

SOLUÇÕES DE TRATAMENTO DO TERRENO DE FUNDAÇÃO DE MUROS DE ATERRO NA AUTO-ESTRADA DO MARÃO

SPECIAL FOUNDATIONS OF REINFORCED EARTH STRUCTURES ON MARÃO HIGHWAY

Pinto, Alexandre, *JetSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.pt*

Pereira, Ana, *JetSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, apereira@jetsj.pt*

Matias, Rui, *Infratunel S.A., Lisboa, Portugal, rmatias@infratunel.pt*

Peixoto, Artur, *Georumo, Lisboa, Portugal, apeixoto@georumo.pt*

RESUMO

No presente artigo são descritos os principais critérios de concepção e de execução adoptados nas soluções de tratamento do terreno de fundação dos muros M4A e M4B, de suporte de aterro, inseridos no Sublanço Geraldês/Padronelo da Auto-estrada do Marão. Apresentam-se os principais condicionamentos, designadamente os geológico-geotécnico, os topográficos e de vizinhança (proximidade do IP4 em funcionamento). As soluções adoptadas consistem no tratamento do terreno de fundação dos muros de suporte, do tipo terra reforçada, através de colunas de jet grouting e de painéis de solo-cimento, executados pela tecnologia deep soil mixing (CSM). Refere-se o dimensionamento efectuado, através de análises estáticas e dinâmicas. O plano de instrumentação e observação implementado é descrito e são apresentados alguns resultados obtidos.

ABSTRACT

This paper describes the main criteria for the design and implementation of the adopted solutions in the treatment of the soil at the foundation of retaining walls M4A and M4B that belong to Subsection Geraldês / Padronelo of Marão Highway. The geological and geotechnical conditionings are presented, as well as the topographical ones. The adopted solutions consist of jet grouting columns and panels of soil-cement, technology implemented by deep soil mixing (CSM) for soil treatment of the foundation of retaining walls. Results of the static and dynamic calculations are presented. The monitoring plan is described and some of the results obtained are shown.

1. INTRODUÇÃO

Os muros de aterro M4A e M4B inserem-se no Sublanço Geraldês / Padronelo da Auto-estrada do Marão, A4/IP4 – Amarante / Vila Real. Este Sublanço corresponde à zona de alargamento/rectificação do IP4. Os muros M4A e M4B desenvolvem-se do lado esquerdo da futura autoestrada, numa extensão de cerca de 456m e 335m, respectivamente. O desnível entre a plataforma da Auto-estrada e o terreno actual no alinhamento do muro apresenta um valor máximo de cerca de 20m no caso do muro M4A e de 13m no muro M4B.

Ao longo do desenvolvimento dos muros M4A e M4B, localizados na proximidade do IP4, ocorre o maciço granítico, em geral, muito alterado e decomposto, recoberto por aterros, tendo a maior parte resultado dos aterros realizados aquando da construção do IP4. Nas situações em que se revelou inviável o saneamento dos aterros existentes e do terreno menos competente para atingir o maciço granítico, com capacidade para suportar os muros de solos reforçados e do respectivo aterro, tanto pela grande espessura dos referidos aterros e terreno menos competente,

como pela proximidade do IP4, foi necessário prever uma solução de tratamento do terreno de fundação com painéis de solo-cimento ou com colunas de jet-grouting.

Na figura seguinte apresenta-se a planta de localização dos muros M4A e M4B e o pormenor do troço do muro M4B, com cerca de 200m de desenvolvimento, onde foi realizado o tratamento do terreno de fundação com painéis de solo-cimento, executados através da tecnologia de deep soil mixing (CSM). Pelo facto desta zona do muro M4B corresponder à maior área de tratamento do terreno de fundação executada, optou-se por a descrever com mais detalhe neste artigo, fazendo apenas uma breve referência ao restante desenvolvimentos dos dois muros.

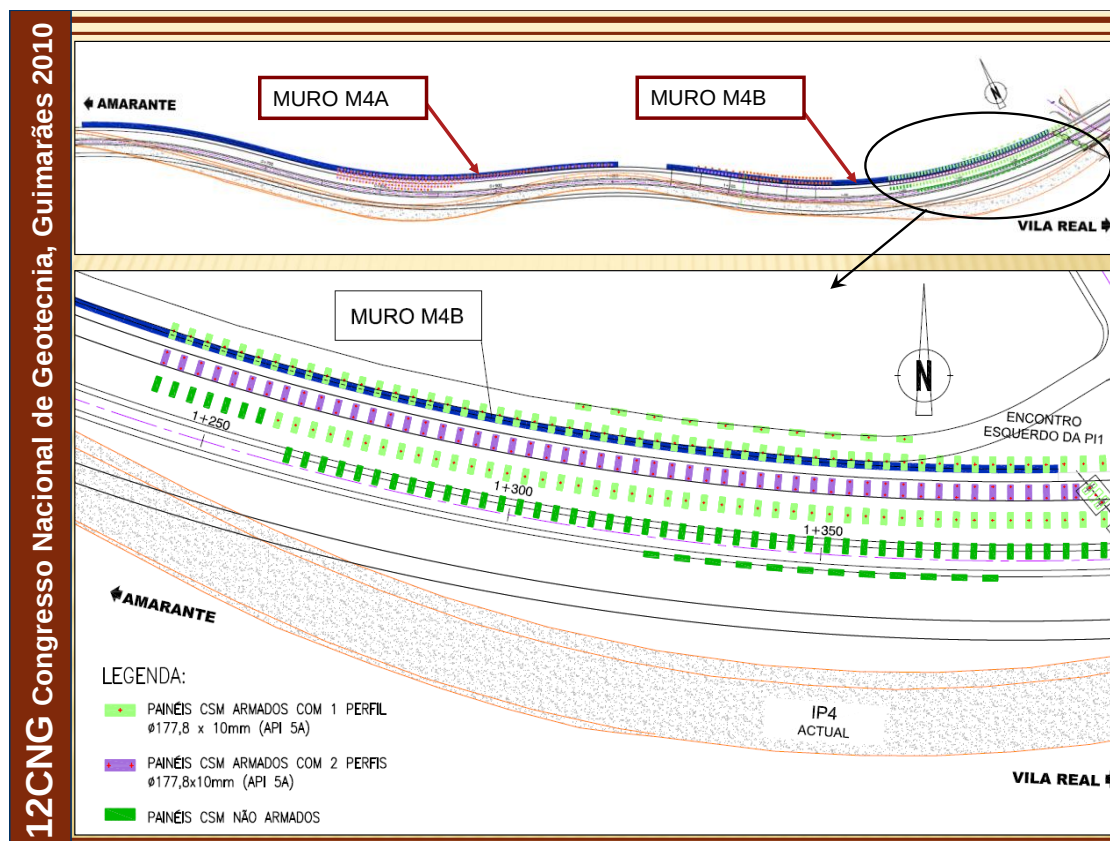


Figura 1 – Planta de localização dos muros M4A e M4B e planta de pormenor do muro M4B na zona onde foi realizado o tratamento do terreno de fundação com painéis CSM

2. PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1. Geologia e Geotecnia

De acordo com a informação resultante das campanhas de prospecção realizadas ao longo dos muros M4A e M4B, o dispositivo geológico foi caracterizado pela ocorrência do maciço granítico que se encontra, em geral, muito alterado a decomposto, debitando-se em areia heterométrica, subjacente a aterros com espessura variáveis, atingido cerca de 14m no muro M4B e 8m no muro M4A.

Os aterros detectados nas sondagens são aterros não controlados (despejos) sobre a encosta. Estes aterros são fundamentalmente constituídos por materiais granulares (saibros graníticos) com elevado estado de humidade, no seio dos quais se observam entulhos urbanos (plásticos e restos de madeira, ferro e cerâmica). Tratam-se de materiais muito descomprimidos e com

valores de N_{SPT} , em geral inferiores a 5 pancadas, característicos de solos friccionais muito soltos, portanto com comportamento geotécnico muito debilitado. Na Figura 2 apresenta-se, a título de exemplo, o corte transversal na zona do muro M4B onde foram detectados aterros com espessura de cerca de 14m e uma vista desta zona antes do início dos trabalhos.

No quadro 1 apresentam-se os parâmetros geomecânicos considerados para os terrenos ocorrentes e para o aterro previsto, aferidos através do conjunto de ensaios in-situ e de laboratório realizados, nomeadamente SPT (Standard Penetration Test), ensaios laboratoriais de identificação e de compressão uniaxial.

Quadro 1- Principais parâmetros geomecânicos adoptados

Litologia	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	E (MPa)
Aterro natural	18	34	0	10
Aterro reforçado	18	35	0	15
Maciço granítico W5 com $N_{SPT} < 60$	19	35	10	50
Maciço granítico W4-5 com $N_{SPT} \geq 60$	20	35	30	100

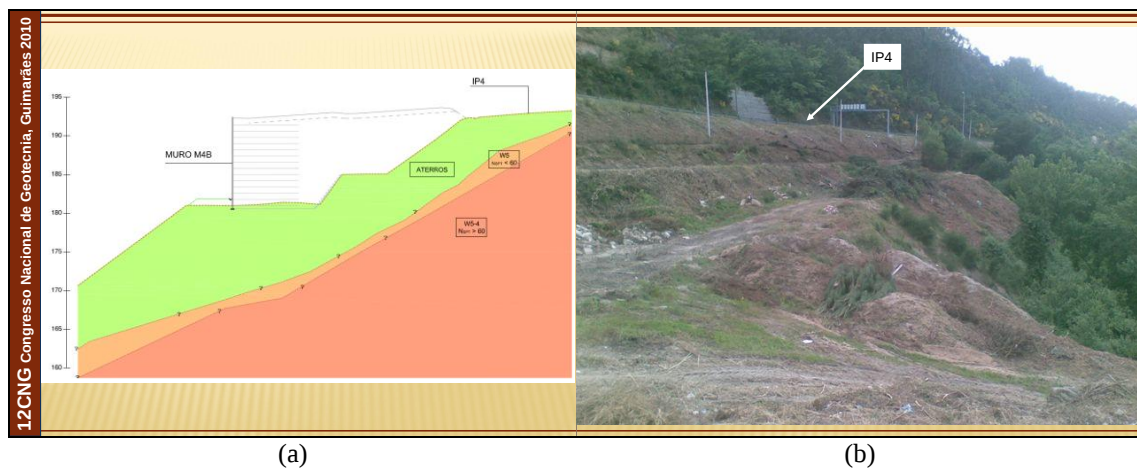


Figura 2 – Corte transversal com a representação da geologia (a) e vista do terreno inicial (b)

2.2. Outros condicionamentos

No que se refere aos restantes condicionamentos, que mais influenciaram o tipo de soluções adoptadas, podem ser destacados os seguintes: a topografia, determinada pela inclinação agressiva da encosta, onde os muros foram implantados, e as condições de vizinhança, nomeadamente a plataforma do IP4, em funcionamento durante a obra, e as infraestruturas associadas, localizadas na proximidade do alinhamento do muro.

3. PRINCIPAIS SOLUÇÕES

3.1. Considerações gerais

Atendendo aos principais condicionamentos existentes ao longo dos muros M4A e M4B, nomeadamente os topográficos e os geológico-geotécnicos, optou-se pela consideração da solução de muros de terra reforçada para suporte do aterro, necessário à execução da plataforma da Auto-estrada. Os muros de terra reforçada são constituídos por aterro com solos seleccionados, com elementos de reforço dispostos ao longo do muro e ligados ao paramento. O paramento é formado por painéis de betão armado pré-fabricados. De forma a garantir o

funcionamento conjunto da solução é realizada uma viga de bordadura ao nível do coroamento do paramento.

Os muros foram fundados directamente sempre que as condições do terreno existente ao nível da fundação dispunha de características adequadas ao suporte dos mesmos. Nas zonas onde foram detectadas, nas campanhas de prospecção realizadas, espessuras de aterro significativas, não sendo viável o seu saneamento, tendo em consideração a proximidade do IP4 em funcionamento, foi preconizado o tratamento do terreno de fundação dos muros, através da execução de colunas de jet-grouting ou de painéis de solo - cimento, pela tecnologia “cutter soil mixing - CSM”, derivada do deep soil mixing (Borel et al., 2007), (Simon, 2009), (Wheeler, 2009). Pelo facto desta solução ter sido aplicada em maior área de tratamento optou-se por descrever a mesma, no presente artigo, com maior detalhe. Relativamente ao tratamento com colunas de jet-grouting foram adoptadas colunas com 1.2m de diâmetro, em malhas e comprimentos de acordo com a secção do muro a suportar e as condições geológico-geotécnicas do local. Em algumas colunas de jet-grouting foram colocados, em toda a profundidade das mesmas, e respeitando os encastramentos de, no mínimo, 1.0m no terreno competente (NSPT > 60 pancadas), perfis metálicos tubulares com diâmetro de 177,8mm e 10mm de espessura, em aço de alta resistência API-5A (fsyd > 560 MPa), com uniões exteriores, de forma a procurar incrementar a segurança à estabilidade global.

3.2. Tratamento do terreno de fundação com painéis de solo-cimento

No que respeita ao muro M4B, foram detectadas, nas campanhas de prospecção realizadas, espessuras de aterro significativas, na extremidade leste do muro, tendo sido preconizado o tratamento do terreno de fundação, através da execução de painéis de solo - cimento, pela tecnologia “cutter soil mixing - CSM”, derivada do deep soil mixing. A tecnologia CSM consiste basicamente numa mistura mecânica entre o ligante, em geral cimento, e o solo. A ferramenta de furação, corte e mistura é análoga à adoptada na tecnologia de execução de paredes moldadas com recurso a hidrofresa, sendo constituída por duas rodas de corte que operam no plano horizontal (Figura 3).

Foram executados painéis de solo-cimento, com secção de $2,4 \times 0,9 \text{ m}^2$, através da tecnologia CSM, dispostos numa malha de $4,4 \times 2,9 \text{ m}^2$, com comprimento total compatível com a transmissão ao terreno competente, com resistência equivalente a NSPT > 60 pancadas, e geologicamente estável em relação à encosta, em condições de segurança, de uma tensão de compressão, para cargas de serviço, de cerca de 2,0MPa (Figura 3). As cargas devidas ao peso do aterro e do muro de terra reforçada e, ainda, as sobrecargas devidas à circulação automóvel na plataforma da auto-estrada são assim transmitidas aos painéis de CSM através de uma plataforma de transferência de carga, construída na base do aterro, constituída por uma camada de geotêxtil de alta resistência (Bräu, 2006), (Pinto et al., 2007).

Nos painéis de CSM realizados na base do muro de terra reforçada foram colocados, em toda a profundidade dos mesmos, e respeitando os encastramentos de, no mínimo, 1.0m no terreno competente (NSPT > 60 pancadas), perfis metálicos tubulares com diâmetro de 177,8mm e 10mm de espessura, em aço de alta resistência API-5A (fsyd > 560 MPa), com uniões exteriores, de forma a procurar incrementar a segurança à estabilidade global.



Figura 3 – Vistas da execução dos painéis de solo-cimento na fundação do muro M4B

Na Figura 4 apresenta-se o corte transversal do muro M4B na zona onde foi executado o tratamento do terreno de fundação com painéis de solo-cimento e uma vista do muro numa fase intermédia da respectiva construção.

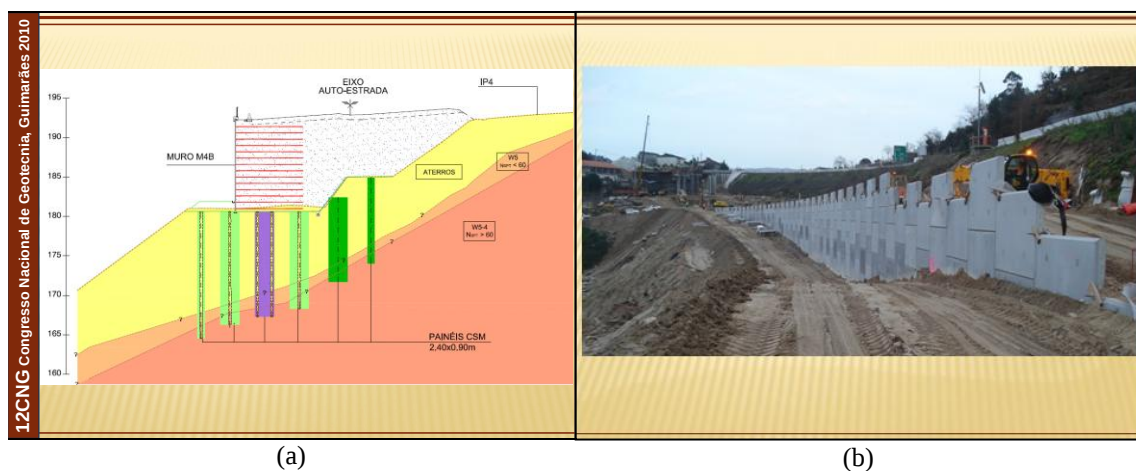


Figura 4 – Corte transversal do muro M4B na zona onde foi realizado o tratamento do terreno de fundação e vista do muro de terra reforçada

3.3. Controlo dos parâmetros de execução dos painéis de solo-cimento

De forma a confirmar os parâmetros de resistência considerados nas verificações de segurança realizadas em projecto, que se apresentam no capítulo seguinte do presente artigo, foram recolhidas amostras frescas dos painéis, realizados através da tecnologia de CSM, para a realização, em laboratório, de ensaios de compressão uniaxial com medição de extensões. Foram ainda recolhidas carotes a diferentes profundidades dos painéis de forma a confirmar a

resistência dos mesmos em profundidade. Foram ainda realizados ensaios CPT nos painéis de CSM e no terreno confinado entre os mesmos. Foi definida uma campanha de ensaios CPT complementares a realizar após a conclusão do aterro do muro de solos reforçados.

Durante a execução dos painéis de solo-cimento foi efectuado o registo e o controlo permanente dos parâmetros de execução.

4. DIMENSIONAMENTO

O comportamento do muro de solos reforçados e do terreno de fundação, em termos de esforços e de deformações, foi analisado, para a fase construtiva e para a fase de exploração, através de programas de elementos finitos vocacionados para o efeito, em particular Plaxis Professional V8 (Figura 5). Os terrenos interessados foram modelados a partir dos parâmetros geomecânicos apresentados anteriormente (Quadro 1). Foram ainda considerados para os painéis de solo-cimento valores de coesão de 400kPa e módulo de deformabilidade de 1,5GPa, obtidos tendo por base os resultados dos ensaios laboratoriais de compressão uniaxial, com medição de extensões que foram realizados em provetes cúbicos recolhidos de amostras frescas aquando da realização dos painéis de solo-cimento.

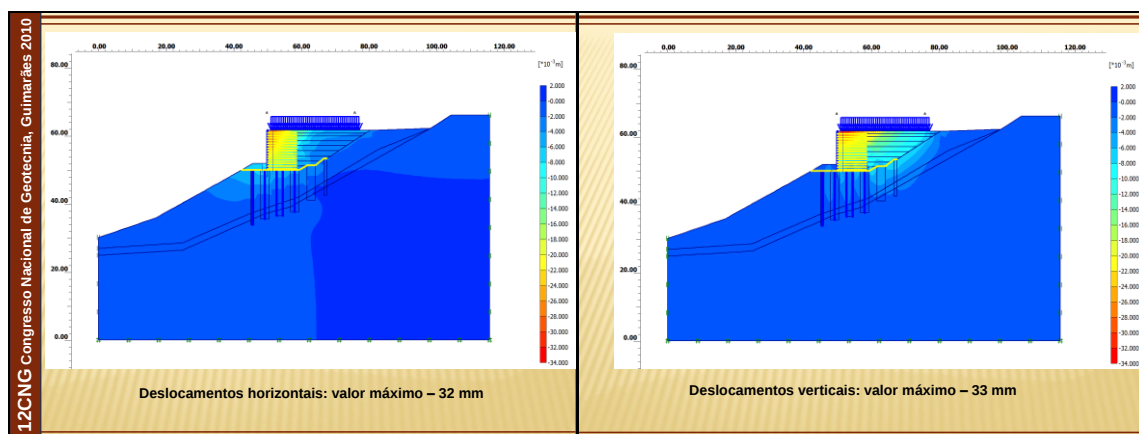


Figura 5 – Exemplo dos resultados obtidos no cálculo tensão-deformação para a fase de exploração

No que se refere ao dimensionamento do muro de solos reforçados, a verificação em termos de estabilidade externa e interna foi realizada pelo fornecedor do sistema que foi implementado.

Foram efectuadas as análises da estabilidade global dos perfis transversais recorrendo-se ao programa de cálculo automático SLIDE. Este determina, em termos de equilíbrio limite, para um conjunto de superfícies de deslizamento pré-definidas, o coeficiente de segurança associado à potencial superfície de deslizamento crítica. Esta análise foi realizada pelo Método de Bishop simplificado. As referidas análises foram efectuadas tendo por base as informações disponíveis relativas aos condicionamentos geológico-geotécnicos no local de cada muro, tendo-se adoptado os parâmetros geomecânicos estimados para cada tipo de terreno que se apresentaram anteriormente, assim como as características dos reforços do muro de terra reforçada adoptados e os parâmetros de resistência dos painéis de solo-cimento.

A análise sísmica foi efectuada através de métodos pseudo-estáticos, recorrendo igualmente ao método de Bishop simplificado. Os métodos pseudo-estáticos constituem análises simplificadas que simulam o efeito dos fenómenos sísmicos através do acréscimo de forças de inércia, determinadas pela majoração do peso de cada fatia pelos coeficientes sísmicos considerados

($k_h = 0,06g$ e $k_v = 0,03g$), tendo em consideração que a obra se localiza na zona sísmica D de acordo com o RSA.

Na Figura seguinte apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos, com a indicação da superfície crítica de deslizamento e dos coeficientes de segurança de 1.5 para o caso estático e a 1.3 para o caso sísmico (Figura 6).

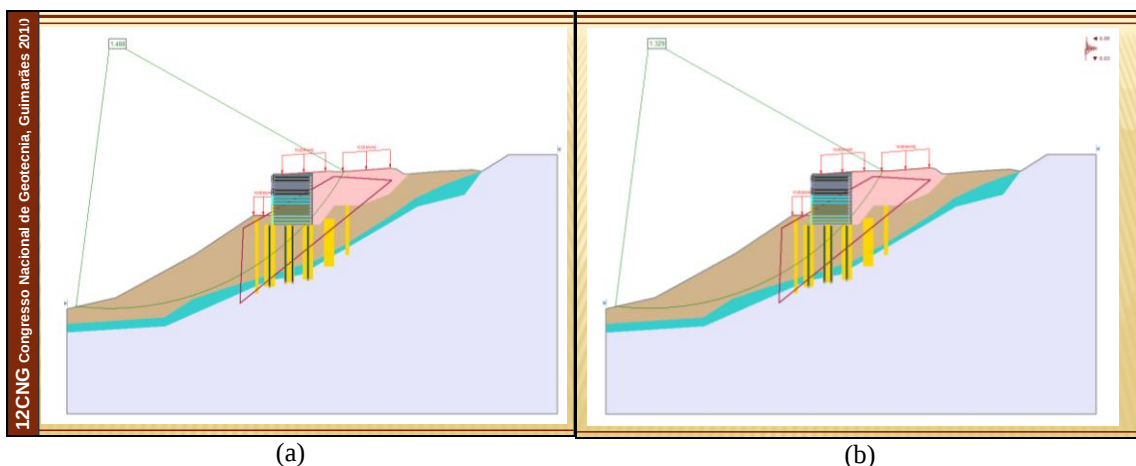


Figura 6 – Exemplo dos resultados obtidos na análise de estabilidade global. Caso estático (a) e caso sísmico (b)

5. INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

O Plano de Instrumentação e Observação (PIO), sendo uma ferramenta de prevenção e de gestão de riscos, indispensável numa obra com as características da presente, foi definido com o objectivo de garantir a realização, em condições de segurança e de economia, dos trabalhos de escavação provisória, assim como permitir a análise do comportamento das infra-estruturas vizinhas, nomeadamente do IP4, durante a execução da obra e, sobretudo, a análise do muro de suporte e da auto-estrada durante a fase de exploração.

Foram instalados inclinómetros e marcas topográficas na berma do IP4 e foi prevista a instalação de inclinómetros junto ao paramento do muro de solos reforçados e de alvos no paramento. Estes dispositivos apenas servirão para analisar o comportamento do muro de suporte após a construção do mesmo, incluindo aterro a tardoz, que neste caso faz parte integrante do muro. Na Figura 7 apresenta-se uma vista do tubo instalado junto ao paramento do muro, no qual será instalada a calha inclinométrica após a conclusão do aterro. Foi ainda prevista a instalação de extensómetros de corda vibrante nos reforços dos muros de suporte.

Os aparelhos foram instalados na berma do IP4, apresentando-se de seguida, a título de exemplo, os resultados das leituras de um inclinómetro instalado até à data na zona do muro M4B. Os deslocamentos apresentados correspondem ao plano perpendicular ao eixo do IP4 e o sentido positivo dos mesmos corresponde aos movimentos no sentido da escavação provisória.

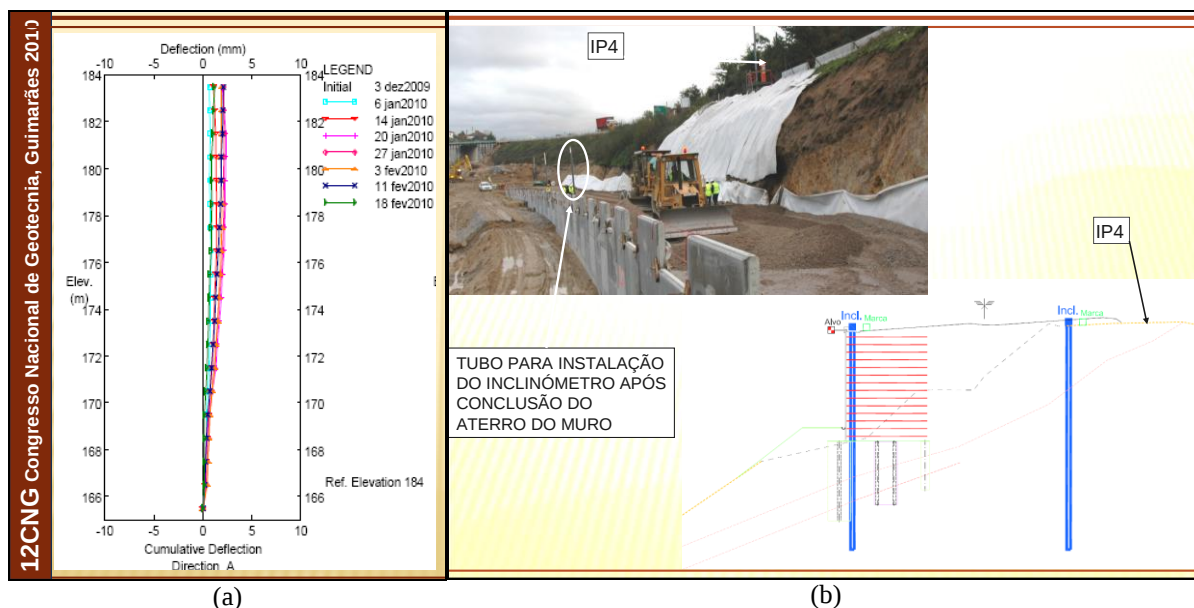


Figura 7 – Exemplo dos resultados das leituras dos inclinómetros instalados no IP4 e vista do tubo para instalação do inclinómetro junto ao paramento do muro

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As soluções implementadas de tratamento do terreno, através de painéis de solo-cimento e de colunas de jet-grouting, para permitir a fundação dos muros de suporte de aterro (muros de solos reforçados) da auto-estrada, realizando uma plataforma de transferência de carga, constituída por um geotêxtil de alta resistência, mostraram-se ser adequadas aos condicionamentos existentes. À data os muros ainda se encontram em execução, pelo que ainda não se dispõe de muitos resultados de instrumentação que permitam confirmar o bom comportamento da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Auto-estradas do Marão (Concessionária) e à Infratúnel (Construtor), a autorização para a redacção e publicação do presente artigo.

REFERÊNCIAS

- Borel, S.; Hamelin, P. J. (2007) *Geomix, an innovative technique. The pilot projects of le Hvre and Miami*. Travaux n°843, pp. 54-58
- Bräu, G. (2006) *EBGEO – German recommendations for reinforcement with geosynthetics*. Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds), pp. 1241-1244.
- Pinto, A.; Tomásio, R. (2007) *Soluções de plataformas de transferência de carga com recurso a geossintéticos*. 2º Seminário Português sobre Geossintéticos, LNEC - Lisboa, pp. 81-99
- Simon, B. (2009) *Projet national de recherche et developpement. Amelioration des sols par inclusions verticales rigides*. Travaux n°862, pp. 65-72.
- Wheeler, P. (2009) *Soil-Mix Piles. Mix Factor*. European Foundations. Autumn 2009, pp. 10-11.