



## PROJETO E FABRICO DE CAIXOTÕES DE BETÃO ARMADO

Pedro Carvalho<sup>1</sup>; Maria Cristina Afonso<sup>2</sup>; Sérgio Oliveira<sup>3</sup>; José Vidal<sup>3</sup>; Francisco Araujo<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>NSE-Engenharia, Lda.; <sup>2</sup>OCEANING-Engenheiros Consultores, Lda.; <sup>3</sup>ETERMAR-Engenharia, S.A.;  
<sup>4</sup>Consultor  
[pedro.carvalho@nse.pt](mailto:pedro.carvalho@nse.pt), [cristina.afonso@oceaning.pt](mailto:cristina.afonso@oceaning.pt), [s.oliveira@etermar.com](mailto:s.oliveira@etermar.com), [j.vidal@etermar.com](mailto:j.vidal@etermar.com),  
[francisco.araujo@chryso.com](mailto:francisco.araujo@chryso.com).

### Resumo

A solução pré-fabricada dos muros de gravidade materializados por caixotões de betão armado apresenta, relativamente a outras tipologias construtivas, vantagens competitivas em termos: ambientais, ao reduzir a perturbação da fauna local durante a construção; logísticos, ao reduzir a mobilização de meios e equipamentos de obra para locais remotos; otimização de tempo e redução dos custos de construção.

O presente artigo descreve os condicionamentos atendidos na construção de dois cais para acostagem para Mega-lates nos Emirados Árabes Unidos.

Palavras-chave: caixotões de betão; doca flutuante.

### 1. Introdução

As estruturas em caixotões aplicam-se essencialmente em cais acostáveis e em quebra-mares.

As recomendações e normativas internacionais aplicáveis ao projeto dos caixotões apontam esta tipologia estrutural como uma das opções mais competitivas para novas infraestruturas portuárias em todo o mundo.

O projeto e o fabrico de caixotões de betão armado pré-fabricados é um processo desafiante, ao obrigar a uma adequação permanente e continua do projeto às abordagens do fabrico, colocação em flutuação, transporte e do afundamento dos caixotões no local da obra.

Do ponto de vista do projeto, a localização geográfica da obra é um fator diferenciador, ao obrigar a atender às exigências específicas do local, como a temperatura e a salinidade, passíveis de afetar a durabilidade e a vida útil das obras, que não se limitam ao estudo da composição do betão e dos recobrimentos das armaduras.

No fabrico dos caixotões dos dois cais objeto deste artigo foram ponderadas as vantagens e as limitações da utilização de uma doca flutuante comparativamente a outras soluções possíveis, como muros de blocos ou aduelas em betão pré-fabricadas.

Os caixotões de betão armado pré-fabricados apresentaram vantagens operacionais e logísticas, mas obrigaram a uma programação detalhada das etapas de fabrico por ser necessário compatibilizar as pressões hidrostáticas inerentes à flutuação dos caixotões em idade “jovem” do betão, enquanto que soluções em blocos ou aduelas requerem maior logística de transporte, mais mão-de-obra no local (nomeadamente e sobretudo mergulhadores) para a execução das camadas de fundação e colocação de aduelas, as quais são uma grande limitação em maiores profundidades.

Em suma, na construção dos dois cais de acostagem para Mega-lates construídos nos Emirados Árabes Unidos, com fundos de serviço -10,0 m ACD, foi escolhida a solução de caixotões pré-fabricados em betão armado.

O projeto incidiu igualmente na conceção da solução para a superestrutura a executar sobre os caixotões e dos dispositivos provisórios para amarração e reboque dos caixotões, por forma a não porem em causa a durabilidade e a consequente degradação dos elementos estruturais em betão armado.

A adaptação do projeto às condições locais, ao processo construtivo e aos equipamentos do empreiteiro exigiu uma colaboração contínua e permanente com a equipa de projeto.

## 2. Considerações de Projeto

Os dois cais de acostagem projetados para atracar Mega-lates têm um comprimento total de 600 m, tendo cada cais um comprimento de 300 m. São compostos por 16 caixotões de betão armado pré-fabricados, com 37,5 m de comprimento, 14,3 m de largura e 13,1 m de altura.

Cada caixotão apresenta 21 células, as quais são preenchidas com material dragado selecionado, limitando o tamanho das partículas a uma faixa que varia de areias grossas a cascalhos (ver Figura 1).

As paredes interiores e exteriores dos caixotões têm 0,25 e 0,45 m de espessura, respetivamente e a laje tem uma espessura de 0,7 m (ver Figura 2).

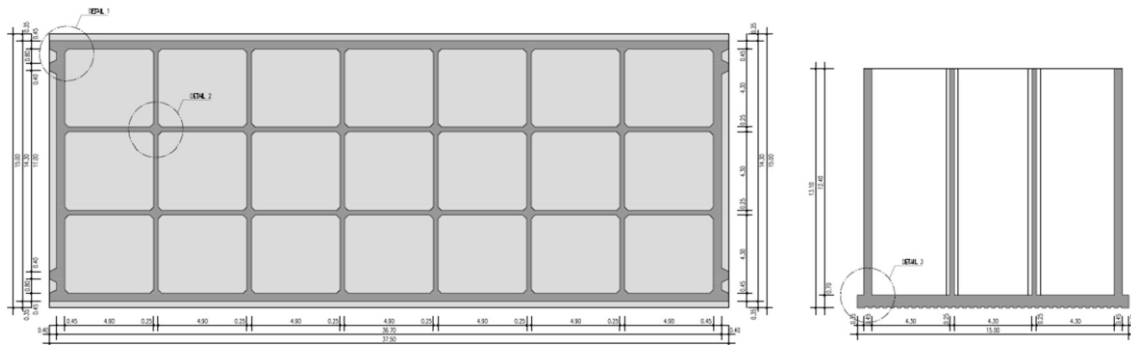


Figura 1. Caixotões pré-fabricados. Planta e perfil tipo.

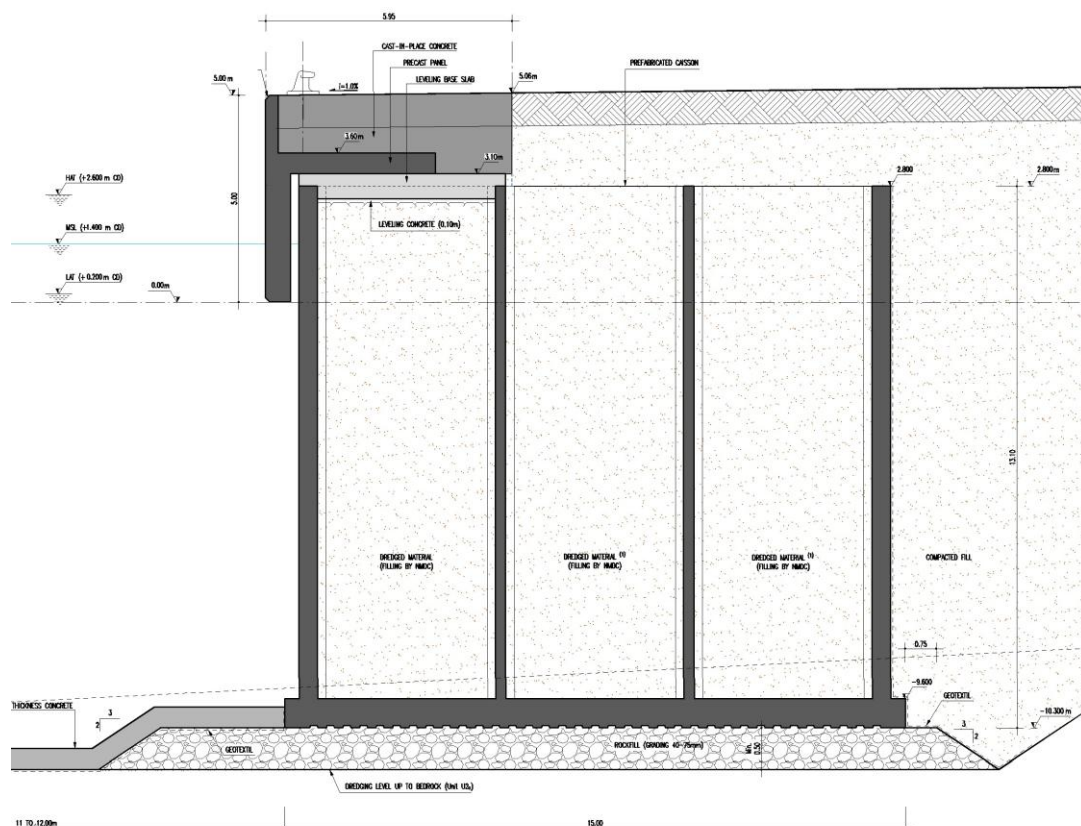


Figura 2. Cais acostável. Seção transversal.



Os caixotões construídos e transportados numa doca flutuante, foram afundados no local sobre um prisma de enrocamento, assente no leito rochoso (ver Figura 3).



Figura 3. Transporte do caixotão para o local da obra.

Os caixotões são ligados estruturalmente dois a dois por intermédio de uma viga de coroamento em betão armado a executar sobre o primeiro alinhamento de células dos caixotões. A viga de coroamento é composta por elementos pré-fabricados, que asseguram a qualidade estética da frente-cais e funcionam como retenção (ou cofragem) do betão aplicado “in situ” para solidarização das peças – cumprindo os requisitos do cliente de ter o coroamento do cais na cota +5,0 m ACD e a cota do leito marinho à -10,0 m ACD.

Os principais requisitos de projeto foram os seguintes: o afastamento entre os caixotões não deve exceder 0,15 m; a espessura mínima do prisma de fundação dos caixotões não deve ser inferior a 0,5 m; os materiais de enchimento no tardo dos caixotões são provenientes da dragagem, selecionados e compactados por deposição natural, cujo o grau de compactação (verificado por ensaios) é suficiente para mitigar o risco de liquefação; as células dos caixotões são preenchidas com materiais dragados, selecionados e com tamanho das partículas definido; a vida útil de projeto é de 50 anos. Foram também estabelecidas as regras a cumprir no afundamento e enchimento dos caixotões, bem como na execução do aterro no tardo dos caixotões.

No dimensionamento do muro-cais foram consideradas as seguintes ações: peso da estrutura; sobrecarga; pressões do solo; força de amarração e acostagem considerando a embarcação de projeto; níveis da maré tendo em conta as alterações climáticas; desnível hidrostático; altura de onda e sismo. As ações transitórias para amarração, reboque e afundamento dos caixotões foram igualmente tidas em conta na verificação estrutural daqueles elementos.

### 3. Considerações de Construção

Nesta obra a construção de caixotões de betão armado pré-fabricados, utilizados nos dois cais foram um grande desafio para atender às exigências específicas do local a ao prazo de execução para construção da obra.

Os caixotões foram construídos e afundados num local onde se reconheceram condições ambientais que condicionavam a vida útil de estruturas em betão armado, nomeadamente a elevada salinidade ( $\approx 4,3\%$ ), relativamente às verificadas em Portugal ( $\approx 2,0\%$ ), temperaturas médias significativamente mais elevadas (atmosféricas de  $40^{\circ}\text{C}$  e  $30^{\circ}\text{C}$  na água do mar) e ainda outros ataques químicos (particularmente os sulfatos).

A vida útil desta estrutura exigida nas especificações técnicas foi 50 anos. Segundo a norma local (D.C.M.I.), a estrutura dos caixotões não poderia ter recobrimento nominal inferior a 75 mm, condicionando o projeto particularmente no controlo de abertura de fendas. Contudo, o projeto foi dimensionado à luz do Eurocódigo 2 (que estabelece limites menos gravosos) com base um estudo apurado da composição do betão usado no fabrico dos caixotões.

Em condições de exposição marítima, a durabilidade do betão armado dependeu da seleção criteriosa dos materiais constituintes e da conceção adequada da formulação do betão. A

utilização de ligantes com propriedades pozolânicas contribuiu para limitar o ataque de agentes agressivos, nomeadamente cloretos e sulfatos presentes na água do mar. Do ponto de vista regulamentar e de conhecimento das condições do Golfo Pérsico, considerou-se que para a durabilidade do betão que alguns critérios deveriam ser respeitados, sendo os mais relevantes a permeabilidade aos cloretos com valor inferior a 800 coulomb e a difusão de cloretos em estado não estacionário ser inferior a  $1,75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Do ponto de vista construtivo a formulação da composição do betão privilegiou uma relação água/cimento inferior ao estabelecido nos regulamentos, o que por si só não era condição suficiente para garantir o controlo da abertura de fissuras. Pelo referido foi reduzido no ligante o teor de clínquer para 35% de CEM I e considerou-se a utilização de GGBS em 60% e ainda 5% de sílica de fumo. Foram igualmente aplicados superplastificantes com adequada manutenção de consistência para as condições de execução. O controlo da fendilhação, foi convenientemente previsto com recurso a proteção de cura química.

Em obra foram projetadas peças metálicas para amarração e reboque do caixotão, concebidas especificamente para esta obra, de forma a eliminar eventuais pontos de corrosão – passíveis de comprometer a vida útil da obra (ver Figura 4).

A superestrutura do caixotão dispõe de uma viga de coroamento em betão armado, pré-fabricada, assente com junta seca sob o coroamento dos caixotões, não sendo prevista a sua ligação com armaduras.

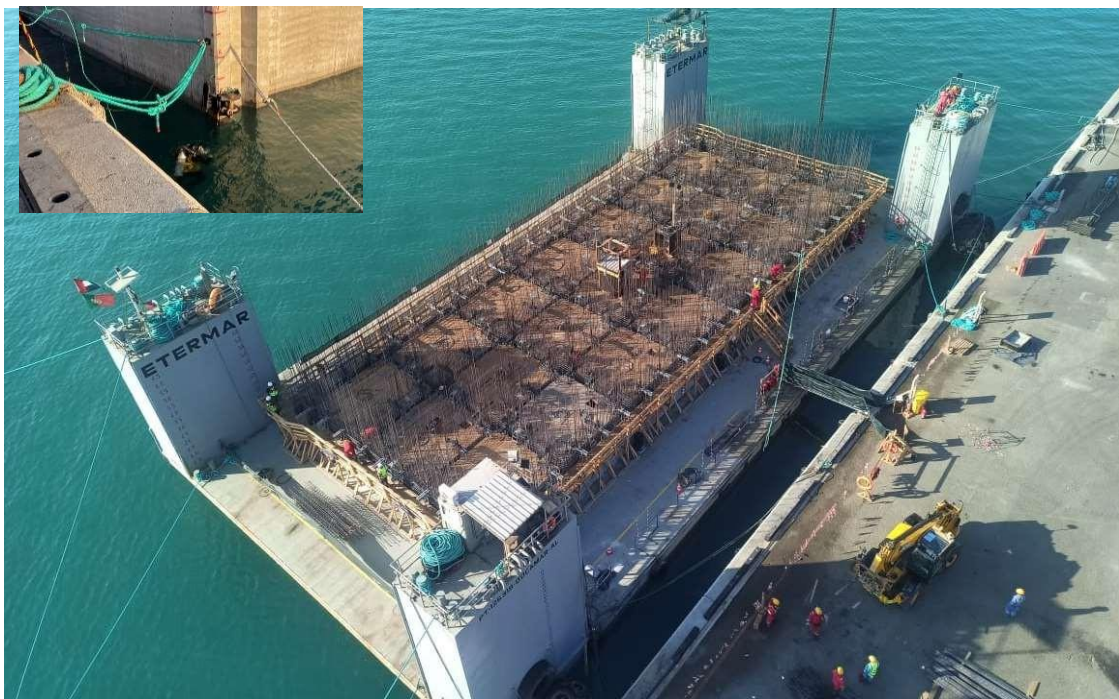


Figura 4. Construção do caixotão na doca flutuante.

#### 4. Referências Bibliográficas

D.T.M.S - Department of Transport Maritime Division (July 2013). "Design Code for Maritime Infrastructure.

European Committee for Standardization. EN 1992-1-1: 2010. "Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings".