

APLICAÇÃO DE CUBOS EM MANTOS RESISTENTES DE CAMADA ÚNICA Application of Cubes in a Single Armour Layer

LUCÍLIA LUÍS ⁽¹⁾ e MARCEL VAN GENT ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, Consulmar,
Av. António Augusto de Aguiar, 19-2º Esq., 1050 – 012 Lisboa, Portugal, lucilia.luis@consulmar.pt

⁽²⁾ Doutor em Engenharia Civil, Deltares,
P.O. Box 177, 2600 MH Delft, Holanda, marcel.vangent@deltares.nl

Resumo

A aplicação de Cubos em mantos resistentes de camada única é uma solução inovadora e de baixo custo para o manto resistente de estruturas de proteção costeira (molhes, quebra-mares, esporões, proteções frontais, etc.). Os trabalhos de investigação realizados demonstraram a eficácia da solução sugerindo a sua consideração na conceção de projetos de obras deste tipo. A presente comunicação resume os resultados mais importantes da investigação já realizada. Aspectos como o pré-dimensionamento, os ensaios em modelo físico para validação estrutural e hidráulica, a construção e manutenção, são igualmente abordados. Apresentam-se ainda exemplos de obras em que se optou pela aplicação de Cubos em mantos de camada única.

Palavras-chave: Quebramares, mantos resistentes, camada única, Cubos.

Abstract

The application of Cubes in single armour layer is an innovative and cost effective solution for the armour layer of coastal protection structures (jetties, breakwaters, groins, front guards, etc.). Research works have shown the effectiveness of the solution suggesting their consideration in the design of construction projects of this sort. This work summarizes the most important results of the research made so far. Aspects such as the pre-design, testing on physical model for structural and hydraulic validation, construction and maintenance, are also addressed. Also, it is presented some examples of works in which it was the application of cubes in single layer was used.

Keywords: Breakwaters, armours, single layer, Cubes.

1. Introdução

A aplicação de Cubos em mantos resistentes de camada única é uma solução inovadora que vem sendo estudada desde 1998 (van Gent e Spaan, 1998; d'Angremond *et al.*, 1999; van Gent *et al.*, 1999, 2001; van Gent, 2003; Rock Manual, 2007; van Buchem, 2009).

Estes estudos mostram que a aplicação de Cubos em camada única é, não só tecnicamente viável, como economicamente mais competitiva, quando comparada com outros tipos de mantos resistente de camada única (por exemplo, blocos do tipo Accropodes™, Core-loc™ e Xblocs®) e, sem dúvida, economicamente mais competitiva que os mantos resistentes de camada dupla (por exemplo, blocos do tipo Antifer e Tetrápodos).

O melhor comportamento manifestado por este tipo de manto parece resultar da combinação entre o peso individual do bloco, forças de contacto entre faces adjacentes de blocos e menor exposição à ação das ondas devido à regularidade da face exposta do manto.

Este último aspeto tem como desvantagem o aumento da intensidade do galgamento e da transmissão da onda por via deste (Van Gent e Spaan, 1998).

Para além do bom desempenho estrutural demonstrado, as vantagens dos Cubos aplicados em camada única, em comparação com os blocos de geometria complexa, colocados de forma imbricada (e que daqui para a frente, por simplicidade de escrita, tomam a designação de blocos imbricados), resulta da simplicidade de fabricação (geometria simples) e de colocação (blocos encostados lado a lado de forma regular ou irregular). Quando comparados com os mantos de camada dupla, o menor consumo de betão é também uma vantagem assinalável.

No caso particular das operações de colocação, a aplicação de Cubos em camada única evidencia ainda outra vantagem quando comparada com mantos resistentes constituídos por blocos imbricados – a maior facilidade de colocação de Cubos debaixo de água, especialmente em locais onde a reduzida visibilidade impede os mergulhadores de ajudarem a colocar corretamente os blocos de geometria complexa de forma a garantir o imbricamento necessário (Verhagen *et al.*, 2002).

Adicionalmente, demonstrou-se que pode ser alcançada uma melhoria na estabilidade dos mantos resistentes com a colocação de Cubos segundo um padrão regular. Frens *et al.* (2008) apresentam um estudo relativo à forma de colocação de blocos Antifer em padrões regulares.

Ensaio realizados em modelo físico com Cubos de betão de densidade normal e de alta densidade, demonstraram a viabilidade da construção de mantos resistentes de camada única em cubos, dado que os danos nestes mantos ocorrem apenas para valores significativamente mais elevados do número de estabilidade $H_5/\Delta D$, do que em mantos de camada dupla. Para este tipo de mantos, o grau de danos (número de unidades deslocadas) admitido é certa de 10 vezes inferior, o que assegura que estes apresentem uma “performance” semelhante aos de camada dupla quando sujeitos à mesma condição de carga (Van Gent *et al.*, 1999).

O menor volume de betão gasto contribui também para a economia da solução de mantos de camada única em Cubos e também por não incluir royalties. Nesta comunicação, apresenta-se em primeiro lugar uma visão global dos resultados obtidos na investigação já realizada (secção 2), analisam-se os métodos de pré-dimensionamento apresentados na bibliografia (secção 3), referem-se os critérios de estabilidade a observar nos ensaios em modelo físico (secção 4), descrevem-se posteriormente os aspetos relativos à construção e à manutenção (secção 5), para depois se discutirem os exemplos da aplicação prática de Cubos em camada única (secção 6), finalizando-se com sugestões para desenvolvimentos futuros (secção 7) e com as conclusões e recomendações (secção 8).

2. Investigação Experimental - Principais Resultados Obtidos

Foram já realizados diversos estudos com Cubos aplicados em mantos de camada única recorrendo a ensaios sistemáticos em modelo físico. Estudou-se não só o desempenho geral estrutural e hidráulico como também a influência de vários parâmetros, tais como: densidade e padrão de colocação, dimensão do material da subcamada, declividade das ondas incidentes, profundidade da água no pé de talude da estrutura e cota de coroamento. Os resultados mais importantes desses ensaios são aqui resumidos. Todos os resultados têm por base a consideração de taludes com inclinação de 1:1,5 (V:H).

2.1. Densidade de colocação

A “sensibilidade” dos mantos de camada única à densidade de colocação dos Cubos foi estudada considerando percentagens de vazios a variar entre 25 e 40%. Verificou-se serem adequadas densidades de colocação com 25 a 30% de vazios (ou seja, uma porosidade n de 0,25 e 0,3 para uma camada com espessura equivalente à aresta do Cubo), sendo a densidade de colocação com 25% de vazios que conduz a uma maior redução dos assentamentos dos Cubos e a uma maior estabilidade.

2.2. Padrão de colocação

Os ensaios foram realizados quer com um padrão irregular (mantendo, contudo, todos os Cubos com um lado paralelo ao talude de modo a criarem uma superfície relativamente lisa/plana) quer com um padrão regular (aumentando a área de contato lateral entre Cubos), sendo este último o que se revelou mais estável, ou seja, os danos iniciais ocorrem para ondas de maior altura, Figura 1.



Figura 1. Colocação de Cubos em padrão irregular (esq.) e regular (dir.).

2.3. Sub-camada / filtro de enrocamento

É considerado adequado um rácio de 10 na relação entre a massa dos Cubos e o material do filtro ($M_{\text{CUBOS}}/M_{50\text{-FILTRO}}=10$). Enrocamento de maior dimensão dá origem a uma superfície de contato com os Cubos consideravelmente irregular, deixando os Cubos mal apoiados e mais expostos à ação das ondas. Enrocamento de menor dimensão, apesar de dar origem a uma superfície de assentamento dos Cubos mais regular, não tem estabilidade suficiente e “escapa” entre juntas de blocos, Figura 2.



Figura 2. Efeito da aplicação de enrocamento de reduzida dimensão na subcamada.

2.4. Cota de coroamento

Na zona de transição entre o plano inclinado do talude (em que poderão ocorrer alguns assentamentos) e o plano horizontal da berma de coroamento (que não sofre assentamentos), poderá surgir uma “abertura/falha”, correspondendo a interseção dos dois planos a uma zona sensível/fraca, devendo por isso ficar a uma cota elevada, que garanta que não fique sujeita à ação direta das ondas, Figura 3.



Figura 3. Vista da abertura/falha na transição entre o talude e o coroamento.

A maioria dos resultados dos ensaios foi obtida para estruturas com coroamento relativamente elevado (em que os galgamentos não ocorrem ou são limitados), pelo que não se consideram válidos para estruturas com coroamento a cotas mais reduzidas.

2.5. Berma de proteção do pé de talude

A berma de proteção do pé de talude é essencial não só para proteger o manto resistente contra a erosão mas também para o suportar. Nos casos de mantos resistentes de camada única de Cubos o peso do manto resistente é em grande parte transferido para o pé de talude. Assim, o pé de talude deve ser estável e composto por blocos de peso suficiente para proporcionar o apoio necessário ao manto resistente. O pé de talude pode ser constituído por enrocamento, blocos de betão, e/ou por uma vala de encaixe/travamento do talude.

2.6. Números de estabilidade e níveis de estragos/danos

Os ensaios realizados indicam que o início dos estragos/danos em estruturas com uma única camada de Cubos ocorre aproximadamente quando $H_s/\Delta D=2$ a 3. Para Cubos do mesmo tamanho e em condições de agitação semelhantes, o início do dano em mantos resistentes de dupla camada ocorre aproximadamente quando $H_s/\Delta D=1,3$ a 1,5. O critério de “rotura do manto resistente” não é considerado igual para mantos de camada única e dupla, uma vez que para mantos de camada dupla está presente uma maior reserva de estabilidade/segurança devido à segunda camada de Cubos. Para os casos de Cubos colocados em camada dupla é realista considerar-se o início dos danos para $N_{OD} = 2,0$, enquanto para Cubos em camada única pode considerar-se $N_{OD} = 0,2$; por conseguinte, para Cubos em camada única é aceitável admitirem-se 10 vezes menos danos. Os resultados com Cubos em camada única mostram ainda a entrada em rotura para valores maiores de $H_s/\Delta D$. Para camadas duplas $H_s/\Delta D=2,5$ a 3 e para camadas únicas $H_s/\Delta D=3$ a 3,5. Nos ensaios realizados, as curvas de danos mostram também que os danos nos mantos resistentes de camada dupla ocorrem mais lentamente do que nos mantos de camada única.

2.7. Galgamentos

Mantos resistentes com uma única camada de Cubos apresentam taludes com superfícies mais regulares do que mantos de camada dupla. Este aspeto introduz uma desvantagem para os mantos de camada única de Cubos quando comparados com mantos de Cubos em camada dupla, uma vez que isso pode aumentar a intensidade dos galgamentos. Nos ensaios realizados verificou-se um aumento ligeiro dos galgamentos de cerca de 1 a 3, para galgamentos numa gama da ordem de 0,1 a 20 L/s/m.

2.8. Incidência oblíqua das ondas

Os danos devido à ação oblíqua das ondas têm início com ondas mais elevadas do que para a ação das ondas perpendiculares. Este aumento da estabilidade devido a ação oblíqua das ondas varia em função do tipo de manto resistente.

Baseado nos testes de van Gent (2003), verificou-se que para Cubos dispostos em camada única, a solicitação resultante da incidência oblíqua das ondas é menor do que para Cubos dispostos em camada dupla. Para mantos de camada única em Cubos, o fator de redução da incidência oblíqua das ondas é de cerca de 2 a 2,5.

Ou seja: $H_{s-equivalente}=H_{s-perpendicular} \cdot (\cos \theta)^{2,5}$ com $0^\circ < \theta < 45^\circ$, enquanto que para Cubos colocados em dupla camada este fator é de cerca de 1,5, ou seja: $H_{s-equivalente}= H_{s-perpendicular} \cdot (\cos \theta)^{1,5}$. A Figura 4 mostra uma comparação com outros tipos de mantos com núcleo permeável ou impermeável.

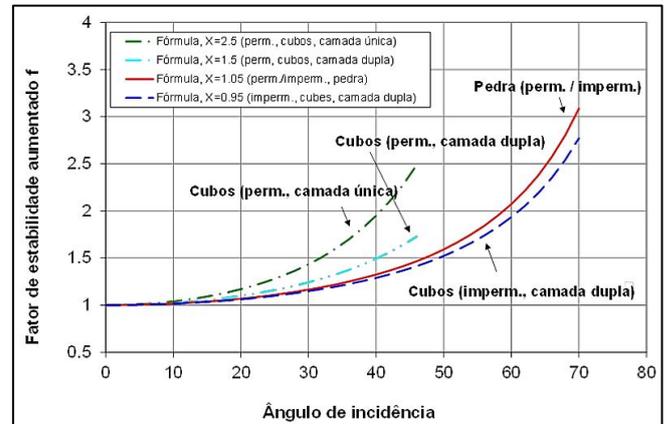


Figura 4. Influência do ângulo de incidência da onda para vários tipos de mantos resistentes (Wolters e van Gent, 2010).

Os resultados obtidos por Almeida (2013) no que respeita à influência i) da densidade de colocação, ii) de dimensão dos enrocamentos constituintes da camada de filtro, iii) da cota de coroamento e iv) da proteção do pé de talude, na estabilidade do manto resistente, correspondem na generalidade, aos resultados de van Gent *et al.* (1999).

3. Métodos / Fórmulas para Pré-Dimensionamento

Algumas recomendações para o pré-dimensionamento dos mantos de camada única em cubos podem ser encontradas no The Rock Manual (2007).

Van Buchem (2009) propõe o uso da fórmula de van der Meer modificada. Esta fórmula, à semelhança da original, tem em conta a altura significativa da onda (H_s), o período de pico (T_p), a declividade (s_{op}), o ângulo do talude (α), a densidade de colocação (n_p) e o tipo de rebentação (mergulhante ou oscilatória).

No entanto, os novos coeficientes a adoptar na fórmula modificada foram deduzidos através de um restrito número de ensaios em modelo reduzido, necessitando ainda por isso de validação.

No The Rock Manual é sugerido que, para efeitos de pré-dimensionamento do tronco admitindo um $N_{OD}=0$ (início dos estragos), se considere números de estabilidade $H_s/\Delta D$ entre 2.2 e 2.3. Estes números de estabilidade já têm em conta um coeficiente de segurança de 1,5.

Seria, no entanto, desejável ter uma fórmula de cálculo que considerasse também a inclinação do fundo junto à estrutura e a possibilidade de ocorrência ou não de rebentação, bem como com os restantes parâmetros relacionados com a agitação (altura, período e declividade), geometria da estrutura (inclinação do talude, cota de coroamento e do pé) com as características da zona de implantação (profundidade).

Dado que a transição entre o talude e a berma do coroamento é uma das zonas vulneráveis/fracas deste tipo de mantos, devendo a mesma localizar-se afastada da zona mais ativa do talude (faixa de incidência das ondas), seria interessante definir um método que permitisse determinar a cota do coroamento, em função da altura da onda incidente, para a qual se garantia que este ficaria fora da faixa mais solicitada.

A proteção do pé de talude é fundamental para assegurar a estabilidade deste, tendo a prática já demonstrado que em função da profundidade e da possibilidade de ocorrência de rebentação, os elementos que constituem esta proteção poderão apresentar massas superiores à dos elementos do talude.

Dada a importância desta parte da estrutura para a estabilidade do talude e para a estimativa do custo da obra, seria conveniente a existência de uma fórmula que permitisse também o seu pré-dimensionamento.

Para efeitos do dimensionamento das secções circulares, tais como “cotovelos” e cabeças, seria útil que existissem recomendações, eventualmente, na forma de coeficientes de correção, que permitissem determinar a massa dos blocos e a densidade de colocação mais apropriada a estas secções.

Também não menos relevante para a estabilidade do manto resistente é o dimensionamento do submanto, van Gent (2003) recomenda que a relação entre a massa dos Cubos e a massa do enrocamento do filtro seja $M_{CUBOS} / M_{50-FILTRO} = 10$.

4. Critérios de Estabilidade a Observar nos Ensaios Físicos

À semelhança da generalidade das obras de abrigo com mantos resistentes com blocos naturais ou artificiais de camada dupla, também os mantos de camada única precisam de ser sujeitos a ensaios em modelo físico reduzido para verificação da sua estabilidade.

A necessidade de recorrer a ensaios físicos é ainda mais premente no caso dos mantos de camada única por se tratar de soluções com uma menor reserva de segurança e em que a diferença entre o início dos estragos/danos e a entrada em rotura é muito pequena.

Nas especificações para ensaio são normalmente definidas as condições de agitação a observar até ser atingida a onda de projeto (H_s , T_p) associada a um determinado período de retorno sendo, no caso dos mantos de camada única constituídos por Accropodes™, Core-loc™ e Xbloc®, exigido pelos detentores das respetivas patentes, ensaios com pares de valores (H_s , T_p) 20% superiores, critério este que também se adota para o caso dos mantos de camada única em Cubos.

Para os ensaios com a onda de projeto, não são admitidos movimentos (deslocação de um bloco numa distância superior ao seu diâmetro) ou extração de blocos e a oscilação (movimentação repetida de blocos, sem se deslocarem do seu lugar) de blocos é limitada a 1%. Para os ensaios com sobrecarga ($120\%H_s$) os movimentos/extrações de blocos estão limitados apenas a 1%.

As condições de agitação a considerar nos ensaios podem ser definidas para vários níveis de água, sendo geralmente considerados os correspondentes ao nível de baixa-mar; preia-mar e preia-mar mais sobrelevação (quando aplicável). A realização de ensaios com diferentes níveis de água assume grande relevância quando as variações de maré são significativas, sendo os ensaios com os níveis mais baixos importantes para verificar a estabilidade da parte inferior do talude e pé de talude, enquanto os níveis mais elevados são importantes para observar a estabilidade da parte superior do talude e berma de coroamento.

No caso dos ensaios tridimensionais, são também comumente definidas diferentes direções de incidência das ondas, podendo corresponder a cada direção um par (H_s , T_p) distinto. Também é importante definir o tipo de espectro mais representativo do tipo de agitação em presença.

5. Aspectos Construtivos e de Manutenção

A escolha do tipo de bloco e da camada de proteção não deve basear-se exclusivamente nas vantagens hidráulicas demonstradas pelos resultados dos ensaios em modelo físico; também não deve basear-se exclusivamente nas vantagens económicas teóricas reveladas por esses resultados. Aspectos práticos, tais como a complexidade de pré-fabricação dos blocos, devido à forma dos blocos e das cofragens, o cuidado especial necessário quando se movimentam os blocos em estaleiro e na obra, e a frágil resistência ao choque das partes salientes dos blocos de geometria complexa (relevante durante a colocação e vida útil da estrutura), não devem ser ignorados. Todos estes aspetos afetam o custo global das obras e a seleção do bloco e do manto resistente, técnica e economicamente mais vantajosos. Do ponto de vista construtivo, os mantos resistentes de camada única com Cubos parece evidenciar diversas vantagens quando comparados com outros blocos de camada única mais complexos, como Accropode™, Core-loc™ e Xbloc®, em relação à pré-fabricação, colocação e trabalhos de manutenção.

Neste capítulo são feitas referências a essas vantagens e comparações com o caso específico dos Accropode™, assumindo que as conclusões são, em geral, suscetíveis de aplicação a outros tipos de blocos de geometria complexa colocados em camada única. Esta análise é baseada na experiência adquirida com a construção de apenas dois quebra-mares onde se aplicaram Accropode™, Core-loc™ e Cubos, pelo que consiste apenas numa análise preliminar.

5.1. Pré-fabricação

Devido à sua geometria simples os Cubos são fáceis de pré-fabricar. Como possuem formas lineares [quatro planos ortogonais - Figura 5 (em cima)], podem ser construídos no local e não necessitam de cumprir os requisitos exigidos pelos detentores de patentes dos blocos de geometria complexa, que muitas vezes só aprovam cofragens desenvolvidas por empresas por eles certificadas, podendo esse facto ser muito penalizador para a entidade que suporta os custos da construção.

Além disso, a geometria complexa dos blocos que funcionam por imbricamento [Figura 5 (em baixo)] exige cofragens caras e de aplicação trabalhosa. O custo das cofragens metálicas depende do número de formas e da sua complexidade. Pelo contrário, as cofragens para os Cubos são mais fáceis e rápidas de construir, sendo, conseqüentemente, mais baratas.



Figura 5. Cofragem para Cubos de betão (em cima) e para Accropode™ (em baixo).

Relativamente à produtividade da construção, devido à complexidade geométrica dos blocos do tipo Accropode™, Core-loc™ e Xbloc®, por oposição à simplicidade dos Cubos, o processo de remoção das cofragens é mais demorado para os primeiros do que para os segundos. Além disso, as cofragens para Cubos podem ser removidas mais cedo, permitindo uma maior rotatividade para o mesmo número de cofragens.

Quanto à área para pré-fabricação, pese embora esta possa ser semelhante nos dois casos, os blocos de geometria complexa necessitam de mais espaço para remoção das cofragens, uma vez que esta é feita lateralmente, enquanto para os Cubos a remoção da cofragem pode ser feita na vertical necessitando, como tal, de menos espaço.

As cofragens maiores e mais complexas usadas para produzir blocos do tipo Accropode™, Core-loc™ e Xbloc® podem originar variações significativas de resistência ao longo desses blocos por causa do modo como se processa a ligação dos agregados, verificando-se maior compactação no fundo da cofragem, dado a água do betão tender a subir com a vibração durante a descarga do betão. Uma elevada relação água/cimento e uma vibração excessiva podem originar blocos de menor qualidade, especialmente nas empreitadas com fiscalização deficiente.

Cofragens de formas complexas, com superfícies horizontais e ligeiramente inclinadas, favorecem a acumulação de água em certos pontos, podendo originar uma redução da resistência do betão. Por outro lado, os Cubos por requerem cofragens mais simples, em que o betão está concentrado numa única massa, produzem um elevado calor de hidratação e um alto potencial de fissuração térmica.

A ocorrência de bolhas está também associada à geometria dos blocos. A face do betão que adere à superfície plana das cofragens é especialmente suscetível à formação de bolhas, Figura 6.



Figura 6. Bolhas na superfície do betão, formadas na interface plana cofragem-betão de um Accropode™.

O espaço necessário para empilhar os blocos pré-fabricados depende do tamanho do quebra-mar, do clima de agitação marítima (pode originar paragens no Inverno) e das restrições do programa de trabalhos a executar. Os Cubos requerem áreas menores porque podem ser facilmente empilhados em múltiplas camadas.

5.2. Execução dos mantos resistentes

Os blocos de geometria complexa são colocados de forma imbrincada, de acordo com uma malha predefinida, fornecida pelo detentor da patente, podendo a orientação dos blocos ser muito variável. Além disso, antes de se colocarem os blocos no manto resistente do molhe, é necessário ensaiar/simular, em modelo à escala de 1:1, a colocação dos blocos num plano inclinado, o que precisa de ser acompanhado por um especialista da empresa que detém a patente, que demonstra e fiscaliza o processo de colocação dos blocos.

Os Cubos, devido à sua geometria linear e plana, são colocados todos na mesma posição, tornando o processo de colocação muito mais fácil.

Os mantos de camada única constituídos por Cubos mantêm-se estáveis por ação da gravidade e do atrito lateral e são, portanto, mais adequados para construções em que seja exigida uma tolerância reduzida.

Do mesmo modo, devido ao complexo padrão dos blocos imbricados e à importância do correto posicionamento e imbricamento, deverá ter-se especial cuidado na colocação da camada do submanto. No caso dos Cubos, este aspeto não é tão crítico para a estabilidade do manto resistente, uma vez que entra em jogo o atrito lateral entre blocos, podendo aceitar-se mais irregularidades.

Em relação à segurança da operação de movimentação dos blocos no estaleiro, deve ser tido em conta que um impacto accidental associado à movimentação dos blocos pré-fabricados, pode afetar diretamente a segurança de pessoas bem como o desempenho das operações de empilhamento, transporte e colocação.

A movimentação dos blocos em segurança depende principalmente do equipamento para manuseamento (pinças, cabos, etc.) e do tamanho e fragilidade dos blocos pré-fabricados.

Os blocos do tipo Accropode™, Core-loc™ e Xbloc®, devido à sua geometria complexa requerem o uso de um sistema de cabos enleados acopláveis a um gancho, constituindo a movimentação, a fase mais complexa e menos segura do processo de execução, Figuras 7 e 8 (direita).



Figura 7. Pinça metálica de pressão para segurar os Cubos (esquerda) e fitas para segurar e suspender Accropode™ (direita).



Figura 8. Colocação do Cubo (esquerda) e de Accropode™ (direita).

Os Cubos podem ser movimentados e colocados de formas diferentes utilizando, por exemplo:

- um sistema de cabos/fitas e ligados com um gancho em aço (semelhante para os blocos de geometria complexa);

- argolas de aço fixas aos Cubos aquando da sua construção, e um sistema de cabos que prendem a essas argolas;
- pinças metálicas de pressão.

O uso de cabos/fitas para suspender os blocos pode expor a riscos físicos os trabalhadores envolvidos no processo. Já o uso de pinça metálica de pressão permite o manuseamento dos blocos a partir de um guindaste, com menores necessidades de pessoal próximo dos blocos, aumentando a segurança destes.

Debaixo de água, em condições de reduzida visibilidade, é particularmente difícil colocar blocos respeitando a malha estabelecida, especialmente quando se trata de blocos de geometria complexa e que têm que ficar imbricados uns nos outros. O manuseamento de blocos do tipo Accropode™, Core-loc™ e Xbloc® debaixo de água é mais crítico uma vez que estes apenas são eficazes quando ficam corretamente imbricados. Já para os Cubos, o contato entre faces laterais, é fácil de concretizar.

Para superar a dificuldade de conseguir uma correta colocação sob condições de baixa visibilidade e aumentar a taxa de produtividade e a segurança, têm vindo a ser desenvolvidos equipamentos especiais e software específico (Posibloc™ desenvolvido pela Mesuris para Accropodes™ e Core-locs®, e o Echoscope®, desenvolvido pela CodaOctopus, aplicável a todos os blocos em geral). Estes métodos especiais destinam-se a tornar mais fácil e segura a colocação de blocos de geometria complexa e que têm que ficar imbricados, e a facilitar a colocação de ambos os tipos de blocos, de geometria complexa e simples, quando estas operações são realizadas de noite. Deverá ter-se em conta que estes métodos, recorrendo a equipamentos especiais, serão apenas rentáveis em empreitadas que envolvam a colocação de um grande número de blocos.

5.3. Reparação do manto resistente

Tanto durante a construção como durante a vida útil das estruturas podem ser necessários trabalhos de reparação, caso estas revelem necessidade de trabalhos de manutenção.

No caso dos blocos de geometria complexa é mais provável que os trabalhos de manutenção sejam necessários durante a construção dado que o manto resistente é construído por etapas. Primeiro é construído o talude, ficando parcialmente concluído e sujeito à ação das ondas durante algum tempo (idealmente um inverno) permitindo, assim, que ocorram alguns assentamentos e imbricamento dos blocos. Só após esta fase de “consolidação” do manto, é que o restante manto pode ser concluído (restante talude e berma de coroamento).

Durante esta primeira fase, a estrutura está incompleta e por isso mais vulnerável à ação das ondas, podendo ser mais facilmente danificada pelas tempestades que possam ocorrer durante a construção. Dependendo da intensidade das tempestades que possam ocorrer, os danos podem confinar-se apenas à quebra de alguns blocos devido à oscilação (rocking – na terminologia anglo-saxónica), ao desprendimento de alguns blocos, ou mesmo verificar-se o colapso da estrutura.

Para evitar ou minimizar esses danos poderão ser aplicados no manto resistente blocos maiores do que os necessários para o efeito. No entanto, isso representa uma alternativa muito onerosa. A construção da camada do manto resistente recorrendo a Cubos não requer um processo faseado e, por conseguinte, a estrutura é menos suscetível a danos.

Os Cubos, que resistem por gravidade e atrito lateral, adaptam-se melhor aos assentamentos do que os blocos de geometria complexa, pois os Cubos tendem a arrumar-se homogeneamente face a face, unindo-se uns aos outros quase de imediato, enquanto nos blocos de geometria complexa, o assentamento e o aumento do imbricamento é mais gradual.

Pelo contrário, se ocorrerem assentamentos diferenciais consideráveis, as camadas do manto resistente que se fixam através do imbricamento, evidenciarão, provavelmente, menos flexibilidade para se adaptarem àqueles assentamentos devido ao seu “entre arranjo” mais complexo. Assim, como estes assentamentos podem causar falhas no imbricamento entre blocos a longo prazo, estas estruturas vão perdendo estabilidade. Com efeito, estão envolvidas uma grande variedade de forças de impacto, desde o contato entre blocos durante a movimentação e a colocação no decurso da empreitada, até às forças causadas pela ação das ondas e pelo impacto de partes de blocos partidos durante a fase de exploração da estrutura.

Os blocos de geometria complexa, dado apresentarem na sua estrutura algumas partes mais delgadas e salientes, apresentam uma maior tendência de se quebrarem do que os Cubos.

As estruturas constituídas por Cubos podem ser reparadas por simples adição de novos Cubos iguais, enquanto no caso das estruturas constituídas por blocos imbricados, a reparação de uma camada do manto devido à falta ou deslocamento de um bloco, implica a remoção de muitos dos blocos adjacentes para se reconstruir adequadamente o manto resistente.

6. Casos Práticos de Aplicação de Cubos em Camada Única

A aplicação de Cubos em camada única foi já realizada nos seguintes casos:

- Punta Langosteira (Espanha), em que as cabeças provisórias foram protegidas com Cubos colocados em camada única (Figura 9, à esquerda).
- Boa Vista (Cabo Verde), em que a parte principal do tronco e da cabeça do quebra-mar é constituída por Cubos em camada única (Figura 9, à direita).

O quebra-mar de Punta Langosteira tem um comprimento de mais de 3 km. Devido à sua grande extensão e ao severo clima de agitação marítima local (com uma altura de onda significativa superior a $H_s=15$ m), teve de ser construído por etapas, verificando-se um maior esforço de construção durante o verão, enquanto no inverno o quebra-mar inacabado era protegido com cabeças provisórias. A utilização de Cubos em camada única foi a solução menos dispendiosa encontrada.

A cabeça do quebra-mar do porto de Sal Rei, na Ilha da Boa Vista foi reprojetaada com Cubos de camada única em alternativa aos Accropode™, por se ter demonstrado que esta solução era técnica e economicamente mais vantajosa.



Figura 9. Ensaios em modelo físico reduzido das cabeças provisórias em mantos de camada única em Cubos em Punta Langosteira (esquerda) e Cubos em camada única na cabeça do quebra-mar de Sal Rei na Ilha da Boa Vista (direita).

7. Desenvolvimentos Futuros

Dado que o significativo trabalho de investigação já realizado (van Gent e Spaan, 1998; d'Angremond *et al.*, 1999; van Gent *et al.*, 1999, 2001; van Gent 2003; Rock Manual, 2007; van Buchem, 2009), bem como os estudos dos casos práticos em modelo reduzido (quebra-mar de Punta Langosteira e Porto de Sal Rei) revelaram que os mantos resistentes constituídos por camada única de Cubos são uma opção técnica e economicamente vantajosa, recomenda-se que sejam efetuados ensaios adicionais em modelo físico, para analisar o comportamento estrutural e hidráulico deste tipo de mantos:

- quando sujeito a condições de agitação mais severas do que as anteriormente testadas;
- que permitam analisar a influência da inclinação do fundo junto à estrutura na estabilidade dos mantos;
- bem como da ocorrência de rebentação diretamente sobre esta,
- que conduzam à possibilidade de uma aplicação mais alargada deste tipo de mantos.

Embora os ensaios em modelo físico de projetos específicos possam fornecer a informação necessária, seria útil investigar melhor alguns aspetos de forma mais genérica e sistemática. São disso exemplo, o estudo do comportamento deste tipo de mantos quando aplicados nas seções curvas, tais como “cotovelos” e cabeças dos quebra-mares e molhes, e seções planas com cotas de coroamento baixas. Para permitir o pré-dimensionamento deste tipo de mantos seria desejável o aparecimento de uma fórmula de cálculo simples, mas que incorpore as inúmeras variáveis em presença, que facilite aos projetistas a adoção deste tipo de manto resistente, como acontece com os mantos de Accropode™, o Core-loc™ e o Xbloc®.

Para divulgar a utilização deste tipo de bloco/manto resistente, bem como para realçar as suas vantagens comparativas com os restantes mantos de camada única e transmitir confiança aos projetistas, donos de obra e construtores, seria útil a inclusão deste tipo de manto nas novas edições dos vários manuais da especialidade, e complementar o The Rock Manual, onde já consta.

Adicionalmente, aproveitando a recente construção do quebra-mar de Punta Langosteira e a construção do quebra-mar do Porto de Salrei (que se encontra em curso), seria oportuno implementar um plano de monitorização de longo prazo, que permita complementar e confirmar os ensinamentos obtidos com os ensaios em modelo reduzido, quer no que se refere à estabilidade dos mantos quer no que se refere ao galgamento.

8. Conclusões e Recomendações

A investigação sobre mantos resistentes constituídos por Cubos colocados em camada única para a proteção de quebra-mares conduziu à conclusão que este tipo de manto apresenta um bom desempenho estrutural.

A resistência da camada única de Cubos resulta duma combinação de forças devidas ao peso (como nas proteções de camada dupla), resistência devida às forças de contato entre unidades adjacentes (como nos revestimentos em blocos), e menor exposição das unidades individuais à ação da onda devido a uma superfície mais plana ao longo de todo o talude.

A aplicação de Cubos em camada única com a função de manto resistente reduz a quantidade de material envolvido na construção em comparação com os mantos de camada dupla, conduzindo a uma solução economicamente mais atrativa.

No que se refere aos métodos e fórmulas de dimensionamento dos vários componentes da estrutura (talude, pé de talude e berma de coroamento) são ainda escassas as recomendações que apoiam os projetistas no projeto/dimensionamento deste tipo de mantos resistentes.

Os critérios de estabilidade a observar nos ensaios em modelo físico reduzido são os usualmente considerados para os restantes mantos de camada única, destacando-se a exigência de efetuar ensaios de sobrecarga (120% H_s).

Por razões construtivas relacionadas com a simplicidade de fabricação, movimentação e colocação, a utilização de Cubos em mantos resistentes de camada única pode ser também economicamente mais atrativa quando comparada com a utilização de blocos de geometria complexa, imbricados, colocados também em mantos de camada única, como Accropode™, Core-loc™ e Xbloc®.

De referir ainda que os casos recentes e em curso de aplicação prática destes mantos são uma excelente oportunidade para efetuar programas de monitorização sistemática.

As conclusões sobre a maior eficiência na produção e a consequente vantagem económica da aplicação de Cubos em camada única quando comparada com a aplicação de outros blocos mais complexos, também em camada única, embora com base em exemplos de aplicações reais, são preliminares e necessitam de mais estudos comparativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Engenheiros Cruz Ferreira e Pedro Sousa da SOMAGUE a sua contribuição para este trabalho, com disponibilização de informações sobre os processos de construção dos blocos e mantos resistentes com Cubos e de outros blocos mais complexos de camada única, bem como pela cortesia de terem facultado as fotografias das Figuras 5 a 8.

Referências

- Almeida, L. (2013). *Experimental evaluation of the behaviour of rubble mound breakwaters with a single layer of cubic blocks*, MSc-Thesis, Faculty of Engineering of University of Oporto, Oporto, Portugal.
- d'Angremond, K., E. Berendsen, G.S. Bhageleo, M.R.A. van Gent e J.W. van der Meer. (1999). *Breakwaters with a single-layer*, Proc. Copedec-V, Capetown, South Africa.
- Frens, A.B., M.R.A. van Gent e J. Olthof. (2008). *Placement methods for antifer armour units*, World Scientific, Proc. ICCE 2008, Vol.4, pp.3337-3345.
- The Rock Manual. (2007). *The use of rock in hydraulic engineering* (2nd edition), CIRIA, CUR, CETMEF, Published by C683, CIRIA, London (ISBN 978-0-86017-683-1 and 5).
- Van Buchem, R.V. (2009). *Stability of a single top layer of Cubes*, MSc-Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Van Gent, M.R.A. e Spaan, G.B.H. (1998). *Breakwaters with a single layer of Cubes*, Delft Hydraulics report H3387, Delft Hydraulics, Delft.
- Van Gent, M.R.A., E. Berendsen, S.E. Plate, Spaan, G.B.H. e d'Angremond, K. (1999). *Single-layer rubble mound breakwaters*, Balkema, Proc. International Conference Coastal Structures, Santander, Spain, Vol.1, pp.231-239.
- Van Gent, M.R.A., d'Angremond, K. e Triemstra. (2001). *Rubble mound breakwaters: Single armour layers and high-density units*, Proceedings of the International Conference on Coastlines, Structures and Breakwaters, London, ICE, 307-318.
- Van Gent, M.R.A. (2003). *Recent developments in the conceptual design of rubble mound breakwaters*, Proceedings of the COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka.
- Verhagen, H.J., K. d'Angremond, and K. van der Vliet. (2002). *Positioning of Cubes on a breakwater slope*, ASCE, Proc. ICCE 2002, Vol.2, pp.1550-1560.
- Wolters, G. and M.R.A. van Gent. (2010). *Oblique wave attack on Cube and rock armoured rubble mound breakwaters*, Proc. ICCE 2010, Shanghai