



PROJETO DE QUEBRA-MARES E MOLHES IMPLANTADOS EM CONDIÇÕES NATURAIS MUITO DESFAVORÁVEIS

Lucília Luís; Sofia Freire; João Barros
Consulmar – Projetistas e Consultores, Lda.

lucilia.luis@consulmar.pt, sofia.freire@consulmar.pt, joao.barros@consulmar.pt.

Resumo

Pretende-se com esta comunicação evidenciar as soluções que os vários projetistas, em colaboração com os laboratórios que realizaram os respetivos ensaios de estabilidade e galgamentos, encontraram para fazer face às desfavoráveis condições naturais. Consoante as condições existentes e os requisitos de cada caso, recorrendo a i) distintas tipologias de molhes e quebra-mares, ii) diferentes tipologia de blocos para os mantos resistentes (cubos regulares ou Antiferes, Tetrapodos, etc.), iii) betões de diferentes densidades, e ainda iv) modos de colocação mais estáveis, opções que, conjugadas, conduzem a obras de menor volumetria, consumindo menor quantidade de materiais, reduzindo a capacidade e alcance necessários dos equipamentos de movimentação e colocação, especialmente dos blocos dos mantos resistentes, e conseqüentemente, encontrando desta forma soluções técnicas, ambientais e economicamente mais vantajosas.

Introdução

A costa oeste do continente e a noroeste das ilhas portuguesas, encontram-se expostas ao Atlântico Norte, e não dispendo de enseadas com condições de abrigo naturais, parte considerável dos seus quebra-mares e molhes estão sujeitos a condições de agitação marítima das mais adversas do mundo.

Esta comunicação apresenta alguns dos casos de projeto e construção de quebra-mares e molhes implantados em zonas com condições naturais muito desfavoráveis, não apenas, mas especialmente, condições de agitação muito severas, mas também fortes correntes fluviais e de maré, elevadas profundidades, fundos rochosos e íngremes, ausência de material pétreo na proximidade para os submantos ou limitação das suas dimensões/pesos, dificuldade de acesso, e áreas sensíveis do ponto de vista ambiental, etc.

Alguns dos casos de estudo selecionados para esta comunicação são o Reforço do Molhe Principal do Porto de Ponta Delgada, na ilha de São Miguel; o Molhe Principal do Porto das Lajes das Flores, na ilha das Flores; os molhes do Porto de São Roque do Pico, na ilha do Pico, o molhe principal do Porto de Leixões, molhe Sul da Barra do Douro, os Molhes do Porto de Sines, os Molhes da Barra do Faro Olhão, nas costas oeste e sul de Portugal, respetivamente.

Finalmente, comparam-se alguns dos casos selecionados com os maiores quebra-mares do mundo, constantes da base de dados elaborada pelo HR Wallingford em colaboração com a Delft University of Technology.

Resumo das condições naturais dos seguintes quebra-mares/molhes

- 1 - Molhe Leste do Porto de Sines (Harris/Consulmar 1985)
- 2 – Molhe Sul da Barra do Douro (Consulmar/Morim de Oliveira 2004-2008)
- 3 - 3.^a Fase do Prolongamento do Molhe Leste do Porto de Sines (Consulmar 2017 - 2021)
- 4 - Prolongamento do Molhe Principal do Porto de Leixões (Consulmar 2016 - 2019)
- 5 - Reparação/reforço do Molhe Principal do Porto de Ponta Delgada (Consulmar 2019 - 2020)
- 6 - Reparação/reforço dos Molhes da Barra de Faro-Olhão (Consulmar 2022-2023)
- 7 - Molhe Principal do Porto das Lajes das Flores (MSW 2023)
- 8 - Molhe Secundário do porto de São Roque do Pico (MSW 2025)



Quadro 1 - Resumo das condições naturais dos quebra-mares/molhes

Qb-mar/ Molhe	Compr. (m)	Prof. de Impl. (mZH)	Hp (m)	Tp (s)	Observações
1	1050	-20 a -24	12	22	Fundos rochosos com pequena espessura de areia
2	450	-6 a -10	6,5	15	Fundos arenosos
3	750	-20 a -25	12 a 12,5	20	
4	300	-14 a -18	11	20	Enraizamento no quebra-mar existente protegido com blocos prismáticos de 90 ton
5	1600	-2 a -21	6 a 12	20	Taludes erodidos, irregulares e com inclinação suave, com pé a cerca de 80m de distância do coroamento
6A Poente	410	+2 a -35	5,8	17	Fortes correntes que erodem os taludes interiores e cabeças. Sítio de elevada sensibilidade ambiental e sem acesso terrestre
6B Nascente	930	-2 a -35	5,9	17	
7	500	-15 a -20	9,8	24	Ausência de enrocamentos para os submantos
8	537	-2 a -16	?	?	Fundos rochosos e ingremes

As condições naturais mais desfavoráveis comuns aos vários quebra-mares e molhes são, na generalidade dos casos, as alturas de onda de projeto que chegam a atingir 12,5m, bem como as profundidades de implantação, especialmente das cabeças, em grande parte com fundos variáveis entre a batimétrica dos -10 a -35m (ZH), cotas às quais acresce o nível de maré e que elevam as profundidades em mais 2 a 4 m. Destaca-se também as fortes correntes e seu efeito erosivo, assim como a ausência de enrocamentos e ausência de acesso por via terrestre.

Soluções propostas para os mantos resistentes dos molhes em talude

Escolha do tipo de bloco

Para os casos sujeitos a maiores alturas de onda, que atingem os 12m, a escolha do tipo de blocos para os mantos resistentes, recai forçosamente sobre os cubos regulares e/ou cubos ranhurados (Antifer), por serem blocos mais robustos, sendo que, em Portugal, é tradicional o uso de Antiferes. Por outro lado, mantos para resistirem a estas alturas de onda, consoante se trata do tronco, de cotovelos e/ou cabeças, e conforme a inclinação dos taludes admitida, precisam de blocos com cerca de 800 a 1000kN, assim como de proporcionais meios de colocação, não só em capacidade, mas também em alcance, pois trata-se de estruturas implantadas em grandes profundidades, cujos pé de talude se encontram a distâncias da ordem dos 85m relativamente ao coroamento/posição do equipamento de colocação.

Mantos de superfície regular ou irregular consoante o grau de galgamento admitido

Os mantos resistentes têm de ser capazes de suportar as fortes ações provocadas pelas ondas que sobre eles incidem e, para além de um bom comportamento estrutural, têm também que apresentar um comportamento hidráulico adequado à função de abrigo que terão que desempenhar. Assim, generalizadamente, pode assumir-se que o quebra-mar poderá ser francamente galgado, e por isso, ter um manto de superfície regular (quase plana), cota de coroamento baixa, mas manto interior com resistência suficiente para suportar as ações provocadas pelo galgamento.

Por seu turno, um molhe, por apresentar estruturas no seu intradorso (cais, terraplenos, edifícios, etc.), não poderá admitir galgamentos expressivos, pelo que o seu manto exterior deverá ter uma superfície irregular/rugosa e o seu coroamento dispor de um muro cortina de cota elevada e, eventualmente, integrar um defletor.

Estabilidade estrutural dos mantos de superfície regular e irregular

No caso dos quebra-mares assumidamente galgáveis, ao ser possível optar por um manto regular, em que a maior área de contato entre faces de blocos proporciona também maior atrito entre eles, a estabilidade destes (embora esteja dependente da densidade de colocação escolhida), é generalizada e significativamente superior aos mantos de superfície irregular/rugosa Graça et al. (2001).

Esta conclusão é, não só, coincidente com vários autores de estudos semelhantes, P. Freitas (2013)



e A.B. Frens (2007), como também foi demonstrado nos ensaios realizados no LNEC, nos casos práticos dos prolongamentos dos quebra-mares de Leixões e do troço SE do molhe Leste de Sines, estes últimos realizados antes e após a obra realizada.

Segundo Frens (2007), no caso dos mantos de superfície irregular, a perda de estabilidade em termos de K_D , será da ordem dos 30% relativamente aos mantos regulares. Já Graça et al. (2001) e P. Freitas (2013), referem que, os mantos de superfície regular, conseguem ter a mesma estabilidade do que dos de superfície irregular, com densidade de colocação 10 a 15% inferiores.

No caso dos molhes, a prática mais comum tem consistido em prever mantos com superfície e colocação regular nas cabeças, por este tipo de colocação resultar em mantos mais estáveis, e no tronco, quando o galgamento é o fator crítico, optar por mantos de superfície irregular (de colocação regular na 1.^a camada e “rodada” na 2.^a camada), conforme também se recomenda em Graça et al. (2001).

Estabilidade estrutural dos mantos em blocos de betão de densidade melhorada

Não obstante, para as mesmas condições de agitação, a colocação dos blocos de forma regular poder conduzir a reduções significativas do volume/peso dos blocos, estes continuam a precisar de meios de colocação de elevada capacidade e plataformas de trabalho suficientemente largas, obrigando também este aspeto a maiores volumetrias de quebra-mares, tão mais expressivas quanto maiores forem as profundidades, dado tratar-se de estruturas de seção transversal trapezoidais.

Além disso, devido ao elevado peso/massa dos blocos dos mantos resistentes, embora os submantos só necessitem de pesos de cerca de 1/10 a 1/15 dos mantos resistentes (SPM 1984), os seus elevados pesos podem já não permitir que sejam realizados com enrocamentos, tendo de ser construídos também com blocos artificiais, cujo elevado número incrementa expressivamente o custo de colocação em particular e da obra em geral.

Face ao exposto, os projetistas vêm-se na necessidade de reduzir o volume/peso unitários dos blocos dos mantos resistentes, para que toda a volumetria do quebra-mar/molhe reduza (espessura dos mantos e submantos e largura das plataformas de trabalho), assim como o número de colocação de blocos, reduzir a capacidade dos meios de elevação a mobilizar e, naturalmente, reduzir o custo total da obra.

Para o efeito, têm recorrido a betões de densidade melhorada, incorporando nos betões inertes com pesos específicos mais elevados, obtendo betões com densidades que poderão atingir 4 ton/m³, Marcel van Gen et al. (2001). No caso português, temos os exemplos do Molhe Leste de Sines com densidades de 2,83 e 3,1 ton/m³, o Molhe Sul da Barra do Douro com blocos de betão com densidade de 3,2 ton/m³; os prolongamentos do Molhe de Leixões com densidades de 2,83 e 3,1 ton/m³ e molhe Leste de Sines com densidades de 2,7 e 3,08 ton/m³, nos blocos do tronco e cabeça respetivamente. Mais recentemente, os molhes das Lajes das Flores com 2,7 e 2,97ton/m³ e São Roque do Pico com 2,57 e 2,75 ton/m³.

Economia obtida e facilidade de construção

Conforme referido anteriormente, os mantos de superfície regular, conseguem ter a mesma estabilidade dos de superfície irregular, com densidade de colocação 10 a 15% inferior. Por outro lado, o recurso a betão de densidade melhorada entre 2,7 e 3,2 ton/m³, pode conduzir a uma redução do volume dos mantos de cerca de 20%, tendo sido esta experiência do autor com os casos práticos dos prolongamentos do molhe principal do Porto de Leixões e do troço SE do Molhe Leste do Porto Sines. Assim, poderá afirmar-se que, embora grosseiramente, um quebra-mar em que se recorra a mantos de superfície regular, associados a blocos de betão de densidade melhorada, pode atingir uma redução acumulada do volume da ordem dos 30 a 35%, além de reduzir também a capacidade e o alcance dos meios de colocação necessários e os respetivos custos de mobilização.

Do ponto de vista construtivo, os mantos de superfície e colocação regulares, são também de mais fácil construção P. Freitas (2013), por obrigar a um espaçamento entre blocos que permita sobreposição parcial dos mesmos, ao contrário dos de superfície irregular, cuja primeira camada é regular, mas como o espaçamento entre blocos tem que ser maior (e logo não se travam mutuamente) para permitir um “encaixe” franco dos blocos da segunda camada, que são colocados rodados, para gerar a pretendida superfície irregular. Relativamente aos submantos de enrocamento sobre os quais assentam os blocos dos mantos resistentes, a uniformidade do plano de assentamento exigida é a



mesma, quer para os mantos de superfície regular ou irregular, dado que a primeira camada de ambos é sempre colocada de forma regular.

Assim, para quebra-mares implantados em condições naturais desfavoráveis, quer no que se refere às condições de agitação, quer no que se refere às profundidades de implantação, e ainda à necessidade de reduzir a sua volumetria para minimizar o seu impacto visual, a opção, por um lado, por mantos de superfície regular (se o galgamento não for um fator crítico) e por outro, por blocos de betão de densidade melhorada, conduzem a uma economia em “cascata”, dado que conduzem a uma redução significativa do peso/volume unitários dos blocos dos mantos resistentes e submantos, redução da capacidade dos meios de colocação e respetivas plataformas de trabalho e ainda, facilidade de construção e redução dos impactos ambientais.

Justificação das opções para os casos em análise

Foram os motivos referidos anteriormente que levaram à opção por blocos de betão de densidade melhorada e de superfície e colocação regular, nos casos dos prolongamentos do Quebra-mar de Leixões e troço SE do Quebra-mar Leste de Sines. Supõem-se que terão sido também estas as razões do projetista do Molhe das Flores cujos mantos resistentes são constituídos por blocos Antiferes de 56,8 e 62 ton, de densidade 2,7 e 2,97 ton/m³ e superfície regular (embora este não possa admitir galgamentos expressivos), assente sobre um submanto de enrocamento de 3 a 5 ton.

De referir ainda que o recurso a betões de densidade melhorada pode também ser uma opção quando se tem de reduzir o impacto visual da presença de um molhe ou quebra-mar, como terá sido o caso do molhe Sul da Barra do Douro.

É também uma opção quando se está a reparar quebra-mares e molhes, mas não existe espaço para bermas de suporte dos novos mantos, tendo estes que apresentar uma espessura reduzida, o que só se consegue recorrendo a blocos de betão de densidade melhorada, sendo que, quanto maior for a densidade, menor será o volume e, por conseguinte, a altura do bloco e a espessura do manto e submanto, ou seja, conduz a uma dupla redução dos volumes dos materiais, opção tomada no caso dos Molhes da Barra de Faro.

Supõem-se que terá sido esta uma das razões que levou o projetista da Proteção Costeira de São Roque do Pico, a optar por mantos em Tetrápodes de 40ton em betão de densidade 2,75ton/m³.

Base de dados dos maiores quebra-mares/molhes do mundo

Presentemente, está em curso um projeto, em que cooperam HR Wallingford UK (HRW) e o Delft University of Technology, Países Baixos (TUD), inspirado na base de dados que surgiu nos anos 70, com o objetivo de gerar e manter atualizada uma base de dados com as principais características dos maiores quebra-mares do mundo. Embora ainda em desenvolvimento e não atualizada, nesta base de dados, entre os maiores quebra-mares do mundo, constam já os quebra-mares dos portos de Sines, Leixões e Ponta Delgada, só ultrapassados em massa/volume dos blocos, pelos quebra-mar de Ferrol, Gijón, Punta Lagosteira e Bilbao.

Referências Bibliográficas

- Frens, A. (2007). “The Impact of Placement Method on Antifer-block Stability”; Master of Science Thesis, Delft University of Technology.
- Freitas, P. (2013). “Estabilidade Hidráulica de Cubos Antifer – Estudo em modelo físico”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico
- Graça, G.N., Gabriel, S.L., Sabine, R. (2001). “Estabilidade e galgamento de quebra-mares de talude – influência do modo e densidade de colocação de bloco cúbicos”. 2.as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária.
- Gent, V. M., d’Angremond, K., & Triemstra, R. (2001). “Rubble mound breakwaters: Single armour layers and high-density concrete units”. Coastlines, Structures and Breakwaters 2001
- Allsop, N. W. H., Cork, R. S., e Jan Verhagen, I. H. (2009). “A Database of major breakwaters around the world”. Coasts, Marine Structures and Breakwaters, 2009 and breakwaters.nl