

SOLUÇÃO DE MELHORAMENTO DE SOLOS COM COLUNAS DE MÓDULO MISTO EM AMBIENTES GEOTÉCNICOS COMPLEXOS

GROUND IMPROVEMENT SOLUTIONS USING MIXED MODULE COLUMNS IN COMPLEX GEOTECHNICAL ENVIRONMENT

Cristóvão, António, *Keller, Sintra, Portugal, antonio.cristovao@keller.com**
Carvajal, Enmanuel, *Keller, Madrid, Espanha, enmanuel.carvajal@keller.com*
Matos, Paulo, *Keller, Sintra, Portugal, paulo.matos@keller.com*
**autor para correspondência*

RESUMO

Na área metropolitana de Lisboa, a disponibilidade de terrenos com área e localização adequados à construção de novos projetos logísticos é atualmente difícil de encontrar. Neste contexto, a solução reside no aproveitamento dos lotes de terreno ainda disponíveis na proximidade das margens do Rio Tejo, maioritariamente caracterizados pela presença de depósitos aluvionares de natureza argilo-lodosa. Na Plataforma Logística de Lisboa Norte (PLLN), os depósitos aluvionares alcançam profundidades da ordem dos 30 m, constituindo um importante condicionamento à construção de novas obras. O desafio consiste, assim, em adequar as condições geológicas e geotécnicas existentes à magnitude das cargas impostas pelas naves logísticas, controlando os assentamentos a curto e longo prazo, tendo igualmente em consideração as ações sísmicas locais.

No presente artigo, descrevem-se as soluções de melhoramento de solos por intermédio de inclusões semi-rígidas e drenos verticais associados a pré-carga adotadas nas zonas exteriores do empreendimento, permitindo cumprir com os exigentes requisitos de projeto. A solução de inclusões semi-rígidas recaiu em colunas de modulo misto (CMM), sendo uma técnica inovadora neste tipo de obra na zona geográfica onde se insere a obra.

ABSTRACT

In the Lisbon metropolitan area, the availability of land with an area and location suitable for the construction of new logistic projects is currently difficult to find. In this context, the solution lies in taking advantage of the plots of land still available near the banks of the Tagus River, mostly characterized by the presence of alluvial deposits of muddy clays. At the North Lisbon Logistics Platform (PLLN), alluvial deposits reach depths of around 30 m, constituting an important constraint on the construction of new projects. The challenge therefore consists in adapting the existing geological and geotechnical conditions to the magnitude of the loads imposed by the logistic warehouses, controlling the settlements in the short and long term, also taking into account the local seismic actions. This article describes the soil improvement solutions using semi-rigid inclusions and wick drains, associated with preloading, adopted in the external areas of the development, allowing to comply with the demanding design requirements. The solution of semi-rigid inclusions relied on mixed module columns (CMM), being an innovative technique in this type of work in the geographical area of the site.

1. INTRODUÇÃO

A Plataforma Logística Lisboa Norte (PLLN) localiza-se na Castanheira do Ribatejo, município de Vila Franca de Xira, Portugal. Apresenta-se na Figura 1 uma vista panorâmica do local da obra, destacando-se a sua localização a norte da cidade de Lisboa, a uma curta distância de aproximadamente 45 km.



Figura 1 - Vista panorâmica do local onde se insere a obra (fonte: "googlemaps").

A PLLN compreende uma área de implantação de 300 hectares e divide-se em diversos lotes. O presente artigo centra-se nas soluções de melhoramento de solos adotadas nas zonas exteriores do lote 19. Este lote possui uma área de 75.000 m², dos quais 45.000 m² estão destinados à construção de uma nova nave de logística.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

A região em estudo, encontra-se cartografada na Carta Geológica de Portugal, folha 30-D Alenquer, à escala 1/50.000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal. A área encontra-se na margem direita do rio Tejo, sendo dominada pelos terrenos aluvionares do Baixo Tejo, depósitos antigos de terraços fluviais e em profundidade pelos terrenos datados do Miocénico.

As aluviões podem apresentar na região em estudo uma grande expressão, com espessuras que podem atingir nas lezírias do Tejo, cerca de 60 m. Estas aluviões constituem um complexo fluvio-marinho compostos por uma sucessão de estratos de natureza diversa, no geral com grande variabilidade lateral, por vezes lenticulares, podendo encontrarem-se lodos castanhos ou cinzentos escuros, lodos mais ou menos arenosos cinzentos escuros, areias mais ou menos lodosas. Podem ainda encontrar-se materiais argiloso-siltosos por vezes com a presença de misturas de areia. Na base das aluviões é habitualmente encontrada uma areia grosseira com seixo ou mesmo cascalheiras, sendo por vezes estas dominantes.

Sob estes materiais de natureza aluvionar encontrar-se-ão os terrenos datados do Miocénico, com intercalações calcárias. Nesta formação podem encontrar-se areias de granulometria diversa, por vezes com componente argilosa, argilas, argilas arenosas, arenitos e arenitos argilosos, margas e calcários.

Superficialmente, sobre as formações aluvionares podem ocorrer alguns depósitos de aterro, que no geral são pouco espessos e compostos por materiais areno-argilosos e argilo-arenosos, acastanhados e cinzento-acastanhado.

No caso particular do lote 19, os depósitos aluvionares de natureza argilo-lodosa (solos moles) alcançam profundidades consideráveis, que variam entre os 13 m e os 31 m, colando sérios desafios à construção de qualquer estrutura nesse local. A partir dos resultados da campanha de prospeção geológica e geotécnica realizada no local, obtiveram-se, para esses materiais, valores típicos de resistência ao penetrómetro estático (q_c) de 0,20 MPa a 0,40 MPa, a que correspondem valores de N_{SPT} de 0 a 2 pancadas.

Das campanhas geotécnicas realizadas na área em estudo foi possível deduzir o perfil estratigráfico indicado no Quadro 1.

Quadro 1 - Perfil estratigráfico.

Zona Geotécnica	Designação	Cota de topo (m)	N_{SPT}	q_c (MPa)
ZG1	Aterros antrópicos. Material granular composto por pedra calcária triturada	+5,16	-	-
ZG2A	Lodo argiloso de muito fraca consistência	+1,00	0-2	$\leq 0,5$
ZG2B	Argila lodosa de fraca consistência	-12,00	2-5	0,5-1,0
ZG3A	Argila silto-arenosa de consistência média a rija	-16,00	6-20	1,0-8,0
ZG3B	Argila silto-arenosa de consistência muito rija a dura	-19,00	20-44	-
ZG4	Areia fina a média argilosa de compactidade mediamente densa a muito densa	-21,00	10-60	-
ZG5	Areia média a grosseira com cascalho de compactidade muito elevada	-25,00	> 60	-

O nível aquífero foi detetado entre as cotas +1,00m e 0,00m.

3. SOLUÇÃO DE MELHORAMENTO DE SOLOS EM ZONAS EXTERIORES

3.1. Introdução

Atendendo aos condicionamentos geológicos e geotécnicos locais, foram definidas soluções de melhoramento de solos para controlar as deformações impostas pelos aterros e sobrecargas de exploração atuantes nos cais de descarga a construir no perímetro exterior do armazém e vias de circulação de veículos ligeiros e pesados. Foram privilegiadas as soluções que comportassem assentamentos totais e diferenciais de baixa magnitude, salvaguardando os necessários requisitos de fiabilidade e de controlo de qualidade das soluções projetadas, nomeadamente, dada a necessidade de serem atingidos estratos competentes a profundidades da ordem dos 30 m.

Nas zonas dos cais de descarga e perímetro exterior do armazém, a solução recaiu na execução de colunas de módulo misto (CMM). Nas áreas de circulação e de estacionamento de veículos ligeiros e zona de circulação de veículos pesados, foi executada uma solução de consolidação de solos com drenos verticais associados a aterros de pré-carga.

4. COLUNAS DE MÓDULO MISTO

4.1. Introdução

O método das colunas de módulo misto (ou CMM) consiste numa técnica de melhoramento de solos patenteada pela Keller. Materializa-se pela associação entre uma inclusão rígida na parte inferior e uma coluna de brita com maior diâmetro, instalada na sua parte superior. A Figura 2 ilustra os elementos que constituem uma coluna de módulo misto.



Figura 2 – Coluna de módulo misto (CMM).

O recurso a soluções com CMM é aplicada na gama dos solos coesivos ou granulares, bem como em aterros. Com a utilização de um ligante apropriado, esta técnica pode ser aplicável na presença de solos agressivos ou contaminados.

Esta técnica tem como objetivo o melhoramento do comportamento do solo sob estruturas fundadas diretamente sobre ele, como resposta aos seguintes requisitos: a) aumento da capacidade de carga do solo; b) redução de assentamentos totais e diferenciais.

As CMM apresentam também vantagens no sentido de diminuir os riscos de rotura inerentes às das inclusões rígidas, a nível, ou logo abaixo, da plataforma de trabalho nos seguintes casos: a) circulação de equipamentos em obra logo em seguida ao nivelamento e compactação de plataformas; b) execução de terraplanagens.

A parte inferior da CMM pode ser constituída por betão, argamassa, calda, solocimento ou uma coluna de brita injetada. Na presente obra a inclusão rígida foi materializada por betão pronto com classe de resistência C20/25.

A execução do elemento rígido (inclusão) foi realizado por intermédio de um trado de deslocamento (*"displacement auger"*). O trado de deslocamento permite uma deslocação lateral do terreno, à medida que progride a furação, aumentando a

capacidade de carga por fuste e minimizando a quantidade de material sobran­te afluente (refluxo) à superfície.

O tramo superior da CMM, correspondente à coluna de brita, executou-se com um vibrador tipo alpha de fabrico Keller, associado a um equipamento do tipo Vibrocat com recurso ao método seco e escoamento da brita pela extremidade da ponteira (“*bottom-feed*”).

4.2. Solução executada

Foi executada uma solução de CMM com diâmetro de inclusão rígida de 0,34m até profundidades máximas da ordem dos 31m. O troço rígido da CMM foi encabeçado por uma coluna de brita com diâmetro variável, de 0,70m a 0,80m. Adoptaram-se malhas de distribuição de colunas de 2,40m x 2,40m, na zona de cais de descarga e de 2,50m x 2,50m em vias de circulação de veículos pesados e perímetro exterior da nave.

A definição das malhas de separação das CMM beneficiou da existência de um aterro compactado existente em toda a área do lote, com altura variável de 2m a 3m. Este aterro, executado antes de 2008 aquando da empreitada de infraestruturas da PLLN serviu, em parte, como camada de transferência de cargas, contribuindo igualmente para uma melhor distribuição das cargas transmitidas aos solos de fundação, atenuando a magnitude dos assentamentos.

4.3. Critérios particulares de dimensionamento

Foi estabelecida uma sobrecarga de utilização uniformemente distribuída correspondente a 20kN/m², na zona dos cais de descarga de camiões e vias de circulação de veículos pesados.

A análise aos Estados Limites de Utilização (E.L.Ut) foi realizada através do programa de cálculo PLAXIS 2D, Brinkgreve et al. (2014).

Para a modelação das aluviões, caracterizadas por argilas lodosas (solos moles), recorreu-se ao modelo de comportamento de solo “*Soft Soil Creep*” (SSC) (Vermeer, P. A., & Neher, H. P., 1999), especificamente concebido para avaliar o comportamento de materiais de elevada compressibilidade, considerando a parcela de deformação devido a fenómenos de fluência. O modelo SSC é definido pelo índice de compressibilidade modificado (λ^*), pelo índice de expansibilidade modificado (k^*) e índice de fluência modificado (u^*), os quais podem ser determinados a partir de relação com os índices de compressibilidade (C_c) e expansibilidade (C_s), obtidos através de ensaios edométricos.

É conhecido que os solos compressíveis exibem um determinado grau de fluência pelo que a compressão primária é seguida por uma determinada fração de compressão secundária (ou de fluência). Este aspeto assume particular relevância quando se analisa o comportamento de solos moles, como é o caso da presente obra. Na generalidade, tem-se constatado que carregamentos significativos impostos por aterros, em solos moles, são usualmente seguidos por elevadas deformações por fluência nos anos subsequentes. Pelo exposto, considerou-se que a modelação dos aluviões através do modelo SSC foi o adequado para obter-se uma previsão fiável dos fenómenos espectáveis para o caso em estudo.

O coeficiente de fluência (C_{∞}) é um parâmetro intrínseco do solo e a sua determinação acarreta inúmeras dificuldades, sobretudo atendendo a que o mesmo pressupõe, em regra, a necessidade de realização de ensaios edométricos de muito longa duração e por isso, não comportáveis com a generalidade dos projetos. A correta aferição do referido parâmetro pressupõe ainda a recolha de amostras indeformadas de muito boa qualidade bem como uma amostragem em quantidade, representativa do verdadeiro comportamento dos terrenos de fundação a diversas profundidades. Ainda assim, a caracterização do referido parâmetro de fluência tem sido referenciada por diversos autores. Para efeitos do estudo realizado, na ausência de resultados de ensaios laboratoriais apropriados, tomou-se a proposta de Nakase et al. (1988), a qual correlaciona o coeficiente de fluência (C_{∞}) com o teor em água natural do solo (w) de acordo com a seguinte expressão:

$$C_{\infty} = 0,000018 \cdot w \quad [1]$$

Da análise conjunta da informação disponibilizada nas diversas campanhas de prospeção realizadas na zona onde se insere a obra foram considerados os parâmetros definidores do comportamento dos materiais aluvionares em profundidade apresentados no Quadro 2, tendo por base a gama de tensões expectáveis para a fase de exploração da obra:

Quadro 2 - Propriedades das aluviões em profundidade.

Prof. (m)	Cs	Cc	e0	C_{α}	c' (kPa)	ϕ' (°)
0-5	0,071	0,456	1,717	0,0083	5	15
5-10	0,062	0,610	2,113	0,0119	5	15
10-15	0,080	0,469	1,757	0,0093	10	15
15-20	0,035	0,329	1,432	0,0091	15	15
20-25	0,046	0,277	1,418	0,0079	15	15
25-30	0,109	0,472	1,501	0,0078	20	15

Cc – Índice de compressibilidade; Cs – Índice de expansibilidade; e0 – índice de vazios; C_{α} - Coeficiente de fluência; c'(kPa) – coesão não drenada; ϕ' (°) – ângulo de atrito interno (tensões efetivas).

Para efeitos de cálculo, considerou-se que, em termos globais, o índice de fluência modificado (u^*) na camada de argilas lodosas toma o valor de 0,001.

Procedeu-se à análise do comportamento da CMM perante a imposição de uma carga correspondente ao aterro a construir e à atuação de uma sobrecarga de utilização de 20 kPa. Adotou-se o modelo axi simétrico para modelação da coluna de modulo misto no programa de calculo automático PLAXIS 2D.

Conforme apresentado na Figura 3, obteve-se um assentamento total de $s_1=3,80$ cm devido à construção do aterro.

Perante a atuação de uma sobrecarga de utilização de 20 kPa, foi obtido um assentamento total com magnitude de $s_2=3,2$ cm.

Inferiu-se igualmente o comportamento do solo a longo prazo, por forma a serem avaliados os assentamentos diferidos no tempo, expectáveis ocorrerem durante um período de vida útil de 50 anos. Os resultados obtidos apresentam-se sob forma gráfica na Figura 4.

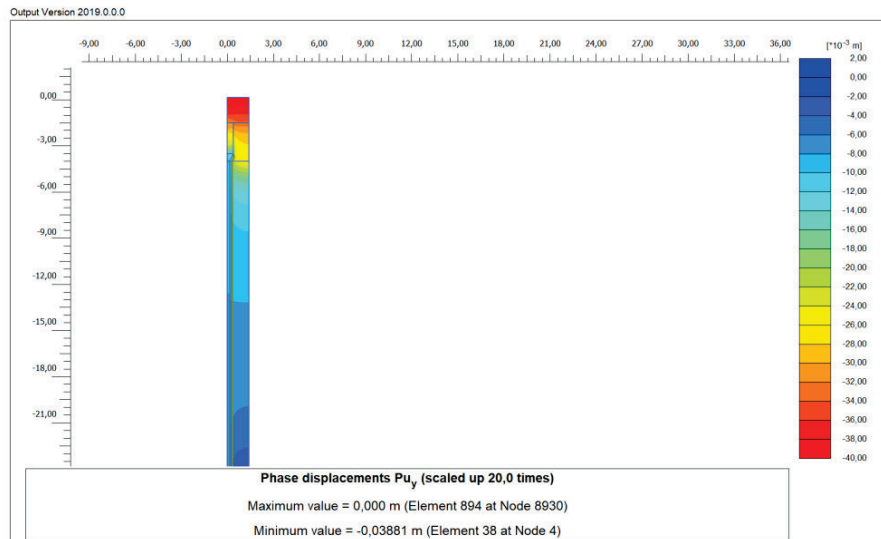


Figura 3 – Modelo de cálculo e resultado de assentamento devido à construção do aterro.

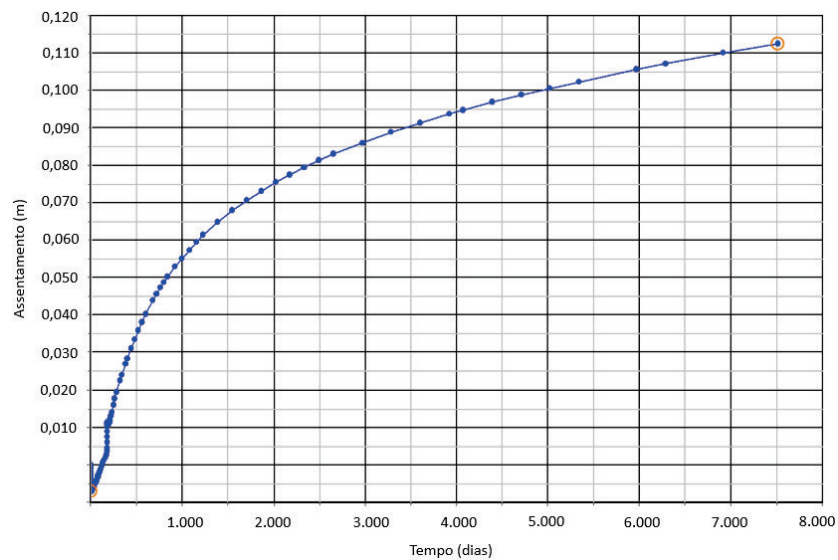


Figura 4 – Modelo de cálculo e resultado de assentamento devido à construção do aterro.

Da interpretação dos resultados, obteve-se um assentamento imediato de 0,03 m e um assentamento estimado a longo prazo, coincidente com o período de vida útil da obra, de 0,08 m.

Procedeu-se à determinação da carga axial transmitida à CMM a longo prazo, após um período de consolidação superior a 20 anos, tendo-se obtido um valor máximo de 179 kN/m. Uma vez que a malha de separação mais larga entre colunas é de 2,50 m x 2,50 m, a carga de compressão máxima transmitida à CMM assume o valor de 448 kN, a que corresponde a uma tensão na inclusão rígida de 4,90 MPa. Uma vez que a análise é realizada a longo prazo e tem em consideração os assentamentos diferidos no tempo, a referida carga de compressão transmitida à CMM já contempla a componente devida aos fenómenos de atrito negativo.

4.3.1. Ação sísmica

Tendo em consideração a estratigrafia existente e o facto de a obra se localizar numa zona de elevada sismicidade, foi avaliado efeito da ação sísmica nas CMM. Para o efeito, procedeu-se à análise o efeito da ação sísmica cinemática, provocada pela interação solo-coluna de módulo misto.

A referida análise foi realizada através da metodologia proposta por Soulomiac (1986) e Mineiro (1988), que estabelece duas alternativas de cálculo para o incremento de momentos e esforço transverso na coluna. Estes métodos são aplicáveis em situações de relação de rigidez entre solo-coluna elevadas, isto é quando a rigidez do primeiro é bastante superior à da segunda. Assim será sobretudo aplicável a elementos flexíveis, diâmetro pequenos e comprimentos elevados. Dentro das condições referidas pode assumir-se que a coluna segue o movimento de campo livre do terreno.

De acordo com a metodologia adoptada, obtiveram-se os esforços máximos no topo das estacas correspondentes a um momento fletor de 5,6 kN.m e a um esforço transverso de 0,80 kN.

A verificação da resistência da inclusão rígida aos estados limites últimos (resistência à compressão simples, esforço transverso e flexão composta), foi realizada de acordo com as recomendações ASIRI.

O documento de referência distingue, para efeitos de dimensionamento, dois domínios de aplicação, a saber: a) “Domínio 1” - casos onde as inclusões rígidas são necessárias para garantia de estabilidade das construções; b) “Domínio 2” - casos onde as inclusões rígidas não são necessárias para garantia de estabilidade das construções, sendo a sua principal função a de redução dos assentamentos.

Atendendo a que as CMM serão executadas sob os aterros exteriores, considerou-se que se enquadram no “Domínio 2”.

5. EXECUÇÃO DA OBRA

Na presente obra, foram executadas um total de 2.200 colunas de modulo misto, com comprimentos variáveis de 17m a 31m, totalizando cerca de 42.000ml. O rendimento de trabalho obtido nesta obra superou, em média, os 700ml/equipamento/turno.

Para a instalação das inclusões rígidas foi utilizado um equipamento ENTECO E9080 SP 300, com capacidade de torque de 320 kN.m e adequado para instalação de inclusões rígidas até 35m de profundidade. O betão foi colocado com o auxílio de uma bomba MECBO P6.80.

O troço superior da CMM foi executado com equipamento de colunas de brita tipo Vibrocat 05, de fabrico Keller. Os equipamentos utilizados na obra são apresentados na Figura 5.



Figura 5 – Equipamentos utilizados na execução das CMM.

6. CONTROLO DE QUALIDADE

Como controlo sistemático da execução, foram monitorizados e controlados os parâmetros de execução, através do registo informático contínuo existente nos equipamentos.

O equipamento utilizado na execução das inclusões rígidas realizou o controle, em tempo real, dos seguintes parâmetros de furação: torque, velocidade e profundidade de furação. Em complemento, foram registrados os parâmetros de betonagem: velocidade, volume, vazão e pressão. A análise dos parâmetros de execução por sistema computadorizado permitiu visualizar o perfil da inclusão rígida executada.

O equipamento de vibro-substituição também possui um sistema informatizado de registo e aquisição de dados, que regista para cada coluna individualmente, o tempo de execução, a profundidade da coluna e a intensidade da corrente consumida durante a execução da coluna.

A compactação da brita é controlada pela intensidade da corrente elétrica, medida por um amperímetro, necessária para produzir o deslocamento lateral do vibrador. Desta forma, tão logo seja atingido o aumento esperado desta intensidade durante a compactação, o vibrador é elevado e inicia-se outra etapa de compactação. O controle do diâmetro médio de cada coluna de brita é conferido pela quantidade de brita consumida em cada coluna.

Na execução das inclusões rígidas foi utilizado betão NP EN206-1; C20/25; X0(P); Cl0,1; Dmax12; S4. Foram recolhidas amostras para a realização de ensaios de compressão simples, nas quantidades definidas na Norma NP EN206-1, verificando-se a resistência necessária das amostras aos 7, 14 e 28 dias.

Complementarmente, escavou-se uma coluna de módulo misto para observação direta do resultado final. A Figura 6 ilustra o aspecto de uma CMM exposta durante a obra, podendo-se observar claramente o troço em betão, correspondente à inclusão rígida com diâmetro de 340 mm, a zona de transição e o troço superior da coluna de brita com diâmetro médio de 0,70-0,80 m.

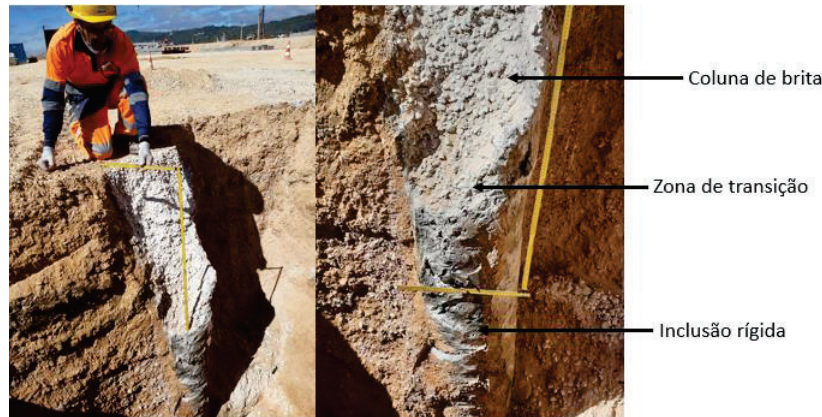


Figura 6 – Aspecto de uma CMM exposta.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na obra descrita conjugam-se vários fatores que determinaram a solução adotada, tais como: (i) a magnitude de esforços transmitidos pela construção de aterros definitivos e sobrecargas de exploração; (ii) a presença de solos aluvionares de elevada compressibilidade, até profundidades de aproximadamente 30m; (iv) ação sísmica, acautelando os efeitos cinemáticos transmitidos aos elementos de fundação.

Nestas condições, concebeu-se uma solução capaz de compatibilizar os assentamentos do armazém, fundado em estacas pré-fabricadas, e as zonas exteriores. Foi proposta e executada uma solução de melhoramento de solos através de colunas de módulo misto, até profundidades de aproximadamente 31 m, permitindo mitigar a magnitude dos assentamentos, sem a necessidade de aplicação de aterros de pré-carga e inerentes tempos de consolidação relevantes, o que poderia comprometer os prazos previstos para a conclusão da obra.

A solução cumpriu com os requisitos técnicos, económicos e construtivos, respeitando os padrões de qualidade requeridos. Destaca-se o elevado rendimento de execução das CMM, aspeto especialmente relevante em obras de grande porte e com prazos de execução muito apertados, como o empreendimento logístico da obra em apreço.

REFERÊNCIAS

- ASIRI. "Rapport d'avancement de Chelles", 2.07.1.03, 2007.
- Brinkgreve, R.B.J. (2014). "Materials Model Manual - Plaxis 2D". A.A. Balkema Publishers, Netherlands, 2014.
- Mineiro, A.J.C. (1988). "Método simplificado para avaliação de esforços sísmicos em estacas". *Boletim geotécnico no. 4 da SAG, FCT-UNL*.
- Nakaze, et al. (1988). "Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index", JGED, ASCE, vol. 114, GT 7, pp. 844-858.
- Soulomiac, R. (1986). "Méthode simplifiée de calcul des pieux en zones sismiques". *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, no. 441*.
- Vermeer, P.A. & Neher, H.P. (1999). "A soft soil model that accounts for creep". *Proceedings of the Plaxis Symposium on Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Amsterdam, the Netherlands, pp. 249-262.