



REABILITAÇÃO, RECALCE E REFORÇO DE UMA ESTRUTURA ACOSTÁVEL PARA INSTALAÇÃO DE UM ELEVADOR PARA NAVIOS DE 9000 TONELADAS

Paulo Matias Ramos
Teixeira Duarte, Engenharia e Construções SA
pmr@teixeiraduarte.com

Resumo

O setor de reparação naval da base militar de Mers El Kebir, na Argélia, estava equipado com um *synchrolift* para navios até 3000T, que possibilitava a sua elevação e transferência para o aterro portuário existente. Contudo, fenómenos de instabilidade dos muros cais e a falta de manutenção dos equipamentos precipitaram a degradação do sistema que se encontrava obsoleto e inoperacional.

Este cenário levou a que a entidade responsável pela base promovesse um concurso para a empreitada de conceção construção de reabilitação e reforço das infraestruturas existentes, que permitisse a instalação de um novo *synchrolift* para navios até 9000T, compatível com as características da frota argelina atual.

Além da reabilitação da infraestrutura existente, a intervenção impôs a adoção de soluções de recalce e reforço das suas fundações, tornando-a compatível com a regulamentação atual, com o aumento das cargas atuantes e a realização de uma dragagem do fundo marinho em cerca de 8m. Abordando as soluções de reabilitação, recalce e reforço, este artigo descreve as principais metodologias de cálculo utilizadas no dimensionamento e as operações construtivas mais relevantes.

1- Introdução

Albergando o principal arsenal naval da Argélia, a base de Mers El Kebir, situada no Golfo de Orã e dentro do perímetro urbano dessa cidade, possui um sector de reparação naval que se insere numa baía interior cerca de 16ha, localizado na zona sul de uma baía portuária mais vasta, que se encontra protegida por dois molhes, um enraizado a Oeste e outro a Este com comprimentos de 1700m e 1900m, respetivamente.

Além de diversas infraestruturas destinadas às operações de construção, reparação e manutenção naval, tais como docas flutuantes e cais de alagam, este setor, foi equipado com uma plataforma elevatória, designada em terminologia anglo-saxónica por *synchrolift*, que permitia a transferência entre o mar e o terrapleno portuário de navios até 3000T.

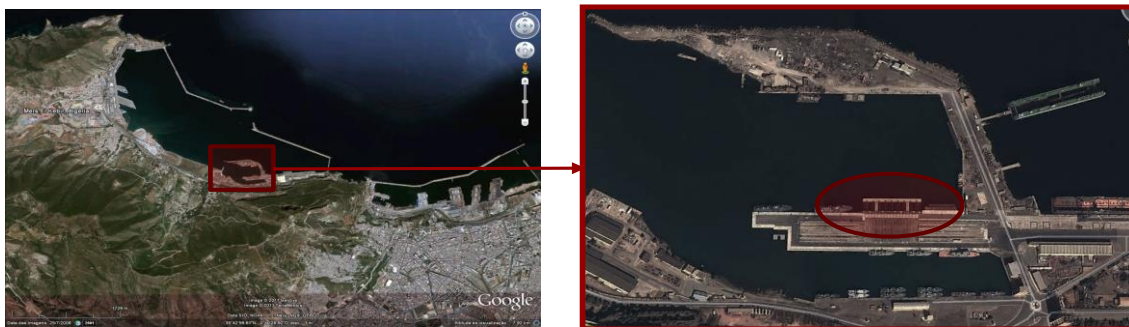


Figura 1 – Localização da Base Naval de Mers El Kebir e do seu *synchrolift*

Contudo, a observação de fenómenos de instabilidade da estrutura dos muros cais, da deterioração das áreas de transferência e estacionamento, da corrosão das estruturas metálicas da plataforma elevatória e a degradação dos seus componentes eletromecânicos, levaram a entidade responsável pelo estaleiro de reparação naval (ECRN) a promover um concurso público

internacional para a empreitada de conceção/construção destinada à reabilitação e reforço das infraestruturas existentes, de modo a permitir a instalação de um novo *synchrolift*, com capacidade para navios até 9000T, de modo a ser compatível com as características atuais das embarcações da armada argelina, em termos de capacidade e dimensões.



Figura 2 – Imagens de algumas patologias observadas nos muros cais e plataforma elevatória

Em termos gerais, as solicitações expressas no caderno de encargos desse concurso impunham:

- A conceção de estruturas de reação *onshore* e *offshore*, para suspensão de uma plataforma elevatória com 25mx145m de área e capacidade para navios até 9000T;
- O recalce dos muros cais existentes para uma dragagem de 8m ou de 3m de profundidade, a realizar respetivamente nas zonas de implantação da nova plataforma elevatória e do novo cais de acostagem, a realizar nas imediações do acesso a esta infraestrutura;
- Prever uma zona de transferência com 145m de comprimento, compatível com a translação de navios entre a plataforma elevatória e as zonas de estacionamento;
- Prever 5 zonas de estacionamento que, com comprimentos entre 100m e 150m, serão destinadas à construção, reparação e manutenção dos navios da armada argelina;
- Conceber um caminho de circulação para duas gruas rolantes com capacidade para elevação de 40T a 50m de distância, numa extensão de aproximadamente 623m;
- A execução de inúmeros edifícios de apoio e controle e a instalação de equipamentos de cais e de um vasto sistema de redes operacionais.

A implementação da súpula das exigências do caderno de encargos nas áreas existentes, resultou na conceção de um *layout* ocupacional que pode ser resumido na figura seguinte.



Figura 3 - Planta esquemática representativa das áreas desta intervenção

2- Avaliação das infraestruturas existentes e exigências que determinaram a conceção

Seguindo os procedimentos recomendáveis para intervenções deste cariz, a definição das medidas e soluções a implementar foi precedida pela avaliação das estruturas existentes, tendo-se constatado que os muros cais, fundados à cota -10.00ZH e com coroamento à cota +2.30ZH, apresentavam problemas de instabilidade, fundamentalmente associados à falta de capacidade da sua fundação. Esses problemas eram evidenciados pela observação de deformações horizontais significativas, resultantes de inclinações do paramento acostável no sentido “mar” (figura 3). As deformações observadas eram reflexo do assentamento excessivo da fundação do cais e antecipavam um cenário de rotura iminente.

Para realizar essa avaliação, efetuou-se uma campanha de reconhecimento geotécnico que, entre outros estudos de caracterização, incluiu a execução de 25 sondagens, cuja interpretação permitiu a atribuição dos parâmetros geomecânicos utilizados nos cálculos subsequentes:

- C2 - Aterros heterogêneos: $\phi' = 25^\circ$; $c' = 5 \text{ kN/m}^2$; $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$;
- C3A - Argilas com intercalações gresosas ($15 < \text{NSPT} < 30$): $\phi' = 25^\circ$; $c' = 3 \text{ kN/m}^2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$;
- Z3B - Argilas margosas ($30 < \text{NSPT} < 60$): $\phi' = 25^\circ$; $c' = 50 \text{ kN/m}^2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$;
- Z4 - Margas compactas ($\text{NSPT} > 60$): $\phi' = 30^\circ$; $c' = 50 \text{ kN/m}^2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

A simulação numérica para avaliação da estabilidade dos muros cais foi feita no *software* de cálculo geotécnico "PLAXIS 2D", onde o solo foi simulado através de elementos finitos não lineares, segundo o critério de rotura de *Mohr-Colomb*, e o muro através de elementos finitos de comportamento elástico. Tal como indicavam as evidências das observações das patologias existentes, os resultados da análise da estabilidade do cais revelaram-se pouco tranquilizadores, acusando deslocamentos da extremidade do cais de sensivelmente 5 cm e um coeficiente de segurança global da ordem de 1.1 (<1.5) e inferior a 1.0 para a ação sísmica (<1.2).

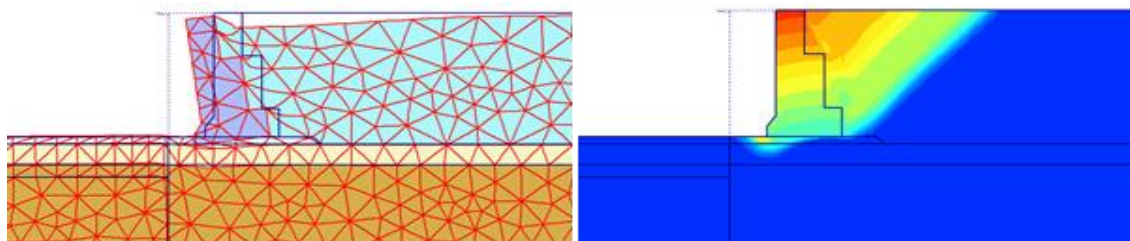


Figura 4 – Deformação e superfícies de rotura do cais existente ($\delta_{\text{máx}} \text{ horiz.} = 5 \text{ cm}$; F.S. \cong 1.1)

Os resultados da avaliação da situação enquadraram a complexidade da intervenção a realizar, que além de reabilitar e dotar a infraestrutura portuária deficitária de uma capacidade resistente compatível com as exigências regulamentares atuais, implicava o reforço do aterro portuário e dos muros cais existentes, de modo a fazer face ao aumento expressivo das cargas operacionais associadas à suspensão, transferência e estacionamento de navios de 9000T.

Adicionalmente, as imposições de calado das embarcações, as dimensões definidas para a plataforma elevatória e as características das vigas berço, de transferência do novo sistema *synchrolift*, impunham a realização do aprofundamento do fundo marinho em 8.0m, da cota -10.00ZH para a cota -18.00ZH, obrigando ao recalce dos muros cais.

Apesar das particularidades do funcionamento operacional sistema *synchrolift* imporem uma diversidade e especificidade de ações cuja descrição detalhada sairia fora do âmbito deste artigo, a figura 4 apresenta dois esquemas ilustrativos das cargas máximas transmitidas pela operação de cada um dos 38 guinchos (19 onshore e 19 offshore), de suspensão da plataforma elevatória.

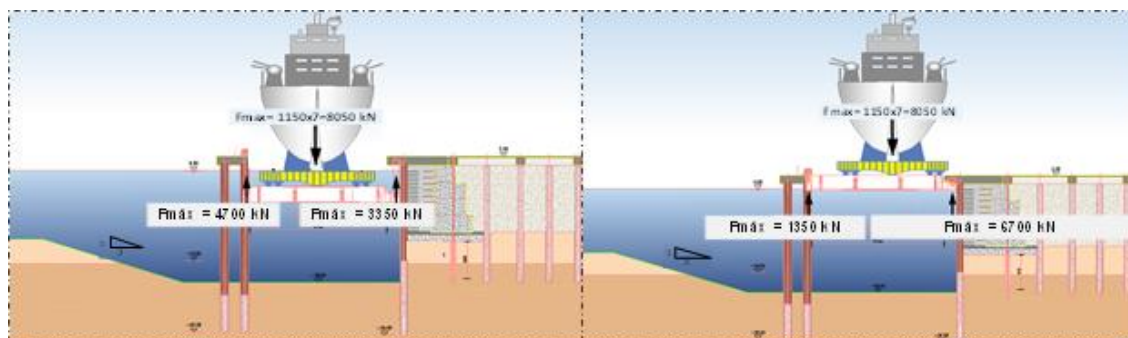


Figura 5 – Cargas máximas atuantes nas estruturas de reação *onshore* e *offshore*

Considerando as enormes cargas rolantes impostas pela transferência e estacionamento de navios (de 9000T), em terra, optou-se limitar a sua ação a alinhamentos específicos, pela adoção

de um sistema em que a movimentação é realizada através de *bogies* que circulam sobre carris, posicionados sobre vigas de betão armado fundadas em estacas. Contudo, e apesar desta medida limitar as áreas de ação dos carregamentos rolantes, nas zonas de estacionamento o sistema prevê a possibilidade de remoção dos *bogies*, o que impõe o apoio das vigas berço fora dos alinhamentos das vigas de betão armado. Esta particularidade determinou que tivessem sido previstas lajes de interligação entre as vigas de suporte do caminho de rolamentos, adequadamente dimensionadas para as ações decorrentes dessa situação.

Esta opção não foi alheia ao facto das imposições operacionais do sistema *synchrolift* determinarem critérios de utilização muito restritivos que, entre outros, limitavam os assentamentos de serviço a valores máximos de 2cm, que não seriam compatíveis com as características geomecânicas do aterro portuário existente.

Complementarmente às imposições determinadas pelas cargas verticais resultantes das operações de suspensão e transferência de navios, destacam-se as ações decorrentes dos impulsos de terras atuantes, correspondentes a um desnível de cerca de 21.2m, estabelecido pela subida da plataforma portuária para a cota +3.20 ZH, por imposições do novo sistema *synchrolift*, e pela dragagem do fundo marinho até à cota -18.00 ZH. Além disso é indispensável destacar a importância da ação sísmica regulamentar argelina, que se revelou condicionante no dimensionamento da solução em Estados Limites Últimos.

Assim, considerando a envolvente das exigências impostas, e após a realização de inúmeros estudos, avaliando várias hipóteses e a implementação de várias soluções construtivas, convergiu-se para uma conceção de uma solução estrutural integrada, onde a plataforma de suporte das zonas de transferência e estacionamento fosse mobilizada como elemento resistente, em conjunto com a estrutura dos muros cais existentes e a sua cortina de recalce.

O recalce dos muros cais é constituído por uma cortina de contenção (estacas moldadas de betão armado $\phi 1200\text{mm}/1.35\text{m}$), realizada a cerca de 6m do alinhamento dos muros cais existentes e funcionando em conjunto com a ação estabilizante concedida pelo enchimento em betão simples adotado para o intervalo existente entre estas duas estruturas de contenção, aplicado por betonagem submersa.

Em terra, os carris dos caminhos de circulação de navios na plataforma portuária são montados sobre vigas de betão armado (2.0mx1.8m), fundadas sobre estacas moldadas $\phi 1500\text{mm}$, que atingem profundidades compatíveis com penetrações adequadas no substrato margoso, ocorrente a partir dos 16m de profundidade. A malha de vigas é encimada por lajes de betão armado que constituem um diafragma horizontal que, em conjunto com a estrutura de recalce, permite a mobilização de impulso passivo no solo, capaz de contrariar os impulsos de terras atuantes. A interligação entre estas duas estruturas revelou-se fundamental para a estabilidade da solução.

Esta conceção pressupõe uma interligação entre os interfaces dos elementos estruturais capaz de garantir o monolitismo de funcionamento conjunto. Assim implementou-se uma conexão através de ferrolhos metálicos, ligados às estruturas existentes através de resinas epóxi e às estruturas de reforço por embebimento no betão em comprimentos de amarração adequados.

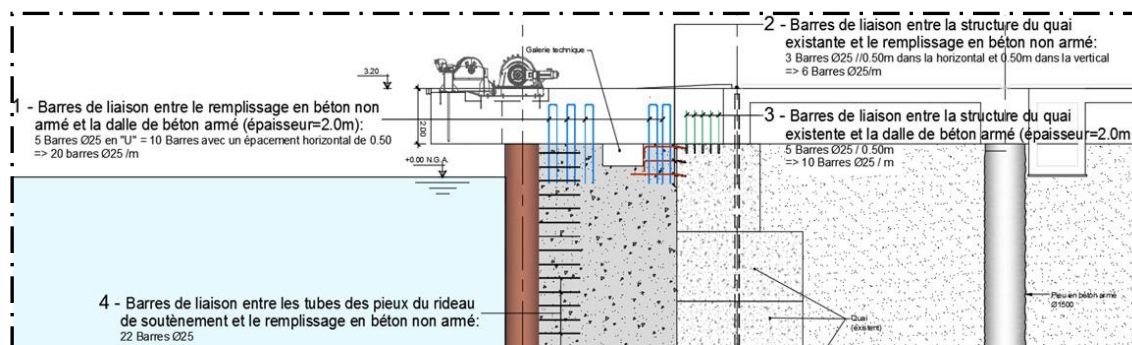


Figura 6 – Ferrolhos de conexão implementados para assegurar o monolitismo da solução

Sobre a implantação do cais existente, a impossibilidade do atravessamento dessa estrutura para execução de fundações de grande diâmetro, motivou a adoção de microestacas que funcionaram como elementos de reforço da sua fundação. Os tubos metálicos $\phi 177.8 \times 15 \text{ mm}$, constituintes das microestacas, foram selados ao substrato margoso através do sistema de injeção repetitiva e seletiva, e dotados de espaçamentos compatíveis os esforços atuantes.

Na figura seguinte, é apresentado um corte tipo das soluções descritas, representando a suspensão da plataforma nas estruturas de reação *offshore* e *onshore*, que possibilita a elevação de navios que antecede a sua transferência até às zonas de estacionamento.

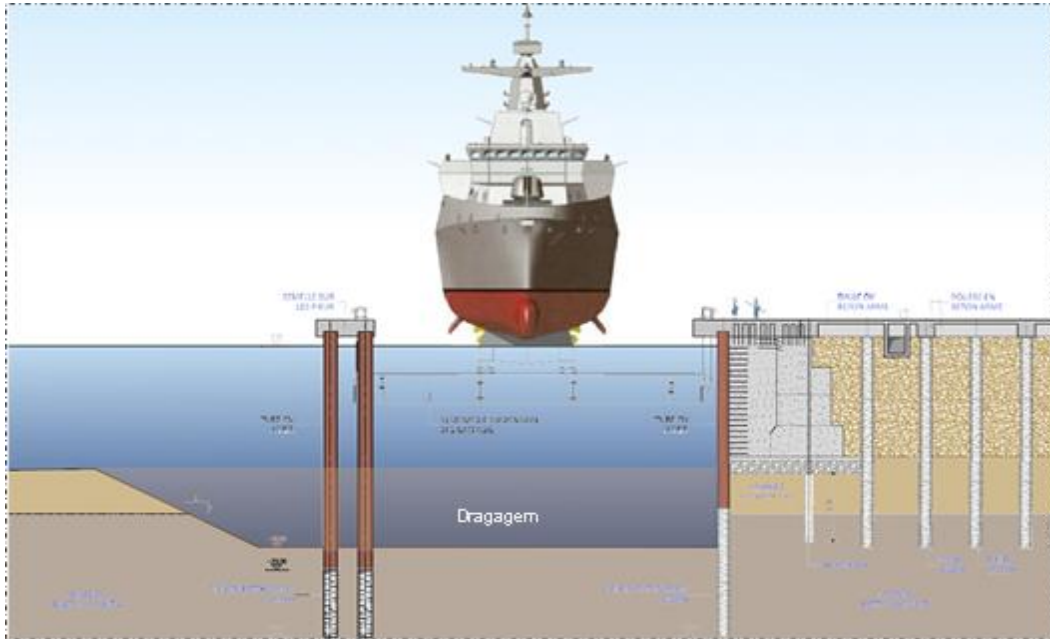


Figura 7 – Corte tipo da solução descrita

3- Dimensionamento

Em termos globais, o dimensionamento estrutural foi executado através de modelos bidimensionais e tridimensionais, utilizando *softwares* distintos e fazendo uma análise de sensibilidade crítica e comparativa aos resultados obtidos.

Tal como nas análises à situação existente antes da intervenção, os modelos bidimensionais foram desenvolvidos no programa de cálculo de elementos finitos de aplicação geotécnica (PLAXIS), onde o terreno foi simulado por elementos finitos, segundo o critério de rotura de Mohr-Colomb, e os elementos de aço, betão simples e betão armado (microestacas, cais, estacas, vigas e lajes) por elementos finitos ou elementos de barra, de comportamento elástico/linear. Nestes modelos, foi possível simular o faseamento construtivo, determinar os esforços atuantes, as deformações de cálculo e os fatores de segurança, para cada etapa da intervenção.

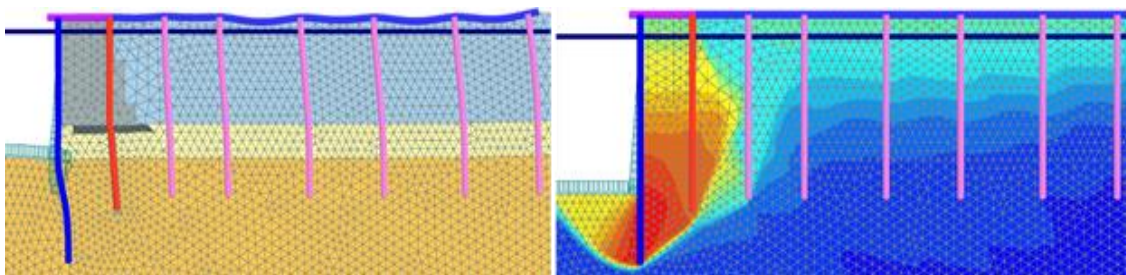


Figura 8 – Deformação de cálculo ($\delta_{\text{máx.}} = 1.7 \text{ cm}$) e Sup. de rotura da solução ($FS \geq 2.6$)

Nos modelos de cálculo tridimensional, desenvolvidos no programa SAP2000, a plastificação do terreno ao impulso passivo foi simulada através de elementos de mola de propriedades não lineares com plastificação ao valor do impulso passivo em essa profundidade.

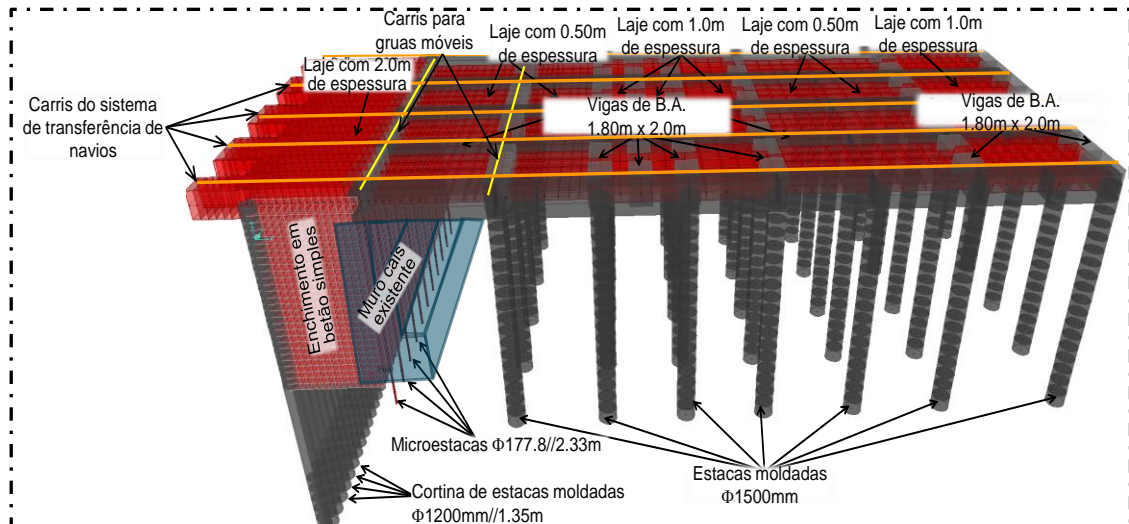


Figura 9 – Modelo 3D adotado no dimensionamento da solução – zona do cais de transferência

Com os modelos de cálculo desenvolvidos, devidamente adaptados às características das diversas zonas e estruturas em análise, foi possível determinar os valores máximos dos diagramas de esforços e deslocamentos para a envolvente de todas as combinações.

Além dos modelos descritos, o dimensionamento envolveu a realização de inúmeras simulações numéricas destinadas a determinar os esforços correspondentes a situações particulares da sequência construtiva ou das ligações estruturais. Disso são exemplo os modelos de cálculo representados na figura 10, que simularam as operações de dragagem, concluídas antes da construção da laje que estabelece o diafragma de estabilização, ou as modelações destinadas ao cálculo dos ferrolhos de ligação dispostos nos interfaces dos vários elementos estruturais.

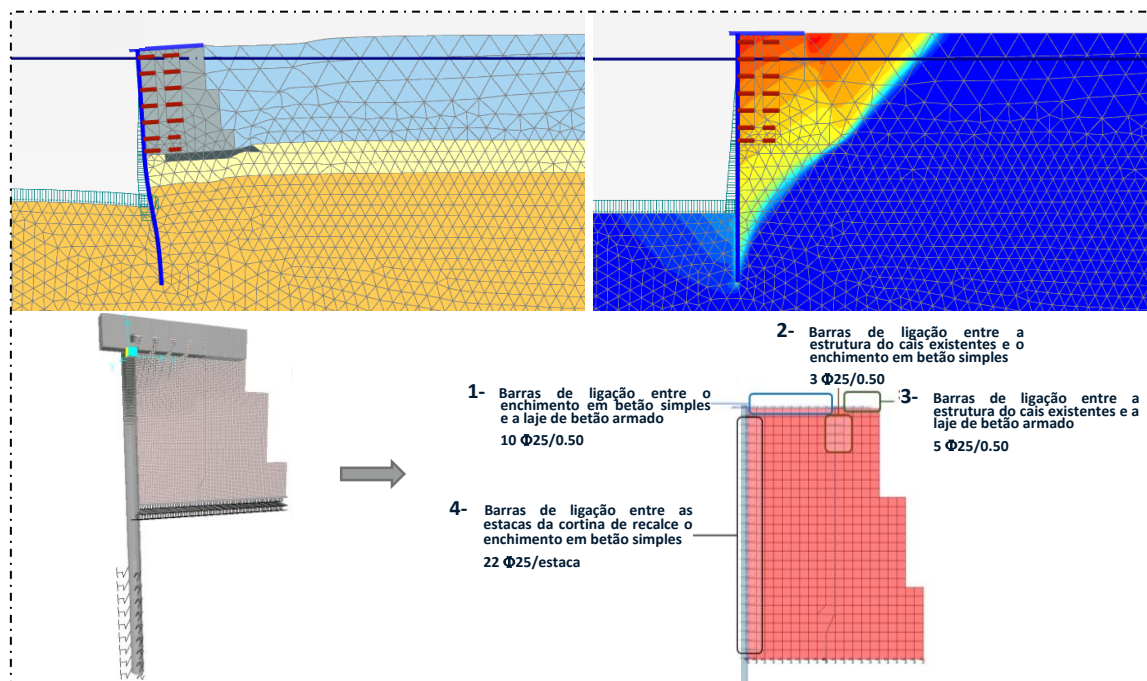


Figura 10 – Modelos de análise das operações de dragagem e de cálculo dos ferrolhos de ligação

4- Métodos e faseamentos construtivos utilizados

O recalce dos muros cais existentes iniciou-se pela execução das microestacas de reforço da sua fundação, acompanhada pela vibrocração sequencial da cortina de tubos metálicos, $\phi_{int} 1200\text{mm}$ e 12mm de espessura, garantindo um afastamento de 6m entre o seu eixo e o paramento vertical desta estrutura. Dotados de comprimentos de sensivelmente 16m (5m em cravação no terreno), estes tubos, de sensivelmente 1.20m de diâmetro, foram posicionados prevendo um afastamento entre eixos de 1.35m, de forma a constituírem uma cortina com um desenvolvimento paralelo ao do cais, cobrindo a totalidade da extensão da área a dragar. A conexão “macho-fêmea” que interliga estes tubos, estabelecendo um elemento de união e de cofragem, permite que a subsequente realização da betonagem submersa de enchimento entre a cortina e o cais existente, ilustrada na figura 14, ocorra sem fuga de material para o mar.

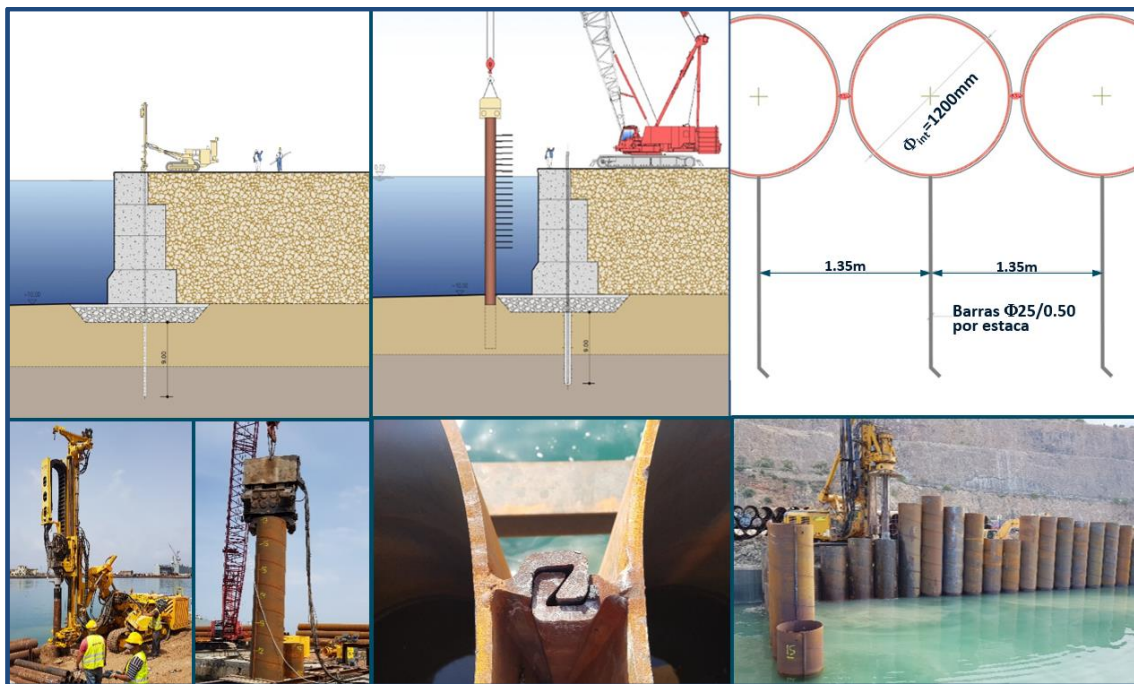


Figura 11 – Esquemas e imagens da execução das microestacas e da cravação dos tubos

Nas figuras seguintes são ilustradas as operações de furação, colocação das armaduras e betonagem para execução das estacas desta cortina, realizadas a partir de terra, pelo interior dos tubos metálicos, com recurso a furação por vara-kelly acoplada em “bate-estacas” ou por *fly-drill* suspenso em grua, tendo-se atingido profundidades compatíveis com a cota -26.00.

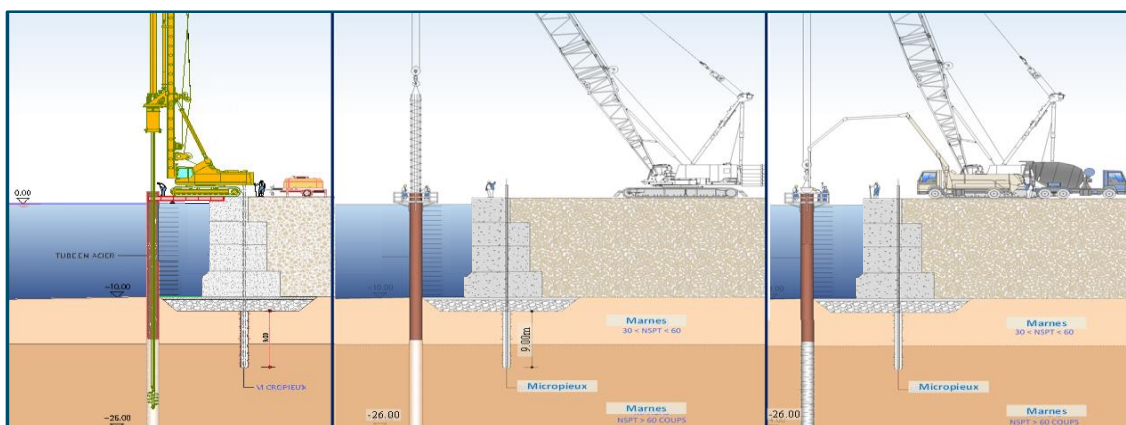


Figura 12 – Esquemas das operações construtivas das estacas moldadas da cortina de recalce



Figura 13 – Imagens das operações para execução das estacas moldadas da cortina de recalce

Respeitando a sequência construtiva definida, os trabalhos prosseguiram com o preenchimento do espaço compreendido entre a cortina de estacas e o muro-cais através de betão simples, aplicado de forma submersa, seguido da realização das colunas de *jet-grouting* que preenchem o intervalo de 15cm entre estacas adjacentes, localizado abaixo da base dos tubos (e dos elemento de ligação), exposto após realização das operações de dragagem do fundo marinho.

Além de representar as operações descritas, a figura 14 ilustra a montagem dos elementos de conexão que garantem o monolitismo entre o alinhamento das estacas, o cais existente e o enchimento em betão. Essa a ligação foi assegurada por varões de aço, aferrolhados ao paramento do cais existente através de resinas epoxi ou incorporados no interior das estacas, no enchimento em betão simples ou da laje estrutural de betão armado.

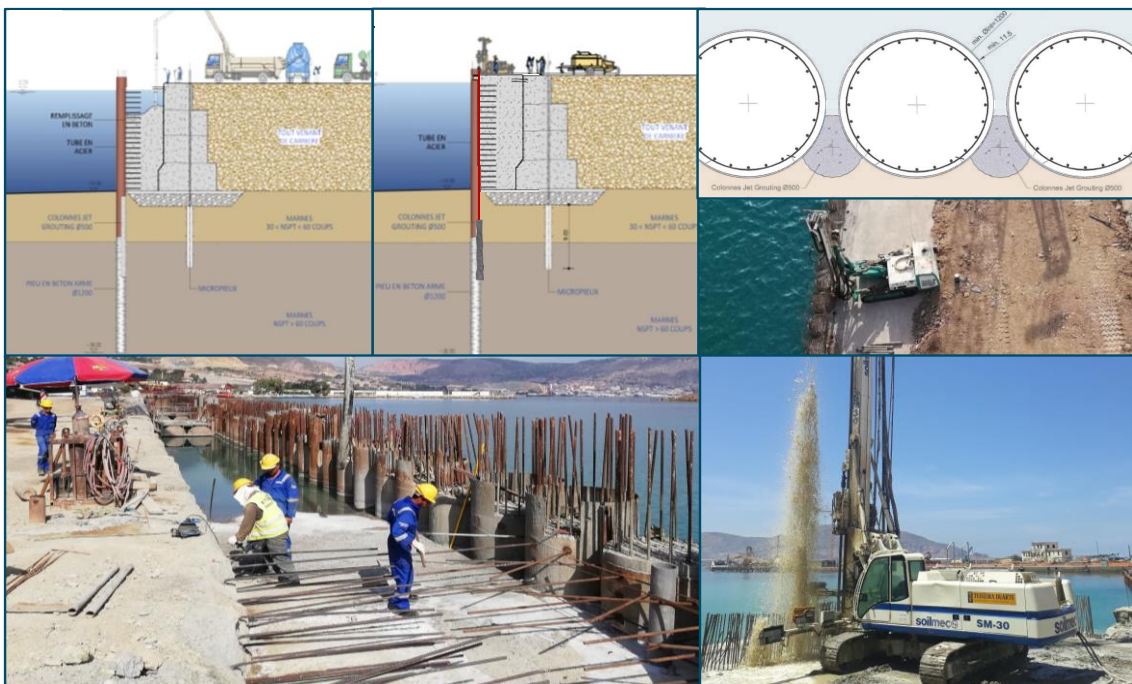


Figura 14 – Execução das colunas de jet-grouting e betonagem do espaço entre a cortina e o muro cais existente

Após conclusão da cortina de recalce, incluindo a camada de enchimento em betão simples, foi possível dar início às operações de dragagem para aprofundamento do fundo marinho em 8m, de modo a estabelecer o nível exigido pelo calado das embarcações e pela geometria da plataforma e vigas berço do sistema *synchrolift* (figura 15).



Figura 15 – Dragagem que atingiu profundidades máximas de 8.0m, até à cota -18.00 ZH

Salienta-se que a escala e dimensão desta intervenção ditou a simultaneidade de inúmeras operações. Disso são exemplo as 411 estacas moldadas de betão armado (72 estacas $\phi 1200\text{mm}$ e 339 $\phi 1500\text{mm}$), de fundação do caminho de rolamento das gruas e da estrutura das plataformas de transferência/estacionamento de navios, localizadas no aterro portuário, que, juntamente com as vigas e lajes da estrutura dessas plataformas, foram executadas em paralelo com as operações descritas anteriormente. Essas estacas foram dimensionadas para resistir às cargas verticais atuantes e para conferir a estabilidade horizontal da solução, por mobilização conjunta do impulso passivo ao longo dos seus fustes, através do diafragma formado pelas vigas e lajes que as encimam. Garantindo uma penetração mínima de 3ϕ nas formações margosas NSPT >60 pancadas, as estacas têm comprimentos variáveis entre 21m e 25m.

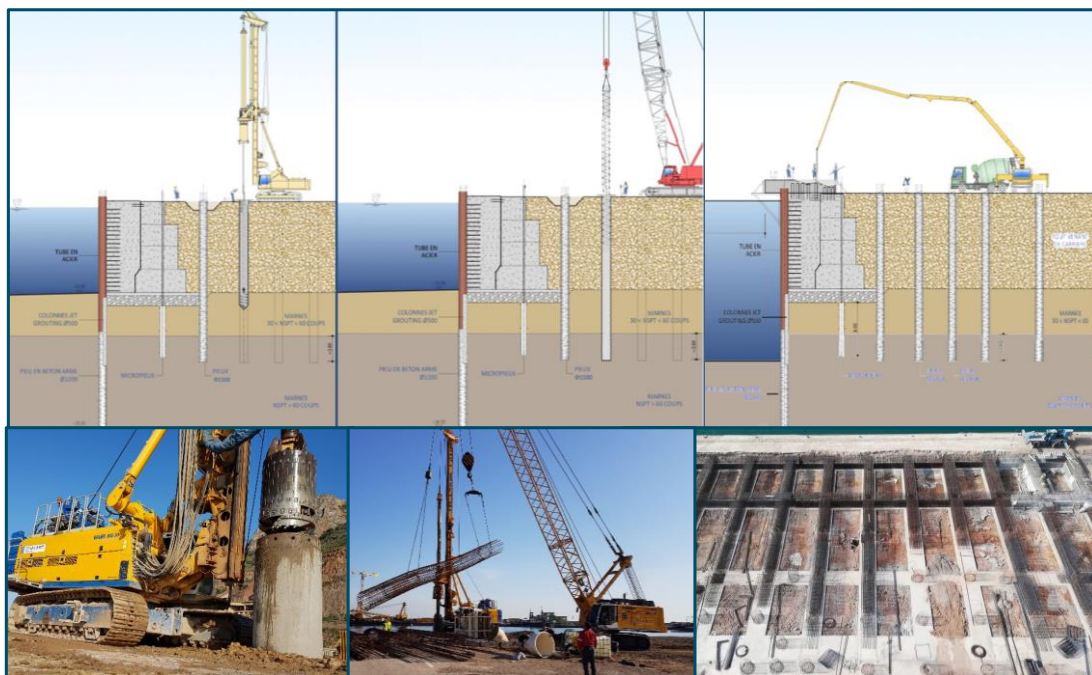


Figura 16 – Execução das estacas de fundação da plataforma de transferência e estacionamento de navios

Concluídas as operações de dragagem, iniciou-se a construção da estrutura de reação, localizada *offshore*, a cerca de 25.5m do alinhamento da cortina de estacas de recalce do cais. Trata-se de uma estrutura composta por uma laje de betão armado de 1.6m de espessura, fundada sobre 42 estacas moldadas, executadas por furação pelo interior de tubos metálicos ($\phi_{\text{interior}}=1500\text{mm}$ e 14mm de espessura), previamente introduzidos no terreno por vibrocração. A cravação dos tubos e a furação para execução das estacas seguiu procedimentos semelhantes aos descritos anteriormente, com a particularidade destes serem realizados por equipamentos a operar sobre meios flutuantes (figura 17).

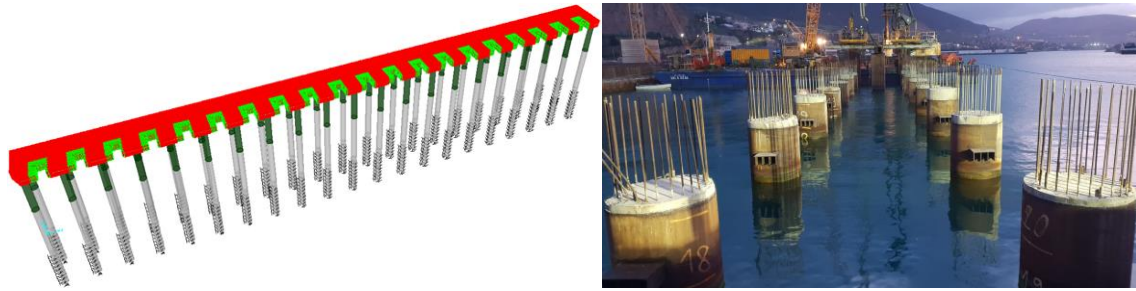


Figura 17 – Modelo de cálculo e execução das estacas da estrutura de reação *offshore*, através de meios flutuantes

À semelhança das estruturas *onshore*, esta plataforma de reação foi dimensionada para a envolvente das combinações de ações, destacando-se as combinações que têm por ação de base as cargas transmitidas pelo sistema *synchrolift*, as ações horizontais de acostagem e amarração de navios e as combinações sísmicas.

5- Instalação dos equipamentos, das redes e montagem da plataforma elevatória

A conclusão da execução dos elementos estruturais de reforço e de todas infraestruturas necessárias à instalação do sistema *synchrolift*, incluindo os edifícios de apoio e de controlo e uma galeria técnica abrangente de a todas as áreas da intervenção, possibilitou dar início à instalação das 2 guas rolantes, dos equipamentos de cais e dos sistemas e redes necessárias à operacionalidade do elevador.

Além dos equipamentos eletromecânicos do *synchrolift* e da instalação das duas guas rolantes com capacidades de elevação de 40T a 50m de distância, destas operações destacam-se a montagem da rede de carris, das redes de alimentação e controlo e da plataforma elevatória, das redes de drenagem, de abastecimento de água doce, de incêndio, difusão sonora, fibra ótica, etc..



Figura 18 – Imagem de uma grua rolante, de alguns equipamentos de cais, da rede de carris e dos componentes do sistema de suspensão

Outra operação de grande importância correspondeu à instalação da estrutura da plataforma elevatória, cujas especificidades, particularidades e requisitos de certificação impunham que a sua construção cumprisse exigências e um controlo de fabrico que inviabilizaram que a sua produção fosse realizada em solo argelino.

Assim, tirando partido das condições privilegiadas de navegabilidade do Mediterrâneo, procedeu-se ao seu fabrico numa unidade industrial situada em território espanhol, seguindo-se a montagem e transporte a partir de um estaleiro naval localizado no sul desse país.

As operações de transporte de cada uma das duas metades constituintes da plataforma para Mers El Kebir foram posteriormente realizadas através de um batelão movimentado por rebocador.

O seu posicionamento final foi obtido por introdução de água nos batelões e complementado por um sistema de guiamento em vigas/funil forradas a teflon, que durante o abaixamento gravítico

da estrutura encaminharam a plataforma para a localização requerida, que admitia tolerâncias de apenas 5mm.

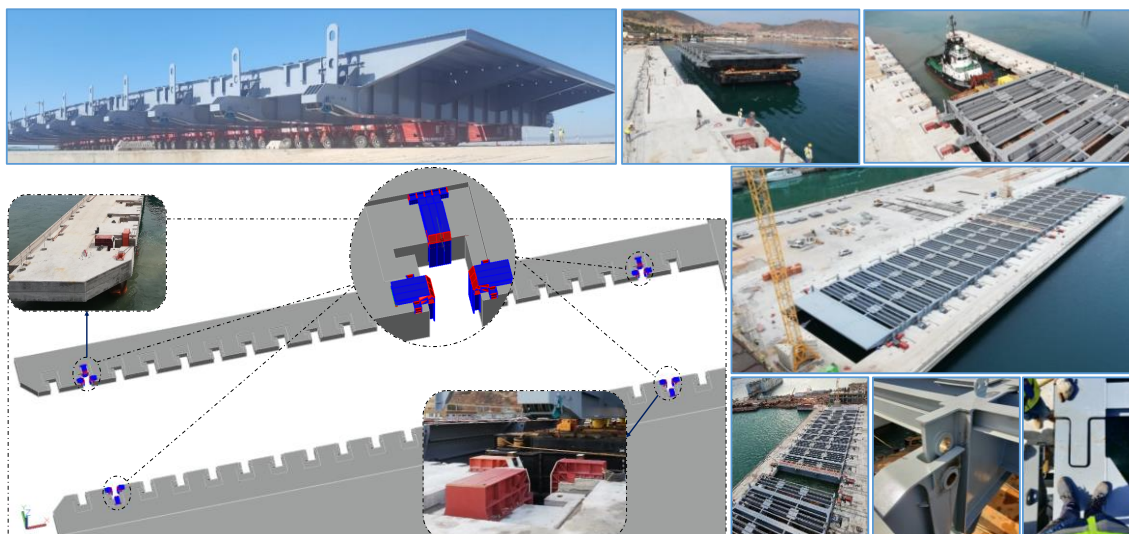


Figura 19 – Transporte e posicionamento das duas metades da plataforma elevatória

6- Conclusões

A imposição de novas exigências de exploração a estruturas marítimas antigas, que se traduzam no aumento das ações atuante ou o descalçamento das infraestruturas existentes implica, de um modo geral, a realização de intervenções estruturais bastante complexas e dispendiosas. Neste contexto, a implementação das intervenções de reforço e recalce exigidas implica a adoção de soluções multidisciplinares e metodologias construtivas adequadas, capazes de ultrapassar as condicionantes existentes e atingir o comportamento estrutural requerido pelas novas condições de funcionamento.

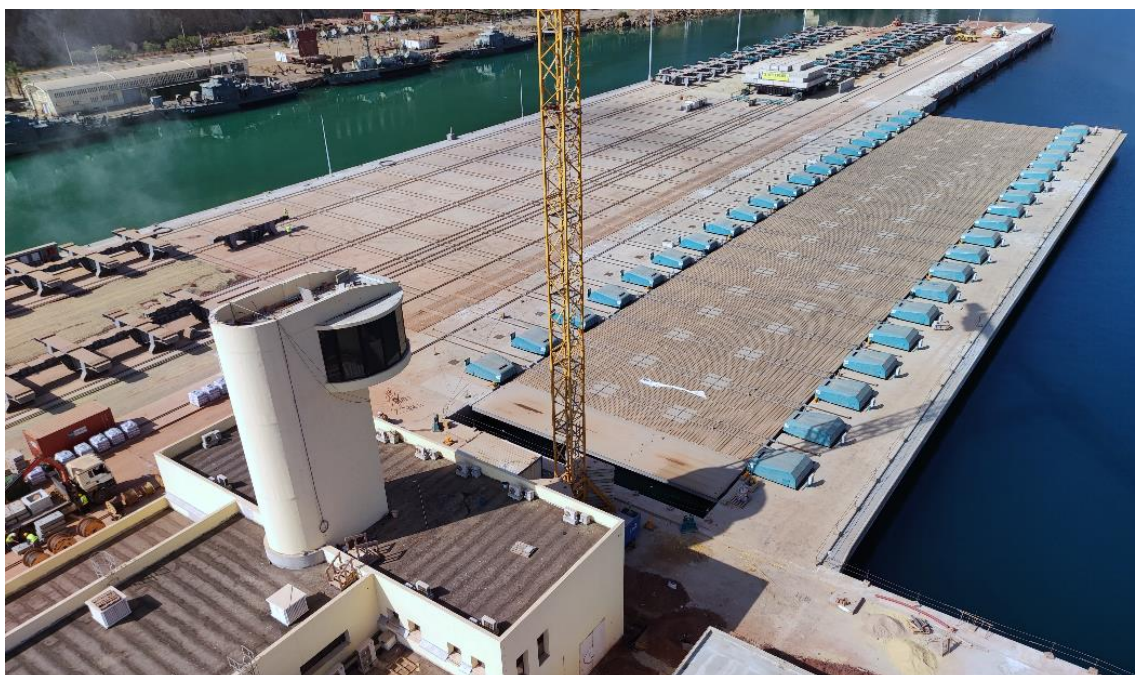


Figura 20 – Imagem da obra em julho de 2021, após conclusão do edifício de controlo e instalação de todos os componentes eletromecânicos do sistema synchrolift

Nestes cenários, e sempre que as características geomecânicas dos solos inviabilizem as operações cravação de elementos por percussão ou vibração, como é o caso de estacas-prancha, até à obtenção das profundidades necessárias para as estruturas de recalce, a opção por estacas moldadas pode afigurar-se vantajosa. Esta metodologia, que utiliza a furação com extração de terreno, contorna limitações impostas pelas dificuldades de cravação, viabilizando a obtenção das profundidades de projeto através da execução de estacas de betão armado, com furação pelo interior dos tubos, obtendo profundidades bastante superiores às de cravação.

No caso de obra exposto neste artigo, as condicionantes extremas da intervenção impuseram a necessidade de tirar partido do funcionamento conjunto de todos os elementos estruturais, existentes e de reforço, para verificação do equilíbrio global. Esta opção, que implicou um conhecimento profundo das características geomecânicas dos solos existentes, das propriedades reológicas dos materiais e do comportamento estrutural de todos os elementos, revelou-se determinante para o sucesso da empreitada.

Considerando a interação entre a cortina de estacas de recalce, os muros cais existentes, o enchimento em betão simples, as colunas de jet-grouting, as microestacas e estacas de fundação das zonas de aterro, todos eles interligados no seu coroamento por um diafragma constituído pelas lajes e vigas de betão armado, e o emprego de elementos de conexão, foi possível obter uma capacidade resistente compatível com o aumento expressivo das ações e a realização de uma dragagem significativa, atingindo fatores de segurança bastante elevados.



Figura 21 – Imagens do sistema em operação ilustrando a sequência da aproximação, elevação e transferência de um navio de 8500T para uma zona de estacionamento