

# ESTUDO DE UM ATERRO DA AUTOESTRADA A10 CONSTRUÍDO COM MARGAS

## Study of an embankment of the A10 Motorway built with marls

Rafaela Cardoso\*

Emanuel Maranha das Neves\*\*

**RESUMO** – No âmbito de um projecto de investigação para a BRISA realizou-se o estudo de um aterro da auto-estrada A10 (sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado) constituído por um núcleo de margas compactadas e espaldas onde foram utilizadas margas tratadas com cal. O principal objectivo do estudo foi prever deformações do aterro devido à evolução das margas quando expostas às acções atmosféricas (essencialmente molhagem devido à chuva). O aterro foi instrumentado para medir as sucções instaladas no solo e as deformações durante e após a construção. No cálculo foi adoptado um modelo de comportamento mecânico aplicável a solos não saturados. Os parâmetros para o modelo foram obtidos através de ensaios de laboratório. Os assentamentos calculados para a fase de construção foram muito semelhantes aos medidos em obra. As deformações devido à molhagem não foram significativas. As tensões calculadas nos contactos núcleo-espaldas permitiram concluir que não é expectável fendilhação relevante devido à diferença de rigidez entre estas zonas do aterro.

**SYNOPSIS** – An embankment of the A10 Motorway (Arruda dos Vinhos/Carregado) built with a core of compacted marls and shoulders with marls treated with lime, was the object of a research project. The main purpose of the study was to predict the deformations of the embankment due to the weathering of the marls (mainly wetting due to rain). Suctions and deformations were measured in the embankment during and after its construction. A constitutive model for unsaturated soils was adopted in the calculation. The parameters for the model were obtained with experimental tests. The settlements calculated during the construction were very similar to those measured in the embankment. The deformations due to wetting were not relevant. The calculated stresses in the contacts core-shoulders led to the conclusion that it is not expected relevant cracking due to different stiffness of the core and shoulders.

**PALAVRAS CHAVE** – Aterros de margas, sucção, modelação de comportamento, tratamento com cal.

## 1 – INTRODUÇÃO

No âmbito de um projecto de investigação foi estudado o aterro AT1 da auto-estrada A10, sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado (BRISA). Trata-se de um aterro especial por ter grande altura (cerca de 9 m medidos no eixo) e por ter sido construído com margas (formação da Abadia). Foi opção do projectista (Cenorgeo, 2002) recorrer ao tratamento das margas com cal para evitar a ocorrência de fenómenos de expansibilidade. Deste modo, foi adoptado um perfil zonado em que o núcleo foi construído com margas compactadas e as espaldas foram construídas com margas tratadas com cal, dada a exposição dos taludes às condições atmosféricas. Neste artigo as margas antes e após o tratamento serão denominadas respectivamente por solo e por solo-cal.

---

\* Assistente, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. E-mail: rafacla@civil.ist.utl.pt

\*\* Professor Catedrático Jubilado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. E-mail: emn@civil.ist.utl.pt

As margas são materiais evolutivos que sofrem degradação das suas características mecânicas (redução acentuada da resistência e da rigidez) quando expostas às acções atmosféricas, em particular à molhagem. Devido ao potencial expansivo deste material, as deformações podem ser importantes em caso de molhagem e podem prejudicar o comportamento do aterro durante a fase de exploração. A previsão das deformações de aterros de margas não é uma tarefa fácil (Mieussens, 1997 e Maranha das Neves, 1998) pois requer o uso de modelos de comportamento aplicáveis a materiais compactados não saturados que permitam simular a natureza evolutiva dos fragmentos que os constituem. Até à data, desconhece-se a existência deste tipo de modelos.

O aterro AT1 da A10 foi instrumentado para medição das deformações verticais e das sucções no solo durante a construção e nos dois anos seguintes. Os valores dos assentamentos medidos durante a construção foram comparados com os valores calculados na simulação numérica do aterro. Apesar de as calhas serem compatíveis com os instrumentos tradicionais para medição dos deslocamentos horizontais, estes foram medidos apenas após a construção pelo que não se apresentam neste artigo.

Para além da construção, foi também simulada a molhagem do aterro devido à chuva. Para o cálculo foi utilizado o CODE\_BRIGHT (Olivella *et al.*, 1996), tendo-se adoptado um modelo mecânico aplicável a solos não saturados porque a molhagem corresponde a uma variação de sucção. A calibração do modelo foi efectuada com base nos resultados de ensaios laboratoriais realizados em provetes de margas e de margas tratadas com cal, compactadas em condições semelhantes às de obra.

A comparação dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados em amostras de margas compactadas com e sem cal mostrou que a cal aumentou significativamente a rigidez. Foi analisada a possibilidade de ocorrência de fendilhação provocada pela diferença entre a rigidez do núcleo (margas compactadas sem cal) e das espaldas (margas compactadas com cal) visto ter-se adoptado um perfil zonado para o aterro. Tal diferença poderia ser responsável pelo desenvolvimento de tensões de tracção susceptíveis de originar fendilhação e consequente entrada franca de água no corpo do aterro. Se tal acontecesse perdiam-se os benefícios do tratamento.

Os resultados obtidos, tanto na análise das deformações verticais devido à molhagem como na análise de tensões devido à diferença de rigidez, permitiram extrair algumas conclusões sobre o tratamento das margas com cal para o caso particular dos aterros da A10.

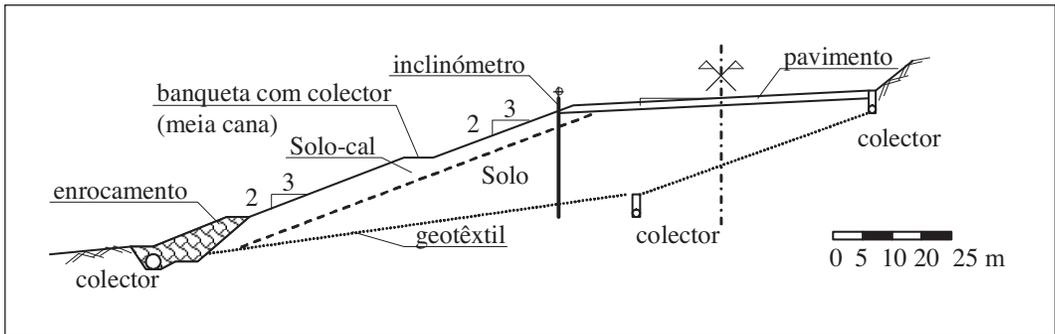
## **2 – O ATERRO AT1**

O aterro especial AT1 (Figura 1) foi construído em encosta e tem uma altura aproximada de 10 m medida no eixo da via. No perfil transversal da Figura 1 é visível o núcleo construído com margas (solo) e as espaldas construídas com margas tratadas com cal (solo-cal). Foram instalados sistemas de drenagem na base e nos taludes de modo a minimizar o acesso da água ao interior do aterro. O contacto entre o aterro e a fundação foi revestido com um geotêxtil. Os taludes foram revestidos com terra vegetal para sua protecção.

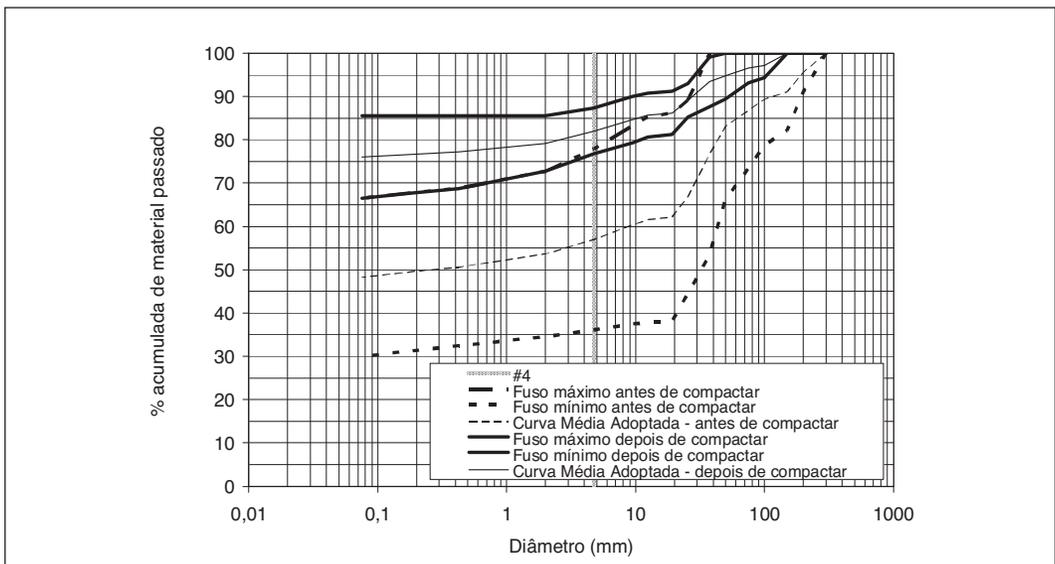
Para a construção do aterro utilizaram-se margas cinzentas não alteradas provenientes dos troços de escavação mais próximos. Trata-se de margas da zona de Arruda dos Vinhos, formação da Abadia, do Jurássico Superior (Jeremias, 1999). Da análise mineralógica das margas foi possível constatar a presença 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 %.

Foi prescrito (Cenorgeo, 2002) um intervalo de compactação definido no lado húmido da curva de compactação pesada. Com esta medida procurou-se obter uma fragmentação eficiente das margas durante a compactação. Tratando-se as margas compactadas de agregados de fragmentos de

margas com dimensões que poderão ser relativamente importantes, as consequências, no comportamento global do aterro, da evolução de fragmentos pequenos são menos relevantes do que as da evolução de fragmentos grandes. A eficiência do processo de compactação é visível na Figura 2, que mostra que a percentagem de finos aumentou de 50 % para 80 % (valores médios).



**Fig. 1** – Perfil transversal-tipo do aterro AT1.



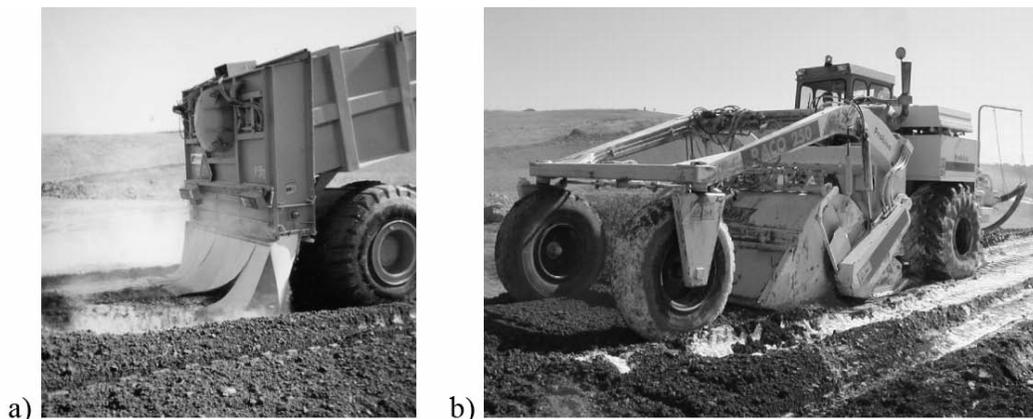
**Fig. 2** – Granulometria antes e após a compactação.

A presença de minerais argilosos torna as margas adequadas para o tratamento com cal pois permite que ocorram as reacções químicas inerentes ao tratamento. Basicamente, estas consistem na troca de catiões  $\text{Ca}^{2+}$  da cal com os silicatos e aluminatos dos minerais argilosos (Bell, 1993). Quanto mais plástico for o solo maior quantidade há de catiões para troca e por isso é que o tratamento é aconselhável para solos argilosos.

No dimensionamento dos aterros (Cenorgeo, 2002), a prescrição da quantidade de cal a utilizar foi baseada nos resultados de ensaios efectuados em amostras com vários teores em cal (massa de cal por massa de sólidos), porque a relação entre o teor em cal e as melhorias introduzidas no comportamento do solo não é directamente proporcional (Clare e Cruchley, 1957 e Bell, 1993, por exemplo). Ainda na fase de Projecto foram efectuados ensaios para vários teores de cal (limites de

Atterberg, ensaios de compactação, CBR e ensaios de expansibilidade), tendo-se adoptado um teor em cal de 3,5 %.

Em obra foi utilizada cal viva da Lusical. A cal (em pó) foi aplicada com um espalhador (Figura 3a) sobre as margas hidratadas previamente. A passagem de uma fresadora (Figura 3b) misturava o solo com a cal e com a água assegurando uma mistura homogénea. A compactação foi efectuada com um cilindro vibrador liso. Até à data, a experiência em várias obras mostra que as boas características hidro-mecânicas conseguidas com o tratamento se mantém vários anos após a sua aplicação (Bell, 1993 e Khattab *et al.*, 2007, por exemplo).



**Fig. 3** – Equipamentos utilizados em obra para adição da cal: (a) Espalhadora, (b) Fresadora.

O controlo da compactação em obra foi efectuada com base nas curvas de compactação determinadas sempre que se exploravam margas de novas manchas de empréstimo. Foram efectuados ensaios de compactação com energia igual à aplicada em obra (compactação pesada) de solo e de solo-cal. O Quadro 1 apresenta exemplos das curvas adoptadas em obra.

**Quadro 1** – Curvas de compactação do solo e do solo-cal.

Material	Solo	Solo-cal (7 dias de cura, dados de obra)
$w_{opt}$ (%)	11,8	15,9
$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,3	17,9

Pela análise das curvas de compactação do solo e do solo-cal é possível constatar que a adição de cal reduz o peso volúmico seco máximo e aumenta o teor em água óptimo. Tal resultado era o esperado (Bell, 1993, por exemplo) e justifica-se pelo facto de ocorrer floculação após a adição da cal (redução do peso volúmico seco) e de ser necessário adicionar maior quantidade de água para sua hidratação (aumento do teor em água óptimo).

### 3 – INSTRUMENTAÇÃO

No talude, a cerca de 3m do topo, foram instaladas duas calhas inclinométricas para medição dos deslocamentos verticais (sistema de leitura INCREX) e horizontais (sistema de leitura tradicional) durante a construção e nos dois anos seguintes. A sua localização apresenta-se na Figura 4

(PK 1+150 e PK 1+250). O aterro tem cerca de 14 m de altura no local onde foram instalados os instrumentos.

O INCREX (Figura 5a) é um sistema para medições extensométricas de alta definição (precisão de  $\pm 0,02$  mm, independentemente do comprimento do instrumento), 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 permite detectar os movimentos dos anéis, quantificando-os através de indução electromagnética entre as espiras do torpedo e os anéis. A sua instalação durante a construção foi descrita por Cardoso *et al.* (2006).

Infelizmente, as duas calhas foram partidas durante a construção e as leituras perderam a continuidade no tempo. As leituras consideradas neste artigo são as que foram efectuadas no final da construção, admitindo que a reparação das calhas não afectou a referenciação dos anéis situados a maiores profundidades. As leituras efectuadas serão apresentadas quando se efectuar a sua comparação com os valores de cálculo.

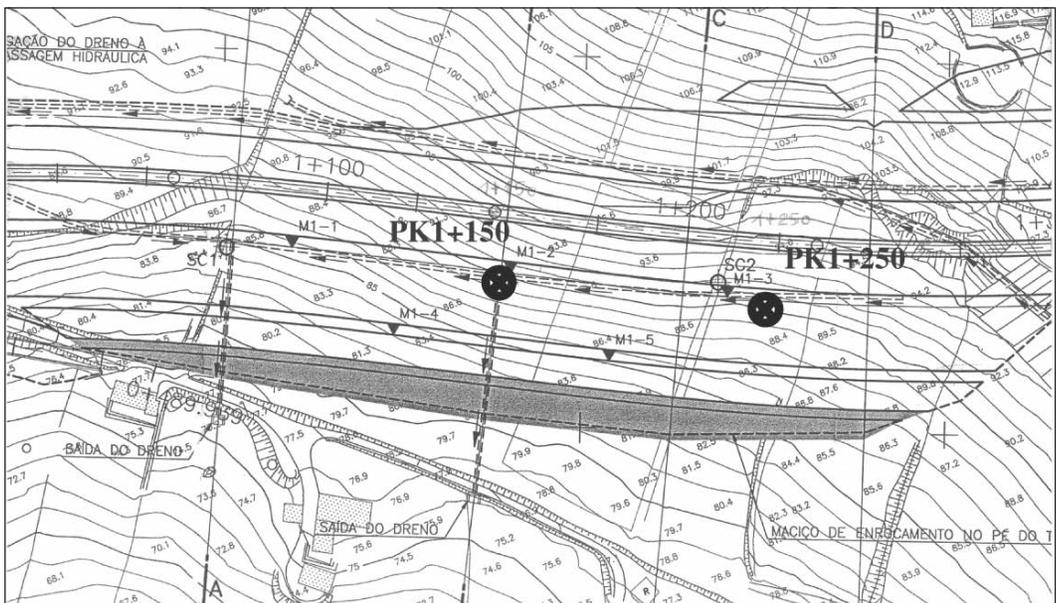


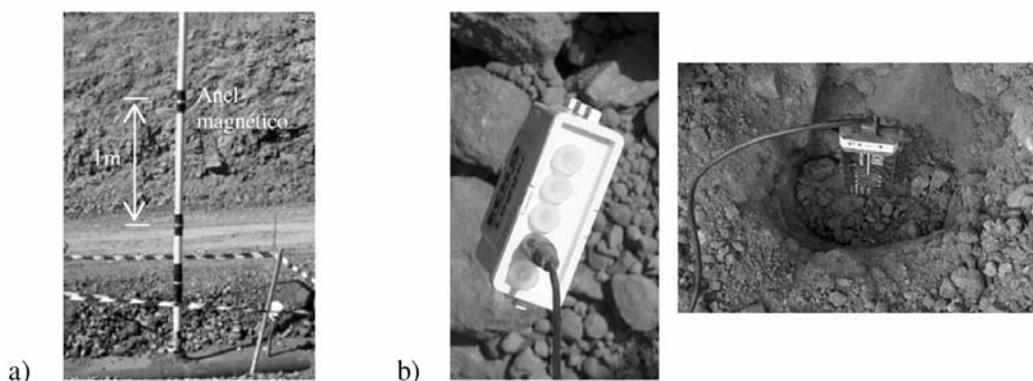
Fig. 4 – Localização dos dois inclinómetros (distanciados longitudinalmente de 100 m).

Para a medição de grandezas que permitem efectuar o cálculo das sucções no solo foram instalados sensores resistivos da Decagon, denominados ECH<sub>2</sub>O (Figura 5b), que medem variações do teor em água ao longo do tempo. Com base no teor em água é possível obter os valores de sucção, utilizando para isso a curva de retenção do solo que será apresentada posteriormente.

Os sensores ECH<sub>2</sub>O, com 20 cm de comprimento, foram instalados em dois perfis verticais (P1 e P2) próximos dos inclinómetros (cerca de 2 m segundo a direcção longitudinal e mantendo a mesma distância à berma). Cada perfil tem sete sensores espaçados verticalmente 1,5 m entre si. Na Figura 5b é visível que foram instalados na posição vertical para permitir o eventual escoamento de água em seu redor. O solo envolvente dos sensores mais próximos da fundação (5 sensores) é o do núcleo do aterro. O solo envolvente dos restantes (2 sensores ECH<sub>2</sub>O) é solo-cal. Durante a instalação houve cuidados especiais para garantir um bom contacto solo-sensor e um peso volú-

mico seco aparente do solo semelhante ao do aterro da zona envolvente. Durante a instalação, foram ainda recolhidas amostras do solo para determinar o seu teor em água em laboratório e foi efectuada uma leitura do sensor para permitir aferir o grau de compactação do solo envolvente. Foram efectuadas 3 leituras diárias e registadas num datalogger (Figura 5b) enquanto os sensores se mantiveram em funcionamento (cerca de 12 meses após a sua instalação).

A calibração dos sensores  $ECH_2O$  foi efectuada em laboratório e consiste na determinação, para cada peso volúmico aparente seco, da relação entre a voltagem medida e o teor em água do solo. Os sensores são sensíveis a diferentes densidades do material e este dado é importante para se ter a noção do erro cometido nas leituras, especialmente porque é difícil, durante a instalação dos sensores, compactar o solo envolvente de forma a obter o peso volúmico seco aparente semelhante ao do corpo do aterro. Para a calibração dos sensores, prepararam-se três provetes com teores em água diferentes e para três pesos volúmicos secos diferentes ( $13,1 \text{ kN/m}^3$ ,  $17,2 \text{ kN/m}^3$  e  $18,2 \text{ kN/m}^3$ ). Os pesos volúmicos secos foram escolhidos de modo a obter-se dados relativos a diferentes compactações, prevendo a eventualidade de não se conseguir, ao instalar os sensores  $ECH_2O$ , obter um peso volúmico seco elevado.



**Fig. 5** – Instrumentação instalada no AT1: (a) Instrumento INCREX; (b) Medidor de teor em água  $ECH_2O$  da Decagon e respectivo datalogger.

A calibração dos sensores  $ECH_2O$  apresenta-se na Figura 6 e confirma que os sensores são sensíveis a diferentes densidades do solo pois a cada peso volúmico seco aparente corresponde uma recta diferente. No entanto o declive das rectas obtido por regressão linear é semelhante (o valor médio dos declives apresentados na Figura 6 é 19,9), apenas variando a ordenada na origem, que é crescente com o peso volúmico. Para a conversão da voltagem medida em teores em água adoptou-se a recta correspondente à do peso volúmico seco de  $17,2 \text{ kN/m}^3$ , escolhida em função da localização dos pontos obtidos com os dados lidos imediatamente após a instalação dos sensores. Para os sensores colocados em solo-cal admitiu-se, simplifadamente, que a calibração era idêntica à dos sensores colocados em solo, dependendo apenas do peso volúmico aparente do solo-cal da camada envolvente.

## 4 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

### 4.1 – Características gerais das margas da Abadia

Na construção dos aterros da A10 foram utilizadas margas cinzentas, não alteradas. O peso volúmico das partículas sólidas é de  $27,5 \text{ kN/m}^3$ . A análise mineralógica foi descrita anteriormente.

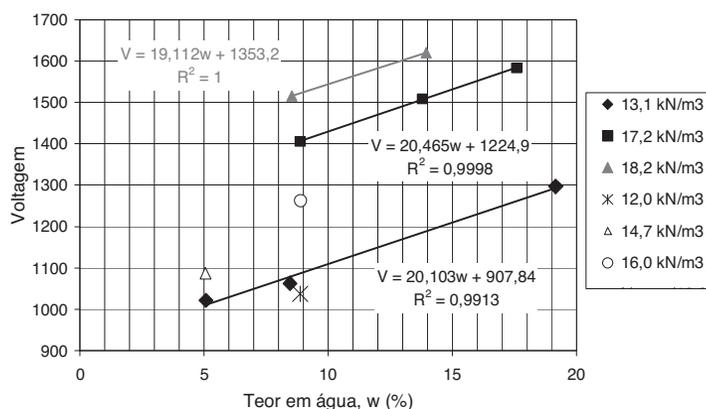


Fig. 6 – Curvas de calibração dos sensores ECH<sub>2</sub>O (Maranha das Neves e Cardoso, 2006).

Os limites de Atterberg (limite de liquidez 37 % e índice de plasticidade 12 %) mostram baixa plasticidade para a fração fina. De acordo com o Quadro 2, estes valores correspondem a uma expansibilidade média a baixa.

Quadro 2 – Relações entre os limites de consistência e a expansibilidade expectável sugeridas por vários autores e sintetizadas por White e Bergeson (2002).

Autores	Relação e expansibilidade		
Holtz e Gibbs	IP<18%		Baixa
	15%<IP<28%		Média
	25%<IP<41%		Alta
	IP>35%		Muito alta
Seed <i>et al.</i>	IP<15%		Baixa
	10%<IP<30%		Média
	20%<IP<55%		Alta
	IP>40%		Muito alta
U.S. Department of the Army	$w_L < 50\%$	IP<15%	Baixa
	$50\% \leq w_L \leq 60\%$	10%<IP<30%	Média
	$w_L > 60\%$	20%<IP<55%	Alta

Foram realizados ensaios de compressão simples (ASTM D 2938-95) e ensaios de compressão diametral (ensaios brasileiros, ASTM D 3967-95) em provetes de rocha com sucções diferentes impostas através da técnica de equilíbrio de vapor. Os resultados apresentam-se na Figura 7 e confirmam que a rigidez e a resistência aumentam com a sucção. De acordo com os resultados dos ensaios brasileiros espera-se alguma resistência à tracção para as amostras saturadas.

Na Figura 7 também se apresenta a curva de retenção das margas, que consiste na relação entre o teor de água (ou grau de saturação) e a sucção instalada (Fredlund e Rahardjo, 1993). Para a imposição de sucções utilizou-se a técnica de equilíbrio de vapor em que a sucção total,  $\psi$ , é imposta com soluções normalizadas de sais cuja concentração permite impôr uma dada humidade relativa,  $RH$  (Romero, 2001). A relação entre a sucção e a humidade relativa é dada pela lei psicrométrica (equação 1) (Fredlund e Rahardjo, 1993), onde  $T$  é a temperatura absoluta,  $R$  é a constante universal dos gases (8,31 J/(mol K)),  $M$  é a massa molecular da água (18,018 kg/mol) e  $\rho_w$  é a massa volúmica da água (998 kg/m<sup>3</sup> a 20°C).

$$\psi = -\frac{RT\rho_w}{M}\ln(RH) \quad (1)$$

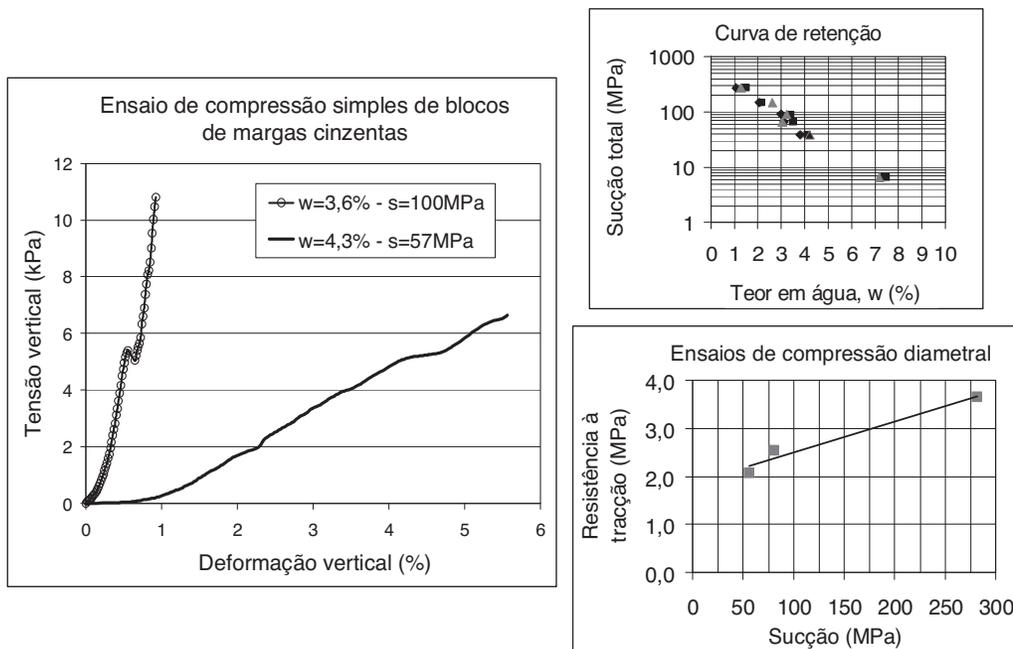


Fig. 7 – Caracterização das margas cinzentas: ensaios de compressão simples, curva de retenção e ensaios de compressão diametral (ensaio brasileiro).

## 4.2 – Margas compactadas

Foram efectuados ensaios de laboratório em amostras de margas com e sem tratamento, compactadas em condições semelhantes às de obra. Os objectivos dos ensaios foram caracterizar o potencial expansivo das margas, avaliar os efeitos do tratamento com cal nas suas características hidro-mecânicas e obter os parâmetros necessários para a calibração do modelo numérico do aterro. Salvo referência em contrário, as amostras ensaiadas foram compactadas nos pontos do intervalo  $[w_{opt}, w_{opt}+2\%]$  das curvas respectivas apresentadas anteriormente no Quadro 1, de modo a simular as condições de obra.

### 4.2.1 – Ensaio de expansibilidade

Em células edométricas foram efectuados ensaios de embebição sob tensão vertical constante (Oliveira, 2006 e Maranhã das Neves e Cardoso, 2006), tendo-se medido as deformações daí resultantes (norma ASTM D4546-96 (método B)). Na preparação das amostras foram deixados 2 mm de folga no topo dentro do anel para permitir que estas continuassem confinadas lateralmente em caso de expansão devido a molhagem.

Foram efectuados ensaios em amostras compactadas com energia de compactação leve e energia de compactação pesada e, para cada energia, nos pontos com teor em água  $w_{opt}-2\%$ ,  $w_{opt}$  e  $w_{opt}+2\%$ . Prepararam-se três amostras em cada ponto, que foram embebidas sob tensões verticais diferentes (30 kPa, 100 kPa e 300 kPa). O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos para os pontos correspon-

dentos à curva de compactação pesada. As deformações apresentadas,  $\varepsilon_v$ , foram calculadas com a equação 2, onde  $dh$  é a variação da altura e  $h_0$  é a espessura inicial da amostra.

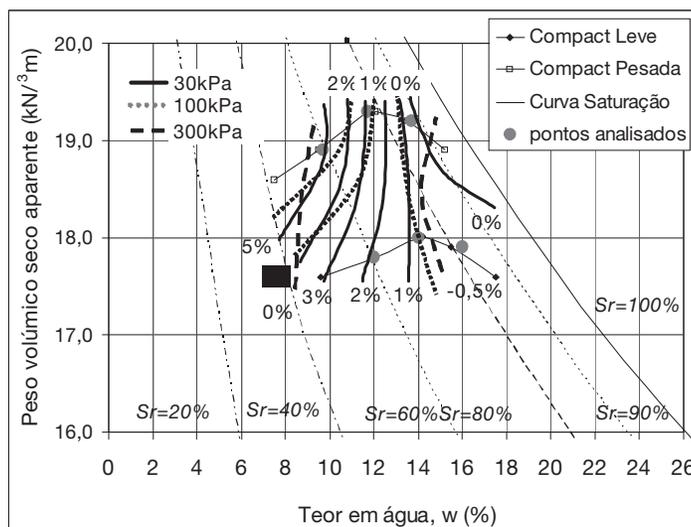
$$\varepsilon_v = \frac{dh}{h_0} \times 100 \quad (2)$$

**Quadro 3** – Deformações\* medidas nos ensaios de expansibilidade de margas cinzentas para diferentes tensões verticais e para a energia de compactação pesada (Oliveira, 2006).

$w_{\text{ópt}}-2\%$			$w_{\text{ópt}}$			$w_{\text{ópt}}+2\%$		
30kPa	100kPa	300kPa	30kPa	100kPa	300kPa	30kPa	100kPa	300kPa
5,43%	2,66%	-0,49%	2,84%	1,26%	-0,17%	0,0%	-0,12%	-0,29%

\*Valores positivos: empolamento. Valores negativos: colapso.

As cartas de expansibilidade apresentadas na Figura 8 para cada tensão vertical foram elaboradas com os resultados obtidos para as deformações devido a embebição considerando os pontos compactados com as duas energias de compactação.



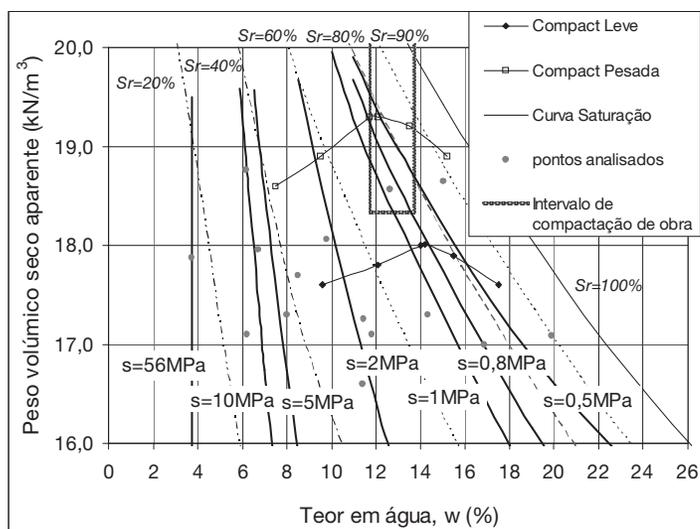
**Fig. 8** – Carta de expansibilidade das margas compactadas medidas na embebição sob tensões verticais diferentes (Maranha das Neves e Cardoso, 2008).

De acordo com a Figura 8 e com o Quadro 3 é possível constatar que as amostras compactadas do lado seco apresentam maior expansibilidade do que as amostras compactadas do lado húmido e que a expansibilidade diminuiu com o aumento da tensão vertical. Tal pode explicar-se pelas diferenças na estrutura do material compactado com diferentes humidades pois as amostras compactadas do lado seco apresentam uma estrutura mais floculada, logo mais deformável (Suriol *et al.*, 2002 e Alonso, 2004). Este tipo de comportamento pode ser simulado recorrendo a um modelo de comportamento aplicável a solos não saturados tal como o *Barcelona Basic Model*, BBM (Alonso *et al.*, 1990).

Foi efectuado outro estudo (Maranha das Neves e Cardoso, 2006) onde foram compactadas várias amostras com diferentes energias de compactação e teores em água, de modo a obter vários

pontos do gráfico teor em água vs. peso volumico seco aparente. A sucção foi medida em cada amostra para a elaboração da carta de sucções que se apresenta na Figura 9. A medição de sucções nessas amostras foi efectuada com dois tipos de psicrómetros: transistores SMI (Dimos, 1991 e Cardoso *et al.*, 2007) e o equipamento Water Dewpoint Potentiometer, WP4, da Decagon (WP4, 2000, Leong *et al.*, 2003, Cardoso *et al.*, 2007). Basicamente, o modo de funcionamento destes equipamentos consiste em medir as diferenças de temperatura devidas ao processo de equilíbrio entre a humidade relativa do solo e a humidade da câmara isolada onde a amostra é colocada durante a medição da sucção. A variação de temperatura é relacionada com a variação de humidade relativa/sucção através de relações de equilíbrio termodinâmico (lei psicrométrica equação 1).

Na embebição (sucção final nula) a variação de sucção é maior nas amostras compactadas no lado seco do que nas amostras compactadas no lado húmido (maior grau de saturação), justificando as maiores expansões medidas nas amostras compactadas do lado seco (Quadro 3). No entanto, independentemente do lado da curva, verifica-se que os valores medidos são relativamente baixos, o que se pode justificar pelo facto de as margas terem potencial expansivo médio a baixo, referido anteriormente (Quadro 2), e também porque as variações de sucção devido à embebição são baixas (inferiores a 2 MPa). Pela análise da Figura 9 é possível verificar que, no intervalo de compactação prescrito, as amostras têm um grau de saturação superior a 70 % a que correspondem sucções inferiores a 1,2 MPa. Deste modo não serão esperadas deformações relevantes no aterro em caso de molhagem.



**Fig. 9** – Carta de sucções das margas compactadas (Maranha das Neves e Cardoso, 2006).

#### 4.2.2 – Efeitos da adição da cal

Os efeitos da adição da cal foram avaliados através da comparação dos resultados de ensaios idênticos realizados em provetes de margas compactadas sem e com a cal (3,5 % de cal), denominadas respectivamente por solo e solo-cal.

O Quadro 4 apresenta algumas características importantes da fracção fina verificando-se que o tratamento não altera significativamente o limite de liquidez, mas aumenta o limite de plasticida-

de de 22 % para 29 % e reduz o índice de plasticidade de 12 % para 7 %, traduzindo a diminuição da plasticidade do solo e da actividade da fracção argilosa. Trata-se de uma melhoria global nas características de trabalhabilidade e de expansibilidade, que altera a classificação da fracção fina de CL para ML.

Tal melhoria pode ser explicada pelas reacções químicas que ocorrem logo após a adição da cal e da água, pois forma-se uma espécie de gel que envolve os finos do solo, agregando-os (Bell, 1993, por exemplo). Com a cura da cal, a médio prazo, o gel endurece formando-se as pozolanas que correspondem à cimentação do solo. A cimentação é que explica o acréscimo de resistência e de rigidez observado após o tratamento. Esta reacção é acompanhada de subida do pH pois a hidratação da cal é uma reacção alcalina. Tal confirmou-se em obra pois o pH medido com papel indicador universal numa amostra de margas após o tratamento subiu de 7 para 12, confirmando que a reacção se estava a processar.

**Quadro 4** – Características das margas antes (solo) e após o tratamento (solo-cal).

	<b>Limite de liquidez</b>	<b>Limite de plasticidade</b>	<b>Índice de plasticidade</b>	<b>Classificação da fracção fina</b>
Solo	37 %	25 %	12 %	CL
Solo-cal	36 %	29 %	7 %	ML

Através dos resultados de porosimetrias por intrusão de mercúrio em amostras de solo e de solo-cal (Figura 10) foi possível constatar que a adição de cal não alterou significativamente a distribuição dos vazios mas a sua dimensão média diminuiu de 149 nm para 110 nm. Este resultado parece ser incoerente se se considerar que o peso volúmico aparente seco do solo-cal é inferior ao do solo, esperando-se por isso vazios maiores. No entanto, esses vazios foram preenchidos com os produtos da reacção da cal com o solo (fotografias de microscópio electrónico apresentadas por Locat *et al.*, 1990, e Lav e Lav, 2000, mostram a formação de cristais após o tratamento com cal respectivamente de argilas e de cinzas volantes). A diminuição das dimensões do volume de vazios explica a diminuição da permeabilidade saturada, pois após o tratamento esta reduziu-se de  $8,7 \times 10^{-11}$  m/s para  $4,9 \times 10^{-11}$  m/s.

Foram determinadas as curva de retenção do solo e do solo-cal (Figura 11), que foram ajustadas pela equação 3 de van Genuchten (1980), onde  $S_e$  é o grau de saturação e a sucção é a diferença entre a pressão de ar,  $P_g$  ( $P_g = p_{atm} = 0,1$  MPa), e a pressão de líquido,  $P_l$ .  $P$  e  $\lambda$  são parâmetros ajustados com os dados experimentais (Quadro 5). As diferenças nas duas curvas de retenção (Figura 11) podem ser explicadas pelas diferenças nas dimensões dos vazios (Figura 10) após o tratamento (Russo *et al.*, 2007).

$$S_e = \left[ 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (3)$$

Durante a secagem, para valores de teor em água em que se pode considerar que esta se encontra livre para percolar é possível medir maiores sucções no solo-cal do que no solo, acontecendo o inverso na molhagem. A maior histerese medida no solo-cal deve-se ao estreitamento dos vazios, o que dificulta a percolação.

Para calibração do modelo numérico do aterro foram realizados ensaios edométricos e ensaios triaxiais, todos eles em amostras compactadas saturadas, e ensaios de compressão não confinada em amostras compactadas não saturadas. A comparação dos resultados também permite avaliar os efeitos do tratamento que, tal como esperado, aumentou significativamente a rigidez e a resistência.

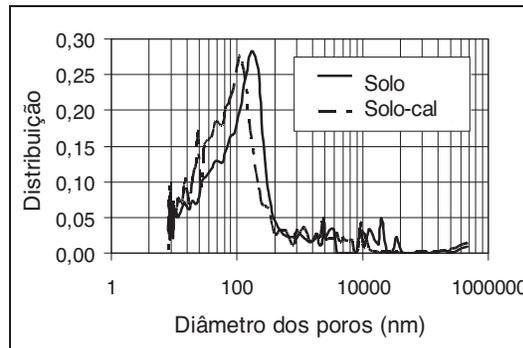


Fig. 10 – Porosimetria por intrusão de mercúrio (Maranha das Neves e Cardoso, 2008).

Quadro 5 – Parâmetros de calibração das curvas de retenção.

Material	Solo		Solo-cal	
	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem
$P$ (MPa)	0,18	0,31	0,08	0,51
$\lambda$	0,23	0,23	0,20	0,25

Os resultados dos ensaios edométricos (ASTM D 2435-96) apresentam-se no Quadro 6 e na Figura 12a para o solo e Figura 12b para o solo-cal. O Quadro 6 também apresenta o valor do índice de recompressibilidade isotrópica para variações de tensão isotrópica,  $\kappa$ , calculada com os dados do ensaio edométrico admitindo, simplificadamente, que as tensões horizontais eram metade das tensões verticais. Tal como esperado e reportado na bibliografia (Rao e Shivananda, 2005, por exemplo), o tratamento com cal diminuiu a compressibilidade das margas ( $m_{v,solo} = 2,4m_{v,solo-cal}$  e  $C_{c,solo} = 1,93C_{c,solo-cal}$ ). O coeficiente de consolidação,  $c_v$ , aumentou após o tratamento, o que é coerente com a diminuição do índice de plasticidade  $e$ , consequentemente da actividade da fracção argilosa (Bell, 1993).

Aproveitou-se a realização dos ensaios edométricos saturados para medir a expansibilidade do solo e do solo-cal, pois a embebição foi efectuada sob duas tensões verticais diferentes (25 kPa e

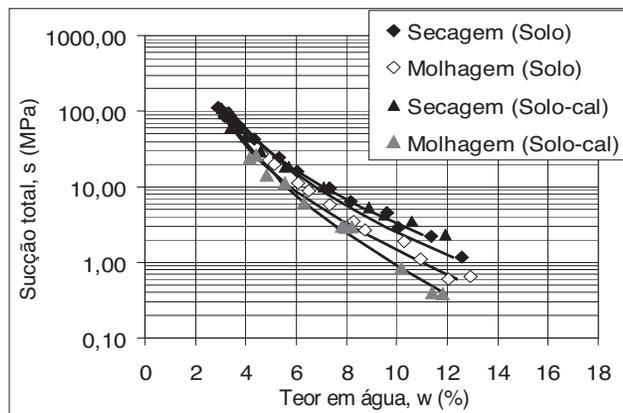
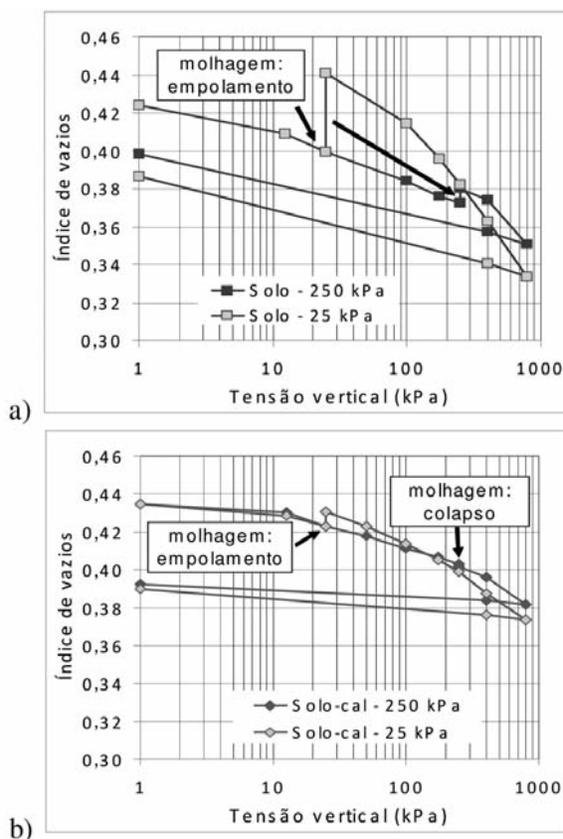


Fig. 11 – Curvas de retenção (Maranha das Neves e Cardoso, 2008).

**Quadro 6** – Dados relativos à compressibilidade saturada do solo e do solo-cal

Ensaio	$c_v$ (mm <sup>2</sup> /min)	$m_v$ (MPa <sup>-1</sup> )	$C_s$	$C_c$	$\kappa$	$\sigma_{ced}$ (kPa)
Solo (Lynce de Faria, 2007)	10,60	0,0502	0,022	0,185	0,008	≅ 1000
Solo-cal (Godinho, 2007)	14,23	0,0209	0,008	0,096	0,003	≅ 1250



**Fig. 12** – Ensaios edométricos com embebição: (a) solo; (b) solo-cal.

250 kPa). Os ensaios edométricos das amostras embebidas sob tensão vertical de 25 kPa forneceram a informação relativa à compressibilidade saturada (Quadro 6). O Quadro 7 apresenta a comparação dos resultados de ensaios de expansibilidade realizados nos dois materiais (deformações calculadas com a equação 2). Com os resultados destes ensaios foi possível determinar o valor do índice de recompressibilidade isotrópica para variações de sucção,  $\kappa_s$  (Quadro 7) (Alonso *et al.*, 1990). Os resultados obtidos confirmam que a adição de cal reduziu o potencial expansivo das margas pois as deformações elásticas devido a variações de sucção reduzem-se cerca de 4 vezes ( $\kappa_{s,solo-cal} = 4\kappa_{s,solo}$ ). Devido à adição da cal o potencial expansivo das margas alterou-se de médio para baixo, o que é confirmado pela redução do índice de plasticidade e pela classificação apresentada anteriormente no Quadro 2.

**Quadro 7** – Resultados dos ensaios de expansibilidade

Material	Solo (Lynce de Faria, 2007)			Solo-cal (Godinho, 2007)		
	$\varepsilon_v$ (%)		$\kappa_s$	$\varepsilon_v$ (%)		$\kappa_s$
$\sigma_v = 25$ kPa	2,90	Empolamento	0,0013	0,55	Empolamento	0,0003
$\sigma_v = 250$ kPa	0,53	Empolamento		-0,12	Colapso	

O tipo de deformações medidas durante a saturação também permite confirmar o valor da tensão de cedência. Por aplicação do *Barcelona Basic Model* (BBM), um solo exhibe empolamento se a molhagem é feita sob tensões inferiores à tensão de cedência saturada (comportamento elástico), ou empolamento seguido de colapso caso contrário (comportamento elasto-plástico). Constata-se que a tensão de cedência do solo é superior a 250 kPa pois regista-se empolamento na saturação sob esta tensão. Mas a tensão de cedência do solo-cal deve estar próxima deste valor pois na molhagem, para esta tensão, já se regista um pequeno colapso.

Foram realizados ensaios triaxiais saturados consolidados não drenados (norma ASTM D 4767-95) com medição das pressões intersticiais. Para os dois materiais adoptaram-se 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa para tensões de consolidação. O carregamento foi efectuado com aumento da tensão vertical. O Quadro 8 apresenta os valores do módulo de distorção,  $G$ , e do ângulo de resistência ao corte no estado crítico,  $\phi'_{crítico}$ , medidos nos ensaios. Como a adição de cal estabelece ligações cimentícias entre as partículas, apresentam-se, no caso do solo-cal, os valores de  $c'_{pico}$  e  $\phi'_{pico}$ . Tal como seria de esperar, a adição da cal aumentou a rigidez e a resistência das margas.

**Quadro 8** – Síntese dos resultados dos ensaios triaxiais e dos ensaios de compressão simples

	Ensaio triaxiais (saturados)				Ensaio de compressão simples (não saturados)	
	$G$ (MPa)	$c'_{pico}$ (kPa)	$\phi'_{pico}$	$\phi'_{crítico}$	$E_u$ (MPa)	$S_u$ (kPa)
Solo (Lynce de Faria, 2007)	20	0	31°	31°	50	325
Solo-cal (Godinho, 2007)	60	12	53°	37°	180	560

O comportamento dos provetes de solo-cal mostrou que este se encontrava fortemente sobreconsolidado para as tensões de consolidação mais baixas (50 kPa e 100 kPa). Para os provetes de solo, o grau de sobreconsolidação não foi suficientemente elevado para se observarem comportamentos dilatantes. Na rotura dos vários provetes de solo não se observou uma superfície bem marcada (Figura 13a) confirmando a ductilidade medida durante o corte. Para os provetes de solo-cal, no entanto, a adição da cal relevou-se importante visto ter sido observado um comportamento marcadamente dilatante. Independentemente da tensão de consolidação, foram medidas durante os ensaios pressões intersticiais negativas, valores de tensão deviatória de pico e rotura frágil com a formação de uma superfície de deslizamento bem marcada (Figura 13b). Tal justifica-se pela já referida cimentação do solo devido à adição da cal. Refere-se ainda que a saturação dos provetes de solo-cal permitiu a hidratação da cal e o tempo em que decorreu (superior a 30 dias), que foi o tempo de cura, possivelmente permitiu a formação das pozolanas que permitiram aumentar significativamente a resistência das margas.

O Quadro 8 também apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples (resistência não drenada,  $S_{ur}$ , e módulo de Elasticidade,  $E$ ) em amostras não saturadas de solo e de solo-cal. O valor de  $E$  corresponde a um módulo secante (em 0,1% da deformação vertical).

Os resultados dos ensaios confirmam que o tratamento com cal aumenta a rigidez ( $G_{\text{solo-cal}}=3G_{\text{solo}}$  e  $E_{\text{solo-cal}}=3,5E_{\text{solo}}$ ) e a resistência das margas, tanto saturada ( $\phi'_{\text{crítico,solo}}=31^\circ$  e  $\phi'_{\text{crítico,solo-cal}}=37^\circ$ ), como não saturada ( $S_{u,\text{solo-cal}}=1,8S_{u,\text{solo}}$ ). Relativamente às margas tratadas com cal, os resultados dos ensaios triaxiais saturados e os resultados dos ensaios de compressão simples não saturados não são directamente comparáveis pois os tempos de cura são diferentes devido à duração de cada ensaio.

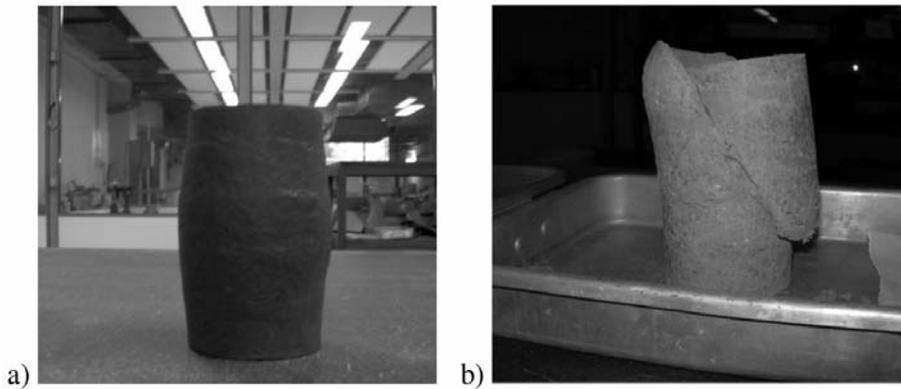


Fig. 13 – Provetas após o ensaio (tensão de consolidação de 100 kPa): (a) solo e (b) solo-cal.

## 5 – MODELAÇÃO DO ATERRO AT1

### 5.1 – CODE\_BRIGHT

Os programas de cálculo comerciais utilizados em projecto geotécnico geralmente não permitem o cálculo de deformações devido ao colapso ou empolamento do material após molhagem. A molhagem ou secagem do solo corresponde a uma variação de sucção pelo que é necessário dispôr de modelos de comportamento que incluem a sucção como variável de estado para que seja possível calcular deformações devido à sua variação. Adoptou-se o *Barcelona Basic Model*, BBM (Alonso *et al.*, 1990) para modelo de comportamento mecânico. Consideraram-se apenas as deformações volumétricas plásticas,  $d\varepsilon_v$ , calculadas (equação 4) em função do índice de vazios inicial,  $e_0$ , da variação de tensão,  $p'$ , e da variação de sucção,  $s$ . Os parâmetros  $\kappa$  e  $\kappa_s$  foram definidos nos Quadros 6 e 7, respectivamente. Admitiu-se que o solo e o solo-cal têm comportamento elástico pois face às tensões instaladas em resultado da compactação e tendo em atenção que a sucção vai diminuir, não são atingidas as duas superfícies de cedência do modelo, isto é, *loading collapse* LC e *suction increase* SI (Alonso *et al.*, 1990).

$$d\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = -\frac{\kappa}{1 + e_0} \Delta \ln(-p') - \frac{\kappa_s}{1 + e_0} \Delta \ln \left[ \frac{s + 0,1}{0,1} \right] \quad (4)$$

As tensões médias de compressão,  $p'$ , são tensões efectivas e são calculadas com a equação 5. A sucção,  $s$ , é calculada com a equação 6.  $P_g$  e  $P_l$  foram definidos anteriormente e  $p$  é a tensão total média de compressão.

$$p' = p - \max\{P_g; P_l\} \quad (5)$$

$$s = P_g - P_l \quad (6)$$

Para o cálculo utilizou-se o programa CODE\_BRIGTH (Olivella *et al.*, 1996 e UPC-DLT, 2002), que efectua uma análise hidro-mecânica acoplada através do balanço de massa de sólidos, balanço de massa de água na fase líquida e vapor e do equilíbrio de tensões. O solo é assumido como um meio poroso deformável, logo as deformações correspondem a variações de porosidade que afectam o fluxo de líquido e de vapor no seu interior. Por outro lado, como se está a utilizar um modelo de comportamento não saturado, as variações de sucção (ou da diferença entre a pressão de líquido e a pressão de gás) são responsáveis por deformações.

A pressão de líquido é obtida através do fluxo de água calculado com a lei de Darcy considerando que a permeabilidade  $k$  (equação 7) é função da viscosidade da água,  $\mu_l$  ( $\mu_l = 1 \times 10^{-9}$  MPa.s a 20°C), da permeabilidade intrínseca saturada,  $k_{int}$ , e da permeabilidade intrínseca da fase líquida do material,  $k_{rl}$ . Esta última varia com o grau de saturação,  $S_e$  (equação 8, onde  $A=1$  e  $\alpha=3$  são constantes adoptadas por defeito no programa). O grau de saturação é definido em função da pressão de água presente no solo e é calculado com a curva de retenção (equação 3).

$$k = \frac{k_{int} k_{rl}}{\mu_l} \quad (7)$$

$$k_{rl} = AS_e^\alpha \quad (8)$$

Admitindo que o solo é um meio poroso deformável, a permeabilidade intrínseca saturada,  $k_{int}$ , depende da porosidade  $n$  e é calculada pela expressão de Kozeny (equação 9), onde  $k_0$  é a permeabilidade intrínseca saturada de referência medida para a porosidade  $n_0$ . A porosidade define-se através do índice de vazios ( $n_0 = 0,34$  para o solo e  $n_0 = 0,34$  para o solo-cal, na compactação).

$$k_{int} = k_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \quad (9)$$

Os valores para as várias constantes adoptados na calibração do modelo de cálculo foram definidos com base nos ensaios descritos anteriormente (Quadros 5, 6, 7 e 8) e apresentam-se no Quadro 9. Considerou-se apenas o ramo de molhagem da curva de retenção.

## 5.2 – Sucção inicial

Para o cálculo é necessária uma sucção inicial cuja variação, na molhagem ou secagem, é responsável por deformações (equação 4). A sucção no solo também afecta a sua rigidez para variações de tensão média efectiva (quanto mais seco mais rígido é o solo), no entanto, como se está admitir comportamento elástico pode-se desprezar a sua influência e adoptar uma compressibilidade  $\kappa$  constante (Alonso *et al.*, 1990).

A determinação da sucção inicial para o modelo foi feita com base nas leituras da instrumentação de obra. Foi possível obter leituras fiáveis durante o ano seguinte à instalação dos sensores, mas alguns deles deixaram de funcionar ou apresentam leituras oscilantes. A Figura 14a mostra a evolução das leituras no tempo para o perfil vertical P2 (P2-1 a P2-5 instalados em solo; P2-6 e P2-7 instalados em solo-cal). Nesta figura observa-se uma fase inicial que corresponde ao equilíbrio do

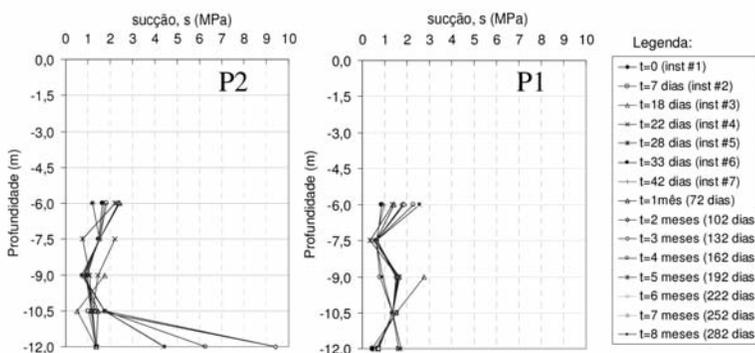
**Quadro 9** – Constantes para calibração do modelo do aterro.

Parâmetro	Significado	Solo	Solo-cal
$\kappa$	índice de recompressibilidade isotrópica para variações de tensão média efectiva	0,009	0,003
$\kappa_s$	índice de recompressibilidade isotrópica para variações de sucção	0,0013	0,0003
$G$	Módulo de distorção	20	70
$\nu$	Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
$\lambda$	Parâmetro de ajuste da curva de retenção	0,23	0,20
$P$	Parâmetro de ajuste da curva de retenção	0,18 MPa	0,08 MPa
$k_o$	Permeabilidade intrínseca (isotrópica)	$9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$	$5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$
$n_o$	Porosidade inicial	0,34	0,34
$A$	Constante	1	1
$\alpha$	Constante	3	3

teor em água da camada logo após a sua compactação. Pode-se considerar que o teor em água tende para 15 % apesar da dispersão nas leituras. Consta-se ainda que não é possível fazer distinção entre os valores lidos nos sensores instalados em solo e nos instalados em solo-cal.



a) evolução das leituras de teor em água no tempo (perfil vertical P2)



b) Evolução das sucções em profundidade para os dois perfis verticais instrumentados

**Fig. 14** – Leituras dos sensores de teor em água e sucções correspondentes.

A Figura 14b mostra a evolução das leituras no tempo para os vários sensores instalados nos dois perfis instrumentados, após terem sido convertidas para sucção. Nessa figura é possível constatar que os sensores são sensíveis às oscilações das propriedades (teor em água e peso volúmico seco aparente) na compactação das diferentes camadas de aterro onde foram instalados, mas que os valores medidos em todas as profundidades tendem para valores entre 0,5 MPa e 2 MPa após o tempo inicial de equilíbrio referido anteriormente. Da análise desta figura pode-se assumir que a sucção no aterro é constante em profundidade, adoptando-se o valor de 1,2 MPa que corresponde ao valor médio do intervalo de oscilação das leituras.

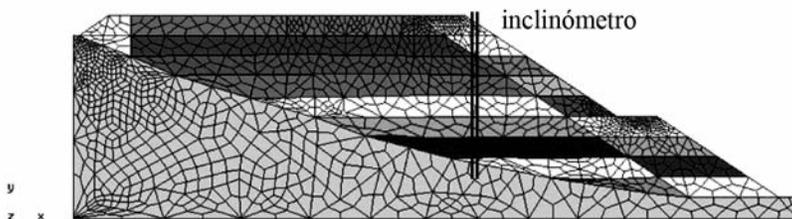
Na ausência de instrumentação há várias possibilidades para definir o valor a adoptar para a sucção inicial. Uma delas é através da curva de retenção, que relaciona o teor em água na compactação com a sucção correspondente (aproximadamente 1,2 MPa para os dois materiais). A outra é com base na carta de sucções (Figura 9), obtendo-se sucções inferiores a 1,2 MPa no intervalo de compactação (para o solo). Os valores obtidos nestas duas alternativas são semelhantes e concordantes com os valores lidos pela instrumentação, pelo que se adoptou 1,2 MPa para sucção inicial nos dois materiais, admitindo que todas as camadas foram compactadas nas mesmas condições.

Nos cálculos antes da molhagem manteve-se a sucção constante em profundidade porque se desprezou possíveis desvios no teor em água de compactação das várias camadas. Também se desprezou a eventual secagem do material devido à acção atmosférica, mas que podiam ter sido simuladas com CODE\_BRIGHT se existissem dados suficientes para quantificar esta acção. De qualquer forma, os valores de cálculo, considerando ou desprezando as trocas de vapor de água com a atmosfera, não devem conduzir a valores muito diferentes pois os coeficientes de permeabilidade do solo e do solo-cal são bastante baixos.

### 5.3 – Modelo numérico

Foi efectuada uma análise em deformação plana do aterro AT1 onde se simulou a sua construção e a molhagem dos taludes por acção da chuva para quantificação das deformações. Na molhagem não se considerou entrada de água pelo pavimento pois admitiu-se que o betuminoso garante a impermeabilização nessa fronteira.

A Figura 15 mostra a malha de elementos finitos (elementos de quatro nós) utilizada para modelar o aterro. Considerou-se que os deslocamentos estavam impedidos na fundação. Para além da molhagem, os carregamentos considerados aplicados através de cargas distribuídas foram o peso próprio do enrocamento do pé do talude (50 kN/m<sup>2</sup>) e do pavimento (1,2 kN/m<sup>2</sup>).



**Fig. 15** – Malha de elementos finitos e etapas construtivas consideradas no cálculo.

Na Figura 15 também são visíveis a calha do inclinómetro e as várias fases construtivas (10 no total, correspondendo à construção de 9 camadas com 2 m de espessura, mais a construção do pavimento). A fase construtiva foi simulada por activação dos elementos de cada camada de aterro. A molhagem foi simulada impondo uma sucção nula durante 10 dias na superfície exposta às acções atmosféricas. Foi incluída a fundação do aterro tendo-lhe sido atribuída uma grande rigidez

de forma a ter deformações desprezáveis e uma sucção igual à do aterro para não permitir trocas de água com o aterro na zona de contacto (esta consideração é realista visto que toda a fundação é drenante). Tal como referido anteriormente, foi considerada uma sucção inicial de 1,2 MPa para os dois materiais. Os parâmetros adoptados para a calibração do solo e do solo-cal apresentaram-se anteriormente no Quadro 9.

## 6 – CÁLCULO DE ASSENTAMENTOS

### 6.1 – Assentamentos durante a construção

As Figuras 16a e 16b apresentam, respectivamente, os assentamentos calculados e medidos durante a construção (inclinómetro PK1+150, Figura 4). No caso dos assentamentos medidos em obra, os gráficos foram interrompidos porque as leituras foram efectuadas nos troços em que as calhas dos inclinómetros foram partidas. Admite-se que a leitura de dia 21 de Julho corresponde ao final da compactação e que a de 31 de Agosto já foi efectuada após a construção do pavimento. No outro instrumento foram medidos valores semelhantes.

Comparando as leituras com os valores calculados no final da construção do pavimento é possível constatar que as amplitudes dos assentamentos máximos e as profundidades a que se verificam são bastante próximas (medido: 23 mm a 5 m de profundidade; calculado: 32 mm a 7 m de profundidade, mas com tendência para aumentarem nos 5 m). A diferença foi cerca de 9 mm, que corresponde a um erro em termos de extensões verticais de 0,06 % (inclinómetro com 14 m de altura) o que é bastante aceitável.

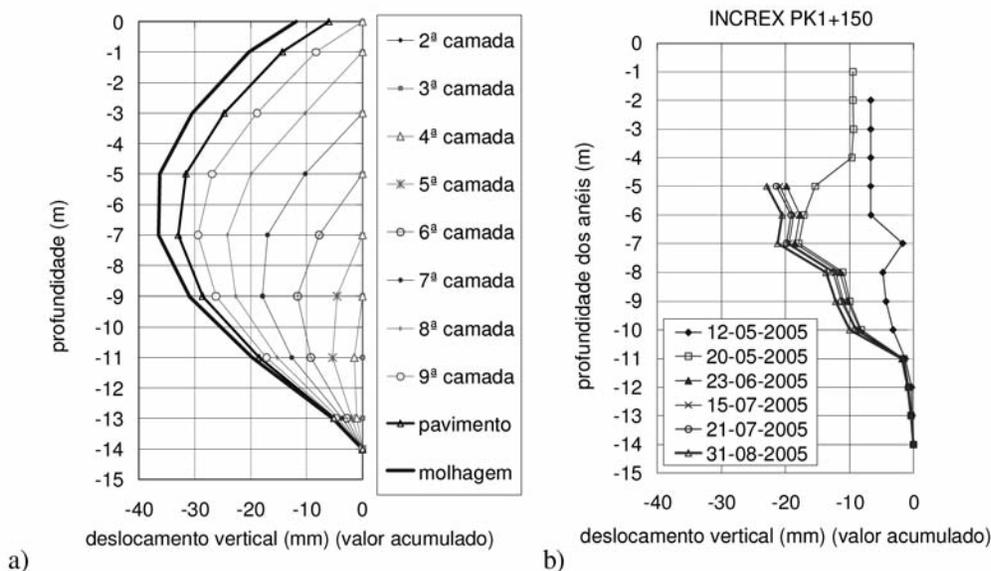


Fig. 16 – Assentamentos durante a construção: (a) calculados e (b) medidos em obra.

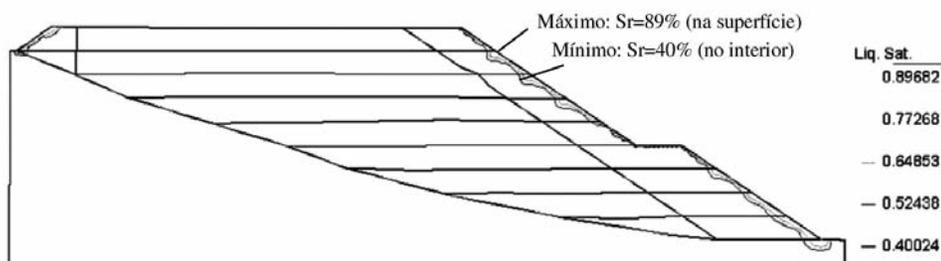
### 6.2 – Assentamentos devido à molhagem

Devido à baixa permeabilidade das margas tratadas com cal só foi possível atingir um grau de saturação de 89 % após 10 dias de manutenção da condição de saturação na fronteira correspondente ao talude. A água penetrou cerca de 50 cm nas espaldas, tal como apresentado na Figura 17a (a

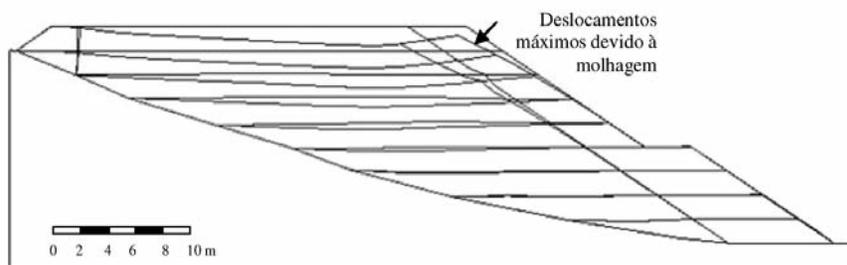
espessura mínima das espaldas é de 5 m, acima da banqueteta). A Figura 17b apresenta a configuração deformada do aterro no final da simulação, indicando a localização das deformações verticais máximas apenas devido à molhagem (próximas do topo do inclinômetro, na esquina de topo do talude). Estas foram calculadas como sendo a diferença entre o deslocamento no final da molhagem e o deslocamento após a construção do pavimento. Os valores calculados nesse e em mais alguns pontos relevantes apresentam-se no Quadro 10 (aterro AT1), constatando-se que são insignificantes. Para idênticas condições de molhagem, se estas deformações ocorrerem não comprometerão o funcionamento do aterro em serviço.

**Quadro 10** – Assentamentos apenas devido à molhagem (assentamentos: valores positivos).

	Topo do inclinômetro	Esquina do talude	Meia cana da banqueteta
Aterro AT1	0,71	0,43	-0,17
Aterro sem a cal	0,71	0,46	-0,36



a) Frente de saturação no final da molhagem.



b) Configuração deformada do aterro no final da simulação (deslocamentos x 100).

**Fig. 17** – Resultados do cálculo do aterro na molhagem.

## 7 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DA CAL NO COMPORTAMENTO DO ATERRO

Um dos principais objectivos do tratamento das margas foi evitar deformações devido à sua degradação quando expostas às acções atmosféricas. Para avaliar a eficiência do tratamento compararam-se as deformações apenas devido à molhagem calculadas no AT1 e num aterro fictício semelhante mas com as espaldas construídas com margas sem tratamento. Os valores obtidos nos

dois casos apresentaram-se anteriormente no Quadro 3. A comparação permite constatar que o tratamento com cal diminui as deformações, mas a redução não é muito significativa porque os valores calculados sem o tratamento já de si são muito baixos. Tal explica-se pelo facto de as margas compactadas sem a cal também terem médio a baixo potencial expansivo, dado obtido nos ensaios de expansibilidade.

Os ensaios laboratoriais realizados comprovaram que o tratamento com cal aumenta a rigidez (Quadros 6 e 8). Como se adoptou um perfil zonado para o aterro há diferenças de rigidez entre o núcleo (margas sem tratamento) e as espaldas (margas tratadas) já que o núcleo é mais deformável. Estas diferenças podem ser responsáveis pelo aparecimento de tensões de tracção nas espaldas, provocando fendilhação. Se tal acontecer o tratamento será prejudicial pois as fendas permitirão o acesso da água da chuva ao interior do aterro, perdendo-se a protecção conferida pelo tratamento.

O aparecimento de fendilhação pode ser analisado através das tensões desenvolvidas na superfície dos taludes. A Figura 18 apresenta as tensões de tracção calculadas ao longo da face exposta do maior talude (desde a base até ao topo) após a construção do pavimento, tanto para o aterro AT1 como para o aterro fictício sem a cal. Identifica-se a localização da banquetta a meia altura e do pavimento (com uma seta). Pode considerar-se que só existem tracções numa faixa paralela à superfície do talude com aproximadamente 50 cm de espessura.

Na Figura 18 é visível que as maiores tensões foram calculadas no aterro construído com a cal e que se localizam perto da meia cana da banquetta, no talude superior (93 kPa com a cal e 2 kPa sem a cal), e sensivelmente a meio do talude inferior (57 kPa com a cal e 7 kPa sem a cal). As diferenças entre os valores calculados nos dois aterros comprovam que a diferença de rigidez devido ao tratamento induz tracções.

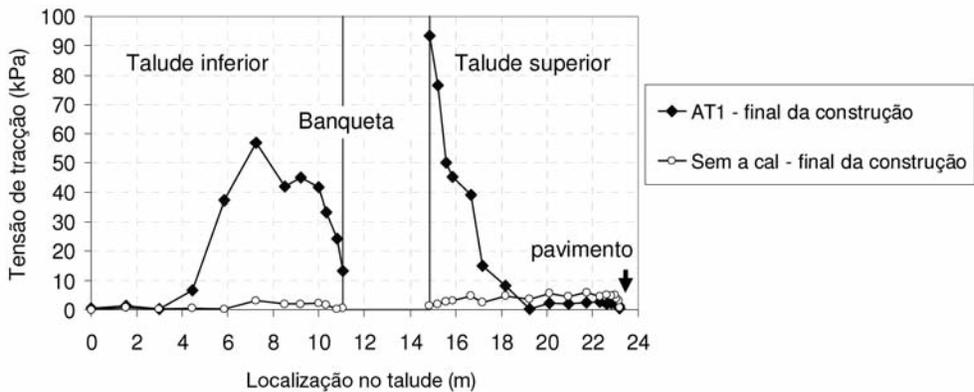


Fig. 18 – Tensões de compressão e tensões de corte no aterro no final da simulação (MPa).

O solo-cal deve possuir alguma resistência à tracção devido à cimentação, mas não foram realizados ensaios para a quantificar. Ficam no entanto indicações de que poderá haver fendilhação, mas provavelmente sem consequências para o interior do maciço já que as tracções se concentram na zona mais superficial.

Os valores das tensões de tracção apresentadas na Figura 18 foram calculados com as tensões verticais, horizontais e tangenciais cuja distribuição se apresenta na Figura 19. A figura diz respeito apenas ao modelo do aterro real em que as espaldas foram construídas com as margas tratadas com cal.

Na Figura 19, a distribuição das tensões verticais mostra que o cálculo conduz a valores de tensões aceitáveis pois os valores calculados na base do aterro (278 kPa) correspondem às tensões instaladas devido ao peso próprio de uma coluna de solo com 12 m de altura com peso volúmico aparente seco de 20,5 kN/m<sup>3</sup> e teor em água de 9 %, mais a sobrecarga do pavimento.

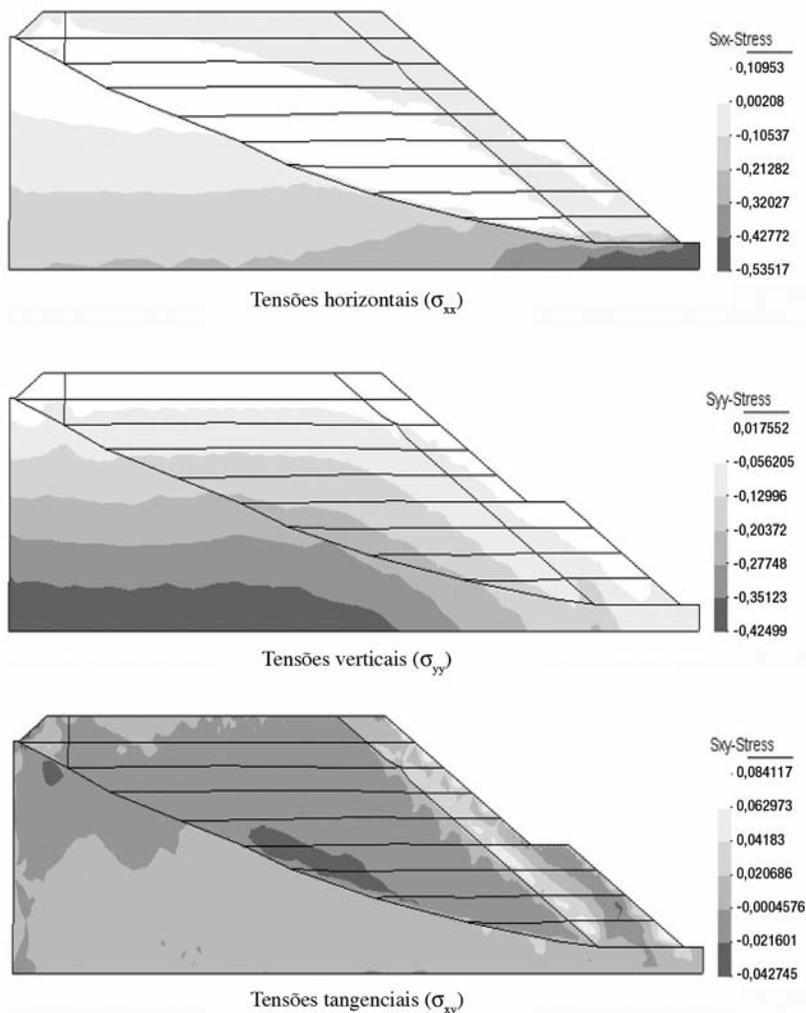


Fig. 19 – Tensões horizontais, verticais e de corte no aterro, no final da simulação (MPa).

Na Figura 19 também é visível que as tensões máximas de corte se localizam perto da fundação do aterro (43 kPa) e no contacto entre o solo e o solo-cal (84 kPa), mais junto à base do talude. No aterro sem a cal estes valores foram de 30 kPa e de 6 kPa, sendo as diferenças notórias na superfície de contacto dos dois materiais e explicáveis pelo contraste de rigidez.

## 8 – CONCLUSÕES

O modelo numérico do aterro AT1 da autoestrada A10 permitiu calcular os seus assentamentos não só durante a construção mas também por molhagem na fase pós construção, pela chuva. Durante a construção, a comparação entre as deformações (assentamentos e deslocamentos horizontais) calculadas e as medidas em obra permitiu verificar que os valores obtidos têm praticamente a mesma ordem de grandeza.

Os valores reduzidos obtidos no cálculo das deformações devidas à molhagem por efeito da chuva nos paramentos, mostram que estas não afectam o comportamento em serviço do aterro. Os valores calculados, admitindo que não se tinha efectuado o tratamento com cal das margas colocadas nas espaldas mostraram, como seria de esperar, deformações superiores. No entanto, em ambos os casos, as deformações têm um valor muito reduzido, o que se pode explicar pelo facto de as margas terem um potencial expansivo médio a baixo. Por outro lado, as condições adoptadas na compactação contribuíram em parte para esta redução pois verificou-se que o aterro exibia elevado grau de saturação. Estas condições harmonizam-se com os valores medidos nos ensaios laboratoriais para determinação da curva de retenção e da carta de succões.

A avaliação relativa aos efeitos da rigidez introduzida pelo tratamento com cal das margas colocadas nas espaldas permitiu constatar ocorrência de tensões de tracção desenvolvidas na superfície dos taludes mas o valor de tais tensões é reduzido, daí não resultando fendilhação relevante ou com consequências graves. No entanto, com o tempo, a rigidez dos solos tratados com cal aumenta, aumentando também as tensões de tracção. Espera-se que o aumento da rigidez no tempo não seja significativo, mas é recomendável a realização de inspecções periódicas ao aterro durante a sua exploração para averiguar se existem fendas que possam facilitar a entrada de água no corpo do aterro.

Face às anteriores considerações, pode questionar-se a necessidade de se ter efectuado o tratamento nas margas dos aterros da A10. Conclui-se que os benefícios do uso da cal deverão ser fundamentados através de ensaios realizados em fase de projecto. Espera-se que o presente trabalho possa contribuir para a definição de alguns desses procedimentos.

## 9 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BRISA o financiamento e a permissão para publicar os resultados dos ensaios efectuados no âmbito do projecto de investigação. Agradecem igualmente o financiamento concedido pela FCT e pelo Programa Operacional para a Ciência e Inovação 2010 (ref. POCI/ECM/59320/2004). O primeiro autor agradece a bolsa concedida pela FCT (SFRH/BD/25846/2005) para permanência no estrangeiro.

Agradecem ainda ao LNEC, na pessoa da Investigadora Coordenadora Laura Caldeira, a disponibilidade demonstrada para a realização de alguns ensaios e ao Professor Eduardo Alonso da Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, as trocas de impressões e a permissão para uso do CODE\_BRIGHT e dos equipamentos do laboratório.

## 10 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.E.; Gens, A.; Josa, A. (1990) *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, vol 40(3), pp. 405-430.
- Alonso E.E. (2004). *Suelos Compactados. Observaciones Experimentales y Modelo Constitutivo*. Carreteras – Extraordinario 2004 – El agua y la carretera – Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, pp 262-312.
- ASTM D 3967-95a (2001). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM.
- ASTM D 2938-95 (1995). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM.

- ASTM D 2435-96 (1996). *Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils*. ASTM.
- ASTM D 4546-96 (1996). *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils*. ASTM.
- ASTM D 4767-95 (1995). *Standard Test Method for Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. ASTM.
- Bell, F.G. (1993). *Engineering treatment of soils*. 1st ed., E & FN Spon, New York, 302 p.
- Cardoso, R.; Maranhã das Neves, E.; Lopes, P.; Coelho, A. L.; Tavares, R. (2006). *Utilização de inclinómetros do tipo increx para medição de deslocamentos durante a construção de aterros*. Proc. 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa, Portugal.
- Cardoso, R.; Romero, E.; Lima, A.; Ferrari, A. (2007). *A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers*. 2nd Int. Conference Unsaturated Soils, Weimar, pp. 79-93.
- Clare, K.E.; Cruchley, A.E. (1957). *Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime*. Géotechnique, vol 7, pp. 97-110.
- Cenorgeo (2002). *A10 - Auto-Estrada Bucelas/Carregado/A13. Sublanço Arruda dos Vinhos/IC11. Parte 1.2 - Terraplanagens do Sublanço*. Tomo 1 - Terraplanagens Gerais. Projecto de Execução.
- Dimos, A. (1991) *Measurement of soil suction using transistor pycrometer*. Internal Report IR/91-3, Special Research Section. Materials Technology Department, Vic. Roads.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons. New York, 544 p.
- Godinho, N. (2007). *Estudo do comportamento hidro-mecânico de margas tratadas com cal*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre por Bolonha, Instituto Superior Técnico.
- Jeremias, F. T. (1999). *Influência dos factores geológicos nas propriedades geotécnicas das rochas silto-argilosas*. Tese para a obtenção do grau de Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Khattab, S.A.A.,; Al-Mukhtar, M.; Fleureau, J-M. (2007). *Long term stability characteristics of a lime treated plastic soil*. J. Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 19(4), pp. 358-366.
- Lav, A.H.; Lav, M.A (2000). *Microstructural Development Of Stabilized Fly Ash As Pavement Base Material*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12(2), pp. 157-163.
- Leong, E.-C.; Tripathy, S.; Rahardjo, H. (2003). *Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique*. Géotechnique 53(2), pp 173–182.
- Locat, J.; Bérubé, M-A.; Choquete, M. (1990). *Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development*. Can Geotech. J., 27, pp. 294-304.
- Lynce de Faria, F. (2007). *Influência da molhagem após compactação no comportamento de um aterro da Auto-Estrada A10 Brisa*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre por Bolonha, Instituto Superior Técnico.
- Maranhã das Neves, E. (1998). *Aterros de solos argilosos rijos e rochas brandas*. Geotecnia 82, 17-33.

- Maranha das Neves, E.; Cardoso, R. (2006). *Projecto de investigação relativo ao comportamento estrutural do aterro com materiais não saturados - Aplicação aos aterros da A10, sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado*. Estudo realizado para a Brisa Primeiro relatório. Relatório ICIST, ep nº 23/06.
- Maranha das Neves, E.; Cardoso, R. (2008). *Projecto de investigação relativo ao comportamento estrutural do aterro com materiais não saturados - Aplicação aos aterros da A10, sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado*. Estudo realizado para a Brisa Relatório final. Relatório ICIST, ep nº 13/08.
- Mieussens, C. (1997). *Les remblais em marne - Études, pathologie et techniques de réparations*. Proceedings conferência LNEC, Lisboa.
- Olivella, S.; Gens, A.; Carrera, J.; Alonso, E. E. (1996). *Numerical formulation for simulator (CODE\_BRIGTH) for coupled analysis of saline media*. Engineering computations, vol. 13(7), pp. 87-112.
- Oliveira, S. (2006). *Caracterização das Rochas Brandas Margosas in situ e dos respectivos aterros. Contribuição para a modelação do comportamento*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Rao, S.; Shivananda, P. (2005). *Compressibility behaviour of lime-stabilized clay*. Geotechnical and Geological Engineering, 23, pp. 309-319.
- Romero, E. (2001). *Controlled-suction techniques*. 4th National Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, W.Y. Gehling e F. Schnaid (eds.), ABMS, Brazil, pp. 535-542.
- Russo, G.; Del Vecchio, S.; Mascolo, G. (2007). *Microstructure of a lime stabilised compacted clay*. 2nd Int. Conference Unsaturated Soils, Weimar, pp. 49-56.
- Suriol, J.; Gens, A.; Alonso, E.E. (2002). *Volumetric behaviour of a compacted soil upon wetting*. Proc. 3rd International Conference on Unsaturated Soils. Recife (Brasil) 2: 619-623.
- UPC-DLT (2002) CODE\_BRIGTH - User's Guide. Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898.
- White, D.; Bergeson, K. (2002). *Empirical performance classification for cohesive embankment soils*. Geotechnical Testing Journal, vol. 25(1), pp. 70-77.
- WP4 (2000). *Water Dewpoint Potentiometer*. User's Manual. Decagon Devices, Inc. ([www.decagon.com](http://www.decagon.com)).