

UTILIZAÇÃO DE INCLINÓMETROS DO TIPO INCREX PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS DURANTE A CONSTRUÇÃO DE ATERROS

USE OF INCREX INCLINOMETERS FOR THE MEASURING OF DISPLACEMENTS ALONG EMBANKMENTS CONSTRUCTION

Cardoso, Rafaela, *Instituto Superior Técnico, Portugal, rafaela@civil.ist.utl.pt*

Maranha das Neves, Emanuel, *Instituto Superior Técnico, Portugal, emn@civil.ist.utl.pt*

Lopes, Pedro, *Tecnasol-FGE, Portugal, plopes@tecnasol-fge.pt*

Coelho, Ana Luísa, *Tecnasol-FGE, Portugal, acoelho@tecnasol-fge.pt*

Tavares, Ricardino, *Tecnasol-FGE, Portugal*

RESUMO

No âmbito de um projecto de investigação pretende-se modelar o comportamento de um aterro da Auto-estrada A10. Com base em ensaios em que se determinaram as características de deformabilidade dos materiais utilizados (margas), são esperadas pequenas deformações. Durante a construção do aterro foram instalados inclinómetros-extensómetros denominados por INCREX, cuja precisão é compatível com os deslocamentos esperados. Trata -se da 1º vez em Portugal que se instalam INCREX durante a construção de um aterro. Neste artigo descrevem-se os principais cuidados a ter na sua instalação e analisam-se os resultados obtidos até à data.

ABSTRACT

Numerical modelling of an A10 highway embankment will be performed. Laboratory testing of the materials used to build the embankment (marls) allowed characterising their deformability and small deformations are expected. Inclinometers-extensometers named as INCREX were installed along the embankment construction. Their measuring precision would be compatible with the expected displacements. INCREX were installed for the first time in Portugal along the construction of an embankment. This paper presents the main concerns with their installation and the results obtained until the present

1. INTRODUÇÃO

É usual o recurso a instrumentação em diversos tipos de obras geotécnicas, sendo o investimento nesta área geralmente proporcional ao risco envolvido. A instrumentação é fundamental sempre que há a necessidade de prevenir deformações excessivas, como é o caso, por exemplo, de execução de paredes ancoradas, túneis e escavações diversas, quer seja para controlo de deformações do terreno, quer seja para monitorização de deslocamentos de construções próximas das zonas de escavação. Nos casos em que é necessário medir deformações/deslocamentos do solo, a instrumentação mais corrente consiste na instalação de inclinómetros, extensómetros e de alvos topográficos.

Neste artigo apresenta-se um caso-estudo relativo a um aterro da Auto-estrada A10 onde, para além de alguns dos equipamentos de instrumentação correntes previstos no Projecto, se instalaram inclinómetros-extensómetros denominados INCREX® (EXtensómetro INCRmental). O estudo das deformações deste aterro insere-se num projecto de investigação do IST/ICIST em conjunto com a BRISA que é o Dono de Obra e tem a ver com a utilização de margas na

construção dos aterros. As margas são um material cuja utilização na construção de aterros tem sido pouco explorada até ao presente devido ao seu potencial expansivo ([1]). De facto, alguns deslizamentos de taludes de margas ocorridos após chuvadas, demonstram que este tipo de material requer cuidados especiais.

Para a modelação do comportamento do aterro foi necessário instrumentar a obra para obter informação relativa às suas deformações durante e após a construção. No caso das deformações verticais do aterro, estas podem ser devidas, por exemplo, aos efeitos da compactação da camadas sobrejacentes, ou à expansibilidade ou colapso das margas por contacto com água (chuva, excesso de água de compactação ou ascensão de água proveniente da fundação) durante a construção e após a mesma.

Com a instalação dos inclinómetros-extensómetros INCREX pretendeu-se medir tanto os deslocamentos horizontais como verticais. Foi necessário recorrer a estes instrumentos para se conseguir ter uma precisão adequada nas leituras já que são esperados pequenos deslocamentos durante a construção.

Trata-se da primeira vez que se instalam em Portugal instrumentos INCREX durante a construção de aterros. Deste modo descrevem-se neste trabalho as principais disposições construtivas adoptadas para a instalação de dois inclinómetros-extensómetros, do tipo atrás mencionado, durante a construção do aterro da A10. Finalmente, com base nos resultados obtidos até ao presente, discute-se a viabilidade da instalação deste tipo de instrumentação durante a construção de aterros.

2. DESCRIÇÃO DO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO E DO ATERRAMENTO

A obra instrumentada é um aterro da Autoestrada A10, Bucelas/Carregado, sublanço Arruda dos Vinhos/IC11. Trata-se de um aterro em encosta, cujo perfil transversal-tipo se apresenta na Figura 1 e a planta se apresenta na Figura 2. O seu desenvolvimento longitudinal é de 325m e a secção mais desfavorável tem altura máxima de 9m e altura média, medida ao eixo, de 6m.

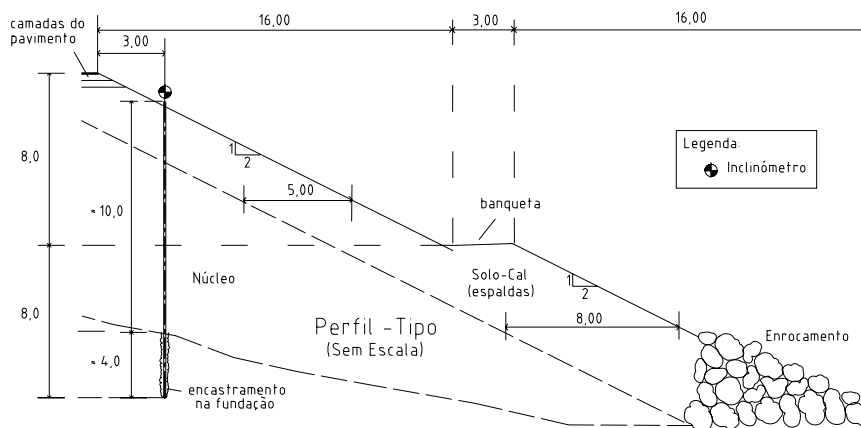


Figura 1 – Perfil-transversal-tipo.

No talude do aterro, distanciados cerca de 3m da berma, foram colocados dois inclinómetros-extensómetros do tipo INCREX (Figura 1). A sua localização em planta pode ser observada na Figura 2. Os instrumentos encontram-se afastados de 100 m (Figura 2), estando o

primeiro localizado sensivelmente a meio do aterro (PK 1+150) e o segundo próximo de um local onde se observaram escorregamentos no passado (PK 1+250).

Para a construção do aterro utilizaram-se margas próximas provenientes dos troços de escavação para construção da Autoestrada A10. Trata-se de margas cinzentas da zona de Arruda dos Vinhos, formação da Abadia, do Jurássico ([2]).

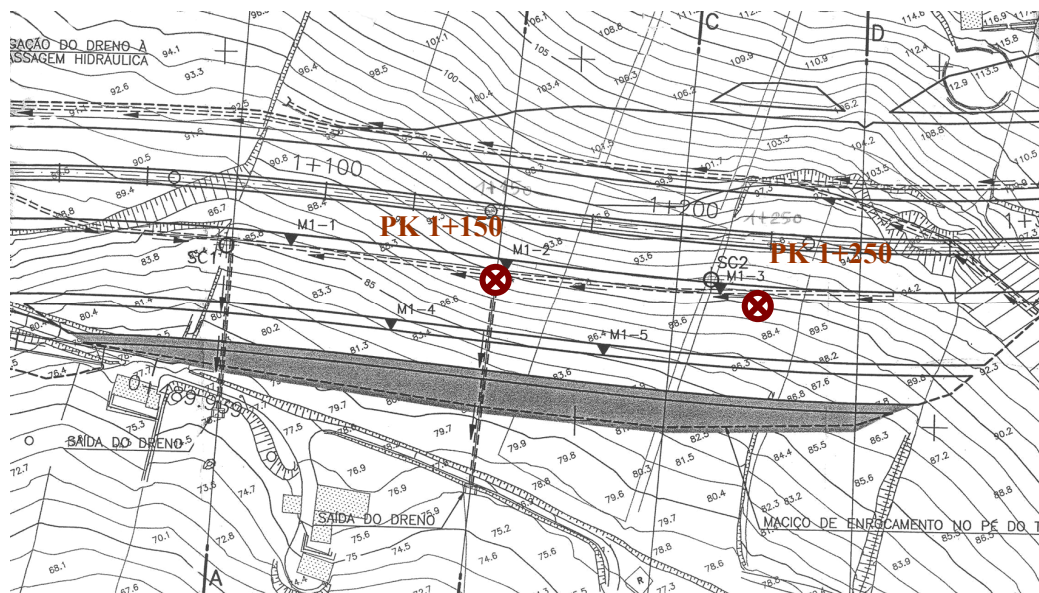


Figura 2 – Planta do aterro e implantação dos instrumentos.

Da análise mineralógica das margas efectuada pelo LNEC, foi possível constatar a presença em maior proporção de calcite e quartzo, e ainda de mica, clorite, dolomite, feldspatos, paligorskite e caulinite. O seu teor em água natural apresenta valores médios de cerca de 9%.

Na fase de Projecto foram efectuados ensaios triaxiais CIU ($\phi' = 26^\circ$ e $c' = 4 \text{ kPa}$) e ensaios de corte directo reversíveis ($\phi'_{\text{residual}} = 9^\circ$). A compressibilidade do material foi determinada através da realização de ensaios edométricos (módulo edométrico igual a cerca de 100 MPa). O Quadro 1 apresenta mais algumas características geotécnicas destas margas.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização das margas cinzentas utilizadas para a construção do aterro (amostras desagregadas recebidas no IST para ensaio).

Densidade das partículas sólidas	2,74
Limite de liquidez, w_L	37 %
Índice de plasticidade, IP	16 %
Fracção fina *	33%
Classificação Unificada de Solos	SP- areia mal graduada com cascalho (Carta de Plasticidade: CL / OL)
Compactação leve ($D \leq 4,75 \text{ mm}$)	$w_{\text{opt}} = 14,9\%$ e $\gamma_{d,\text{máx}} = 19,0 \text{ kN/m}^3$
Compactação pesada ($D \leq 4,75 \text{ mm}$)	$w_{\text{opt}} = 11,8\%$ e $\gamma_{d,\text{máx}} = 20,3 \text{ kN/m}^3$

* Percentagem de material passado no peneiro #200 ASTM ($D \leq 0,075 \text{ mm}$)

Em obra, a compactação foi efectuada com um cilindro vibrador com pés de carneiro (Figura 3), aplicando uma energia correspondente à do ensaio de compactação pesada. De acordo com o Caderno de Encargos, a compactação foi efectuada do lado húmido (teor em água pertencente

ao intervalo $[w_{opt}, w_{opt}+2\%]$) e com grau de compactação mínimo de 95%. A Figura 4 apresenta a variação da granulometria devido à compactação.

A compactação do lado húmido prescrita pelo Projectista (CENORGE) insere-se num conjunto de medidas preventivas da expansibilidade deste material ([3]). Outra destas medidas foi o tratamento do solo das espaldas do aterro com cal (Figura 1) protegendo assim o núcleo constituído pelo material margoso ([1]).



Figura 3 – Cilindro utilizado e aspecto das margas durante a compactação.

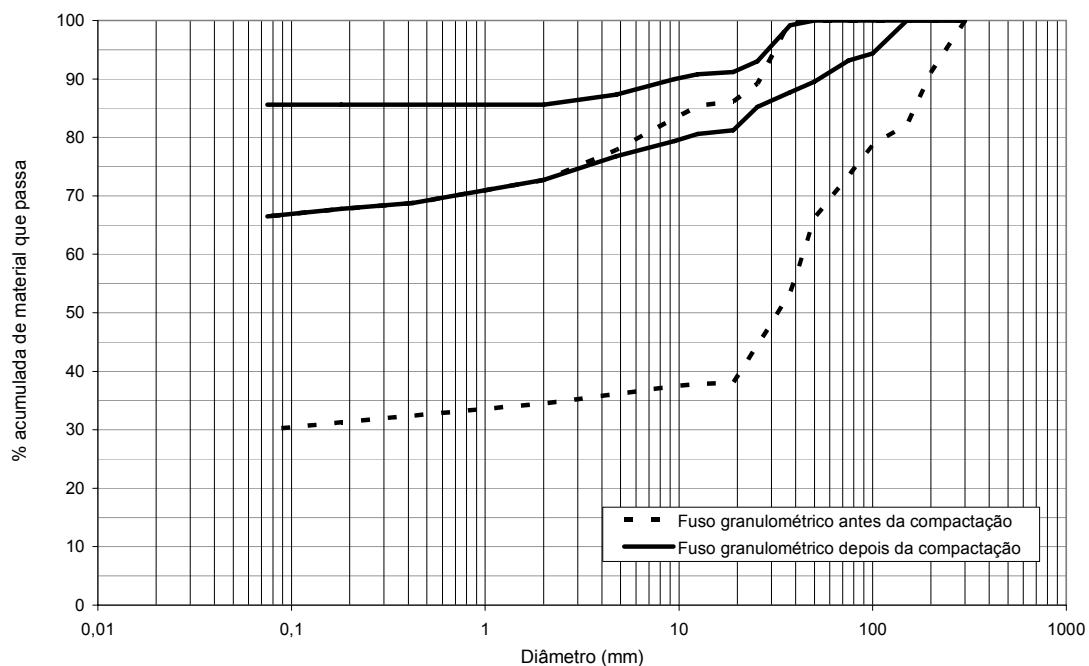


Figura 4 – Granulometria antes e após a compactação.

No IST foram efectuados ensaios de expansibilidade/colapso das margas, de acordo com a Norma ASTM D4546 (método B) ([4]). Basicamente, este procedimento consiste na embebição de uma amostra colocada num edómetro sob uma tensão vertical constante, registando-se as deformações axiais do provete. As amostras foram preparadas com um grau de compactação e teor em água função das curvas de compactação do solo (Quadro I). O ponto foi definido dentro do intervalo de compactação do Caderno de Encargos (teor em água $w = w_{opt} + 1,5\%$ e grau de compactação 95%). Este procedimento foi efectuado tanto para a compactação leve como a

pesada, tendo-se preparado amostras que foram submetidas às tensões verticais $\sigma_v=25\text{kPa}$ e $\sigma_v=250\text{kPa}$.

Os valores da expansibilidade obtidos apresentam-se no Quadro 2. A expansibilidade do material, ε , foi obtida através da Equação 1, onde ΔH corresponde à variação da altura do provete e H_0 é a sua altura no início do ensaio.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

O valor negativo apresentado no Quadro 2 corresponde à situação em que se verificou assentamento devido à embebição (colapso). De acordo com os resultados do Quadro 2, considerando que o aterro tem cerca de 9m de altura, num ponto situado a cerca de 1,1m de profundidade (tensão vertical média de 25kPa, admitindo que o peso volúmico húmido do solo compactado é de 22kN/m³) poderá observar-se um empoamento de cerca de 3mm se houver embebição. Deste modo a instrumentação do aterro deveria permitir medir deslocamentos desta ordem de grandeza justificando-se, por isso, a escolha dos instrumentos INCREX.

Quadro 2 - Resultados da expansibilidade observada nos ensaios efectuados no IST para os dois tipos de compactação.

Compactação leve		Compactação Pesada	
$\sigma_v=25\text{kPa}$	$\sigma_v=250\text{kPa}$	$\sigma_v=25\text{kPa}$	$\sigma_v=250\text{kPa}$
0,54%	-0,06%	3,01%	1,02%

3. DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS INCREX

O INCREX (Figura 5 a)) é um sistema para medições extensométricas de alta definição, com leituras de compressão/extensão de metro a metro. Os instrumentos instalados possuem anéis magnéticos exteriores à calha, solidarizados com o solo do aterro e espaçados de 1m na sua instalação. Os anéis podem deslizar ao longo do exterior da calha, acompanhando os deslocamentos do aterro segundo o eixo do instrumento. A unidade de leitura (Figura 5 b)) permite detectar os movimentos dos anéis, quantificando-os através de indução electromagnética entre as espiras do torpedo e os anéis. Deste modo é possível obter uma grande precisão nas leituras ($\pm 0,02\text{mm}$, independentemente do comprimento do instrumento).

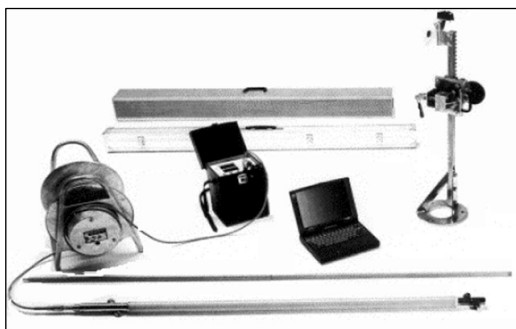


Figura 5 a) – Elementos que constituem o sistema.



Figura 5 b) - Unidade de leitura.

Figura 5 – Sistema INCREX ([5]).

Para além de permitir medir deslocamentos segundo o seu eixo, o instrumento INCREX também permite medir deslocamentos horizontais. No caso do aterro em estudo foram utilizadas calhas inclinométricas tipo ABS standard com diâmetro exterior de 70mm e interior de 60mm.

A instrumentação deste aterro constitui um caso particular se se considerar a instrumentação mais usual neste tipo de obras. É prática corrente do LNEC utilizar inclinómetros tradicionais na instrumentação de barragens de aterro, medindo tanto deslocamentos horizontais como verticais. No entanto, a precisão destes equipamentos para medição dos deslocamentos verticais (da ordem dos 5mm) é bastante inferior à dos instrumentos INCREX (da ordem dos 0,05mm). O Quadro 3 foi elaborado para permitir comparar vários tipos de instrumentação em termos de medições de deslocamentos verticais. Neste quadro apresenta-se uma síntese dos principais sistemas de medição de deslocamentos disponíveis no mercado, com os respectivos intervalos de medição e precisão.

Como é usual na grande maioria dos equipamentos de instrumentação, quanto maior for a precisão do equipamento menor é a amplitude do intervalo de medição (campo de medida). No caso dos instrumentos INCREX, essa amplitude é de 20mm (em 1 metro). Este valor é relativamente pequeno, podendo ser ultrapassado durante a construção. Por este motivo não é usual instalar este sistema de medição na fase de construção.

Quadro 3 – Síntese dos intervalos de medições de deslocamentos verticais, resolução e erro de alguns extensómetros disponíveis no mercado ([5] e [6]).

Sistema / Equipamento	Deslocamento máximo (mm)	Resolução das medições*	Erro**
Settlement probes (Hook type ou USBR type)	Espaçamento entre troços do tubo vertical	A da fita utilizada (geralmente da ordem dos mm)	Metade da resolução
Extensómetros magnéticos (diferentes dos INCREX)	Teoricamente ilimitado	A da fita utilizada (geralmente da ordem dos cm)	Metade da resolução
Instrumentos INCREX	20mm	0,05mm	0,01mm/m
Extensómetros MBPX (corda vibrante)	50mm ou 100mm	0,01 mm	0,001mm

* Intervalo mínimo de leituras ou o valor mínimo lido pelo equipamento de medição.

** Erro do equipamento de medição.

4. INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DURANTE A CONSTRUÇÃO

O procedimento adoptado na instalação foi idêntico para os dois instrumentos. Cada instrumento foi encastrado na fundação do aterro (margas não alteradas). O furo na fundação foi executado com recurso a um equipamento de sondagens que realizou uma furação destrutiva em cerca de 4m, estando os primeiros 0,5m de aterro já realizados. No furo da fundação colocou-se o primeiro troço do instrumento, que tinha cerca de 6m. Os restantes troços, com 3m de comprimento, foram colocados à medida que o aterro foi sendo construído, num total de 3 troços, perfazendo o comprimento total de 15m. Na zona da fundação, o espaço anelar foi preenchido com calda de cimento para encastramento do tubo.

O primeiro troço de calha possui o ponto de referenciação do sistema que é o primeiro anel, fixo à calha e localizado a 0,5m do fundo do furo. Este anel é visível na fotografia da Figura 6 a). Os restantes anéis apenas têm que manter a sua posição (espaçamento de 1m) durante a instalação, tendo depois que deslizar livremente ao longo da superfície das calhas acompanhando os deslocamentos do aterro. A calha e os respectivos anéis podem ser observados nas Figuras 6 b) e 6c).

Durante a compactação de cada troço de aterro foi necessário separar a calha, com os anéis já colocados, do solo a ser compactado. O objectivo deste procedimento foi impedir que os anéis se deslocassem durante o processo mecânico da compactação, pois se tal acontecesse as leituras reflectiriam este processo e não os deslocamentos posteriores do aterro. Por outro lado, os deslocamentos durante a compactação seriam de tal forma grandes que sairiam provavelmente do campo de medida. Deste modo, colocou-se um tubo de PVC (diâmetro=200mm e comprimento de cerca de 2m) a proteger a calha, à volta do qual se foi construindo o aterro (Figura 7 a)).

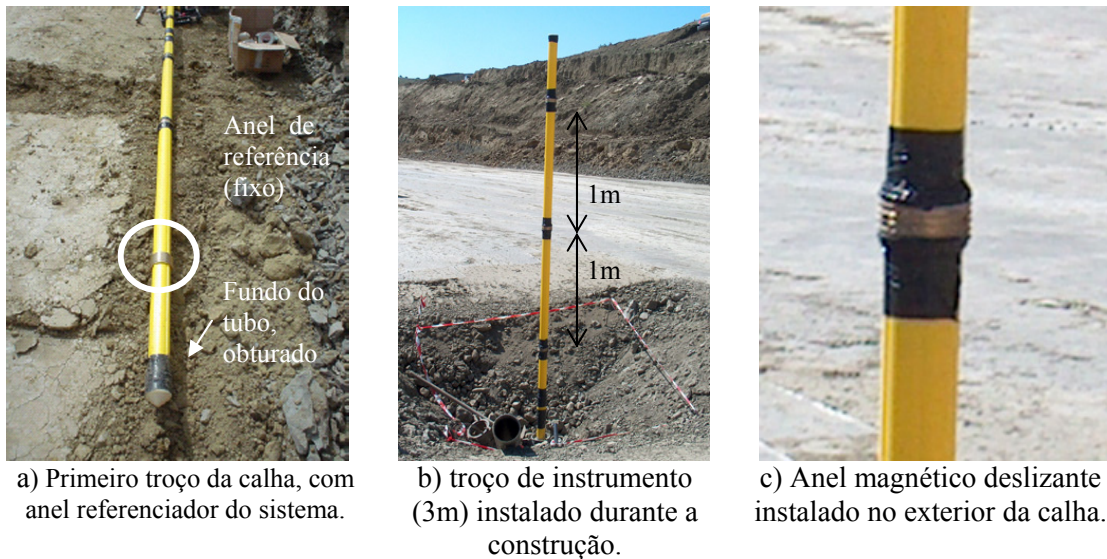


Figura 6 – Instrumento do tipo INCREX.

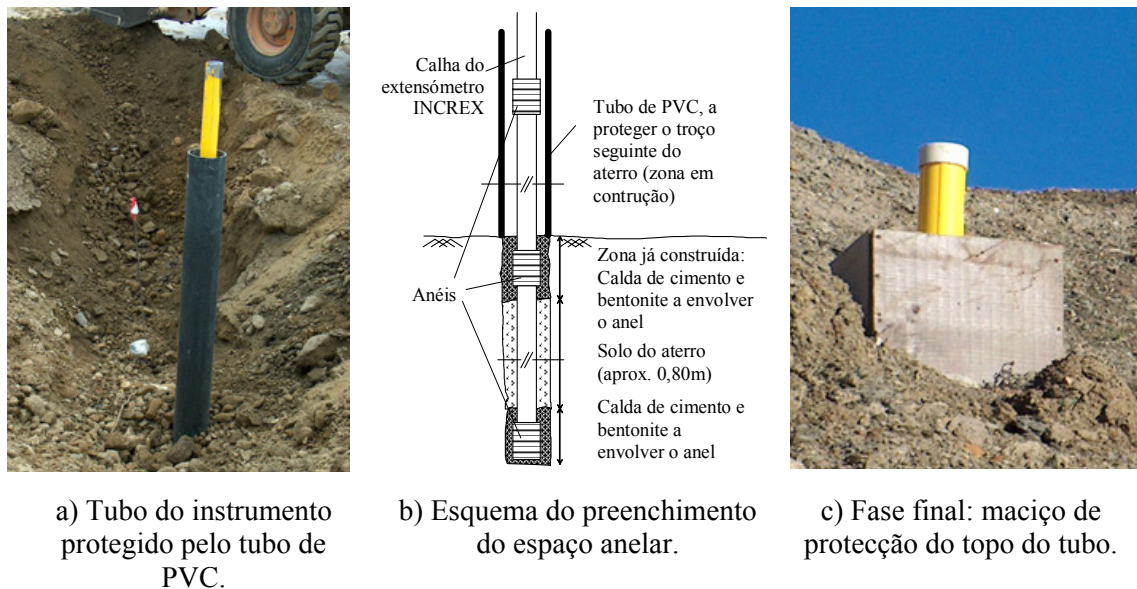


Figura 7 – Instalação dos instrumentos durante a construção.

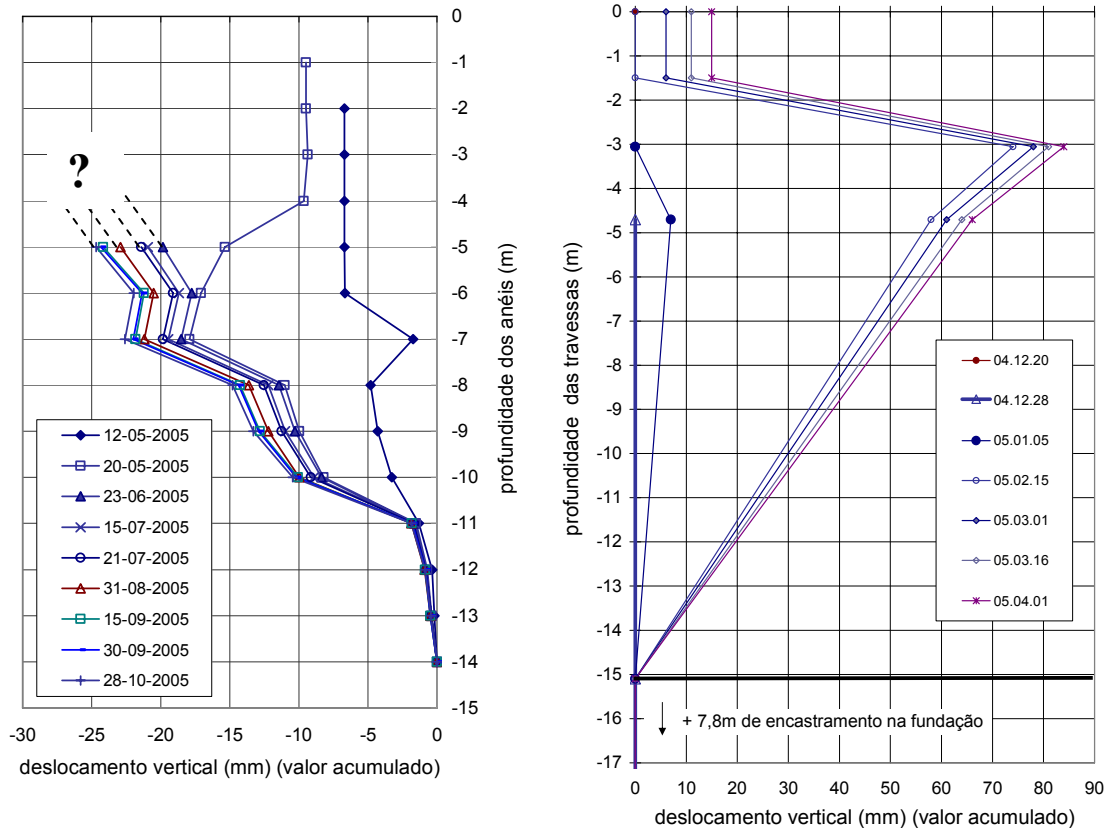
Quando a cota do aterro compactado atingia a distância medida ao topo do tubo de cerca de 0,5m, o tubo de PVC de protecção era retirado e procedia-se ao enchimento do espaço anelar, tal como ilustrado esquematicamente na Figura 7 b). Este espaço foi preenchido com solo do aterro em toda a extensão da calha excepto na zona dos anéis; nesta zona foi colocada uma mistura de cimento e bentonite de modo a criar uma zona para apoio do anel, para a sua melhor

solidarização com o aterro. Em seguida procedia-se à união da calha do instrumento com a calha do troço seguinte e voltava-se novamente a enfiar o tubo de PVC para a protecção do novo troço, repetindo-se o processo até à cota final do aterro. Na fase final de construção, a boca da calha foi protegida com um maciço de protecção (Figura 7c) de modo a evitar danos no instrumento.

Acrescenta-se ainda que a área envolvente dos instrumentos foi compactada manualmente, para evitar efeitos indesejáveis do equipamento de compactação. A cinta de protecção colocada em torno dos instrumentos é visível na Figura 6 b). O controlo da compactação nesta zona (teor em água e peso volúmico seco) foi efectuado com um gamadensímetro. Foram também medidos os deslocamentos horizontais.

5. LEITURAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A construção do aterro demorou cerca de dois meses, tendo terminado em finais de Junho de 2005. Até ao final do mês de Outubro de 2005 efectuaram-se 9 leituras (Figura 8 a)), com um desfase temporal de cerca de 15 dias durante a construção (furação para instalação do sistema de medição em 20-4-2005, conclusão da construção em finais de Junho) e nos dois meses seguintes, e passando depois a efectuar-se de 30 em 30 dias. O intervalo de tempo escolhido para cada leitura foi definido considerando que (i) a primeira leitura de cada um dos troços acrescentados só pode ser efectuada após a presa da calda de cimento do espaço anelar envolvente dos anéis, e que (ii) é necessário aguardar que a superfície do aterro atinja uma cota que permita o acesso ao topo das calhas para fazer as leituras.



a) Instrumento INCREX (PK 1+150)

b) Aterro 2- Instrumento tradicional (PK 3+120)

Figura 8 – Deslocamentos verticais medidos nos dois aterros instrumentados da A10.

A apresentação gráfica dos resultados das medições efectuadas com os instrumentos INCREX é semelhante à que é usualmente adoptada para os instrumentos tradicionais. No gráfico da Figura 8 a) é possível observar os deslocamentos verticais medidos até ao dia 28 de Outubro de 2005 (cerca de 3 meses após a conclusão do aterro) no equipamento instalado no PK 1+150. Os valores registados no instrumento INCREX instalado no PK 1+250 foram semelhantes aos do PK 1+150, mas ligeiramente inferiores.

Devido ao ritmo da construção foram efectuadas apenas 4 leituras. Nesta fase não se conseguiu medir os deslocamentos devidos à construção das camadas de aterro situadas entre cotas -11 e -7m. Pela observação do gráfico da Figura 8 a) é possível constatar que os deslocamentos ocorridos nesta etapa são inferiores a 5mm e seriam facilmente detectáveis pelos instrumentos INCREX. Uma sugestão para aumentar o número de leituras durante a construção do aterro é, por exemplo, a colocação de troços de calha mais pequenos (1,5m em vez de 3m).

Consideram-se relevantes as leituras efectuadas durante a construção até à data em que ocorreu um acidente em obra (no dia 20-6-2005), em que ambos os instrumentos foram partidos. O local da rotura das calhas corresponde sensivelmente à cota -5m. A primeira leitura após a substituição das calhas partidas foi efectuada após uma semana. Devido ao acidente, as leituras realizadas acima da cota -5m não são apresentadas no gráfico da Figura 8 a) por não serem fiáveis.

O gráfico da Figura 8 b) apresenta os deslocamentos medidos por instrumentos tradicionais instalados pelo LNEC num aterro da mesma obra (PK 3+120). Este segundo aterro tem materiais e concepção idênticos à do aterro em estudo (altura de 15m) e as semelhanças entre os dois aterros, tanto no que respeita à geometria como ao processo construtivo, permitem comparar as medições efectuadas.

Neste segundo aterro, os instrumentos foram instalados a meio da construção, perfazendo um total de 22,8m que incluem 7,8m de encastramento na fundação.

Como os dois aterros foram construídos de forma semelhante e com os mesmos materiais, pode esperar-se um andamento semelhante dos gráficos das Figuras 8 a) e 8 b), pelo que os deslocamentos verticais máximos registados pelos instrumentos INCREX ocorreriam a uma profundidade inferior a 5m.

Finalmente, admitindo que o peso volúmico húmido do solo compactado é de 22kN/m^3 e considerando a compressibilidade obtida através de ensaios laboratoriais, o valor teórico dos assentamentos à cota -5m é de cerca de 8,3mm. Este valor corresponde a uma extensão de 0,09% e é próximo da extensão de 0,06% medida na cota -5m entre 20-5-2005 e 15-7-2005, período em que se construíram os últimos 5m de aterro (assentamento de 6mm - Figura 8 a)).

6. CONCLUSÕES

Para a instalação de instrumentos INCREX durante a construção é necessário assegurar que os deslocamentos expectáveis são inferiores ao campo de medida do sistema. Para tal é necessária uma caracterização cuidada da deformabilidade e expansibilidade do solo para que se possa justificar a escolha deste sistema de medição.

As poucas leituras efectuadas durante a construção ainda foram suficientes para fornecer alguma informação sobre o comportamento do aterro. Não se registaram, no entanto, os assentamentos devidos à compactação das primeiras camadas, que permitiriam tirar melhor partido das potencialidades do campo de medida dos instrumentos INCREX.

O acidente ocorrido reduziu os ensinamentos que poderiam ter sido obtidos com este estudo. Um dos cuidados relativos à instalação de extensómetros durante a construção de aterros tem a ver com a rigidez do material envolvente das calhas, que deverá ser semelhante à do corpo do aterro.

Pelos valores dos deslocamentos verticais incrementais verificados é possível constatar que os assentamentos ocorridos na obra até ao presente ainda estão longe dos valores do campo de medida dos INCREX, pelo que se espera que seja possível proceder ao registo de assentamentos durante bastante mais tempo de vida útil da obra.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer à BRISA todo o apoio e a permissão da publicação dos resultados apresentados neste artigo. Também desejam agradecer ao LNEC o auxílio prestado na escolha da intrumentação mais adequada e os dados relativos à instrumentação do segundo aterro, e à CENORGEO pelo fornecimento dos elementos do Projecto.

8. REFERÊNCIAS

[1] C. Mieussens - *Les remblais em marne - Études, pathologie et techniques de réparations*, Proceedings conferência LNEC, Lisboa, 1997

[2] F. Telmo Jeremias, *Influência dos factores geológicos nas propriedades geotécnicas das rochas silto-argilosas*, LNEC, 1997

[3] E. Alonso - *Análisis del comportamiento de terreplenes frente a cambios de humedad*. Carreteras - Extraordinario 2004 - El agua y la carretera - Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera pp. 314-339, 2004

[4] ASTM-D4546) D4546-96 - *Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*, American Standard Testing Materials, ASTM, 1996

[5] Interfels, *Catálogo da Boart Longyear Interfels - Geotechnical Instrumentation*, Interfels 2004

[6] Slope, *Slope Indicator Catalog*, Slope 2004