

PROJETO DE DUQUES D'ALBA EM DIFERENTES CENÁRIOS GEOLÓGICOS

João Bastos; José Pernão; António Ressurreição
Future Proman

francisco.bastos@future.proman.pt; jose.pernao@future.proman.pt;

Sumário

O crescimento e a globalização da economia têm levado a um aumento do nível de exigência do transporte marítimo. Ao longo das últimas décadas tem-se verificado um aumento significativo da dimensão dos navios, o que implica um maior desafio no dimensionamento das estruturas onde estas embarcações acostam.

Neste panorama, os duques d'alba (DA) desempenham um papel fundamental na acostagem e na amarração de navios, bem como na proteção de estruturas mais expostas ao tráfego portuário, nomeadamente o que ocorre em bacias e canais de portos interiores, revelando-se estruturas bastante versáteis e económicas em face do seu custo-benefício. Grande parte dos DA são construídas com recurso a estacas, sujeitas a cargas horizontais, estando o seu dimensionamento fortemente condicionado pelo cenário geotécnico onde se insere e pelas características do navio de projeto.

Na presente comunicação pretende-se fazer referência a dois projetos distintos de DA, ambos projetados pela Future Proman. O primeiro trata-se da construção de um DA com finalidade de proteção a uma estrutura exposta, a ponte móvel do Porto de Leixões, onde o cenário geológico é caracterizado por um "bed rock" rochoso profundo, coberto de camadas de areias e de siltes-arenosos, de espessuras até 16m. O segundo, trata-se de um conjunto de DA num Terminal na Guiné Bissau, constituído por dois DA de acostagem e dois DA de amarração, onde o cenário geológico é complexo e sem um horizonte de fundação bem definido, constituído por areias de diferentes graus de compactidade e por uma camada espessa superior de aluviões siltsosos.

Com base nestes dois cenários geotécnicos distintos, esta comunicação pretende evidenciar a influência da geologia local no dimensionamento deste tipo de estruturas. Numa primeira fase será feita uma breve descrição dos projetos e filosofias de dimensionamento, posteriormente, serão comparados alguns parâmetros que levaram às diferentes soluções executadas.

DA NE no Porto de Leixões

DA Acostagem na Guiné Bissau

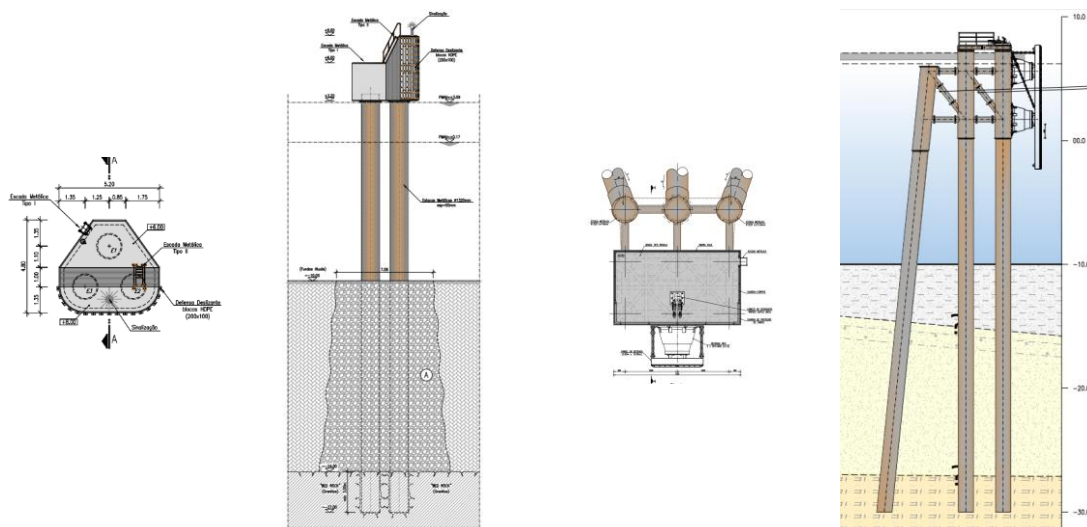


Figura 1. Plantas e Alçados dos dois projetos em análise.

Conceção Estrutural de DA de Acostagem

Os DA de acostagem são dimensionados com base na energia de acostagem (E_N) dos navios, que pode ser determinada com base nas características do navio, da estrutura de acostagem e do tipo de manobra efetuada.

$$E_N = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \times C_M \times C_E \times C_C \times C_s$$

Onde,

E_N – Energia Normal de Acostagem (kNm);

m – Deslocamento do Navio para um dado intervalo de confiança (ton);

v – Velocidade de Acostagem, componente perpendicular à linha de acostagem (m/s);

C_M – Coeficiente de Massa;

C_E – Coeficiente de Excentricidade;

C_C – Coeficiente da configuração da acostagem;

C_s – Coeficiente de suavidade.

A ação horizontal resultante na estrutura de acostagem é determinada pela rigidez global do sistema, que pode ser estimada com base na interação conjunta das estacas, da defesa e do terreno. Na figura seguinte são ilustradas as curvas típicas de força-deslocamento de cada componente individual (Defensa, estacas e terreno) e do sistema global. A área inferior à curva do sistema global corresponde à energia de acostagem do navio.

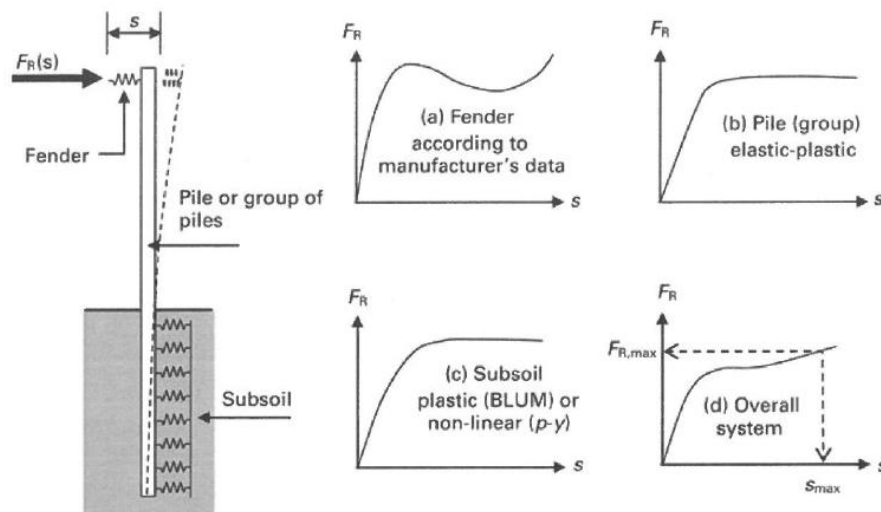


Figura 2. Sistema estrutural de um DA com defesa. Relação força-deslocamento

No caso de DA que não são equipados com defensas, como é o caso do DA NE do Porto de Leixões¹, a energia cinética dos navios terá de ser totalmente absorvida pela deformação das estacas e do subsolo. Do ponto de vista físico correspondem a uma mola/amortecedor com recuperação total de capacidade, uma vez que os materiais se encontram sempre em regime elástico e os solos de fundação, uma vez que se tratam de ações muito rápidas, tem uma resposta praticamente elástica.

¹ O DA NE do Porto de Leixões é equipado com defensas deslizantes em blocos HDPE com baixa deformabilidade, pelo que pode ser considerado uma estrutura flexível.

1. Projeto de Reabilitação do DA “NE” da Ponte Móvel de Leixões

Em setembro de 2017 registou-se um acidente com um navio de contentores, que à saída do Terminal Sul e após falha de máquina, embateu no DA Nordeste, seguidamente designado apenas DA NE, executado no âmbito da empreitada de Construção da Nova Ponte Móvel no Porto de Leixões, danificando essa estrutura.

Este DA consiste numa estrutura destacada do maciço de apoio da Ponte Móvel que foi concebida exatamente com a função de absorver qualquer embate accidental de uma embarcação em manobra, deflectindo-a e afastando-a da estrutura da ponte, salvaguardando a ocorrência de acidentes estruturais graves.

O DA NE faz parte do conjunto de quatro unidades que foram projetadas e construídas junto aos apoios da Ponte Móvel. Todas essas estruturas foram projetadas no âmbito do Projeto de Execução da Nova Ponte Móvel do Porto de Leixões, realizado entre 2004 e 2006.

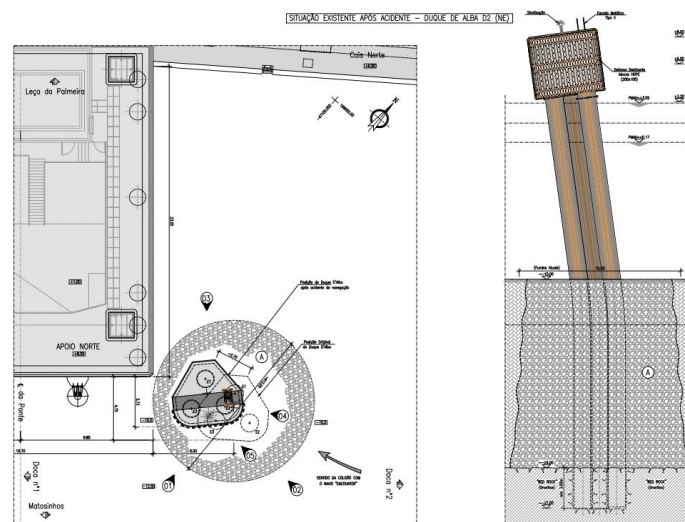


Figura 3. Situação existente após o acidente.

Antecedendo a fase de projeto, elaborou-se primeiramente uma especificação técnica completa sobre os objetivos e metodologia dos trabalhos de Inspeção Subaquática, necessária à obtenção de dados sobre as condições das estacas no trecho imerso.

Com base na informação recolhida pela equipa de mergulho, a desenvolveu-se um relatório de inspeção no qual foi feita uma análise criteriosa ao estado da estrutura do DA acidentado. As principais conclusões patentes nesse Relatório foram as seguintes:

- i. Sob a ação do embate, o navio em movimento transferiu a energia cinética, proporcional à sua massa e ao quadrado da velocidade, para as estacas do Duque D’Alba que dissiparam essa energia em deformação mecânica e calor, parte para o trecho livre e parte para o trecho embecido no leito marinho. Alguns cálculos preliminares e a observação do vídeo referente ao embate do navio (câmaras de segurança da APDL) mostram que a energia envolvida é muito superior à energia de dimensionamento dos Duques D’Alba, o que é perfeitamente normal uma vez que se tratou de uma situação de acidente.
- ii. Em face das elevadas forças envolvidas no impacto, geraram-se esforços e deformações na estrutura que, numa fase inicial causaram a rotura de uma das rótulas plásticas de fusível previstas em projeto, o que terá resultado no desligamento da estaca E2 do maciço de encabeçamento em betão armado, tendo isso dissipado uma

parcela significativa de toda a energia do impacto, continuando as restantes duas estacas E1 e E3 num processo de deformação.

- iii. Apesar disso, o DA NE, no seu conjunto, desempenhou bem a função de proteção à estrutura da Ponte Móvel tendo deflectido o navio no seu movimento.
- iv. É expectável que a deformação total no processo tenha sido superior a 2500mm. Porém, após ter terminado o processo de transferência e dissipação de energia do navio para a estrutura do duque d'alba e para o solo de fundação a parte livre da estrutura terá recuperado elasticamente a sua posição geométrica inicial, permanecendo a deformação final em cerca de 1870mm. Obviamente, a parte das estacas embebidas no terreno não tem liberdade para recuperar a posição inicial porque o solo envolvente deformou de forma plástica e definitiva, impedindo a recuperação da verticalidade na totalidade.

Com base nestas conclusões, a Future Proman elaborou numa primeira fase o estudo prévio de soluções com vista à obtenção daquela que melhor possa satisfazer a reabilitação/reconstrução do DA NE.

O cliente optou pela solução que oferecia mais garantias a longo prazo, que consistia na construção de um novo DA incluindo a demolição integral do maciço de coroamento em betão armado, o corte das estacas existentes e a execução de novas estacas metálicas.

1.1 Geologia e Geotecnia

A caracterização das condições geotécnicas das formações geológicas existentes na margem norte, junto ao maciço de apoio da Ponte Móvel foi realizada em outubro de 1989.

De acordo com os resultados desta prospeção, o topo do *bed-rock*, constituído por formações graníticas mais ou menos alteradas superficialmente, tem uma disposição variável entre 8,0 m e 25,9 m(ZHL). Sobre estas formações ocorrem, primeiro, camadas pouco espessas de areias finas e médias, micáceas e, depois, camadas de siltes argilo-arenosos, de espessura variável até um máximo de 16 m.

De referir ainda que os DA junto ao apoio norte foram sujeitos a um melhoramento do solo na envolvente às estacas por meio da tecnologia vibro-flutuação com adição de brita grossa, numa envolvente com 10-12m de diâmetro.

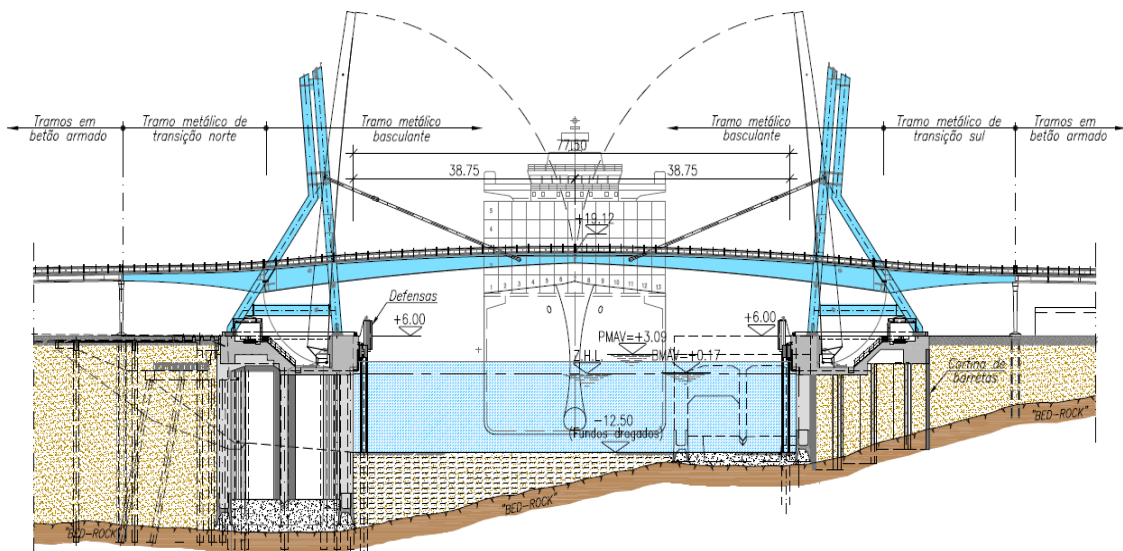


Figura 4. Envolvente Geotécnica local da Ponte Móvel

1.2 Descrição da Solução

O Duque d'Alba é constituído por três estacas metálicas de grande diâmetro Ø1320mm com uma espessura de 35/50mm. As estacas são encastradas no solo de fundação e articuladas (ou semi-articuladas) ao nível da cabeça, obrigando ao funcionamento em conjunto quando sob a ação de um impacto horizontal no maciço de betão de encabeçamento.

Como é visível na figura seguinte, baseados nos desenhos de projeto, a penetração mínima obtida para as estacas foi de pelo menos 17m de modo a atingir o “Bed-rock” rochoso, penetrando nessa formação cerca de 3,0m, sendo que o restante terreno é constituído por uma areia siltosa submersa medianamente compacta, que foi melhorada pelo processo da vibro-flutuação com adição de brita grossa.

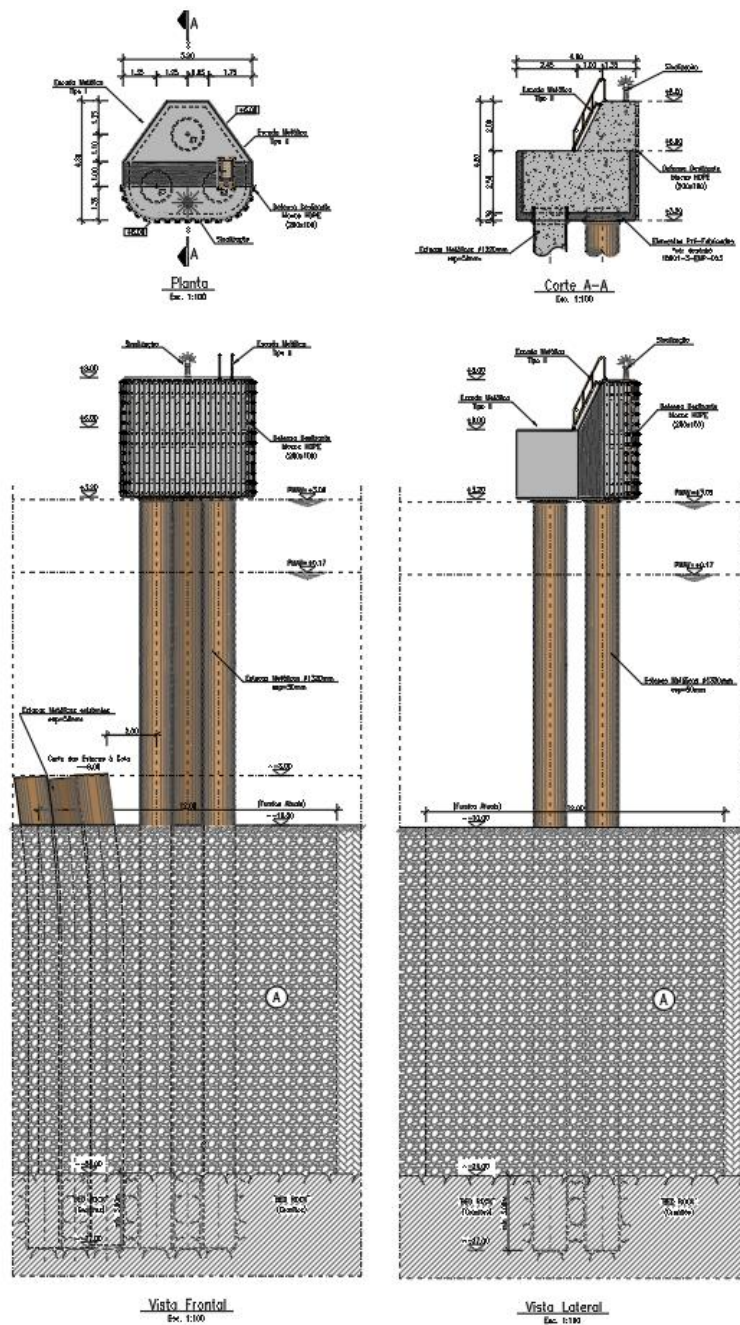


Figura 5. Planta, Corte e Vistas do novo Duque D'Alba a construir.

No que respeita ao maciço de betão foi utilizado um sistema de módulos pré-fabricadas, com função meramente de cofragem perdida, apoiando diretamente numa gola metálica montada em cada estaca, dispensando recorrer a complexos sistemas de escoramentos metálicos. As peças pré-fabricadas, constituídas por uma laje e por paredes laterais de modo a não ser necessária a colocação de painéis de cofragem permitiu realizar a betonagem “in situ” prevista nas peças desenhadas do projeto.

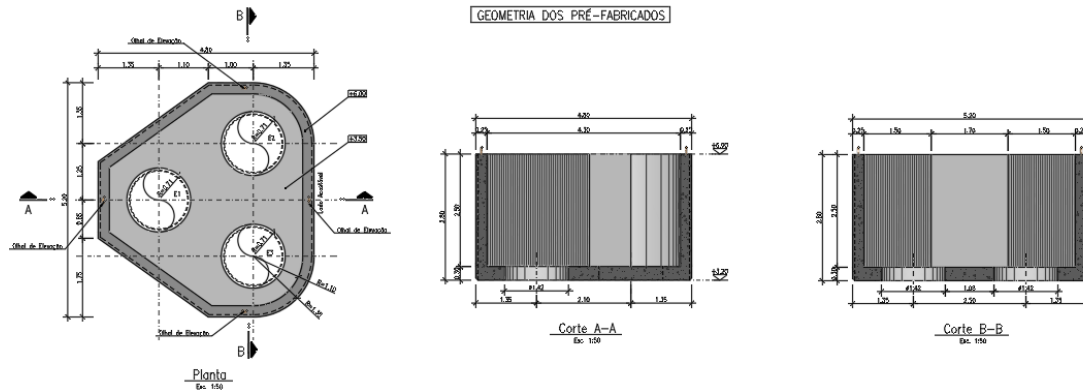


Figura 6. Módulo pré-fabricado do maciço de encabeçamento das estacas.

O bom desempenho destas estruturas tornou-se bem evidente pela forma como foi possível deflectir uma embarcação animada de movimento, com massa e velocidade significativas, evitando um impacto com a Ponte Móvel.

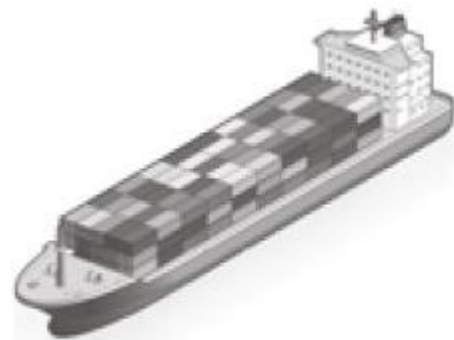
1.3 Navio de Projeto

A estrutura foi dimensionada para um navio de contentores com as características apresentadas na tabela seguinte. Tal como foi referido anteriormente, em DA flexíveis que não são equipados com defensas, a energia cinética dos navios terá de ser totalmente absorvida pela deformação das estacas e do subsolo. A energia absorvida pelo sistema (A) pode ser determinada através da relação força-deslocamento:

$$A = \frac{1}{2} Fu$$

Tabela 1 - Navio de Projeto – Navio de Contentores.

Condições de acostagem	Favoráveis
Prof. Média Dos fundos (m)	14
Estrutura	Aberta
Deadweight (dwt)	30000
Deslocamento (t)	41500
Comprimento LOA (m)	210
Boca (m)	30
Calado D (m)	10.7
Ajuda de Rebocadores	Não
Velocidade v (m/s)	0.30





1.4 Modelo Estrutural

A estrutura do Duque D'Alba foi analisada através de um modelo tridimensional desenvolvido no programa de cálculo automático SAP2000. Através do mesmo programa, processaram-se as combinações de ações necessárias, obtendo-se os esforços de cálculo condicionantes para respetiva verificação e dimensionamento aos Estados Limite Últimos de Resistência e de Utilização.

O efeito de encastramento no solo foi simulado por meio de molas a cada metro de profundidade segundo o seguinte critério:

$$K_s = n_h \times Z \rightarrow K_{mola\ i} = n_h \times Z_i \times a$$

O modelo genérico estudado no programa admitiu uma estrutura formada por três estacas de aço encastradas no solo de fundação e solidarizadas ao nível da cabeça por um maciço de betão. Neste modelo a cabeça das estacas foi considerada rotulada e o efeito de solo foi simulado por meio de molas de reação do tipo Winkler, estimadas para um terreno melhorado com recurso a vibrosubstituição.

Paralelamente ao modelo tridimensional da estrutura estimou-se a capacidade resistente à compressão e à tração das estacas de acordo com a NP EN 1997-1:2010 (EC7) e ROM 0.5-05 "Geotechnical recommendations for the design of maritime and harbour structures".

$$Q_h + W' = Q_p + Q_f$$

Onde,

Q_h - Força vertical total que produz o colapso estrutural no topo da estaca;

W' - Peso efetivo da estaca;

Q_p - Parte da carga suportada pela ponta da estaca;

Q_f - Parte da carga suportada através do atrito lateral entre a estaca e o terreno.



Figura 8 - Módulo tridimensional do DA NE.

2. EPC – Ponte Cais Guiné Bissau - Substituição dos DA

O terminal de combustíveis líquidos em análise situa-se na região de Bandim, na República da Guiné-Bissau na foz do rio Geba.

Antes da intervenção o sistema de imobilização e amarração dos navios deste terminal era composto por quatro DA que mostram vestígios de grande corrosão e desgaste, especialmente os DA específicos para amarração. De uma forma geral, todas as estruturas, incluindo a plataforma de trasfega em betão armado, apresentam indícios de avançado estado de degradação. No caso da plataforma de trasfega existente, dada a sua utilização recente como estrutura de acostagem (que não seria a sua função quando da sua construção), o seu estado de degradação terá evoluído significativamente.

O projeto elaborado pela Future Proman teve o objetivo de substituir as estruturas danificadas por outras novas com adequada funcionalidade e segurança, com vista à melhoria das condições de amarração dos navios e das condições gerais de segurança durante a operação de descarga de combustível.

O projeto global inclui quatro DA, sendo que dois se destinam à amarração e dois à acostagem de navios, e uma plataforma de trasfega para substituição da estrutura existente. O presente documento é focado apenas nos DA de acostagem.

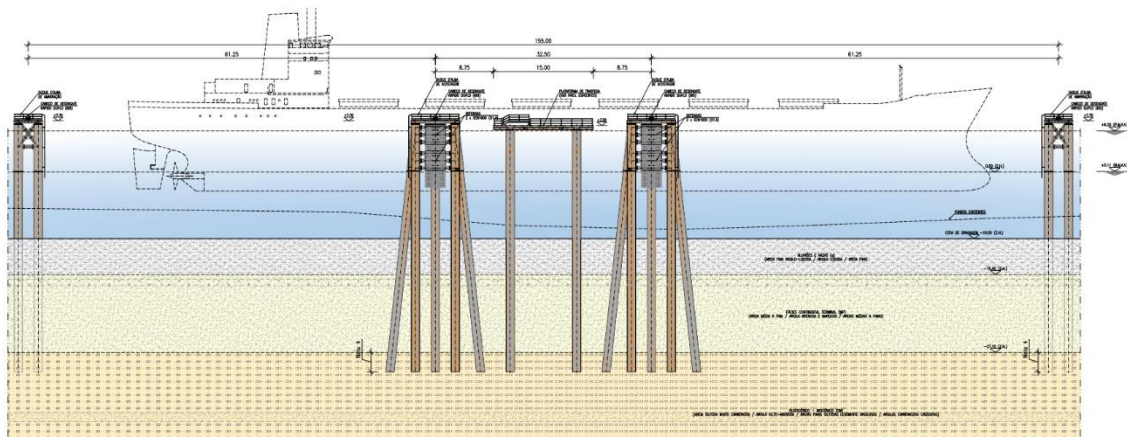


Figura 9 - Alçado frontal do terminal.

2.1 Geologia e Geotecnia

Os trabalhos de prospeção enquadrados no âmbito do projeto consistiram na execução de 2 sondagens geotécnicas de furação vertical até profundidades que variaram entre os 50.2m e 55.5m. Estas sondagens foram acompanhadas de ensaios de caracterização “in situ” SPT-Terzaghi e com colheita de amostras indeformadas de solos, para caracterização em laboratório.

O ambiente geológico prevalecente no local estudado envolve genericamente a ocorrência de substratos sedimentares com diferentes graus de compacidade, constituídos por depósitos areno-argilosos, subjacentes a argilas com intercalações de areias argilosas. Estes estratos sedimentares encontram-se recobertos por depósitos aluvionares e aterros pontuais, associados ao leito de cheia do Rio Geba.

2.2 Descrição da Solução

Cada DA de acostagem é constituído por nove estacas, 6 verticais e 3 inclinadas (inclinação 1:10 – H:V), compostas por tubo de aço Ø1220 mm com uma espessura de 21,6 mm. As estacas serão cravadas nos estratos geológicos que constituem o leito do mar na zona de implantação, composto por camadas de areias siltosas, permitindo desta forma a correta

transmissão das cargas por atrito lateral, capacidade de ponta e resistência lateral do solo.

Estas estruturas foram dimensionadas de modo a absorver a energia resultante das ações de acostagem e amarração. Como tal, sendo uma estrutura do tipo semi-rígida, exige-se que os elementos verticais (estacas) tenham um comportamento de flexão adequado. Daí a escolha de estacas metálicas de paredes espessas em vez de estacas convencionais de betão armado.

As estacas metálicas serão encastradas nas camadas areno-siltosas existentes, prevendo-se um comprimento total de cada estaca de cerca de 40m. Estas serão encabeçadas por uma estrutura metálica treliçada que permitirá a transmissão das forças entre as diversas estacas que compõem o duque d'alba, bem com a instalação dos sistemas de defensas na frente da estrutura.

A figura seguinte apresenta as características geométricas gerais da estrutura.

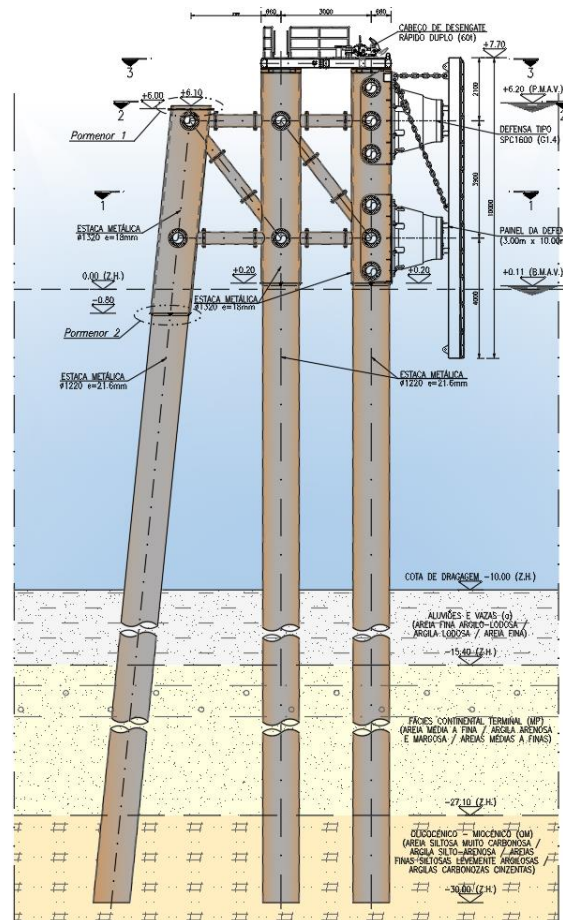


Figura 10 - Seção transversal dos Duques d'Alba de acostagem

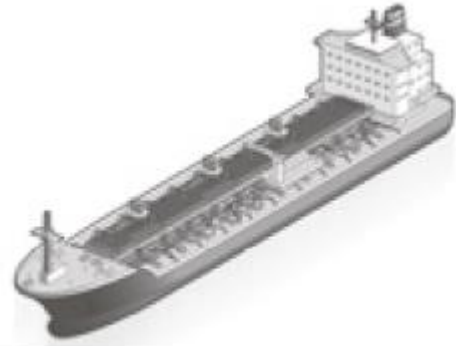
2.3 Navio de Projeto

A estrutura do duque d'alba de acostagem foi dimensionada de modo a acomodar o navio de projeto, baseado nas características dos navios do tipo tanque (Oil Tank) e de navios de gás (Gas Carrier), com deslocamento máximo de 15000t e mínimo de 5000t.

O impacto resultante da acostagem do navio de projeto é absorvido por um DA, equipado com um sistema de defensas de cone com painel frontal.

Tabela 2 - Navio de Projeto – Gas carrier.

Condições de acostagem	Moderadas
Prof. Média Dos fundos (m)	10
Estrutura	Aberta
Deadweight (dwt)	10000
Deslocamento (t)	15000
Comprimento LOA (m)	130
Boca (m)	24
Calado D (m)	7
Ajuda de Rebocadores	Não
Velocidade v (m/s)	0,47



2.4 Modelo Estrutural

O procedimento de cálculo foi inicializado com a definição de todas as variáveis envolvidas no processo: materiais, seções de elementos, cargas e combinações de acordo com os regulamentos em vigor. Posteriormente, após uma análise cuidadosa, os resultados condicionantes foram considerados para verificar os Estados Limites Últimos e Utilização e, portanto, dimensionar os elementos da estrutura. Este dimensionamento levou em consideração as regras e suposições indicadas na Regulamentação Portuguesa e nos Eurocódigo 3 e Eurocódigo 7.

A análise estrutural foi desenvolvida utilizando o modelo de cálculo computacional tridimensional desenvolvido no software SAP2000, baseado no Método dos Elementos Finitos, representado na figura seguinte.

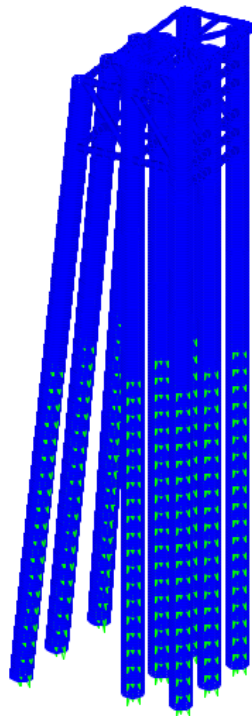


Figura 11 - Módulo tridimensional dos DA de acostagem



Considerações Final

Os projetos apresentados são dois exemplos de DA de acostagem com comportamentos estruturais distintos. No caso do DA de Leixões a estrutura foi dimensionada tendo um comportamento flexível, onde a energia de impacto do navio é absorvida pela deformação lateral das estacas e do terreno. Por outro lado, os DA da Guiné foram dimensionados com base num comportamento rígido, onde a energia de impacto do navio é essencialmente absorvida pelas defensas.

Em ambos os projetos é clara a influência do terreno relativamente à capacidade que a estrutura tem de absorver a energia cinética do navio. A força de acostagem aplicada no topo da estrutura é transmitida ao terreno através da flexão das estacas e de binários de tração compressão. Neste cenário, o ambiente geológico e geotécnico onde a estrutura está inserida tem um impacto direto na robustez da estrutura.

Comparando os dois projetos apresentados, é interessante notar que, apesar da energia de acostagem ser semelhante em ambos os casos, a solução adotada em Leixões acabou por ser menos robusta comparativamente com o DA de acostagem da Guiné, em grande parte por estar fundada num estrato rochoso competente com elevada capacidade de carga (compressão e tração).

Por outro lado, apesar de os DA de Bissau terem uma exigência operacional muito mais elevada e um maior número de acostagens, estão inseridos num cenário geológico complexo, sem um horizonte de fundação bem definido. Neste panorama, a capacidade de carga das estacas é obtida essencialmente por atrito lateral entre as paredes do tubo e o terreno, sendo esse valor bastante inferior quando comparado com uma fundação num estrato rochoso.

Referências Bibliográficas

Proman, Centro de Estudos e Projeto, S.A (2018), "APDL - Duque d'alba NE"

Proman, Centro de Estudos e Projeto, S.A (2018), "SETH – Duques d'alba Guiné Bissau"