

ATERRO DA DOCA DO TERREIRO DO TRIGO SOBRE ALUVIÕES LODOSAS TRATADAS COM COLUNAS DE JET GROUTING

FILL OF THE "TERREIRO DO TRIGO" DOCKYARD OVER ALLUVIAL SOILS IMPROVED WITH JET GROUTING COLUMNS

Tomásio, Rui, JetSJ Geotecnia, Lda., Lisboa, Portugal, rtomasio@jetsj.pt
Pinto, Alexandre, JetSJ Geotecnia, Lda., Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.pt
Mendes, João Ravasco, Somague Engenharia, S.A., jmendes@somague.pt
Marques, Gonçalo, Seth - Sociedade de Empreitadas e Trabalhos Hidráulicos S.A., Lisboa, Portugal, Gonçalo.marques@seth.pt

RESUMO

No presente artigo são descritos os principais critérios de concepção e de execução adoptados na solução de tratamento dos materiais lodosos existentes no interior da Doca do Terreiro do Trigo, no Jardim do Tabaco, em Lisboa, de modo permitir o seu posterior aterro. A solução implementada, que visou permitir a futura construção do novo Terminal de Cruzeiros de Santa Apolónia, em Lisboa, consistiu na execução de uma malha de colunas de jet grouting com Ø1500mm, subjacentes a uma plataforma de transferência de carga, materializada por duas geogrelhas biaxiais, permitindo assim a construção de um aterro de 4,2m de altura. As colunas de jet grouting asseguram a transferência da carga do aterro directamente para o substrato Miocénico competente, identificado a cerca 20,0m de profundidade, sem necessidade de transmitir cargas importantes aos lodos (resistência ao corte não drenada entre 15kPa e 20kPa) e, consequentemente, sem despoletar significativos fenómenos de consolidação hidrodinâmica dos mesmos. Refere-se ainda os trabalhos de reabilitação e recalçamento dos muros periféricos que possibilitaram que os mesmos viessem a acomodar os impulsos transmitidos pelo aterro da Doca. No âmbito dos trabalhos foram ainda realizados, sobre colunas definitivas, ensaios de carga verticais e horizontais. Por último são apresentados os principais resultados da instrumentação da obra.

ABSTRACT

The "Terreiro do Trigo" dockyard, located at the "Jardim do Tabaco", at the right bank of Tagus River was filled in order to allow the construction of the new "Santa Apolónia" Cruise Ship Terminal in Lisbon. A load transfer platform (LTP), founded over jet grouting columns Ø1500mm, allowed the construction of a 4,2m height embankment placed over a soft alluvium layer (undrained shear resistance lesser than 15 to 20 kPa) with about 20m of average thickness. The existent dockyard peripheral and old walls were refurbished and underpinned using micropiles, capped by reinforced concrete beams, in order to accommodate the new embankment earth pressures. The main design and execution criteria, including the quality control and quality assurance of the jet grouting columns are presented, as well as the main results of the adopted monitoring and survey plan and full scale load tests.

1 - INTRODUÇÃO

As soluções apresentadas ao longo deste artigo, inserem-se na empreitada de "Reabilitação e Reforço dos Cais entre Santa Apolónia e o Jardim do Tabaco – 2ª Fase". Esta obra desenvolve-se numa extensão total de cerca de 1100m, incluindo o aterro a doca do Jardim do Tabaco, com uma área de cerca de 700x55m² (Figura 1).

Os principais objectivos da intervenção foram:

- Reabilitar a estrutura dos muros cais existentes, que apresentava deficiências, de forma a que os mesmos pudessem acomodar os impulsos transmitidos pelo aterro da doca;
- Aumentar a área de terraplano, através do aterro da doca;
- Construir uma nova infraestrutura que permita a utilização do cais por navios de cruzeiro, com maiores fundos de serviço.

Com vista ao melhoramento da estabilidade global da estrutura dos cais, a solução original, patenteada a Concurso previa, resumidamente, as seguintes medidas:

- Execução de colunas de brita ao nível do complexo lodoso, adjacente à face exterior dos muros cais. As colunas de brita deveriam dispor de um diâmetro de 950mm, distribuídas numa malha de 2m de lado, com excepção da zona da entrada da doca, e com altura variável, desde a superfície dos lodos até ao substrato Miocénico;
- Execução de um prisma de enrocamento subaquático, sobre os lodos tratados com colunas de brita, o qual só poderia, à partida, ser realizado após a conclusão das colunas de brita e do prazo estimado para a consolidação dos materiais lodosos;
- Execução de colunas de brita ao nível do complexo lodoso, em toda a área de implantação da Doca. As colunas de brita deveriam dispor de um diâmetro de 950mm, distribuídas numa malha de 2m de lado e com altura variável, desde a superfície dos lodos até ao substrato Miocénico.

A solução alternativa proposta e executada pretendeu eliminar a totalidade dos trabalhos subaquáticos e de colunas de brita, assegurando maior previsibilidade do prazo da obra e menor risco para a estabilidade das estruturas vizinhas e a preservar, determinado pela eliminação do processo de consolidação acelerada dos lodos (JetSJ, 2009).

No enquadramento descrito, foram executadas as seguintes soluções:

- Recalçamento e reforço dos muros cais existentes, através da realização de microestacas e de colunas de jet grouting, encabeçadas e solidarizadas por elementos em betão armado;
- Fecho da Doca através da execução de uma estrutura porticada, constituída por estacas de betão armado, encabeçadas por uma grelha de vigas de betão armado e travadas horizontalmente, no topo, com recurso a microestacas inclinadas. Adicionalmente, de forma a garantir a continuidade e o efeito de barreira e de confinamento do material fino do aterro, foi instalada uma cortina de estacas prancha encastrada nos materiais lodosos e encabeçada na referida grelha de vigas;
- Execução de colunas de solo-cimento, materializadas através da tecnologia de jet grouting, na área de implantação da Doca, para fundação de um aterro com 4,20m de altura, que permitiu atingir a cota do terrapleno adjacente.

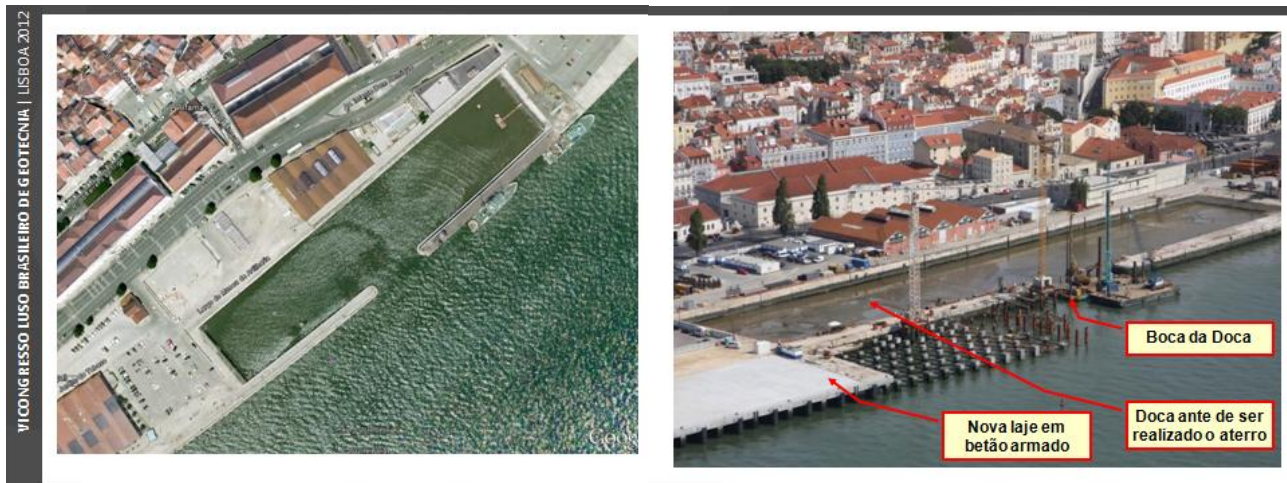


Figura 1 – Vista geral da zona da intervenção

2 - PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 - Geologia e geotecnia

No que se refere ao cenário geológico e geotécnico, o mesmo era constituído por aterros e por enrocamentos marginais, fundados sobre lodos, parcialmente ou totalmente consolidados (zona sobre os muros), pelo complexo lodoso, constituído por lodos argilosos com valores baixos de resistência ao corte não drenada e finalmente pelo substrato Miocénico, constituído por areias, argilas e calcários. Os lodos, na zona de transição para o Miocénico, apresentavam características arenosas.

As três formações definidas anteriormente foram caracterizadas, do seguinte modo:

- Aterro e Enrocamentos: estrato heterogéneo, incluindo, por vezes, enrocamentos calcários constituintes da fundação dos muros, embora também detectados na zona interior da Doca;
- Complexo Aluvionar: constituído, quase exclusivamente, por lodos, apresentando algumas intercalações areno-lodosas, especialmente no interior da Doca. A generalidade das sondagens realizadas naquele lugar detectou, na parte inferior do complexo, uma zona areno-lodosa com conchas, seixos e calhau calcários provenientes da erosão das camadas miocénicas;
- Complexo Miocénico: constituído, essencialmente, por estratos calcários fossilíferos-gresosos, alternando com camadas argilosas. As bancadas calcárias podem atingir espessuras da ordem dos 4,0m. As camadas gresosas (areolas) são constituídas por areias finas, micáceas, argilosas, alternando com camadas de argila, raramente isentas de areias.

Passa-se em seguida a descrever os valores adoptados para os parâmetros geomecânicos das diferentes formações:

Quadro 1 – Parâmetros Geomecânicos

Formações Modeladas	ϕ' (°)	C' (kPa)	γ_h (kN/m ³)	E' (MPa)
Aterros	35,0	0,1	18,0	12,0
Lodos Argilosos	19,0	8,0	16,0	1,0
Lodos Arenosos	25,0	10,0	17,0	3,0
Areias Siltosas / Miocénico	30,0	0,1	18,0	15,0
Jet Gouting	30,0	400	18,0	1.000,0

γ_h - Peso específico húmido; ϕ' - Ângulo de atrito interno; E' - Módulo de deformabilidade C' - Coesão drenada

2.2 - Estrutura dos muros cais existentes

Do ponto de vista estrutural os muros cais existentes são constituídos por uma estrutura em pilares de betão de cal hidráulica, afastados de cerca de 14m, dispoendo de superestrutura em alvenaria de pedra, apoiada sobre lintéis em abóbada, vencendo o vão entre pilares. O conjunto encontra-se assente sobre um prisma de enrocamento ou directamente sobre o substrato Miocénico. O prisma de enrocamento da base encontra-se, por sua vez, fundado no substrato, quando este se encontra acima da cota -15m (ZH), ou numa vala dragada no lodo, com rasto a cotas variáveis. (WW, 2008)

2.3 - Condições de vizinhança

O recinto da intervenção encontrava-se confinado entre muros cais centenários e edifícios de armazéns (Figura 2 e Figura 3). A tardoz dos muros, do lado Poente, localizam-se, a pequena distância, edifícios de uso industrial, assim como um poço de ventilação do Metropolitano de Lisboa. As soluções implementadas permitiram minimizar o impacto no normal funcionamento destas estruturas e infraestruturas durante e após a conclusão dos trabalhos.



Figura 2 – Vista geral da zona da intervenção e das Condições de Vizinhança

2.4 - Serviços afectados

A localização de todos os serviços enterrados situados no tardoz dos muros que delimitam a Doca, em particular do lado Poente, foi realizada antes do início dos trabalhos, de forma a salvaguardar imprevistos durante o decorrer da mesma. Foi dada especial atenção a uma conduta adutora Ø1000mm, localizada entre os edifícios industriais e os muros da Doca (lado Poente) (Figura 3).

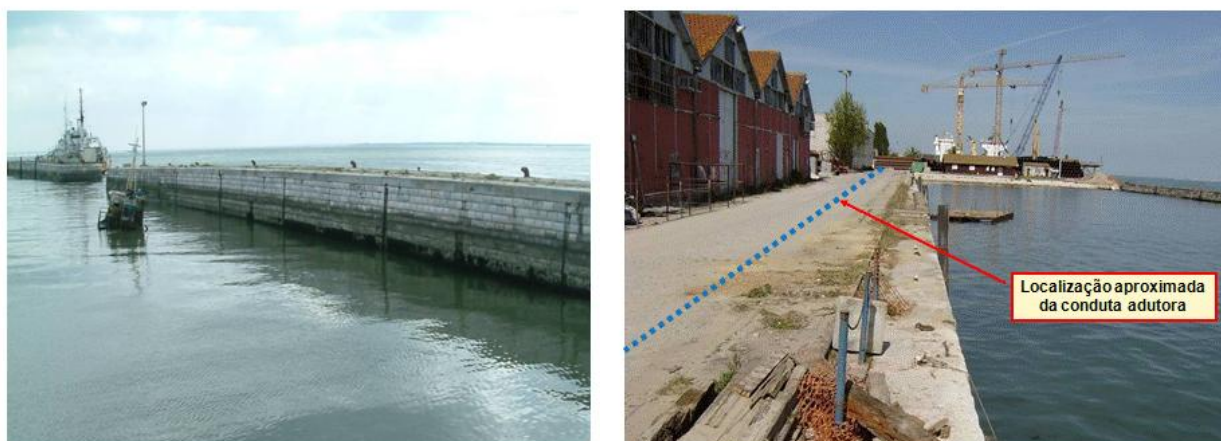


Figura 3 – Vista das Estruturas e Infraestruturas adjacentes ao Recinto da Intervenção

3 - PRINCIPAIS SOLUÇÕES

3.1 - Reabilitação e recalçamento dos muros cais existentes

A reabilitação e o reforço dos muros existentes, previamente ao aterro da doca, bem como o recalçamento das respectivas fundações, foi realizada através da execução de microestacas, N80 (API 5A) Ø114,3x9mm, auto-perfurantes, armadas com 1 varão Ø32mm (A500/550), e seladas no interior de colunas de jet grouting, todas encabeçadas e solidarizadas por uma grelha de vigas em betão armado (Figura 4). Este conjunto de elementos foi dimensionado para acomodar as acções resultantes do peso do aterro, entretanto realizado no interior da doca, e das sobrecargas de utilização previstas, permitindo:

- Estabilizar os muros cais face a fenómenos de rotura global, determinados pelo incremento das solicitações nos muros (sobrecarga de utilização de 30kN/m² e impulsos do aterro da doca), pois as microestacas de recalçamento atravessaram toda a zona com maior probabilidade de ocorrência da referida rotura, incrementando a resistência ao corte do conjunto;
- Asegurar o recalçamento vertical dos muros cais, através do encaminhamento das cargas aplicadas à superfície dos muros para terrenos competentes, sem necessidade de mobilizar os actuais elementos de fundação, permitindo assim um controlo mais efectivo do comportamento dos muros face às novas solicitações.

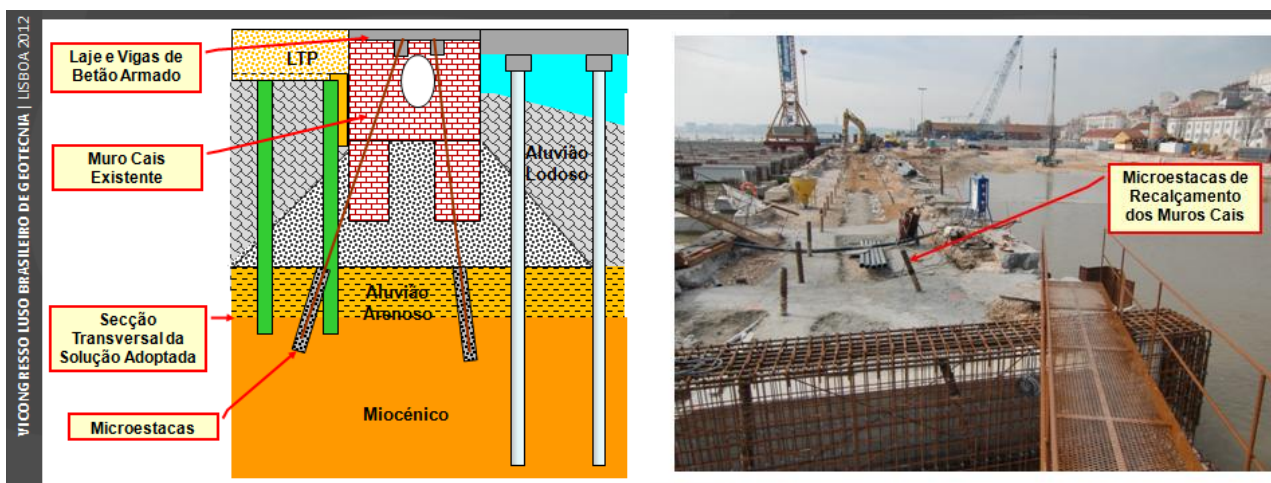


Figura 4 – Corte tipo e fotografia da solução implementada nos muros cais

3.2 - Fecho da boca da doca

Para o fecho da boca da doca, previamente ao respectivo aterro, foi executada uma estrutura porticada, constituída por estacas moldadas de betão armado Ø1000mm afastadas de 5,0m, encabeçadas por uma grelha em vigas de betão armado, travadas horizontalmente, no topo, com recurso a microestacas auto-perfurantes, inclinadas a 25°, N80 (API 5A) Ø114,3x9mm, armadas com 1 varão Ø32mm (A500/550) e seladas no interior de colunas de jet grouting. Adicionalmente, de forma a garantir a continuidade e o

efeito de barreira ao material fino do aterro, foi executada uma cortina de estacas prancha, devidamente protegida contra a corrosão, encastrada nos materiais lodosos e encabeçada na referida grelha de vigas (Figura 5).

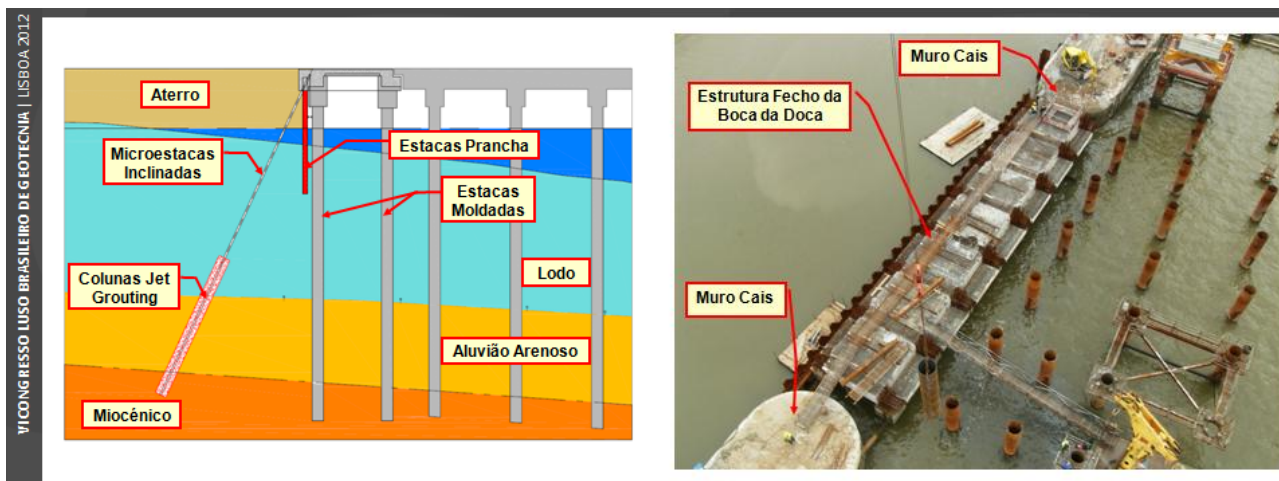


Figura 5 - Corte tipo e fotografia da solução implementada na boca da doca

3.3 - Tratamento da fundação do aterro da doca

O aterro da doca, face à existência de materiais lodosos subconsolidados e de modo a minimizar o fenómeno da consolidação hidrodinâmica, foi executado, após os trabalhos de reabilitação e recalçamento dos muros e de fecho da boca da doca, sobre uma plataforma de transferênica de cargas (LTP) fundada indirectamente sobre colunas de jet grouting executadas ao nível dos lodos argilosos.

Em função das cargas devidas ao peso próprio do aterro e da respectiva sobrecarga de utilização recorreu-se à execução de colunas de jet grouting $\varnothing 1500\text{mm}$, dispostas em duas malhas desfasadas de $8,0 \times 8,0\text{m}^2$, devidamente entregues ao nível dos materiais aluvionares arenosos, existentes na transição com o substrato Miocénico, de forma a permitir a transmissão das cargas essencialmente por atrito lateral. Nas situações em que a transição dos lodos para o substrato Miocénico se verificou mais brusca, as colunas foram executadas com uma entrega mínima de 1m no referido substrato (Figura 6). As colunas foram dimensionadas para um diâmetro de 1500mm e para uma resistência à compressão não confinada de 3,7MPa, associada a um valor de módulo de deformabilidade de 1,0GPa (28 dias). Para a consecução destes objectivos foram realizadas colunas com uma dosagem de cimento pozolânico de 550kg/m³.

A opção por fundações indirectas através de colunas de jet grouting prendeu-se, essencialmente, com aspectos de natureza construtiva, nomeadamente o recurso a equipamentos de pequeno porte, que minimizaram as exigências ao nível da plataforma de trabalho provisória, quando comparados com soluções tradicionais, como estacas de betão armado ou mesmo colunas de brita. Verificou-se que a materialização de uma plataforma de trabalho estável, que permitisse a realização dos trabalhos compatibilizados com a cota das marés, dispensando o recurso a meios marítimos, foi extremamente importante para o decurso dos trabalhos, em condições de segurança e de previsibilidade. Neste enquadramento, para além do fecho da doca através de uma cortina de estacas prancha, apoiada numa estrutura de betão armado, fundada em estacas, foi executada uma cortina de colunas de jet grouting $\varnothing 1200\text{mm}/1,0\text{m}$, ao longo do alinhamento interior dos muros da doca, de forma a minimizar a afluxo de água ao interior do recinto da doca e, sobretudo, assegurar o maior confinamento possível dos materiais aluvionares localizados no interior da doca.

A plataforma de trabalho provisória e a plataforma de transferência de cargas definitiva foi constituída por duas geogrelhas biaxiais do tipo SS20G e SS20 (resistência à tracção de 20kN/m), sob camada de material granular, com 40cm de espessura mínima, sobre a qual foi, por sua vez, colocada uma segunda geogrelha biaxial, do tipo SS20 e, por fim, uma segunda camada de material granular, com 60 cm de espessura mínima.

A solução de tratamento implementada previu ainda a possibilidade de vir a ser integrada numa futura solução de fundações do Edifício da Gare de Passageiros do Terminal de Cruzeiros (Figura 2).

Apresenta-se, na Figura 6, um corte, uma planta e uma fotografia ilustrativos da solução executada:

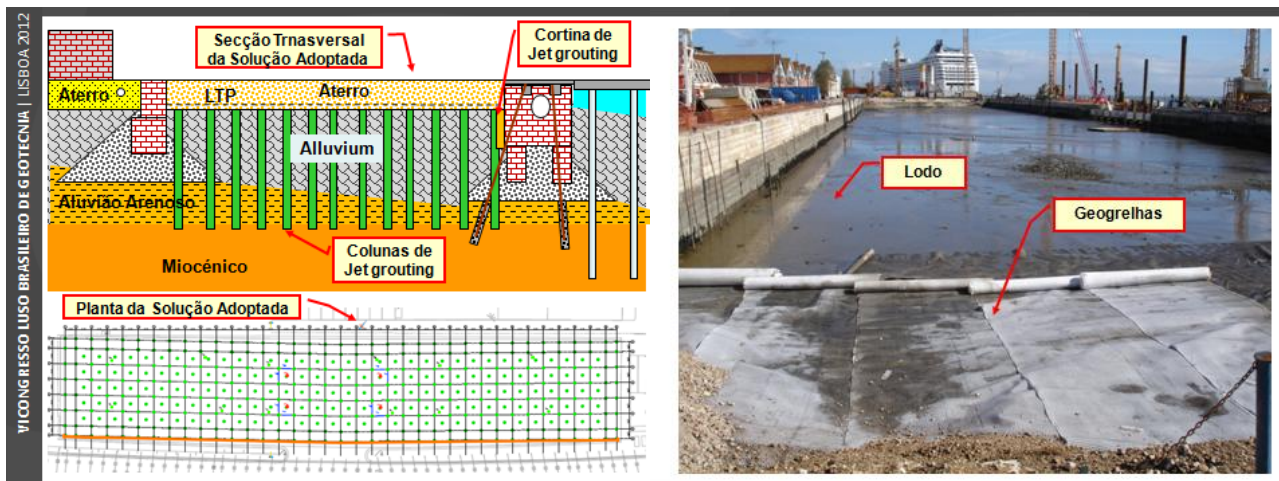


Figura 6 – Planta, Corte Transversal Tipo e fotografia da Solução Executada

4 - DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento da solução implementada, nomeadamente da plataforma de transferência de cargas e para avaliar a percentagem da carga (LTP) efectivamente transferida para as colunas de jet grouting, foi elaborado um modelo numérico tridimensional, no programa Plaxis 3D Foundation, recorrendo a elementos finitos de volume, que respeitam o critério de rotura de Mohr-Coulomb.

O assentamento vertical máximo estimado para o topo de aterro, com base no modelo de cálculo referido, foi de cerca de 76mm. Verificou-se, durante a construção do aterro, que o máximo assentamento vertical registado foi de cerca de 350mm, conforme se poderá verificar na Figura 8. A justificação para esta diferença estará associada ao valor do assentamento mobilizado antes da conclusão da plataforma de transferência de cargas. A título comparativo refere-se que o assentamento estimado para a solução de colunas de brita seria de cerca de 1600mm (num prazo de cerca de 1 ano), com efeitos secundários nefastos para as estruturas e infraestruturas vizinhas.

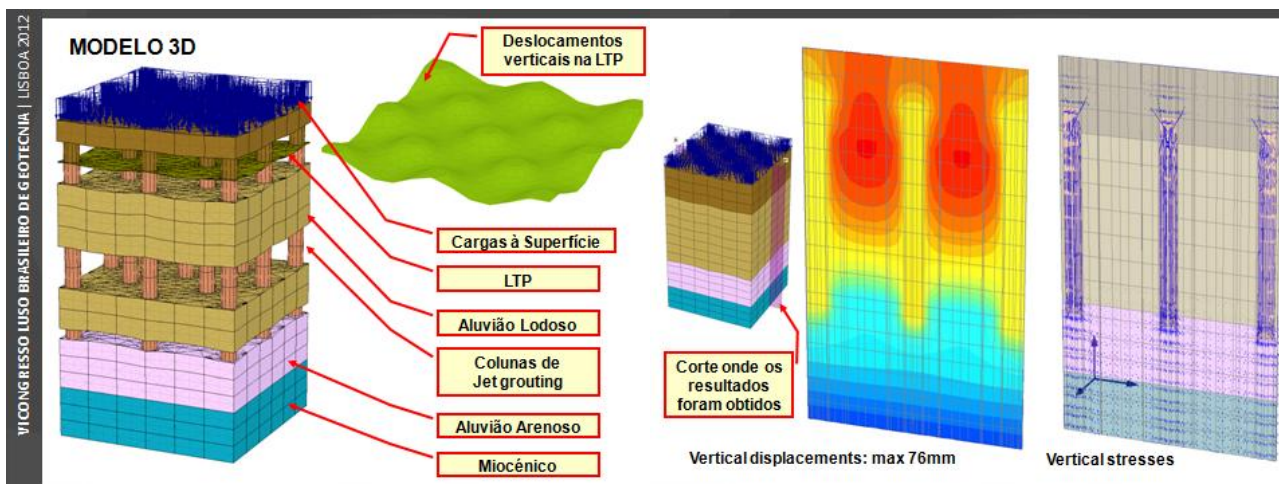


Figura 7 – Modelo de Elementos Finitos 3D

5 - PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

O desempenho da solução implementada foi monitorizado, durante os trabalhos de execução das colunas de jet grouting e do aterro, com base no Plano de Instrumentação e Observação previamente definido. O referido Plano previa a colocação de marcas topográficas, seladas na base do aterro, extensómetros, nas geogrelhas da plataforma de transferência de cargas, e células de pressão, no coroamento das colunas de jet grouting (Figura 8 e Figura 9).



Figura 8 – Andamento dos Deslocamentos Verticais e Instalação de um Extensómetro

Com base nos resultados produzidos pela instrumentação instalada, nomeadamente as leituras das células de pressão, foi possível concluir que, apesar das colunas terem sido dimensionadas para acomodarem a totalidade das cargas provenientes do aterro (3,7MPa de resistência à compressão não confinada), apenas cerca de 40% das cargas foram transferidas directamente para o seu coroamento (Figura 9). Conclui-se, assim, que a zona superficial dos lodos, confinados pela presença das colunas de jet grouting, apresentam uma capacidade portante bastante elevada, conseguindo acomodar cerca de 60% das cargas. Admite-se ainda que as percentagens apresentadas venham a ser alteradas ao longo do tempo, nomeadamente através da transferência gradual de carga dos lodos para o troço inicial do fuste das colunas, acabando estas por vir a acomodar a sua carga de dimensionamento. Os eventuais fenómenos de consolidação associados a esta transferência de carga, através dos lodos, são reduzidos face à reduzida espessura de materiais lodosos influenciados por este processo.

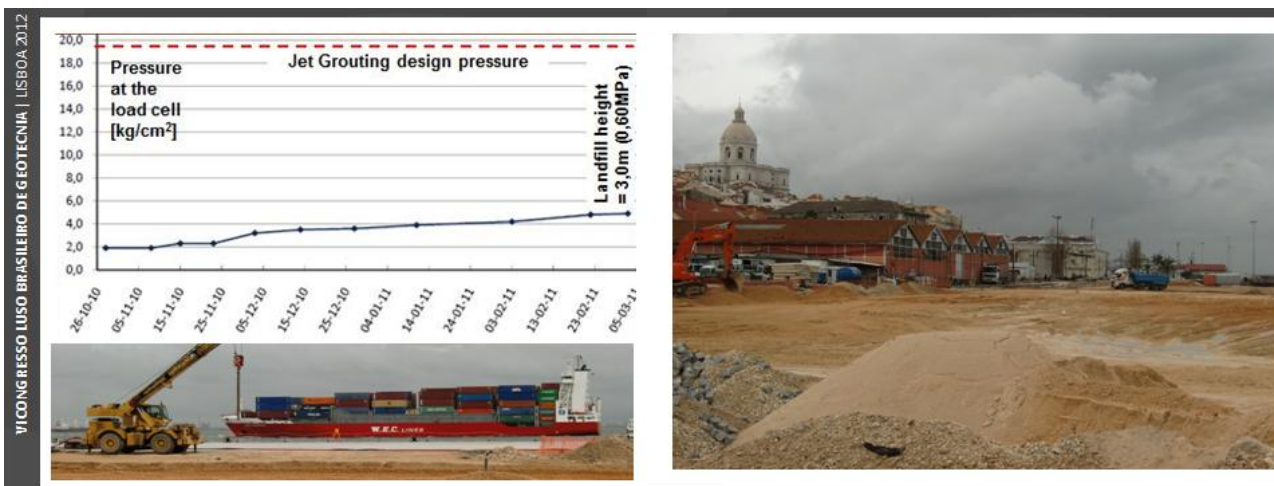


Figura 9 – Carga Instalada nas Células de Pressão e Vista Geral do Aterro na Fase Final de Construção

Além do confinamento lateral dos lodos, conferido pela existência das colunas de jet grouting, considera-se que o aumento global da capacidade de carga dos mesmos poderá ser explicado pela existência das formações miocénicas na base dos lodos e pela contaminação, da zona superficial, por material granular do aterro.

6 - CONTROLO DE QUALIDADE / CONTROLO DE EXECUÇÃO

A execução das colunas de jet grouting foi acompanhada de um apertado sistema de controlo de qualidade e de controlo de execução, que permitiu a confirmação da resistência, da rigidez e da geometria previstas no projecto. Do ponto de vista do controlo de execução confirmou-se que a tecnologia associada à execução das colunas assegura bons resultados, nomeadamente através do registo permanente de todos os parâmetros de execução das colunas (Figura 10). No que se refere ao controlo de qualidade, foram executadas colunas de teste (antes do início dos trabalhos) e foram realizadas carotagens em todo o comprimento em colunas de teste e aleatoriamente em colunas definitivas. A partir destas últimas foram recolhidos provetes sobre os quais foram realizados ensaios de

compressão não confinada, com medição de extensões, para aferição dos valores da resistência e do módulo de deformabilidade (Figura 10).



Figura 10 – Painel de Controlo do Equipamento de Execução das Colunas, Execução de Carotes e Caixa de Provetes

7 - ENSAIOS DE CARGA

7.1 - Ensaios de carga vertical

7.1.1 - Introdução

Após a conclusão dos trabalhos, foram realizados dois ensaios de carga à escala real com o objectivo de avaliar a possibilidade das colunas de jet grouting, reforçadas com tubos metálicos, poderem vir a integrar a solução de fundação do novo edifício da Gare de Passageiros do Terminal de Cruzeiros.

Com a realização dos 2 ensaios de carga vertical pretendeu-se confirmar as deformações verticais (nas suas parcelas elástica e plásticas) das colunas armadas com tubo metálico e avaliar a tensão de atrito mobilizável ao longo do fuste das colunas, para os diferentes materiais atravessados.

Com base nos resultados obtidos foi confirmada a capacidade de carga das colunas de jet grouting, realizadas com o objectivo de tratamento dos terrenos de fundação do aterro da Doca do Jardim do Tabaco (Figura 11).

Como já referido, os dois ensaios foram realizados sobre colunas de jet grouting $\varnothing 1500\text{mm}$, armadas com um tubo de microestaca, em aço N80 $\varnothing 177,0 \times 25,0\text{mm}$, reforçado interiormente, nos 6,0m superiores, com um varão tipo GEWI $\varnothing 50\text{mm}$.

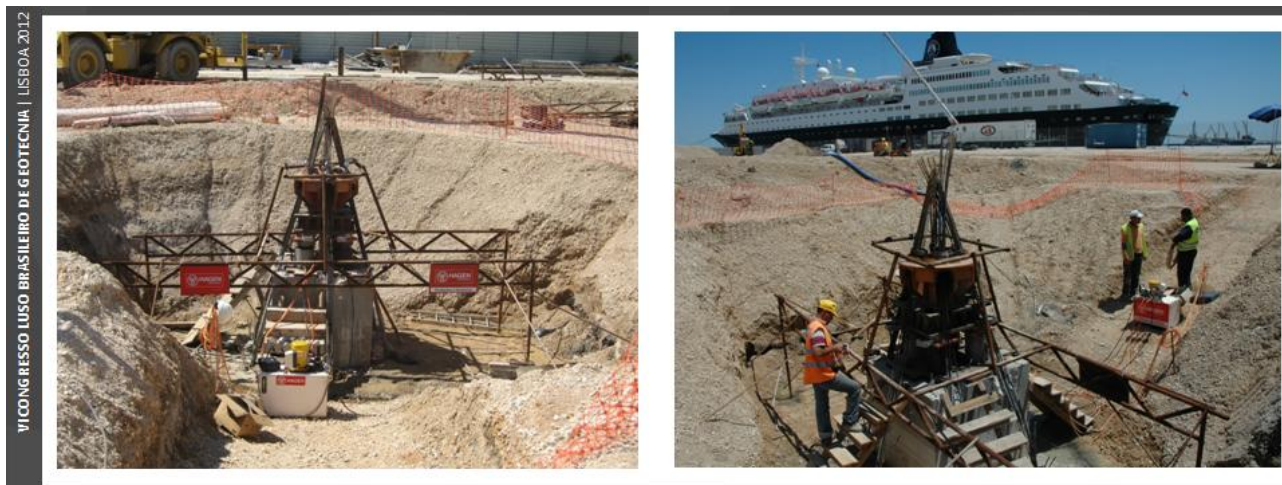


Figura 11 – Vista Geral dos dois Ensaios de Carga Vertical

7.1.2 - Características das colunas ensaiadas

As colunas de jet grouting ensaiadas (ensaio 1 – coluna 111A e ensaio 2 – coluna 149V), apresentavam diâmetro de $\varnothing 1500\text{mm}$ e comprimentos totais de 24,0m e 22,5m, respectivamente. Os referidos

comprimentos permitiam assegurar uma entrega mínima de 3,0m metros nos lodos arenosos, com resistência de ponta equivalente a $q_c > 5,0 \text{MPa}$, aferida previamente através de ensaios CPT e CPTU.

As colunas ensaiadas foram integralmente caroteadas e posteriormente armadas com um tubo de microestaca, em aço N80 $\varnothing 177,0 \times 25,0 \text{mm}$, por sua vez, armado interiormente, nos 6,0m superiores, com um varão tipo GEWI $\varnothing 50 \text{mm}$, devidamente selado através de uma injeção de preenchimento, interior e exterior, ao tubo da microestaca. O tubo de microestaca dispunha de um comprimento selagem, abaixo da base da coluna e devidamente injectado através do sistema IRS, de 1,7m e 3,2m para as colunas 111A e 149V, respectivamente.

Os maciços de encabeçamento, em betão armado, executados sobre o coroamento de cada uma das colunas, permitiram a aplicação das cargas verticais de compressão determinadas pelo programa de ensaio, definido com base no Plano de Cargas a transmitir à fundação, pelo novo Edifício da Gare de Passageiros.

7.1.3 - Metodologia do ensaio / sistema de aplicação da carga

Os ensaios realizados consistiram na aplicação ao coroamento das colunas de jet grouting (através de maciço/cabeça de reacção) de uma carga axial de compressão, por patamares, com um valor máximo de 5000kN (6000kN, ensaio 2). Este valor correspondia a cerca de duas vezes o respectivo valor de serviço (2500kN).

Como sistema de reacção foram utilizadas seis ancoragens de seis cordões de 0,6", devidamente seladas no substrato Miocénico competente e amarradas no coroamento através de uma cabeça metálica (Figura 12).

Entre a face superior do maciço de betão armado e o capacete de reacção foram intercalados quatro macacos hidráulicos devidamente calibrados (com as quatro respectivas células de carga igualmente calibradas), que permitiram a mobilização e o controlo da carga instalada durante o decorrer dos ensaios.



Figura 12 – Sistema de Aplicação da Carga e Sistema de Leitura

7.1.4 - Sistema de leitura

Em cada ensaio foram instalados os seguintes dispositivos, com o objectivo de medir as deformações axiais das colunas de jet grouting e as cargas aplicadas às mesmas (Figura 12):

- 3 Extensómetros de vara, dispostos ao longo do comprimento da coluna, localizados às seguintes profundidades (medidas em relação ao coroamento da coluna): extensómetro E2 – localizado aos 24m (base da microestaca); extensómetro E3 – localizado aos 22,5m (base da coluna); extensómetro E4 – localizado aos 12m. Apesar de instalados, apenas se dispõe de resultados para os extensómetros do 2º ensaio;
- 4 Células de carga: intercaladas entre os macacos hidráulicos e o capacete metálico de reacção;
- 4 Deflectómetros: colocados no coroamento do maciço de encabeçamento da coluna de jet grouting de ensaio. Os deflectómetros foram solidarizados com uma estrutura de referência, fundada suficientemente longe da zona de perturbação do ensaio, nas colunas adjacentes à de ensaio;

- 6 Deflectómetros colocados no coroamento de cada uma das cabeças das ancoragens de reacção. Os deflectómetros foram solidarizados com uma estrutura de referência, fundada suficientemente longe da zona de perturbação do ensaio, nas colunas adjacentes à de ensaio;
- 4 Alvos Topográficos: colocados no coroamento do maciço de encabeçamento da coluna de jet grouting de ensaio;
- 1 Alvo Topográfico: colocado no centro do capacete metálico de reacção.

O sistema implementado permitiu assim a leitura directa das seguintes grandezas:

- Deformação axial da coluna de jet grouting a 3 profundidades;
- Carga instalada nos macacos hidráulicos;
- Deformação axial total;
- Alongamento das ancoragens.

7.1.5 - Análise dos resultados

Com base na informação adquirida através dos diferentes aparelhos de instrumentação instalados, assim como das propriedades mecânicas dos tubos de microestaca e das colunas de Jet-Grouting, nomeadamente a geometria, secção transversal e módulo de deformabilidade, foi estimada a degradação em profundidade da carga aplicada à cabeça (Figura 13).

Para a referida análise, considerou-se que a degradação de carga axial do conjunto "Coluna+Microestaca" ocorreria de uma forma linear, ao longo do fuste, com a existência de alguma carga residual no final do elemento, que seria transmitida, por ponta, ao terreno competente.

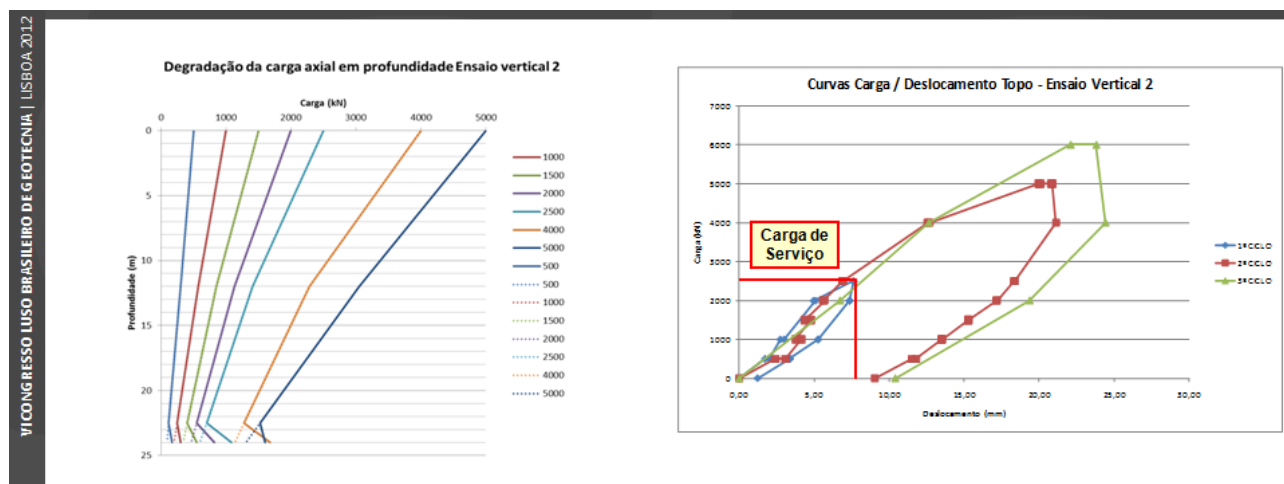


Figura 13 – Andamento da Carga Axial em Profundidade e Curvas Carga / Deslocamento no Topo da Coluna

Conforme é visível no gráfico anterior, o modelo consegue descrever o fenómeno de perda de carga por atrito lateral que, face ao grande diâmetro da coluna, toma um valor total significativo pese embora corresponda à mobilização de valores relativamente baixos de tensão tangencial de atrito coluna-solo, situação já antecipada devido às deficientes características geológicas das formações interessadas pelo corpo da coluna.

Partindo do diâmetro da coluna de Jet-Grouting, obtiveram-se valores de tensão coluna-solo na ordem dos 20kPa a 30kPa, compatíveis com os da coesão não drenada (C_u), aferidos através do estudo geológico para os materiais aluvionares lodosos onde a coluna está inserida.

Do mesmo modo foi possível verificar que parte significativa da carga, entre os 20 a 30% da carga aplicada à cabeça, é transmitida por ponta ao solo. Este facto é corroborado pelo assentamento diferencial registado entre a cabeça, medido pelos alvos topográficos, e o extensómetro situado perto da base da microestaca.

No entanto, no gráfico do lado esquerdo da Figura 13 é igualmente visível uma inflexão no final da linha de todos os ciclos de carga. Esta inflexão, que provem da utilização directa dos dados dos extensómetros, conduz ao que aparenta ser um aumento de carga ao nível do comprimento de selagem. Contudo, tendo em consideração que nesta zona apenas existe a microestaca, ocorrendo uma

significativa redução da rigidez axial do conjunto, justifica-se a correcção dos valores obtidos e, como tal, estimar um andamento das cargas conforme indicado no mesmo gráfico (linha a tracejado).

7.1.6 - Consideração finais sobre os ensaios verticais

A análise dos resultados obtidos com base na informação produzida pelos ensaios de carga vertical realizados, permitiu, em geral, confirmar a adequabilidade da resposta das colunas de jet grouting ensaiadas às cargas de compressão aplicadas no respectivo coroamento.

Os registos dos assentamentos do coroamento das colunas situam-se em valores expectáveis e significativamente inferiores ao assentamento elástico, considerando que a carga apenas se dissiparia no substrato competente, localizado a cerca de 20,0m de profundidade (pressuposto conservativo de dimensionamento das colunas). Os deslocamentos plásticos são igualmente reduzidos, indiciando um comportamento predominantemente elástico, em particular para as cargas de serviço (Figura 13).

Relativamente a fenómenos de fluência, verificou-se a inexistência de assentamentos significativos ao longo dos patamares de carga, nomeadamente para a carga de serviço aplicada durante 12 horas.

Tendo por base o exposto e admitindo os resultados obtidos como representativos do comportamento das restantes colunas executadas na Doca do Jardim do Tabaco, considerou-se que estas estariam em condições de poder vir a ser incorporadas na solução de fundações do novo Edifício correspondente à Gare de Passageiros do Terminal de Cruzeiros de Santa Apolónia.

7.2 - Ensaios de carga horizontal

7.2.1 - Introdução

Tal como nos ensaios de carga verticais, com a realização dos ensaios de carga horizontais pretendeu-se avaliar as deformações horizontais (nas suas parcelas elástica e plástica) das colunas de jet grouting, armadas com tubo metálico, quando sujeitas a uma força horizontal aplicada no seu coroamento.

Os resultados obtidos permitiram estimar a capacidade de carga horizontal das colunas de jet grouting, realizadas com o objectivo de tratamento dos terrenos de fundação do aterro da Doca do Jardim do Tabaco. Adicionalmente, a informação recolhida nestes ensaios permitiu obter dados para o projecto das fundações indirectas do futuro Edifício da Gare de Passageiros do Terminal de Cruzeiros de Santa Apolónia, nomeadamente no âmbito da análise da possibilidade de integrar as actuais colunas, desde que devidamente armadas com tubos metálicos, como elementos de fundação, para as cargas verticais e também para as cargas horizontais, das estruturas que irão materializar o edifício.

Apesar de prevista inicialmente a realização de apenas um ensaio de carga, face às dificuldades que surgiram durante a realização do primeiro ensaio, durante o qual, na fase de carga do 2º ciclo, se registaram deslocamentos e rotações demasiado expressivos na cabeça de uma das colunas, foi considerado como oportuna a repetição do ensaio. O dispositivo de ensaio definido inicialmente previa que o ensaio horizontal fosse realizado entre o coroamento de duas colunas, ou seja, as duas colunas seriam ensaiadas em conjunto e serviam, simultaneamente, de sistema de reacção simétrico, conforme representado na Figura 14.

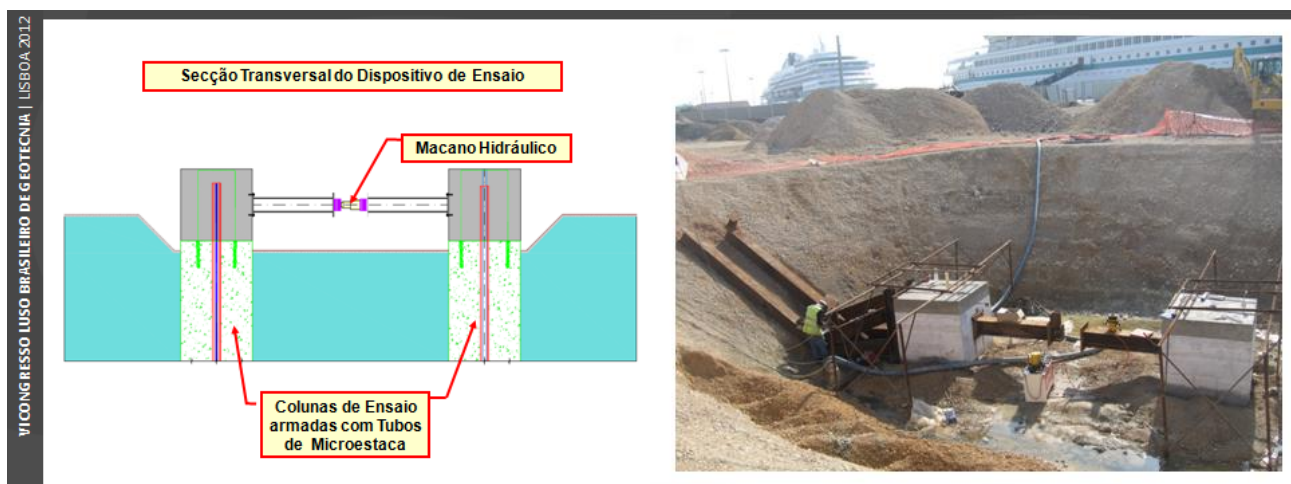


Figura 14 – Sistema de Ensaio Idealizado e Sistema Alternativo Implementado

Como já descrito, face à deformação excessiva de uma das colunas, motivada muito provavelmente pela descompressão excessiva do terreno lodoso a quando da escavação para a execução do maciço de

encabeçamento, que terá afectado a ligação do coroamento da coluna ao mesmo, o sistema não se mostrou simétrico e, como tal, verificou-se um excessivo afastamento dos maciços, impossibilitando a mobilização das cargas previstas. De modo a tentar solucionar a situação referida, realizou-se a repetição do ensaio em que o maciço de encabeçamento da coluna danificada foi escorado contra o talude de aterro existente, com o objectivo de mobilizar um sistema de reacção alternativo, mais realista, e de maior rigidez, conforme indicado na Figura 14.

7.2.2 - Características das colunas ensaiadas

As colunas de jet grouting ensaiadas (coluna 178V e coluna 146A) apresentavam diâmetro de Ø1500mm e comprimentos totais de 23,0m. Os referidos comprimentos permitiam assegurar uma entrega mínima de 3,0m metros nos lodos arenosos, com resistência equivalente a $q_c > 5,0\text{MPa}$, previamente aferida através de ensaios CPT e CPTU.

À semelhança do que aconteceu nas colunas ensaiadas verticalmente, as colunas ensaiadas horizontalmente foram integralmente caroteadas e posteriormente armadas com um tubo de microestaca, em aço N80 Ø177,0x25,0mm, armado interiormente, nos 6,0m superiores, com um varão tipo GEWI Ø50mm, ou equivalente, devidamente selados através de uma injeção de preenchimento, interior e exterior, ao tubo da microestaca. Os tubos de microestaca dispunham de um comprimento selagem, abaixo da base da coluna e devidamente injectado através do sistema IRS, de 2,7m para ambas as colunas.

Os maciços de encabeçamento, em betão armado, executados sobre o coroamento de cada uma das colunas, permitiram a amarração do tubo da microestaca e a aplicação das cargas horizontais determinadas pelo programa de ensaio, definido com objectivo de avaliar a rigidez horizontal da fundação do novo Edifício da Gare de Passageiros.

7.2.3 - Metodologia do ensaio / sistema de aplicação da carga

Os ensaios realizados consistiram na aplicação ao coroamento das colunas de jet grouting (através do maciço de encabeçamento) de uma carga horizontal com um valor máximo estimado em 600kN. Este valor correspondia a, aproximadamente, cerca de 15% da carga de dimensionamento vertical estimada. A carga transmitida ao coroamento da coluna foi acomodada pela resistência ao corte e à flexão das colunas armadas, devidamente restringidas pelos materiais lodosos confinantes.

Na concepção inicial do ensaio previa-se que as duas colunas apresentassem um comportamento sensivelmente idêntico e, como tal, fosse possível tirar partido desta simetria para a materialização do sistema de reacção. Contudo, como já referido, este comportamento não se veio a confirmar, tendo-se adoptado, numa segunda fase, uma solução de recurso através do escoramento de uma das colunas, a que apresentou maior deformação, ao talude de aterro existente (Figura 14). Esta adaptação do esquema de montagem do ensaio resultou igualmente da aproximação do cenário experimental à situação de serviço onde, por restrição dos restantes elementos estruturais, nomeadamente pela laje de fundo em betão armado com funcionamento do tipo diafragma, se admite que tanto a rotação, como as translações da cabeça da coluna, venham a estar condicionadas, facilitando a redistribuição das cargas horizontais pela totalidade das colunas.

Como já referido, as cargas de ensaio foram aplicadas ao coroamento das colunas de jet grouting, através de maciços de encabeçamento em betão armado, recorrendo a um macaco hidráulico ligado aos dois maciços por dois perfis metálicos HEB, por sua vez selados nas faces laterais dos referidos maciços, de modo a poderem reagir entre si (Figura 15).



Figura 15 – Maciços antes da Realização do Ensaio e Macaco Hidráulico

7.2.4 - Sistema de leitura

Foram instalados os seguintes dispositivos de leitura, com o objectivo de medir as deformações horizontais das colunas de jet grouting e as cargas aplicadas às mesmas:

- 1 Calha inclinométrica, instalada no interior do tubo de microestaca colocado na coluna de jet grouting 146A;
- 1 Célula de carga intercalada entre o macaco hidráulico e o perfil metálico;
- 6 Deflectómetros colocados nas faces laterais e superiores dos dois maciços de encabeçamento;
- 4 Alvos Topográficos colocados nas faces laterais dos dois maciços de encabeçamento.

O sistema implementado permitiu a leitura directa das seguintes grandezas:

- Deformação horizontal, em profundidade, da coluna de jet grouting 146A, medida através da calha inclinométrica, permitindo elaborar um gráfico contínuo com a variação das deformações;
- Carga instalada no macaco hidráulico e transmitida ao coroamento das colunas, medida através da célula de carga;
- Deformação horizontal e rotação do coroamento de ambas as colunas, medida através dos deflectómetros e/ou dos alvos topográficos.

7.2.5 - Análise dos resultados

A análise e a interpretação dos resultados destes ensaios ficou muito condicionada pelo ocorrido no primeiro ensaio (rotura precoce de uma das colunas). Neste enquadramento, os resultados do segundo ensaio foram considerados como os mais representativos, em particular os registos obtidos pelos alvos topográficos instalados na cabeça da coluna de Jet-Grouting.

Através da correlação dos deslocamentos horizontais à cabeça da coluna com a carga aplicada, foi possível determinar (para cada patamar) uma rigidez horizontal equivalente da cabeça da coluna (valor que incorpora na sua génese a contribuição da rigidez da coluna associada à contribuição da rigidez do solo envolvente).

Na Figura 16, apresentada em seguida, é possível, através do gráfico apresentado, avaliar o desenvolvimento da rigidez horizontal com a variação da carga instalada, verificando-se que a rigidez não atinge o valor zero, ou seja, não existe uma plastificação total da coluna e, como tal, não terá sido esgotada a capacidade de carga horizontal.

A linha amarela corresponde a uma aproximação contínua (polinomial) dos registos discretos da rigidez, obtidos através do ensaio.

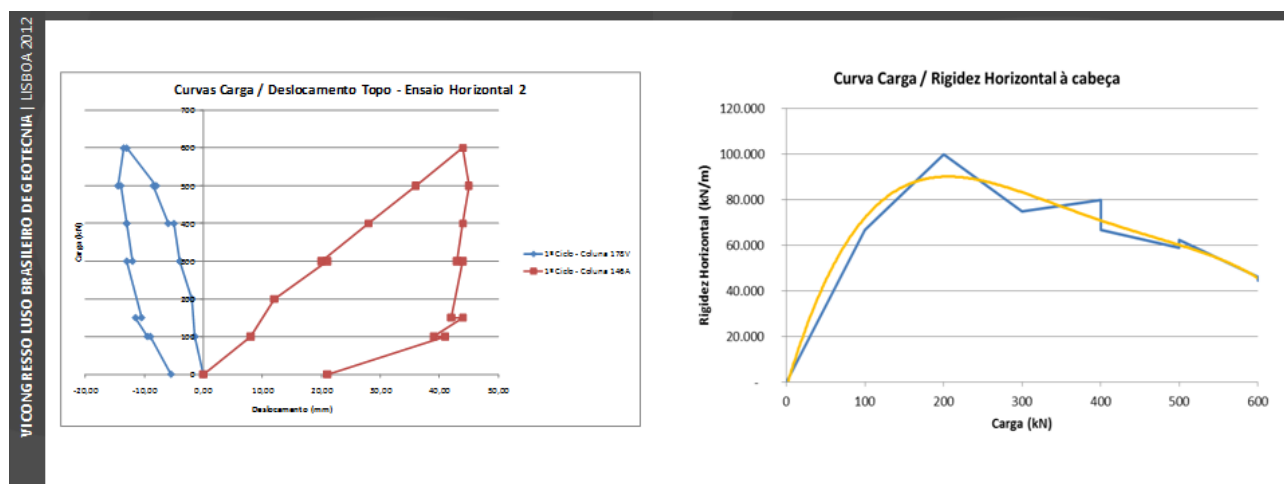


Figura 16 – Curvas de Deslocamento/Carga e Rigidez Equivalente no topo das Colunas

É possível ainda verificar que para carregamentos horizontais perto dos 200kN, cerca de 8% do valor da carga de serviço, o conjunto coluna e microestaca apresenta a rigidez horizontal mais elevada.

7.2.6 - Consideração finais sobre os ensaios horizontais

A análise dos resultados obtidos nos ensaios permitiu verificar que a coluna que manteve a integridade estrutural, por apresentar um confinamento na zona do respectivo coroamento mais próximo daquele que poderão vir efectivamente a dispor as colunas que venham a ser integradas na solução definitiva de fundações do novo edifício do Terminal de Cruzeiros (travadas no seu coroamento por uma laje de ensoleiramento em betão armado funcionando como um diafragma rígido e betonada sobre uma plataforma de trabalho constituída por material granular reforçado com geogrelhas biaxiais), assegurou um desempenho de acordo com o inicialmente expectável, permitindo a acomodação da totalidade da carga prevista.

Como já referido, os registos dos deslocamentos horizontais permitem confirmar que o ensaio apresentou um bom desempenho, registando deformações totais e plásticas bastante reduzidas para os níveis de carga instalados. Pois, por exemplo, para uma carga horizontal de 600kN apenas se verificou um deslocamento total de 15mm e um deslocamento plástico de cerca de 5mm (Figura 16).

8 - PRINCIPAIS QUANTIDADES

As quantidades dos principais materiais aplicados na obra, são listadas no quadro seguinte:

Quadro 2 – Principais Quantidades

Muros		Doca	
Material	Quantidade	Material	Quantidade
Microestacas	8.500m	Aterro	64.000m ³
Colunas de Jet Grouting	5.000m	Colunas de Jet Grouting	12.500m
Betão	2.800m ³	Geogrelhas	48.000m ²
Aço	400ton		

9 - CONCLUSÕES

O presente artigo permite comprovar o bom desempenho e a versatilidade das soluções com recurso a colunas de jet grouting e a microestacas em ambientes marítimos complexos, onde a flexibilidade das soluções e dos equipamentos utilizados permite o seu ajustamento aos principais condicionamentos existentes, em particular os de natureza geológica e geotécnica, assim como os de ordem construtiva. Confirmou-se ainda a adequabilidade das soluções a cenários geológicos adversos, minimizando substancialmente o risco associado a efeitos secundários nas estruturas e infraestruturas vizinhas. Por último destaca-se o facto das soluções propostas terem permitido a execução do aterro da doca e, se o Dono de Obra o vier a entender, poderão ainda vir a ser incorporadas, total ou parcialmente, nas soluções de fundação do novo Edifício da Gare de Santa Apolónia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Administração do Porto de Lisboa a autorização para a redacção e publicação do presente artigo, assim como a qualidade dos trabalhos realizados pelo ACE constituído pelas empresas SOMAGUE, SETH e OFM. Os trabalhos de geotecnia foram realizados pelas empresas HAGEN (jet grouting e microestacas) e TEIXEIRA DUARTE (estacas). Destaca-se ainda a importância da Solução Base, desenvolvida pelas empresas WW e STA, como referência fundamental para estudo da solução apresentada e implementada.

REFERÊNCIAS

- Bustamante, M. and Doix, B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés* (in french). Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n°140, p.75-92.
- Pinto, P. S. S. P.; Pinto, A.; Tomásio, R. (2009). "Rehabilitation and Reinforcement of Marina EXPO Breakwaters". Proceedings of International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories, Singapore, pp 77- 93. Editors C.F. Leung, J. Chu and R.F. Shen.
- Pinto, A.; Tomásio, R.; Ravasco, J.; Marques, G. (2011). "Fill of the Terreiro do Trigo Dockyard in Lisbon over Alluvial and Hard Soils". 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece, Part 2 – 3.1 – Shallow Foundations, pp. 787 – 792.
- WW Consultores, STA. (2008). Projecto de Execução patenteado a Concurso.
- JetSJ Geotecnia, Lda. (2009). Projecto de Execução Alternativo.