

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/356

# Tratamento de solos moles com recurso a aterros de pré-carga no lote 14 da Plataforma Logística Lisboa Norte

## Ground improvement solutions implemented at plot 14 of the Northern Lisbon Logistic Platform

Miriam Lopes

Engenheira Civil, JETSj Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, mlopes@jetsj.com

Alexandre Pinto

Engenheiro Civil, JETSj Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.com

**RESUMO:** O presente artigo aborda as soluções de melhoramento de solos adotadas nos terrenos de fundação do futuro armazém industrial, a construir no lote 14 da Plataforma Logística Lisboa Norte, em Castanheira do Ribatejo, Vila Franca de Xira, Portugal, compreendendo uma área de aproximadamente 47 975 m<sup>2</sup>. Efetua-se uma descrição dos condicionamentos existentes, particularmente de índole geológica-geotécnica, destacando-se a presença de solos moles aluvionares de natureza argilo-lodosa, de espessuras significativas (aproximadamente 20 m), com fracas características de resistência e de rigidez, bem como reduzida capacidade de suporte perante a imposição de incrementos de cargas verticais. A solução adotada consiste na execução de aterros de pré-carga associados a (i) colunas de brita, executadas na área prevista para a implantação da nave industrial, e (ii) geodrenos verticais, nos pavimentos exteriores, nos locais previstos para estacionamento e circulação automóvel. No presente artigo descrevem-se os critérios e métodos de dimensionamento dos aterros de pré-carga para a aceleração do processo de adensamento primário na fase de construção, visando a obtenção de recalques totais e diferenciais compatíveis com o adequado desempenho em serviço do futuro armazém industrial, durante a vida útil da obra. Apresenta-se ainda o Plano de Monitoramento geotécnico e respetivos resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solos moles, Aterros de pré-carga, Colunas de brita, Geodrenos verticais, Adensamento primário.

**ABSTRACT:** The present work addresses the ground improvement solutions adopted for the soft soils as foundation of the future industrial warehouse, to be built at the plot 14 of the Northern Lisbon Logistic Platform, at Castanheira do Ribatejo, Vila Franca de Xira, Portugal, comprising an area of 49 813 m<sup>2</sup>. A description of the existing conditions is made, particularly of the geological-geotechnical scenario, highlighting the existence of an alluvial layer, with clayed soft soils, with low characteristics of strength and stiffness as well as very low average permeability. The solution adopted consists in the execution of preload embankments associated with (i) stone columns, executed at the area of the warehouse indoor pavements, and (ii) vertical prefabricated geodrains, at the area of the outdoor pavements, in the places designed for car parking and circulation of light and heavy vehicles. This article describes the criteria and methods used at the design of the preload fills, seeking to reduce the hydrodynamic consolidation schedule. The Monitoring and Survey Plan and respective results are also presented.

**KEYWORDS:** Soft soils, Preloading embankments, Stone columns, Prefabricated vertical drains, Hydrodynamic consolidation.

## 1 INTRODUÇÃO

A Plataforma Logística Lisboa Norte (PLLN) localiza-se em Castanheira do Ribatejo, Vila Franca de Xira, Portugal, numa área de aproximadamente 100 hectares. Esta plataforma foi construída visando

materializar um ponto de interligação dos fluxos logísticos internacionais, nacionais e regionais com a região de Lisboa e Vale do Tejo.

No lote 14 da referida plataforma, prevê-se a construção de uma nova nave industrial, com uma área de aproximadamente 32 968 m<sup>2</sup>. Na vista aérea presente na figura 1, é possível identificar a área alvo de intervenção, bem como os limites da PLLN.

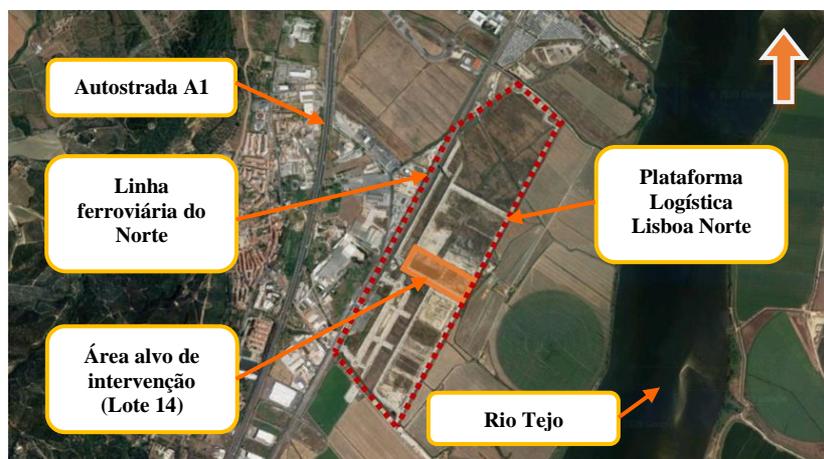


Figura 1. Vista aérea do local de intervenção (imagens retiradas do Google Earth).

## 2 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS

O local em estudo insere-se, do ponto de vista geológico, em formações aluvionares, de idade Holocênica, conforme se encontra representado na Folha 30-D - Alenquer da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, cujo extrato constitui a figura 2.

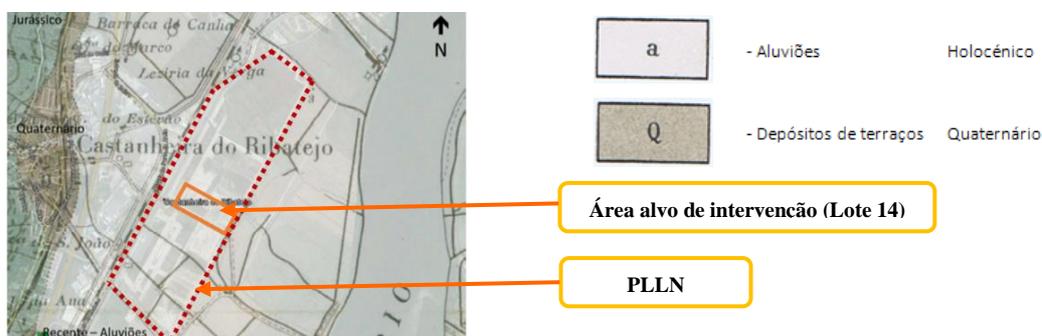


Figura 2. Enquadramento do local em estudo na Folha 30-D – Alenquer da Carta Geológica de Portugal (escala original 1:50 000).

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, por terrenos datados do Miocénico.

De acordo com a informação obtida no decorrer dos trabalhos de prospecção geológica e geotécnica efetuados na área, confirma-se que o cenário geológico-geotécnico local é caracterizado, superficialmente, por uma camada de aterros, desenvolvendo-se desde a superfície do terreno até uma profundidade variável entre 1,1m e 3,4m. Trata-se, de acordo com a amostragem disponível, de uma camada heterogénea constituída por siltes, de cor castanho-alaranjada, com cascalho de natureza calcária.

Imediatamente abaixo da camada de aterros, encontram-se depósitos aluvionares, constituídos, essencialmente, por lodos e argilas lodosas, de alta plasticidade, cinzentos-escuros, de consistência mole, com alto teor de matéria orgânica e fragmentos de conchas.

Subjacentes aos depósitos lodosos, identificam-se as formações coluvionares, compostas por argilas arenosas de consistência média e cor castanha, por vezes com veios acinzentados, com cascalho heterométrico arredondado de natureza essencialmente quartzítica.

A posição do nível freático é dependente do nível de água no Rio Tejo, sendo influenciado, não só por variações sazonais, como também pelos ciclos de maré diários sentidos no estuário.

No decorrer dos trabalhos de prospecção, detectou-se a presença do nível freático a uma profundidade variável entre os 1,3m e 3,4m, ocorrendo, de um modo geral, ao nível da interface do terreno natural e dos aterros sobrejacentes.

### 3 SOLUÇÕES DE MELHORAMENTO DE SOLOS PROPOSTAS

Atendendo à presença, nos terrenos de fundação, de solos moles de natureza argilo-lodosa, com fracas características de resistência e de rigidez, bem como reduzida capacidade de suporte perante a imposição de incrementos de cargas verticais, e tendo por base o prazo alargado disponível para a execução da obra, preconizou-se a realização de um tratamento dos terrenos de fundação, ambicionando o acréscimo das características geomecânicas do maciço, proporcionando, assim, condições favoráveis à implementação de soluções de fundação compatíveis com a obtenção de recalques totais e diferenciais reduzidos. Neste âmbito, adotou-se uma solução de tratamento por adensamento forçado com recurso a aterros de pré-carga.

De modo a acelerar o processo de adensamento hidrodinâmico/primário dos materiais compressíveis (solos moles), considerou-se a introdução de elementos drenantes, nomeadamente, colunas de brita e drenos verticais pré-fabricados (PVD). Esta redução do tempo de adensamento é conseguida através da substancial otimização do trajeto de drenagem da água presente nos interstícios do esqueleto sólido do solo, deixando de ser vertical e mobilizando toda a espessura da camada compressível para passar a ser horizontal e mobilizando apenas o afastamento entre drenos/colunas de brita.

#### 3.1 Situação de referência

O lote 14 foi, anteriormente, objeto de um tratamento de fundação com recurso a vibrosubstituição, por meio de instalação de colunas de brita, associadas a aterros de pré-carga, cujas características se apresentam sucintamente na tabela 1.

Tabela 1. Resumo das características dos tratamentos por vibrosubstituição.

Zona	Altura de aterro (m)	Diâmetro médio (m)	Malha geral (m <sup>2</sup> )	Malha perimetral (m <sup>2</sup> )	Comprimento (m)
NW	≈5,55	0,95	3,0 x 3,0	3,15 x 3,15	15 a 19,5
SE	≈3,30	0,95	3,0 x 3,0	3,15 x 3,15	17 a 23

A execução dos referidos aterros de pré-carga iniciou-se em abril de 2010 e janeiro de 2011 na zona noroeste (NW) e sudeste (SE) do lote 14, respetivamente. Na tabela 2 apresenta-se a síntese dos principais resultados do monitoramento geotécnico efetuado no âmbito dos tratamentos por vibrosubstituição desenvolvidos no lote 14.

Tabela 2. Síntese dos resultados do monitoramento dos tratamentos por vibrosubstituição.

Zona	Tempo de construção da pré-carga	Tempo de adensamento primário	Recalque imediato e de adensamento primário (cm)
NW	98 dias ≈3,3 meses	288 dias ≈9,6 meses	50 a 110
SE	50 dias ≈1,7 meses	261 dias ≈8,7 meses	35 a 67

#### 3.2 Pavimentos interiores

Dado que os terrenos onde se prevê implantar a estrutura da nave foram previamente objeto de um tratamento de fundação com recurso a vibro substituição, por meio de instalação de colunas de brita, associadas

a aterros de pré-carga, que, no entanto, se afigurava insuficiente, atendendo ao incremento da magnitude da sobrecarga de utilização prevista, propôs-se a execução de novos aterros com 8,00 m de altura (superior à altura de aterro de 3,30 e 5,50 m considerados nas pré-cargas anteriores), compatíveis com uma nova sobrecarga de utilização de 50 kN/m<sup>2</sup>, considerando taludes com inclinações H=1,5; V=1.

Nesta solução, conforme referido anteriormente, as colunas de brita atuam como elementos verticais de aceleração do processo de drenagem e de adensamento primário. Adicionalmente, dado que a solução de vibrosubstituição consiste na introdução, sem extração do solo existente, de um material (brita) com melhores características de resistência e de rigidez, reconhece-se um efeito de melhoramento das características do solo de fundação, às quais se associa também o efeito de compactação radial do solo mole em torno da coluna de brita motivado pelos efeitos de instalação (Priebe, 1998).

### 3.3 Pavimentos exteriores

Nos locais previstos para estacionamento automóvel e para a circulação de veículos ligeiros e pesados, preconizou-se a instalação de drenos verticais pré-fabricados.

Os drenos verticais são constituídos por bandas drenantes pré-fabricadas, instaladas no terreno por um processo de cravação (figura 3). Correspondem assim a elementos do tipo linear, instalados segundo a direção vertical e com uma seção da ordem de 100 mm por 3 mm. Em geral apresentam um núcleo central flexível que é revestido por um filtro de elevada permeabilidade. A estrutura deste núcleo central permite que as águas que acedam, em trajetória horizontal, aos drenos verticais (na sequência do processo de adensamento dos solos moles) possam ser conduzidas à superfície e depois encaminhadas para o exterior da obra.

Os drenos foram instalados segundo uma malha triangular regular com 1,20 m de lado, até uma profundidade média estimada de 20,00 m, em relação à cota da plataforma de trabalho.

Os aterros de pré-carga nesta zona, foram executados com 4m de altura, compatíveis com uma sobrecarga de 20 kN/m<sup>2</sup>, considerando taludes com inclinações H=1,5; V=1,0, possibilitando a sua estabilidade durante a fase construtiva.

Atendendo à presença de uma camada superficial de aterro, a execução dos drenos verticais careceu da realização prévia de pré-furos (figura 4).



Figura 3. Execução de drenos verticais pré-fabricados (torre de cravação).



Figura 4. Execução de drenos verticais pré-fabricados (pré-furos).

Após a instalação dos geodrenos, e previamente à execução dos aterros de pré-carga, procedeu-se à limpeza e saneamento da plataforma de trabalho, seguida da aplicação de um geocompósito drenante responsável por encaminhar a água afluyente aos geodrenos verticais, aos coletores que, por sua vez, se encontram conectados à rede drenagem de águas pluviais existente no local (figura 5).



Figura 5. Aplicação do geocompósito drenante na base do aterro de pré-carga.

Na figura 6, apresenta-se uma seção tipo da solução de tratamento por adensamento primário forçado (acelerado).

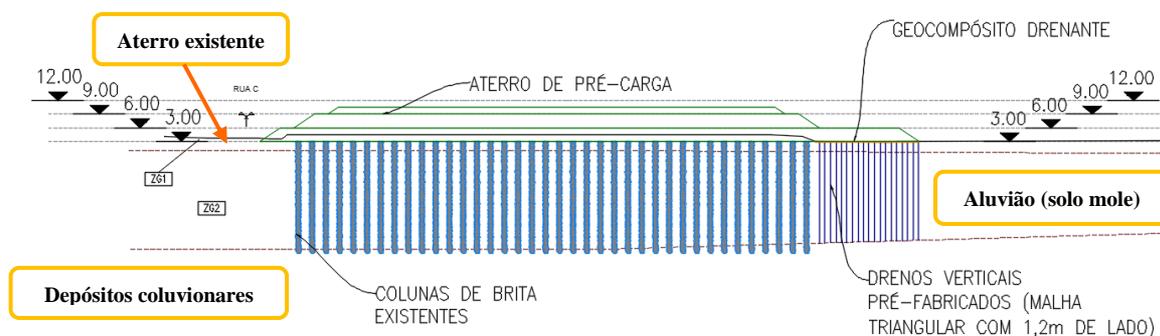


Figura 6. Seção tipo da solução de tratamento por adensamento acelerado (sem escala).

Na figura 7, apresenta-se uma fotografia aérea dos aterros de pré-carga construídos.



Figura 7. Fotografia aérea dos aterros de pré-carga.

## 4 DIMENSIONAMENTO

### 4.1 Recalques

O recalque total do solo compressível por incremento de tensão vertical pode ser estimado através da soma das parcelas correspondentes i) ao recalque imediato, produzido durante a construção em condições não drenadas, portanto sem variação de volume; ii) ao recalque primário, decorrente da expulsão da água devido à dissipação do excesso de pressões intersticiais, aquando do desenvolvimento do processo de adensamento primário; iii) e ao recalque secundário, correspondente à prossecução da deformação do solo após conclusão do adensamento primário, correspondente ao adensamento secundário ou por fluência.

Para o problema em estudo, contabilizaram-se os recalques imediatos e por consolidação primária.

O valor do recalque imediato ( $s_0$ ) foi estimado, adotando, simplificada, para o solo de fundação, um comportamento elástico linear isotrópico a volume constante (coeficiente de poisson,  $\nu$ , igual a 0,5) e escolhendo criteriosamente o módulo de deformabilidade em condições não drenadas,  $E_u$ . Para este efeito recorre-se à expressão ilustrada na equação 1.

$$s_0 = \frac{\sigma B}{E_u} (1 - \nu^2) I \quad (1)$$

Em que,  $\sigma$  corresponde ao incremento de tensão vertical aplicado;  $B$  é a largura da área carregada;  $E_u$  é o módulo de deformabilidade em condições não drenadas; e  $I$  é o coeficiente de recalque.

A metodologia de cálculo dos recalques por adensamento primário, ou hidrodinâmico, contemplou a aplicação da teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi, associada a uma distribuição bidimensional das cargas transmitidas ao terreno.

Para este efeito, o recalque por adensamento primário foi estimado com base nos parâmetros obtidos nos ensaios edométricos, através da equação 2, discretizando o estrato compressível em camadas, e estimando o recalque total tendo em conta a variação das tensões efetivas ( $\sigma'_{v0}$ ) em profundidade.

$$s_{c,i} = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot h \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

Em que,  $s_{c,i}$  é o assentamento em cada uma das camadas;  $h$  a espessura da referida camada;  $C_c$  é o índice de compressibilidade;  $e_0$  é o índice de vazios do solo antes do início do processo de adensamento primário;  $\sigma'_{v0}$  é a tensão efetiva inicial; e  $\sigma'_{vf}$  é a tensão efetiva estimada no final do adensamento primário.

Os incrementos de tensão para o cálculo supracitado e, como tal, para a definição da altura dos aterros de pré-carga, foram determinados, considerando o peso próprio dos aterros (provisórios e definitivos), o peso próprio da laje do pavimento e as distintas sobrecargas de utilização. Destaca-se que nesta estimativa foram considerados os efeitos de segunda ordem, associados aos espetáveis recalques dos aterros.

A estimativa da duração do processo de adensamento primário, passou pelo cálculo da estimativa dos tempos de adensamento vertical e horizontal e posteriormente pelo valor total resultante destes dois mecanismos.

Tendo conhecimento da magnitude do recalque total associado a uma determinada altura de aterro, assim como da lei que rege a sua evolução ao longo do tempo, foi possível estimar as curvas de evolução dos recalques com o tempo, apresentadas na figura 8.

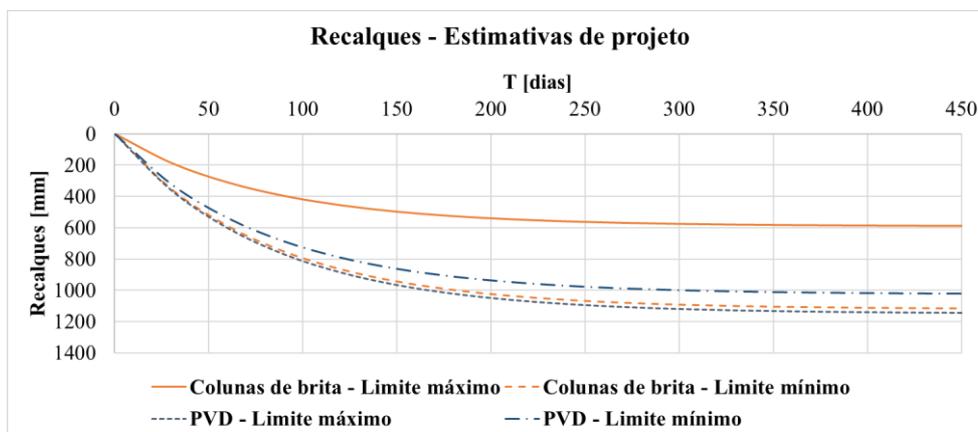


Figura 8. Recalques por adensamento primário estimados em projeto.

## 4.2 Estabilidade dos taludes dos aterros de pré-carga

No âmbito da verificação de estabilidade global dos taludes dos aterros de pré-carga e da capacidade de carga da fundação, contemplando a quantificação dos fatores de segurança, foi utilizado um programa de

cálculo automático vocacionado para o efeito: SLIDE (V6.0) que permite efetuar análises em regime de equilíbrio limite. Este *software* permitiu realizar uma análise de estabilidade, recorrendo a superfícies de rotura circulares, com base no Método de Bishop-Simplificado. Realizaram-se ainda, em paralelo, análises de elementos finitos bidimensionais recorrendo ao *software* PLAXIS 2D, particularmente vocacionado para o efeito. Na figura 9 e 10, apresentam-se dois dos modelos desenvolvidos.

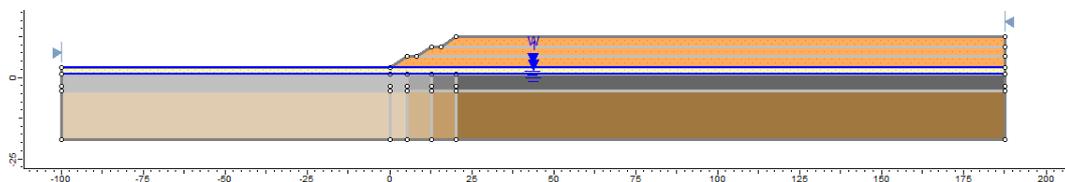


Figura 9. Modelo de verificação de estabilidade por meio de análise limite.

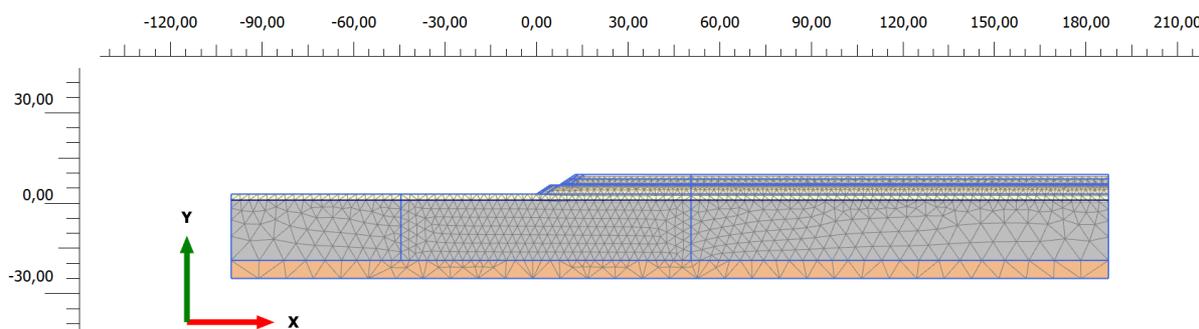


Figura 10. Modelo de verificação de estabilidade por meio de análise de elementos finitos.

## 5 PLANO DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

Visando garantir a realização, em condições de segurança e de economia, dos trabalhos de tratamento dos terrenos de fundação e de terraplenagem, em particular no que concerne à estabilidade dos aterros/fundação e à evolução dos recalques/grau de adensamento, implementou-se um Plano de Monitoramento geotécnico. Neste âmbito considerou-se fundamental o monitoramento das seguintes grandezas:

- Nível de água instalado no terreno, através da instalação de 72 sensores piezométricos de corda vibrante, dispostos, no total de 18 pontos, em 4 profundidade distintas;
- Movimentos horizontais do terreno na zona dos aterros de pré-carga, medidos através de 6 calhas inclinométricas, dispostas na periferia dos aterros;
- Recalques superficiais do terreno natural e dos aterros/plataformas, através da medição de marcas topográficas apoiadas em 52 placas de recalque instaladas na base dos aterros de pré-carga.

Nas figuras 11 e 12, apresentam-se, respetivamente, os deslocamentos verticais medidos nas placas de recalque, registados até 9 de março de 2023, na área onde foram executadas as colunas de brita e os drenos verticais pré-fabricados.

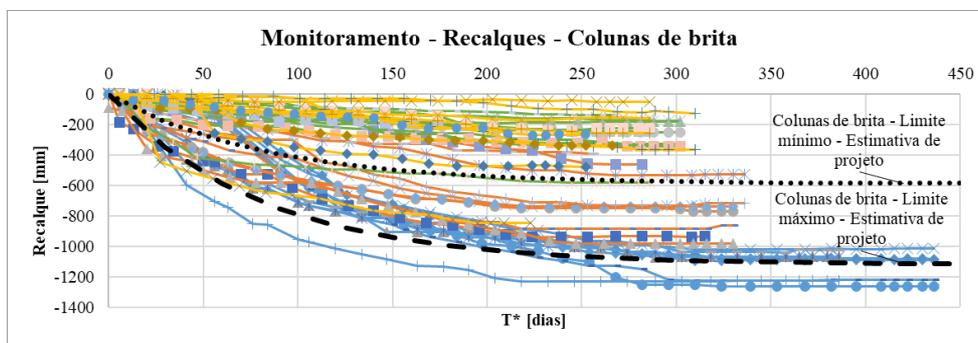


Figura 11. Deslocamentos verticais medidos nas placas de recalque – Solução de colunas de brita.

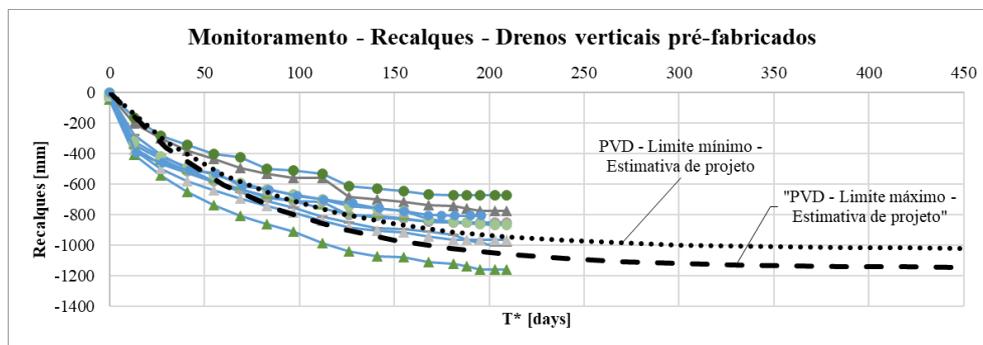


Figura 12. Deslocamentos verticais medidos nas placas de recalque – Solução de drenos pré-fabricados.

No que às medições dos níveis de água e dos deslocamentos horizontais diz respeito, importa referir que a instalação tardia dos piezômetros e das calhas inclinométricas não permitiu obter o registo completo destas grandezas desde o início da construção dos aterros de pré-carga. Não obstante, a evolução registada, encontra-se de acordo com a previsão de projeto, nomeadamente no que se refere à redução, com o tempo, das pressões intersticiais tendendo para valores que se aproximam da distribuição hidrostática. No que se refere ao registo de deslocamentos horizontais, verificou-se a mobilização de deslocamentos de magnitude superior nas profundidades correspondentes à existência do estrato argiloso mole, com uma taxa de evolução mais elevada, durante o período de construção, mas que estabilizou após término da construção dos aterros, durante o período em que decorre o processo de adensamento hidrodinâmico.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O enquadramento da obra descrita, incluindo o prazo disponível para execução dos trabalhos, determinou a necessidade de desenvolver soluções de tratamento de solos visando proporcionar condições favoráveis à implementação de soluções de fundação económicas, mas compatíveis com o adequado comportamento da estrutura em serviço.

Neste âmbito, destaca-se o facto de as soluções adotadas permitirem mitigar, durante o período de vida útil da futura estrutura industrial, os recalques de magnitude elevada, decorrentes do processo de adensamento primário, desenvolvido ao nível camadas aluvionares argilosas moles.

Salienta-se a importância do Plano de Monitoramento geotécnico na gestão do comportamento da obra, permitindo a interpretação dos recalques observados e o estabelecimento, com maior rigor, dos tempos necessários à obtenção do grau de adensamento especificado. Sendo, como tal, uma ferramenta indispensável numa obra geotécnica, com as características da presente.

Refere-se que a magnitude dos recalques estimada em projeto, na generalidade, aparenta estar em linha com os valores efetivamente medidos em obra. Exceção a esta afirmação, são os valores registados na zona NW da parcela, onde se encontram instaladas as colunas de britas, e onde se observam assentamentos de magnitude consideravelmente inferior aos valores registados e estimados para a zona SE. Atribui-se esta diferença ao efeito da presença prolongada dos aterros de pré-carga previamente construídos, assim como ao efeito de reforço do terreno conferido pelas colunas de brita.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dono de Obra a autorização para a redação e apresentação do presente artigo. Destaca-se ainda o facto de os trabalhos de terraplenagem terem sido realizados pela empresa “Iranzo Excavaciones” e os trabalhos relativos à execução dos geodrenos pela empresa “Terratest”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Priebe, et al. (1995) The design of vibro replacement. *Ground Engineering*, GT07-13 E, p.31-37.