eficiência hidráulica dos blocos NOREF, decidiu-se definir um coeficiente de melhoria, o qual resulta do quociente entre o índice de agitação obtido para a solução NOREF e o índice de agitação obtido para a solução vertical.

Nas figuras 11 e 12 pode-se observar a variação do coeficiente de melhoria para os 3 pontos em análise, para ambos os rumos testados, para o nível de baixa-mar e para o nível de preia-mar, respetivamente.

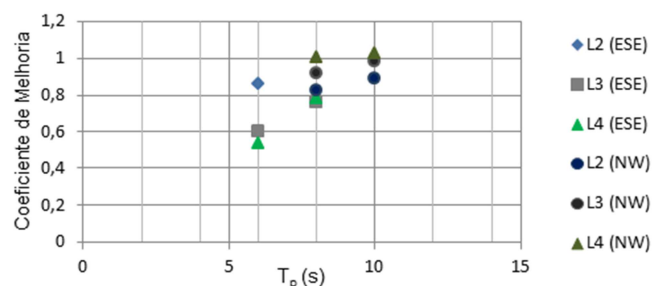


Figura 11. Coeficiente de melhoria para os pontos L2, L3 e L4, para os rumos ESE e NW, para o nível de baixa-mar.

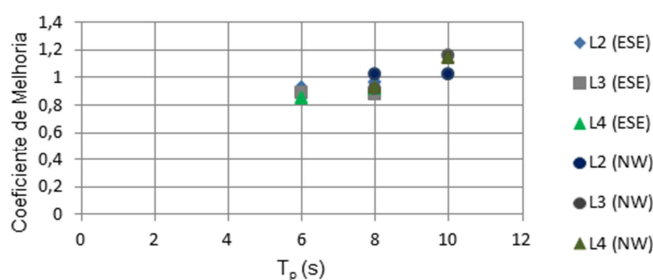


Figura 12. Coeficiente de melhoria para os pontos L2, L3 e L4, para os rumos ESE e NW, para o nível de preia-mar.

Nos casos em que o coeficiente de melhoria é inferior a unidade, tal significa que a solução em blocos NOREF permite dissipar de uma forma mais eficaz a energia incidente no interior da bacia, contribuindo para a tranquilidade do plano de água no interior do cais.

Através das Figuras 11 e 12 nota-se que os blocos NOREF possuem, em geral, um efeito dissipador.

² Trata-se do quociente entre a altura de onda no ponto em estudo e a altura de onda à saída do sistema de geração.

Deste modo, constata-se que para o rumo NW, os blocos NOREF apresentam um comportamento ligeiramente perturbador, ao passo que para o rumo de ESE este comportamento é irrelevante, sendo o efeito dissipador o predominante.

É importante salientar que o rumo NW é o que apresenta menores índices de agitação. Este facto explica a aparente falta de eficiência dos blocos para este rumo.

Compreende-se facilmente que, quanto menor for o valor do índice de agitação num determinado ponto, menor será a altura de onda nesse mesmo ponto. Isto é, admitindo um valor de 0.25 para o índice de agitação e uma altura de onda ao largo de 1 m (por simplicidade de raciocínio), de acordo com a definição de índice de agitação, verifica-se que no ponto, a altura de onda será de 0.25 m, valor que é bastante reduzido.

Deste modo, como se verificam, para o rumo de NW e para ambas as profundidades de água, valores reduzidos dos índices de agitação, tal permite concluir que as condições energéticas para esse rumo no interior da bacia são particularmente reduzidas, sendo que o plano de água no interior da bacia encontra-se na sua globalidade tranquilo, pelo se pode afirmar, com uma certa ligeireza, que não existe energia para os blocos NOREF dissiparem.

Portanto, em termos relativos, aparentemente os blocos NOREF são menos eficientes para o rumo NW. Mas em termos absolutos o efeito perturbador é insignificante, como se pode constatar pela explicação dada anteriormente.

Assim, pode-se afirmar que a solução com blocos NOREF permite uma melhoria das condições de agitação no interior da bacia em causa. Porém, conclui-se que a melhoria proporcionada pelos blocos NOREF não é substancial, mas não deixa, por isso, de ser importante.

Do ponto de vista hidráulico, o que fazia sentido, tendo em conta os períodos em presença, é que a extensão das câmaras dissipadora fosse ainda maior.

Mas, o cais não pode ser apenas eficiente do ponto de vista hidráulico, tem também que o ser do ponto de vista estrutural e não pode ser sobredimensionado sob pena de a estrutura do cais ficar muito cara. A solução proposta tem que ser equilibrada.

O que se pretende é, sem aumentar os custos do cais (isto é, sem desvantagens), conseguir uma solução melhor do ponto de vista hidráulico (vantagem), mesmo que pouco significativa.

No que diz respeito à eficiência hidráulica à reflexão dos blocos NOREF, não se podem tecer considerações quantitativas (uma vez que não se dispõem dos valores dos coeficientes de reflexão) para este caso de aplicação, porém pode-se afirmar, que através da análise dos dados que estes contribuem para a melhoria das condições de tranquilidade no interior da bacia de nascente.

No entanto, através das Figuras 11 e 12 verifica-se que existe um crescimento do coeficiente de melhoria com o aumento do período de pico, para ambos os níveis de água testados e também para ambos os rumos ensaiados.

Assim, pode-se afirmar que este efeito é um indicador do aumento do coeficiente de reflexão dos blocos NOREF com o crescimento do período de pico testado.

4.4. Novos desenvolvimentos

No âmbito deste trabalho realizaram-se novos ensaios laboratoriais utilizando-se a geometria que foi desenvolvida e a que se encontra aplicada no cais do Novo Terminal Multiusos de Leixões. Assim, o objetivo foi verificar o seu comportamento para outros períodos e ainda o efeito da existência de fundos inclinados, para esses mesmos períodos.

Seguidamente apresentam-se as condições de ensaio:

- Períodos de onda de 4 s, 8 s e 12 s;
- Alturas de onda de 1 m, 2 m e 3 m;
- Situações de Preia-mar, Nível médio e Baixa-mar;
- Simulação de fundos horizontais e inclinados.

A inclinação dos fundos adotada foi de 1:20, uma vez que se trata de um valor que facilmente se encontra ao longo da costa portuguesa. Os novos ensaios foram também realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, que possui 28,0 m de comprimento, 12,0 m de largura e 1,20 m de profundidade

O sistema de geração implementado no tanque é do tipo multi-elemento, foi desenvolvido pelo Laboratório *HR Wallingford*, sendo constituído por dois módulos, possuindo cada um deles 8 pás independentes, contemplando uma largura de 12 m (igual à largura do tanque), podendo trabalhar com uma altura de água máxima de 1 m. Assim, o movimento das 16 pás deve-se à existência de motores elétricos, sendo o movimento destas horizontal e independente entre si. Nas Figuras 13, 14 e 15 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

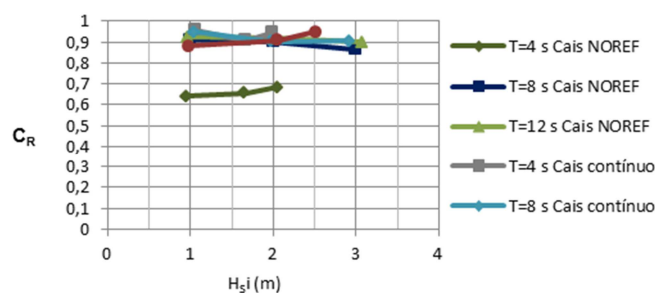


Figura 13. Coeficientes de reflexão obtidos para os vários períodos de onda de pico (T_p), para o nível médio de água.

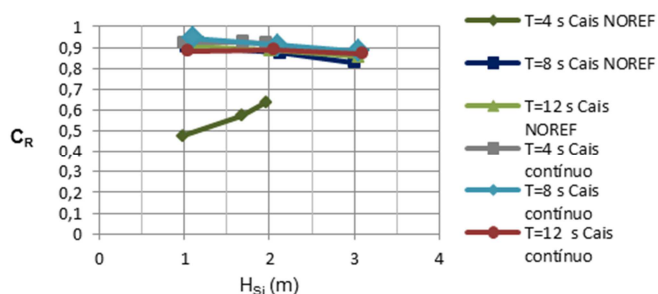


Figura 14. Coeficientes de reflexão obtidos para os vários períodos de onda (T), para o nível máximo de água.

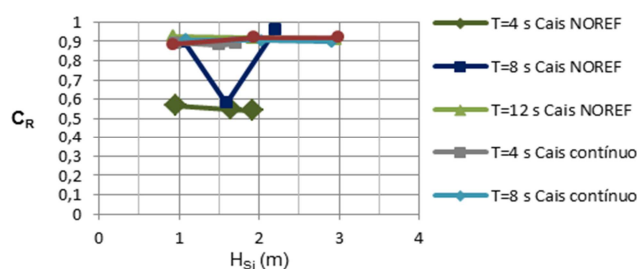


Figura 15. Coeficientes de reflexão obtidos para os vários períodos de onda de pico (T_p), para o nível mínimo de água.

Verificou-se que o comportamento dos blocos NOREF, para fundos horizontais, apresentou um comportamento muito semelhante ao de uma estrutura vertical impermeável, quando testada para períodos de 8 s e 12 s, tendo-se obtido coeficientes de reflexão de aproximadamente de 0.90.

Este comportamento já era expectável devido ao estudo anteriormente realizado no âmbito da avaliação da eficiência hidráulica dos blocos NOREF que iriam ser aplicados no Novo Terminal Multiusos do Porto de Leixões, uma vez que através desse estudo se observou que o comportamento hidráulico da estrutura à reflexão para o período de pico de 6 s já era muito semelhante ao de um cais contínuo.

Através da análise da Figura 16 verifica-se que:

- O coeficiente de reflexão médio aumenta com o aumento do nível de água testado para fundos inclinados;
- Genericamente, os valores obtidos para o coeficiente de reflexão médio para os ensaios realizados com fundos horizontais são superiores aos seus homólogos realizados com fundos inclinados, apenas para o nível de baixa-mar e para o nível médio;
- Para o nível de preia-mar a comparação do coeficiente de reflexão médio para fundos inclinados e horizontais depende do período de pico, isto é, para o período de 4 s, o valor do coeficiente de reflexão médio é maior para fundos inclinados, ao passo que para o período de pico de 8 s verifica-se o oposto. Para o período de pico de 12 s, os valores do coeficiente de reflexão médio são iguais;
- Para os testes realizados com fundos horizontais observa-se um ligeiro decréscimo do coeficiente de reflexão médio entre os períodos de pico de 8 s e 12 s;
- Para fundos inclinados e nível de baixa-mar, a estrutura apresenta um comportamento eficiente do ponto de vista da reflexão, uma vez que o coeficiente de reflexão medido se situa no intervalo [0.3; 0.7].

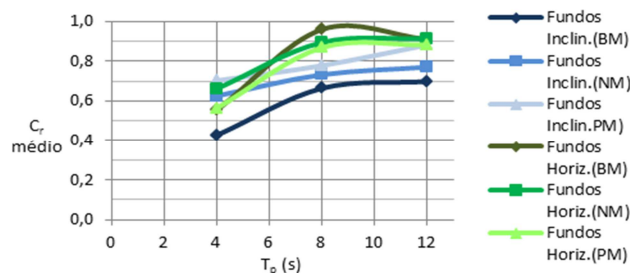


Figura 16. Variação do coeficiente de reflexão médio em função do período de pico, para os vários níveis de água testados (baixa-mar - BM; nível médio - NM e preia-mar - PM) e para fundos horizontais e inclinados.

Deste modo, conclui-se que a consideração de fundos inclinados conduz a valores do coeficiente de reflexão inferiores (em comparação com fundos horizontais), logo a eficiência hidráulica da estrutura sujeita a estas condições de agitação marítima e fundada sobre fundos horizontais é superior.

Acredita-se que devem ser realizados estudos complementares para uma gama de inclinações diferentes da testada no âmbito da presente dissertação, com o objetivo de avaliar se a tendência apresentada se mantém constante para inclinações de fundos distintas.

5. Conclusões

Apesar de cada um dos casos analisados dispor de condições de agitação marítima características e sendo todas elas diferentes entre si, verifica-se que existe uma tendência para a eficiência dos blocos à reflexão diminuir (ou seja o coeficiente de reflexão aumenta) à medida que o período de pico aumenta. Foi possível verificar que à medida que o período aumenta, é necessário que a extensão da câmara dissipadora também aumente, para que a estrutura seja eficiente do ponto de vista hidráulico. Porém é necessário que se encontre uma solução que permita compatibilizar os aspetos hidráulicos, estruturais e económicos. Assim, estes blocos destinam-se essencialmente a constituir estruturas sujeitas a uma gama de períodos limitada, as quais se verificam em regra geral nas zonas portuárias.

Referências

- Brogueira-Dias, E., Luís, L., Cunha, M. (2007). *Cais do novo Terminal Multiusos do Porto de Leixões em Blocos tipo NOREF*, PIANC - 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa.
- CONSULMAR (2011). Peças do Procedimento. Concurso Limitado por Prévia Qualificação Para a Prévia Construção do Terminal de Passageiros do Porto de São Roque, na Ilha do Pico, Açores. Memória Descritiva.
- Luís, L., Oliveira, F., Dias, M. (2005). *Cais de Gravidade com Recurso à Utilização de Blocos Tipo NOREF, Projeto e Construção*. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, W., de Groot, Maarten, Crouch, R., Vrijling, H., Voortman, H. (2001). *Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*.
- Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F.; Brogueira Dias, E.; Guedes Lopes, H.; Rosa Santos, P. (2007). *Estudo em Modelo Físico da Eficiência Hidráulica à Reflexão de Blocos Verticais Perfurados*. Proc. das 2.^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 24 de Outubro.