

INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM ATERROS E PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS – IMPORTÂNCIA, NECESSIDADE E APLICAÇÕES

GEOTECHNICAL INSTRUMENTATION IN RAILROAD LANDFILLS – IMPORTANCE, NEED AND APPLICATIONS

Gil, Sara, *Mota-Engil Engenharia S.A., Lisboa, Portugal, sara.gil@mota-engil.pt*
Páscoa, João, *Viaponte-Projectos Consultoria Engenharia S.A., Lisboa, Portugal, jpascoa@viaponte.pt*
Pereira, A.Miguel, *Mota-Engil Engenharia S.A., Lisboa, Portugal, miguel.pereira@mota-engil.pt*
Vila, Miguel, *Viaponte-Projectos Consultoria Engenharia S.A., Lisboa, Portugal, mvila@viaponte.pt*

RESUMO

No âmbito da empreitada de Modernização da Linha do Norte, troço entre a Azambuja e Vale de Santarém, foi preconizado um vasto plano de Instrumentação Geotécnica visando o controlo da consolidação e da resistência associada aos solos de fundação dos aterros ferroviários em construção.

Dado os solos de fundação ocorrentes, designadamente lodos com possanças variáveis entre os 5,0 e os 20,0m, e a importância da segurança que uma obra desta envergadura encerra, tanto em fase de construção como de exploração, pretende esta comunicação aflorar os aspectos relacionados com: metodologias de instalação dos dispositivos de medição; análise dos dados obtidos e correlação entre os modelos expectáveis e os registados.

ABSTRACT

In the scope of the “Modernização da Linha do Norte, Subtroços 1.2/1.3 – Azambuja/Vale de Santarém” contract, was praised a vast geotechnical instrumentation plan, aiming the monitoring of the foundation soils consolidation and resistance.

Due to the presence of silty soils, that may vary between 5 and 20m of thickness, and the importance of the workmanship security that a project of this magnitude locks up as in the construction phase as in the exploration phase, intends this communication arise the related aspects with: Installation methodology of the measurement devices; obtained data analysis and correlation between the theoretical models and the really obtained data.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da empreitada de construção dos 1.311m de extensão que constituem o Viaduto de Santana do Cartaxo, inseridos no projecto de Modernização da Linha do Norte Sub-troços 1.2/1.3 entre a Azambuja e o Vale de Santarém, foi preconizada uma solução em aterro (denominados aterros de aproximação) para apoio dos encontros desta estrutura.

Tendo em conta que esta obra de arte se insere num contexto geológico-geotécnico muito desfavorável, contando com a presença de formações lodosas muito moles, com $N(SPT)=0$ pancadas, que em alguns casos atingem espessuras na ordem dos 20m, foi necessário acompanhar de forma muito rigorosa e metódica todas as deformações associadas às fracas

características geomecânicas dos solos. Este acompanhamento foi efectuado em fase de construção e irá prolongar-se durante a exploração.

Assim, foi definido um vasto plano de instrumentação geotécnica, com o objectivo de monitorizar todas as estruturas em betão armado (viaduto e respectivas fundações indirectas), bem como as estruturas em terra (aterros de aproximação). Nesta comunicação será abordada a instrumentação instalada para acompanhamento dos aterros.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O traçado da via insere-se na periferia Noroeste da Bacia Terciária do Tejo-Sado, que constitui uma extensa unidade morfostrutural, próxima do contacto com a orla Mesocenozóica.

Localmente o traçado entre a Azambuja e o Vale de Santarém desenvolve-se ao longo do limite entre a extensa baixa aluvionar associada ao rio Tejo, na sua margem direita, e os terrenos Mio-Pliocénicos que limitam as aluviões.

A evolução geomorfológica da bacia do Tejo, originou o desenvolvimento de vales fósseis, na dependência de linhas de água subsidiárias do Tejo, originando a deposição de espessuras de aluvião que frequentemente ultrapassam os 30m, passando lateralmente a espessuras da ordem dos 5m.

Estratigraficamente o local é interessado pelas seguintes formações:

- Holocénico – Recente (aterros recentes, horizontes de terra vegetal)
 - Aluviões do Tejo (argilas lodosas cinzentas escuras, lodos por vezes com intercalações de areias finas, areias finas a médias silto-lodosas, areias finas a médias por vezes grosseiras com seixos rolados dispersos);
- Pliocénico – *Grés e argilas da Cruz do Campo* (P) – areias finas a médias siltosas e/ou areias médias a grosseiras siltosas, por vezes argilosas, com seixos e calhaus dispersos, argilas siltosas e siltes argilosos;
- Miocénico – *Complexo de Aveiras de Baixo e calcários de Vale do Paraíso* (M) – Margas calcárias, calcários margosos, argilas margosas com intercalações calco-gresosas, areias médias a grosseiras e calcários pulverulentos esbranquiçados;

Da litostratigrafia acima apresentada foram intersectados pelas sondagens, e fazem parte da fundação dos aterros ferroviários, os depósitos aluvionares associados ao rio Tejo e às linhas de água afluentes, que apresentam espessuras variáveis entre 1.3 e 27.5m, dependendo da proximidade ao limite da baixa aluvionar com o Mio-Pliocénico.

As aluviões são constituídas, essencialmente, por argilas lodosas, por vezes com lenticulas arenosas intercaladas, por areias siltosas e argilosas, frequentemente, lodosas, com seixos e calhaus, e, mais raramente, por argilas arenosas. Os resultados dos ensaios SPT efectuados nesta formação permitiram classificá-la como muito mole a mole, N(SPT) entre 0 e 3. Superficialmente ocorre um horizonte dissecado com consistência mole a dura, N(SPT) entre 3 e 9.

Dado que o objectivo deste artigo se prende, essencialmente, com a monitorização dos aterros que servirão de apoio aos encontros do viaduto e de fundação da futura plataforma ferroviária, apresenta-se a seguir uma tabela (Quadro 1) com as suas principais características:

Quadro 1 – Resumo das características dos aterros de aproximação.

| Localização | Extensão (m) | Altura ao eixo (m) | Formações geológicas interessadas |
|---------------------------------------|--------------|--------------------|---|
| Km 58+075-58+286 (E1 – Lado Azambuja) | 211 | 7,9 | Aluviões (espessura entre 1,0 a 8,0m) Miocénico |
| Km59+597-59+700 (E2- Lado Santarém) | 103 | 7,0 | Aluviões (espessura da ordem dos 11,0m) Miocénico |

3. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DA FUNDAÇÃO

Os cálculos efectuados pela empresa responsável pelo projecto desta empreitada (Viaponte), permitiram prever para os solos ocorrentes, assentamentos totais da ordem dos 0,9 a 1,0m e assentamentos residuais em fase de exploração da ordem dos 0,2 a 0,3m respectivamente, para a zona do aterro de aproximação ao encontro E1 (Lado Azambuja) e ao E2 (Lado Santarém). Estes valores foram considerados inaceitáveis para o bom comportamento da zona de transição aterro de aproximação/encontro do viaduto, dado que existia limitação de tempo para a construção do viaduto (≈ 15 meses) e consequentemente do período disponível para a consolidação do aluvião na base dos aterros de aproximação.

Face à adversidade destas condições foi preconizada uma solução de melhoramento dos solos de fundação por processos de vibrosubstituição com recurso a colunas de brita numa malha triangular com 2m de lado, por via seca, que permitiu acelerar a consolidação das formações compressíveis, bem como melhorar as características resistentes das fundações dos aterros. Aquele tipo de solução de consolidação/reforço da fundação dos aterros foi a que se revelou mais vantajosa em termos de tempo de execução, condicionantes geométricas (aterros a construir nas proximidades dos aterros da via existente com comboios em circulação) e também como o mais ajustado ao tipo de solos interessadas, na medida em que promove a redução dos assentamentos totais, devido à substituição parcial dos solos compressíveis, acelera a consolidação e aumenta a resistência ao corte da fundação dos aterros.

Na sequência da solução de melhoramento de solos referida, o comportamento dos aterros foi objecto de nova análise, de acordo com as figuras seguintes.

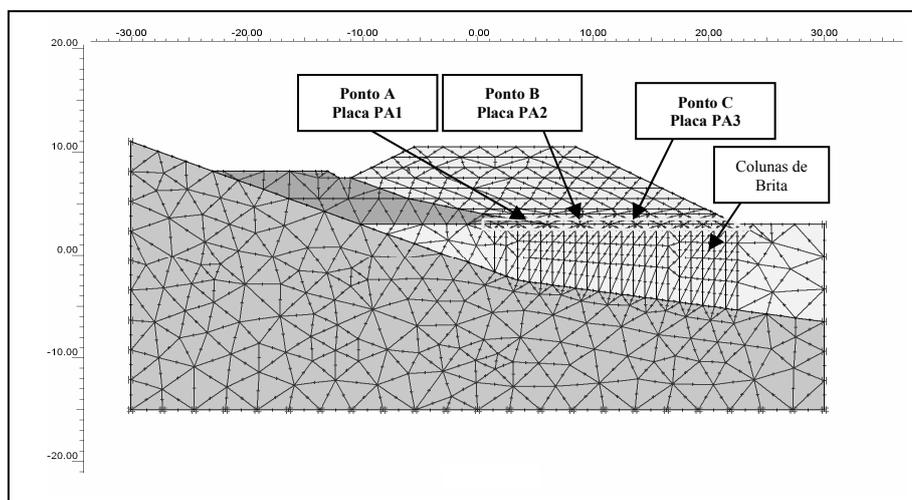


Figura 1 – Malha de elementos finitos considerada no modelo de cálculo ao km 58+150 (E1)

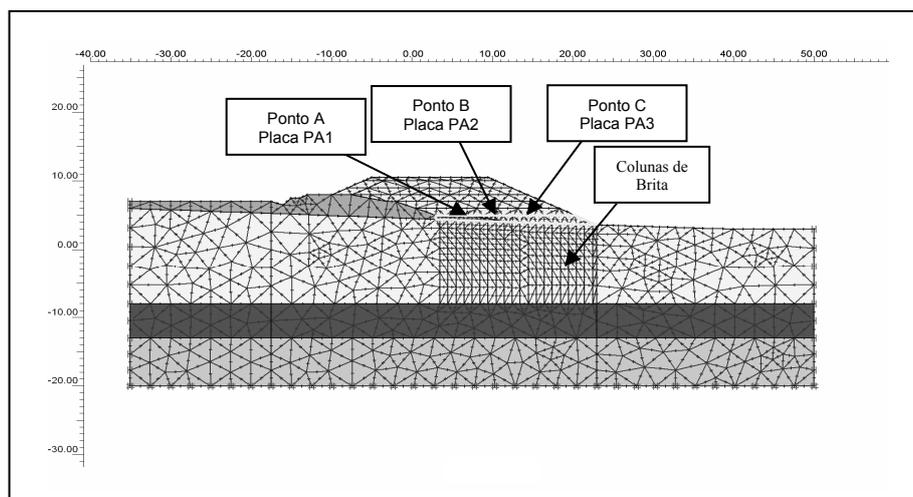


Figura 2 – Malha de elementos finitos considerada no modelo de cálculo ao km 59+625 (E2)

Desse estudo obtiveram-se os seguintes resultados:

- O assentamento máximo expectável, no final da construção dos novos aterros iria variar entre cerca de 7 e 27cm, respectivamente para a zona do encontro E1 e E2;
- O assentamento expectável, após a consolidação total durante a fase exploração da nova via variaria, aproximadamente, entre 11 e 34cm, igualmente para os encontros E1 e E2;
- O assentamento residual em fase de exploração da via variaria entre 4 e 11cm, respectivamente para os encontros E1 e E2.

Estes valores, para a utilização da técnica de melhoramento de solos com recurso a colunas de brita, são compatíveis com a via ferroviária, tanto em fase de construção como de exploração, pelo que foi a adoptada para o tratamento da fundação.

Para além da solução adoptada outras hipóteses foram também analisadas, das quais se destaca uma solução de aterros de pré-carga com malha de geodrenos. Esta alternativa foi abandonada, uma vez que não garantia que grande parte dos assentamentos expectáveis ocorresse durante o período de construção do viaduto.

4. INSTRUMENTAÇÃO

Com o objectivo de acompanhar a evolução dos assentamentos na zona dos aterros de aproximação foi definido um plano de instrumentação que visou monitorizar o excesso de tensões geradas durante o processo de construção e a respectiva velocidade de dissipação, acompanhar os efeitos dos deslocamentos horizontais e verticais nos aterros de aproximação sobre as aluviões lodosas e verificar a adequação do método construtivo.

A maioria dos equipamentos de instrumentação foi distribuída segundo 2 perfis de instrumentação (Figura 3), coincidentes com os perfis de cálculo realizados em fase de projecto para cada um dos aterros de aproximação aos encontros do viaduto, cada um incluindo os seguintes equipamentos:

- 3 placas de assentamento (PA);
- 1 extensómetro magnético vertical (XV);

- 4 Piezómetros eléctricos de corda vibrante (PE), 1 PE instalado aos 3 m de profundidade na fundação do aterro do encontro E1 e 3 PE instalados aos 3, 6 e 9m na fundação do aterro do encontro E2.

Para além dos equipamentos de instrumentação referidos, foram ainda contemplados os seguintes dispositivos:

- 2 extensómetros magnéticos horizontais (XH), 1 em cada aterro, distribuídos longitudinalmente;
- 2 Inclínómetros verticais (IN), 1 em cada aterro (na sua saia);
- 2 perfilómetros ou inclinómetros horizontais (PF), 1 em cada aterro, distribuídos longitudinalmente.

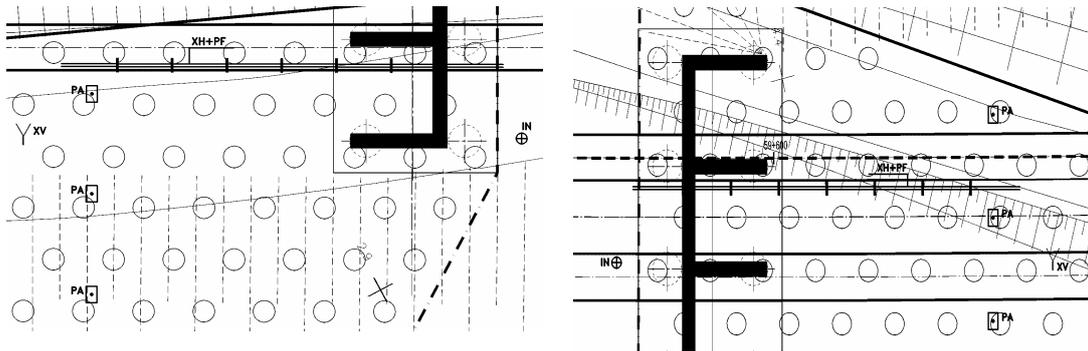


Figura 3 – Esquema de localização dos instrumentos nos aterros E1 e E2

Os instrumentos instalados visaram obter, durante a construção de ambos os aterros e no decorrer do período de consolidação (enquanto o viaduto era construído), informação relativa a:

- deslocamentos horizontais na base dos aterros (potenciais superfícies de rotura) com a leitura dos inclinómetros verticais;
- acompanhar a evolução da dissipação das tensões neutras geradas pela sobrecarga da construção do aterro com os piezómetros eléctricos de corda vibrante;
- deslocamentos verticais com as placas de assentamento e extensómetros magnéticos verticais. Os inclinómetros horizontais instalados na base dos aterros permitiram estabelecer perfis longitudinais de deslocamentos verticais.

4.1 Placas de assentamento

Foram instaladas, com a função de acompanhamento dos deslocamentos verticais da base do aterro, três placas de assentamento, sobre a camada drenante. As placas de assentamento (Figura 4) são constituídas por uma base quadrada de aço (0,5m x 0,5m) à qual está soldado um tubo metálico revestido por um tubo de PVC $\phi 200\text{mm}$. À medida da subida do aterro eram acrescentados tubos de 1,0m de comprimento com o respectivo tubo de protecção.

As leituras das placas são efectuadas através de nivelamento geométrico que se apoia em marcas profundas instaladas fora da zona de influência de cada um dos aterros.

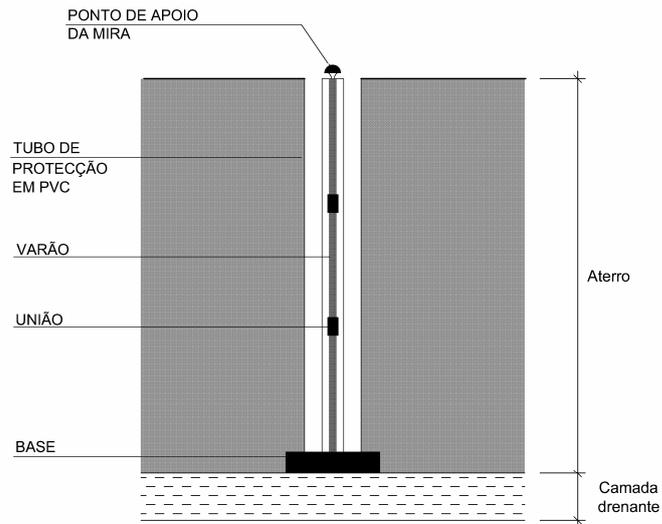


Figura 4 – Placa de assentamento

4.2 Extensómetros magnéticos verticais

Para acompanhamento dos deslocamentos verticais ao longo do aterro e da respectiva fundação, foi instalado um extensómetro magnético vertical (Figura 5) em cada um dos encontros. Este dispositivo é composto por um tubo corrugado onde se instalam, com espaçamento constante (1.5m), anéis magnéticos (tipo aranha ou tipo prato) e que na base tem uma ponteira com um anel designado por Datum. No interior do tubo corrugado é colocado um tubo guia em PVC para circulação da sonda magnética de leitura.

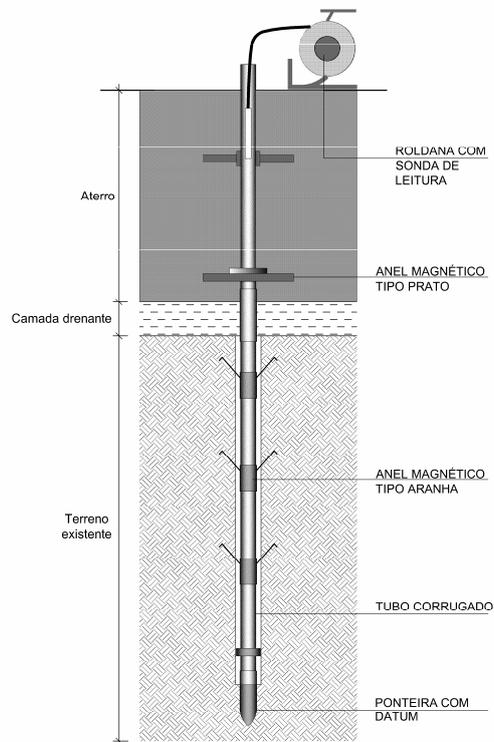


Figura 5 – Extensómetro magnético vertical

A instalação dos extensómetros foi mista tendo-se iniciado após a execução da primeira camada de aterro sobre a camada drenante. Nesta fase o extensómetro foi furado até à cota de base definida em projecto, colocados os seus constituintes que incluíram anéis tipo aranha e procedendo-se em seguida à sua selagem com calda de bentonite/cimento. À medida que a cota do aterro foi subindo este aparelho foi acrescentado com tubo corrugado, tubo guia e anéis magnéticos tipo prato. Após a conclusão dos trabalhos de terraplanagem nos aterros os extensómetros verticais tinham aproximadamente 14,0m (E1) e 18,0m (E2).

A leitura do extensómetro magnético é efectuada pela descida de uma sonda através do tubo guia que permite a identificação da posição dos anéis instalados uma vez que emite um sinal sonoro quando está na influência do campo magnético destes.

4.3 Piezómetros

No sentido monitorizar as tensões geradas durante o processo de construção e a respectiva velocidade de dissipação foram instalados piezómetros eléctricos de corda vibrante (Figura 6) nos aterros E1 (1un) e E2 (3un).

A sua instalação foi efectuada após a realização da primeira camada de aterro sobre a camada drenante, num furo que na base foi preenchido com areão calibrado e onde foi colocada a ponteira do piezómetro. Esta câmara foi isolada com uma camada de bentonite e o restante furo preenchido com calda de cimento bentonítica.

Os dados da ponteira piezométrica são transmitidos por um cabo eléctrico que foi encaminhado ao longo do aterro até à sua saia e que possui na extremidade um conector de ligação à unidade de leitura.

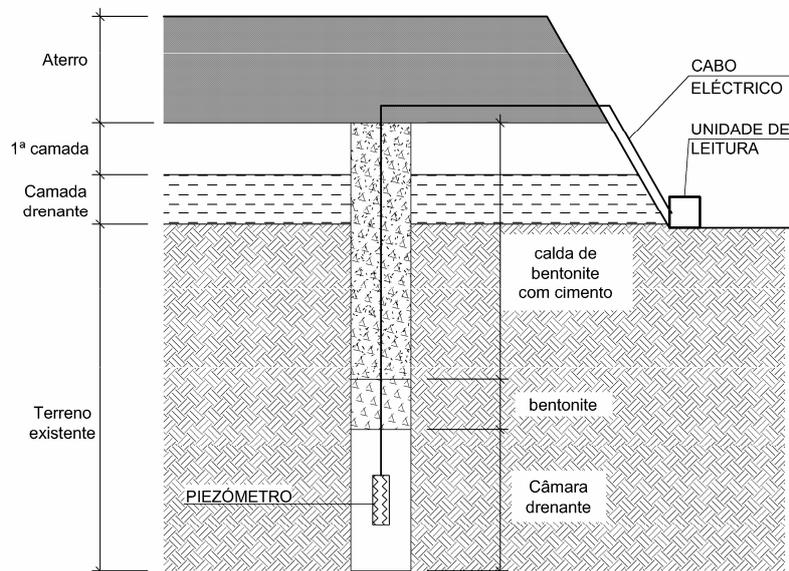


Figura 6 – Piezómetro eléctrico de corda vibrante

4.4 Extensómetros magnéticos horizontais

Com o objectivo de acompanhar o deslocamento horizontal na base do aterro, associado à sua consolidação, foi instalado em cada um dos encontros um extensómetro magnético horizontal com comprimento de 17,0m. A constituição deste dispositivo é idêntica à descrita para os extensómetros verticais, divergindo no tipo de anéis magnéticos que neste caso são simples e na extremidade onde não se instala uma ponteira mas sim uma roldana que através da passagem de um cabo de aço permite a circulação da sonda de leitura.

A sua instalação foi efectuada após a execução da primeira camada de aterro sobre a camada drenante. Depois de executada uma vala foram instalados os seus componentes (tubo corrugado, tubo guia, anéis magnéticos e roldana), coberto com o material do aterro e compactado manualmente.

A leitura dos extensómetros magnéticos é efectuada pela circulação de uma sonda pelo tubo guia que permite a identificação da posição dos anéis instalados uma vez que emite um sinal sonoro quando está na influência do campo magnético destes.

4.5 Inclínómetros horizontais

No sentido de controlar os deslocamentos verticais na base do aterro foi instalada uma calha inclinométrica horizontal com comprimento de 17,0m, em que na extremidade mais interna do aterro se instalou uma roldana para permitir a circulação do torpedo de leitura através da passagem de um cabo de aço.

A sua instalação foi efectuada após a execução da primeira camada de aterro sobre a camada drenante. Depois de executada uma vala foram instalados na base os seus constituintes (calha inclinométrica e roldana de retorno) e cobertos com o material do aterro, compactado manualmente.

A leitura do inclinómetro horizontal é efectuada com um torpedo que é deslocado ao longo da calha fazendo leituras em intervalos de 0,5m.

4.6 Inclínómetros verticais

No exterior de cada um dos aterros foi instalada uma calha inclinométrica vertical, respectivamente com 13,0m (E1) e 17,5m (E2), no sentido de controlar os deslocamentos horizontais da fundação do aterro.

A sua instalação foi efectuada durante a execução da camada drenante, num furo onde foi colocada uma calha inclinométrica selada com calda de cimento bentonítica. O topo da calha foi protegido com uma tampa metálica.

A leitura das calhas inclinométricas verticais é efectuada com recurso a uma sonda biaxial dotada de sensor servo-acelerométrico.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em conta que nesta obra os deslocamentos com mais importância são os verticais e que estes foram calculados em projecto para os pontos onde se instalaram as placas de

assentamento, os resultados destas serão alvo de especial análise, não se pretendendo, no entanto, minimizar a importância dos restantes dispositivos que têm uma função mais activa no decorrer da obra de construção do aterro.

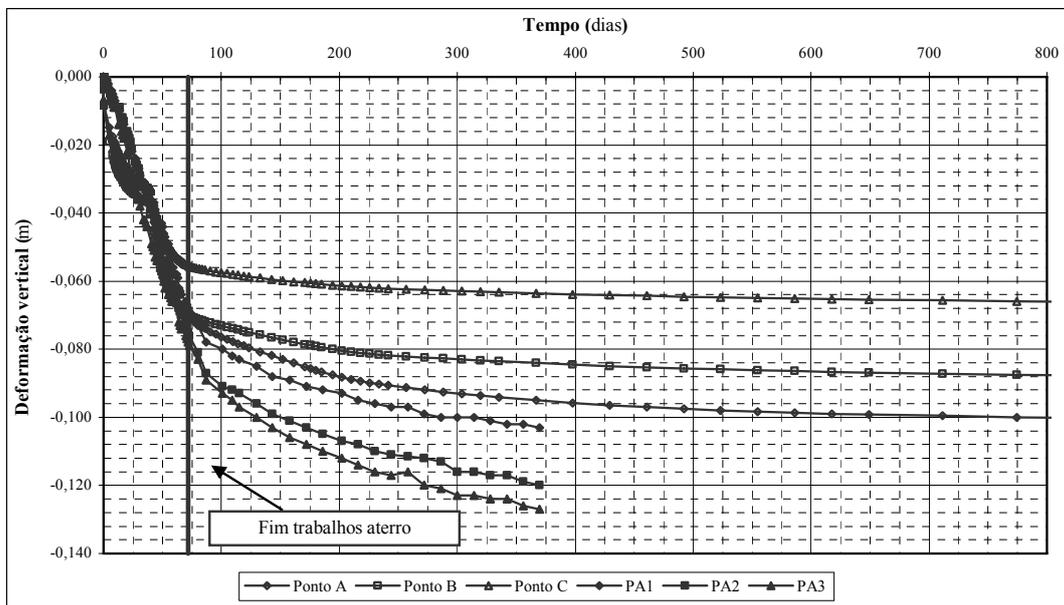


Figura 7 – Assentamentos previstos/reais para o encontro E1

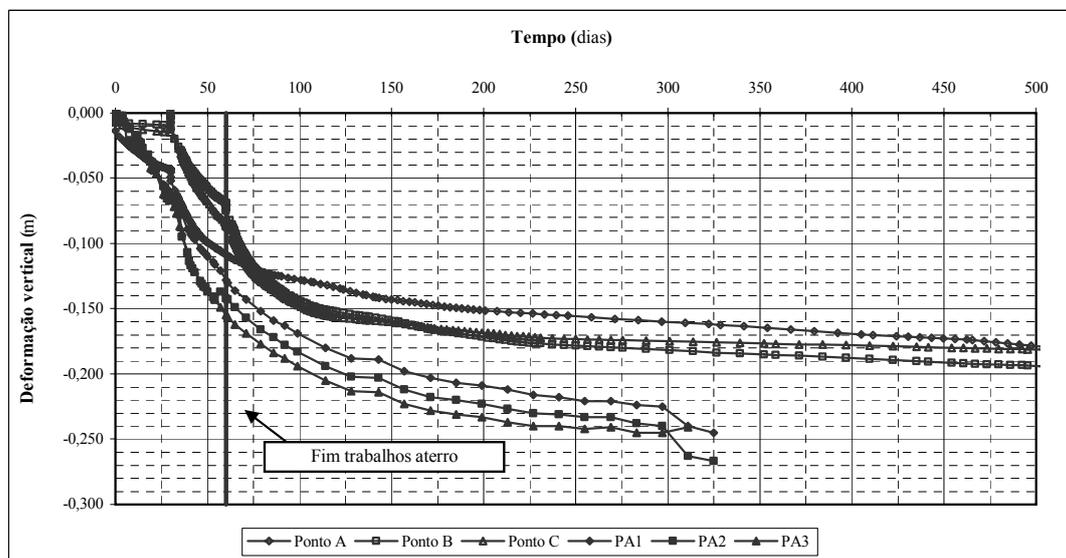


Figura 8 – Assentamentos previstos/reais para o encontro E2

Da análise dos gráficos das Figuras 7 e 8 podemos obter os valores apresentados no quadro 2 e que no cômputo geral podemos verificar serem superiores aos esperados o que poderá estar relacionado com o facto não ser possível simular exactamente as condições da fundação e/ou dos métodos construtivos das estacas de brita divergirem do preconizado no projecto.

Quadro 2 – Deslocamento previsto/lido das placas de assentamento

| E1 | | | | | E2 | | | | |
|--------------------|------------------|------------|----------------------------------|--------------------|------------------|--------|----------------------------------|--------|------|
| Desl. Previsto (m) | Deslocamento (m) | | Desvio Previsto Vs Observado (%) | Desl. Previsto (m) | Deslocamento (m) | | Desvio Previsto Vs Observado (%) | | |
| A | -0,071 | PA1 | -0,068 | -4,2 | A | -0,109 | PA1 | -0,128 | 17,4 |
| B | -0,070 | PA2 | -0,075 | 7,1 | B | -0,073 | PA2 | -0,142 | 94,2 |
| C | -0,055 | PA3 | -0,078 | 41,8 | C | -0,087 | PA3 | -0,155 | 78,1 |

Para além desse facto há uma inversão de assentamentos isto é, estava previsto nos dois encontros que o ponto com maior assentamento seria o A e isto verificou-se não na placa PA1, que corresponde ao referido ponto, mas sim na placa PA3. Esta diferença pode dever-se talvez ao facto de a espessura de aluvião na zona das placas PA3 ser superior à esperada. Nos restantes dispositivos os resultados obtidos são concordantes com os referidos e nos casos em que se verificam algumas diferenças estas são justificadas por factos da obra.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Só adoptando um programa de instrumentação detalhado, recorrendo à informação e correlação dos diversos instrumentos e das diferentes grandezas se torna possível aferir se os métodos construtivos são eficazes e retirar elações úteis para futuras obras.

7. AGRADECIMENTOS

Viaponte com especial atenção para Daniel Sousa

A toda a equipa da Mota-Engil que esteve directamente ligada à obra com especial atenção para Henrique Santos, Luis Tolda de Abreu, Manuel Dias, Rui Coelho e Sandra Carvalho.

8. REFERÊNCIAS

Zbyszewski, G & Veiga Ferreira, O, (1968). Carta Geológica de Portugal – Escala 1:500000 – Notícia Explicativa da Folha 31-C (Coruche). Serviços Geológico de Portugal. Lisboa.

Zbyszewski, G, (1953). Carta Geológica de Portugal – Escala 1:500000 – Notícia Explicativa da Folha 31-C (Santarém). Serviços Geológico de Portugal. Lisboa.

VIAPONTE, Projectos e Consultoria de Engenharia S.A. (2004). Projecto de Modernização da Linha do Norte, Subtroço 1.2/1.3, Azambuja/Vale de Santarém. Projecto de Execução.