

# **ATERROS EXPERIMENTAIS SOBRE FUNDAÇÕES LODOSAS NA ZONA DE MARINHAS DO MULATO, VILA FRANCA DE XIRA**

## **EXPERIMENTAL EMBANKMENTS ON SOFT SOILS IN THE AREA OF MARINHAS DO MULATO, VILA FRANCA DE XIRA**

Guedes de Melo, Pedro, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, pmelo@civil.ist.utl.pt*  
*CONSULGEO, Lisboa, Portugal, consulgeo@mail.telepac.pt*

### **RESUMO**

Na zona de Marinhas do Mulato, em Vila Franca de Xira, foi recentemente levado a cabo um estudo geotécnico, visando a construção de um conjunto de aterros, no qual teve particular incidência na caracterização de uma formação lodosa ocorrente na fundação desses aterros. Inseridos neste estudo foram executados quatro aterros experimentais na fundação dos quais foram instaladas malhas de geodrenos com diferentes espaçamentos para avaliar da eficiência deste tipo de solução na aceleração do processo de consolidação. O comportamento destes aterros foi acompanhado durante cerca de 18 meses. Apresentam-se, neste trabalho, os principais aspectos do estudo elaborado para a caracterização da formação lodosa, fornecendo-se os valores obtidos para os principais parâmetros que controlam o comportamento destes materiais.

### **ABSTRACT**

In the area of Marinhas do Mulato, Vila Franca de Xira, it was recently executed a geotechnical study for the construction of a series of embankments, specially focused on the characterization of the muddy materials occurring in the embankments foundations. This study included the execution of four experimental embankments in that area and in their foundation it was installed different grids of geodrains for evaluating the efficiency of this type of solution in the acceleration of the consolidation process. The behavior of these embankments was monitored during 18 months. It is presented in this paper the main aspects of the study and the set of values for the main geotechnical parameters that control the behavior of the muddy materials.

### **1. INTRODUÇÃO**

Na zona de Marinhas do Mulato, em Vila Franca de Xira, foi recentemente levado a cabo um estudo bastante completo de caracterização da fundação lodosa de um conjunto de aterros que se pretende construir no local. Este estudo envolveu um vasto programa de prospecção, o qual incluiu um significativo número de ensaios *in situ* e em laboratório.

Inserido no estudo, foram executados quatro aterros experimentais (ver Figura 1) com o objectivo de analisar a evolução do processo de consolidação da sua fundação lodosa. Sob os quatro aterros esses materiais lodosos apresentam espessura variável e para o estudo foram instaladas malhas de geodrenos com diferentes espaçamentos para avaliar da eficiência deste tipo de solução na aceleração do processo de consolidação. Sob um desses aterros não foi instalada qualquer malha de geodrenos. O comportamento dos aterros foi monitorizado com 18 marcas de medição de assentamentos, instaladas próximo da superfície do terreno, e com 14 células de medição da

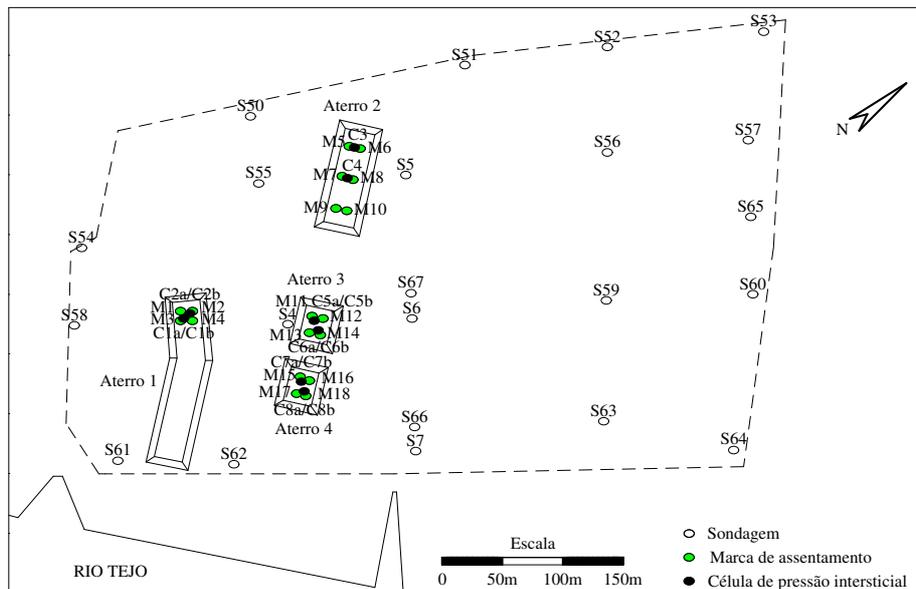


Figura 1 - Planta geral da zona com localização dos aterros experimentais.

pressão da água intersticial instaladas na fundação lodosa. Estes equipamentos estão ainda em operação, dispondo-se, no momento, de dados relativos a cerca de 18 meses.

Com este trabalho pretende-se apresentar os principais resultados do estudo elaborado uma vez que envolveu um conjunto de meios de caracterização invulgares, em particular se se atender a que eles foram executados no âmbito de um trabalho prático de Engenharia Geotécnica e não no âmbito de um programa de investigação. Procura-se, deste modo, apresentar um conjunto significativo de dados geotécnicos de caracterização dos materiais lodosos validados através da observação do comportamento de aterros experimentais, situação pouco habitual.

Neste trabalho começa-se por apresentar as características geológicas locais e os resultados dos ensaios de caracterização da formação lodosa. Seguidamente são apresentados os aspectos mais relevantes dos aterros experimentais executados, incluindo-se uma descrição do sistema de monitorização instalado. Finalmente são apresentados os resultados da monitorização do processo de consolidação da fundação lodosa (por limitação de espaço apenas serão apresentados os resultados das marcas de assentamento), definindo-se os valores dos principais parâmetros de cálculo que efectivamente condicionaram o comportamento da fundação lodosa.

## 2. PERFIL GEOLÓGICO DO LOCAL

As condições geológico-geotécnicas locais foram avaliadas em duas campanhas de prospecção realizadas em 1997 e em 2002 pela empresa Teixeira Duarte, S.A [1] e [2]. As sondagens realizadas (ver Figura 1) permitiram identificar os complexos que seguidamente se referem.

### Formações actuais a recentes

C1A - Depósitos de aterro arenosos, areno-argilosos e argilosos (SPT médio entre 10 e 20 golpes).

C1B - Depósitos aluvionares constituídos por lodos muito moles (SPT quase sempre nulo).

C1C - Depósitos aluvionares constituídos por areias de granulometria variável, lodosas, areão e

seixos dispersos (SPT entre 10 e 30 golpes).

#### Formação quaternária

C2 - Formação heterogénea constituída por areias, por vezes argilosas, areão e seixos dispersos, medianamente compactas a muito compactas (SPT médio entre 30 golpes e a “nega”).

#### Formação miocénica

C3 - Formação heterogénea constituída por arenitos de granulometria variável, margosos a calcários e argilosos (SPT correspondendo à “nega”).

### 3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA FORMAÇÃO LODOSA

Para a caracterização da formação lodosa foram realizados vários ensaios *in situ* e em laboratório. Estes resultados são apresentados no estudo elaborado por Consulgeo [3]. Dada a proximidade e semelhança das características dos materiais detectados nesta zona e na zona do Forte da Casa (situada na proximidade e para a qual já foi realizado um estudo de caracterização geotécnica semelhante), no presente trabalho os respectivos resultados foram considerados conjuntamente.

#### 3.1 Granulometria

A análise granulométrica mostrou tratar-se de materiais finos, com percentagens passadas no peneiro n°200 ASTM em regra superiores a 80% e com percentagens de argila da ordem de 40%. A maioria das amostras ensaiadas (total de 23) contém uma percentagem de areia inferior a 5%. Cinco das amostras mostraram conter uma percentagem de areia superior, variável entre 20 e 40%.

#### 3.2 Plasticidade

Trata-se de materiais de alta plasticidade (ver Carta de plasticidades na Figura 2), com valores do limite de liquidez da ordem de 60 a 70% e valores do índice de plasticidade da ordem de 30 e 40%.

#### 3.3 Compressibilidade

Das curvas de compressibilidade obtidas nos ensaios edométricos (ver Figura 3) obteve-se, para

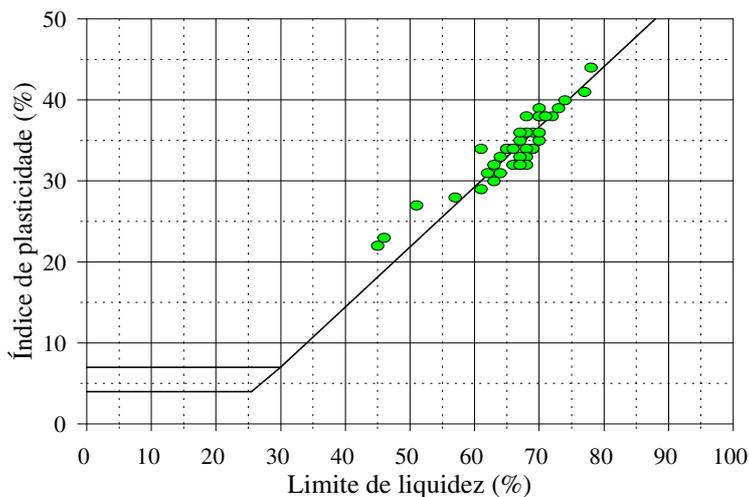


Figura 2 - Carta de plasticidades

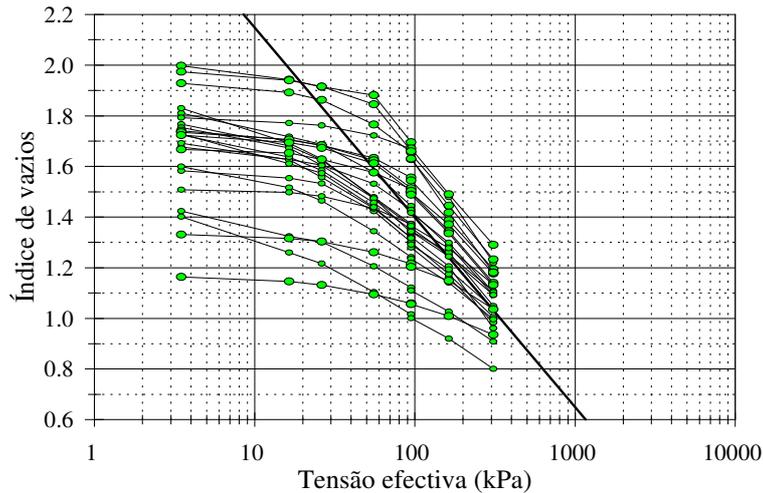


Figura 3 - Curvas de compressão dos lodos

a curva média de compressão virgem um índice de compressibilidade  $C_c$  de 0.75 e um valor de  $e_0$  (índice de vazios para uma tensão vertical efectiva unitária) de 2.9. Estes materiais lodosos foram considerados no estudo como normalmente consolidados.

### 3.4 Consolidação primária

O coeficiente de consolidação primária vertical,  $c_v$ , foi determinado para os resultados obtidos nos patamares de carga 50kPa-80kPa e 160kPa-310kPa. Na interpretação dos resultados foi utilizado o método de Parkin [4]. Este autor mostrou que o diagrama de variação da velocidade de consolidação no tempo, quando representado em escala bilogarítmica, apresenta um declive de -0.5 para valores do grau de consolidação inferiores a 50% (isto é, para valores de  $T_v$  inferiores a 0.1967), aumentando em seguida sistematicamente. O ajuste da curva teórica aos valores experimentais permite identificar o ponto de alteração do declive (ao qual corresponde o grau de consolidação de 50%) e estimar o valor de  $c_v$  a partir de  $c_v = 0.1967d^2/t_{50}$ , sendo  $d$  o comprimento inicial de drenagem e  $t_{50}$  o tempo correspondente a 50% de consolidação primária. A curva obtida para o primeiro dos referidos patamares de carga é apresentada na Figura 4. Como se pode observar existe uma reduzida dispersão de resultados, a qual, em parte, pode ser explicada pelo facto de a

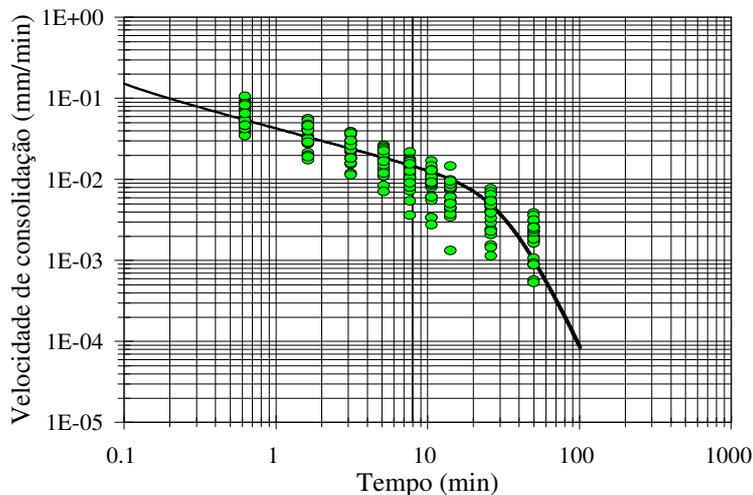


Figura 4 - Curvas de consolidação dos lodos para o patamar de carga 50kPa-80kPa

altura dos provetes ensaiados ser um pouco variável. Da interpretação dos resultados obtiveram-se valores de  $c_v$  de  $3.9 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$  e  $3.5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ , respectivamente, para o primeiro e segundo patamares de carga, tendo-se definido como valor representativo  $4 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ .

### 3.5 Resistência ao corte

A resistência ao corte não drenada foi avaliada *in situ* através de ensaios de corte rotativo. Destes ensaios obtiveram-se os valores da coesão não drenada,  $c_u$ , de pico e residuais apresentados na Figura 5, na qual é notória a tendência para o aumento dos valores de pico com a redução da cota.

Para a caracterização da resistência ao corte foram ainda realizados ensaios de compressão triaxial do tipo consolidados não drenados, com medição de pressões intersticiais. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6 (onde  $s=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ ,  $t=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ ). Dessa figura pode concluir-se que os dois conjuntos de valores obtidos se ajustam razoavelmente segundo alinhamentos rectos, aos quais estão associados  $\phi_{CU}=15^\circ$  e  $c_{CU}=0$  (tensões totais) e  $\phi'=29^\circ$  e  $c'=0$  (tensões efectivas). Foi ainda determinado para estes materiais um peso volúmico saturado de  $16,1 \text{kN/m}^3$ .

## 4. ATERROS EXPERIMENTAIS

O estudo de caracterização da fundação lodosa dos aterros incluiu a construção de quatro aterros experimentais (ver Figura 1). Trata-se de aterros com cerca de 2.5m de altura, na fundação de três dos quais foram instaladas malhas de geodrenos, sempre com distribuição triangular em planta mas com diferentes espaçamentos (ver Quadro 1). Todos os aterros são constituídos por uma camada inicial de regularização de material de aterro compactado com cerca de 0.3m de altura, sobre a qual foi colocada uma camada de areia com 0.5m de altura, sobre a qual por sua vez foi colocada uma camada de material de aterro compactado com cerca de 1.7m de altura. Nos vários aterros, os geodrenos foram sempre instalados após a colocação da camada de areia. Para acompanhar a evolução do processo de consolidação da fundação foram instaladas 18 marcas para medição de assentamentos e 14 células de medição da pressão intersticial (ver Figura 1). De referir que as marcas de assentamento foram instaladas após a colocação das camadas de aterro de regularização e de areia, pelo que os resultados não incluem o início do processo de consolidação.

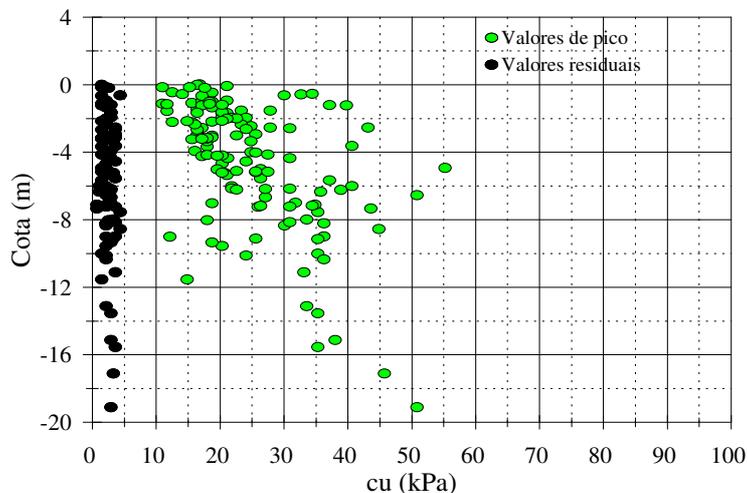


Figura 5 - Resultados dos ensaios de corte rotativo

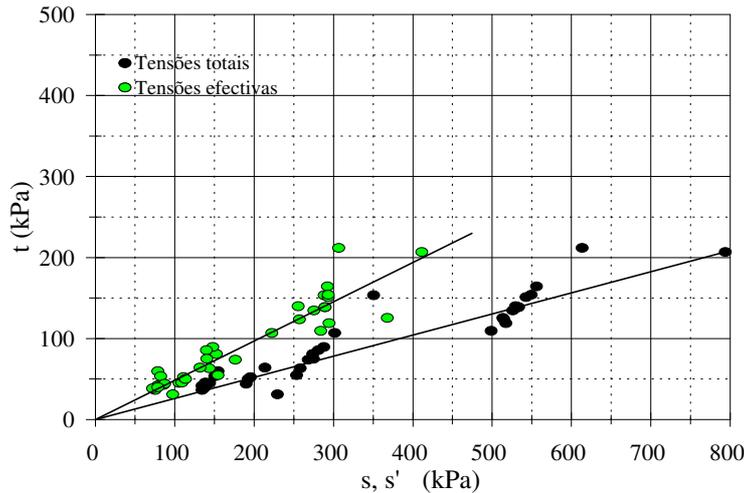


Figura 6 - Resultados dos ensaios triaxiais do tipo CU

Quadro 1 - Características gerais dos aterros e equipamentos de observação

Aterro	espaçamento geodrenos (m)	cota superf. terreno (m)	cota topo lodos (m)	cota base lodos (m)	marcas de assentamento	células de pressão intersticial
1	1.7	3.0	0.0	-8.5	M1 a M4	C1 e C2
2	s/geod.	3.0	0.0	-5.0	M5 a M10	C3 e C4
3	1.4	2.6	0.0	-9.5	M11 a M14	C5 e C6
4	2.0	2.7	0.0	-12.5	M15 a M18	C7 e C8

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Aspectos gerais da análise

A evolução do comportamento das marcas de assentamento e das células de medição da pressão intersticial tem vindo a ser acompanhada, dispondo-se já de um conjunto muito significativo de resultados de observação cobrindo cerca de 18 meses de observações.

Para a análise dos resultados obtidos procurou-se modelar numericamente o comportamento da fundação lódica para que fosse possível associar ao comportamento observado nas 18 marcas e 14 células um único conjunto de valores de parâmetros geotécnicos. Foi, assim, desenvolvida uma solução baseada no método das diferenças finitas, a qual foi programada numa folha de cálculo por forma a permitir obter, para cada equipamento, um rápido ajuste entre modelo numérico e dados de observação. Essa solução, detalhadamente descrita em [5], permite, simultaneamente:

- reproduzir o comportamento de marcas de assentamentos e de células de pressão intersticial;
- fazer intervir os parâmetros clássicos que controlam o processo de consolidação;
- ter em conta o efeito conjugado da drenagem vertical e da drenagem radial na consolidação, no sentido de reproduzir a presença de fronteiras permeáveis no topo e/ou base da camada lódica e ainda a eventual existência de geodrenos verticais;
- variar o carregamento ao longo do tempo, por forma a ter em conta, em qualquer instante do processo de consolidação, um aumento da cota do aterro;
- variar as condições de drenagem no tempo, como por exemplo, a associada à instalação de geodrenos após a construção, mesmo que faseada, dos aterros;

- variar os coeficientes de consolidação horizontal e vertical dos lodos ao longo do tempo.

## 5.2 Curvas de resultados

Por limitação de espaço, no trabalho que agora se apresenta apenas será abordados o comportamento das marcas de assentamento. Os resultados obtidos nas células de medição da pressão intersticial podem ser encontrados em [5].

Os resultados do estudo realizado para as marcas de assentamento de cada um dos quatro aterros são apresentados nas Figuras 7 a 10. Nestas figuras são apresentadas três curvas de valores: uma relativa aos resultados da observação, outra relativa à aplicação da solução numérica e a terceira correspondente à evolução da cota do aterro no tempo.

Curva de resultados de observação: Esta curva corresponde às leituras efectuadas em cada marca. De referir que os primeiros registos disponíveis correspondem a uma fase na qual o processo de consolidação dos lodos estava já em curso. Assim, o assentamento real associado à primeira leitura teve que ser obtido da exploração do modelo numérico para o período anterior a essa leitura.

Curva da aplicação da solução numérica: Na aplicação da solução numérica desenvolvida foram considerados os valores dos parâmetros de cálculo obtidos dos ensaios laboratoriais para a formação lodosa:  $C_c=0.75$ ,  $e=2.9+0.75\log\sigma_v'$ ,  $c_v=4\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$  e  $\gamma_{\text{sat}}=16,1\text{kN}/\text{m}^3$ . Relativamente ao coeficiente de consolidação radial,  $c_{vr}$ , o valor considerado, uma vez que este não foi objecto de qualquer determinação experimental, resultou já da compatibilização dos comportamentos das curvas de dados de observação e resultados numéricos. O valor obtido foi de  $c_{vr}=4\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$ , isto é, igual ao coeficiente de consolidação vertical. Por último, admitiu-se para os materiais de aterro um peso volúmico de  $19\text{kN}/\text{m}^3$  e considerou-se que o nível freático na zona se situava à cota +1,0m (este valor é confirmado pelos resultados obtidos nas células de pressão intersticial instaladas).

Curva de evolução da cota do aterro no tempo: A curva de evolução no tempo da cota do aterro é apresentada para permitir a análise da evolução do comportamento das marcas no tempo. Juntamente com o conjunto de valores dos parâmetros de cálculo definidos para a formação lodosa e a geometria da obra, a evolução no tempo da cota do aterro constitui um dos dados principais a introduzir no modelo numérico desenvolvido para a obtenção do comportamento final da marca.

## 5.3 Aplicação da solução numérica

### 5.3.1 Resultados do Aterro 1

Na fundação deste aterro foi instalada uma malha triangular de geodrenos espaçados de 1.7m, atravessando os 8.5m de espessura de lodos. O comportamento registado nas 4 marcas instaladas neste aterro é, como se pode ver na Figura 7, diferenciado. A aplicação do modelo numérico base (modelo considerando os valores dos parâmetros definidos na prospecção geotécnica) conduziu à curva de assentamentos que reproduz, de forma muito próxima, o comportamento das marcas M3 e M4. Admite-se que o comportamento distinto das marcas M1 e M2 deve estar associado a uma eventual sobreconsolidação dos lodos neste local, tanto mais que este aterro se situa na proximidade de zona anteriormente ocupada por construções. A curva do modelo numérico que se apresenta para reproduzir o comportamento destas marcas M1 e M2 foi obtida admitindo como única alteração ao modelo base que a cota inicial do terreno se situava a 3.8m em vez de 3.0m, considerando-se, deste modo, de forma indirecta, a eventual sobreconsolidação dos lodos.

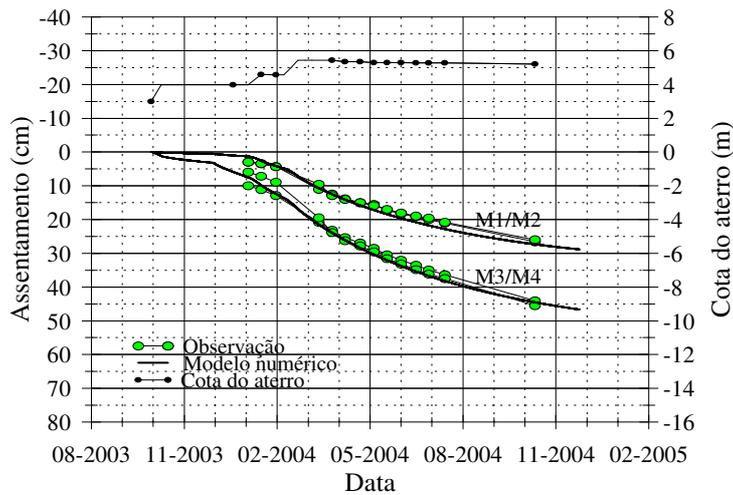


Figura 7 - Assentamentos do Aterro 1

### 5.3.2 Resultados do Aterro 2

Na fundação deste aterro não foi instalada qualquer malha de geodrenos nos 5m de espessura de lodos. A drenagem, neste caso, é apenas possível pelo topo e base da formação lodosa. Tal como no Aterro 1, também neste caso as marcas mostraram comportamento distinto (ver Figura 8). Neste caso, no entanto, as diferenças parece estarem associadas a diferentes velocidades do processo de consolidação. Fazendo-se variar no modelo numérico base apenas o valor coeficiente de consolidação vertical obteve-se, para valores desse parâmetro de  $8 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$  e de  $16 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ , as curvas que se apresentam na Figura 8 sobrepostas aos dados de observação, respectivamente, das marcas M7 e M8 e das marcas M5 e M6. Nessa figura, a curva superior corresponde à aplicação do modelo base ( $c_v = 4 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ ). Como se verifica, o ajuste conseguido entre modelo numérico e resultados de observação é bastante bom, sendo que foi o modelo base que conduziu às menores velocidades de consolidação. Admite-se que na zona do aterro onde a velocidades de consolidação dos lodos parecem ser mais elevadas possam ocorrer, no seio da camada lodosa, níveis de material mais permeável, os quais, reduzindo o caminho de percolação, aceleram o processo de consolidação. O efeito da eventual presença destes níveis permeáveis faz-se notar com maior evidência no comportamento deste aterro face aos restantes, uma vez que nestes últimos o

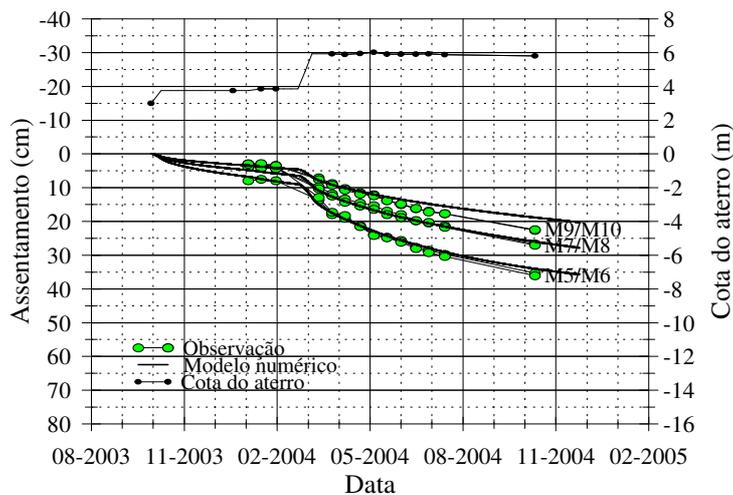


Figura 8 - Assentamentos do Aterro 2

processo de consolidação é fundamentalmente condicionado pela presença de geodrenos. Acresce ainda o facto de ser sob este Aterro 2 que ocorre a menor espessura de lodos, facto que vem acentuar a importância da eventual presença de níveis de material de maior permeabilidade.

### 5.3.3 Resultados do Aterro 3

Na fundação deste aterro foi instalada uma malha triangular de geodrenos espaçados de 1.4m, atravessando os 9.5m de espessura de lodos. As curvas de assentamentos das quatro marcas colocadas neste aterro (ver Figura 9) apresentam comportamento muito semelhante. A aplicação do modelo numérico base ao estudo deste aterro conduziu à curva que também se apresenta nessa Figura 9, mostrando grande aproximação entre resultados de observação e resultados numéricos.

### 5.3.4 Resultados do Aterro 4

Na fundação deste aterro foi instalada uma malha triangular de geodrenos espaçados de 2.0m, atravessando os 12.5m de espessura de lodos. Neste caso existe praticamente uma coincidência no comportamento observado nas quatro marcas instaladas no aterro (ver Figura 10), o qual é reproduzido de uma forma quase perfeita pelo modelo numérico base.

## 6. CONCLUSÕES

Apresentaram-se neste trabalho os resultados de um estudo bastante completo de caracterização da formação lodosa ocorrente na zona das Marinhas do Mulato, em Vila Franca de Xira. Este estudo incluiu, para além de ensaios *in situ* e de laboratório, a realização de quatro aterros experimentais, na fundação dos quais foram instaladas malhas de geodrenos, com diferentes espaçamentos, para avaliar a eficiência deste tipo de solução na aceleração do processo de consolidação desses lodos. Estes aterros foram monitorizados e têm sido observados periodicamente, dispendo-se, no momento, de dados relativos a cerca de 18 meses de observações.

Recorrendo a uma solução baseada no método das diferenças finitas foi possível reproduzir numericamente o comportamento dos vários equipamentos de observação instalados e, deste modo, identificar os valores dos principais parâmetros geotécnicos que controlam o comportamento da

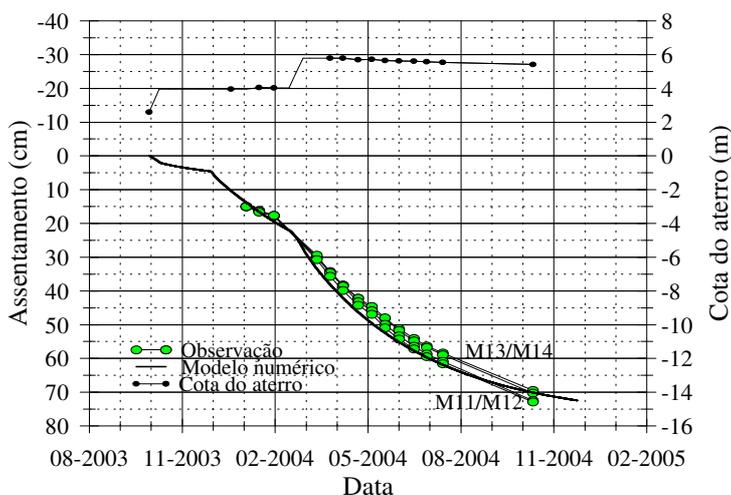


Figura 9 - Assentamentos do Aterro 3

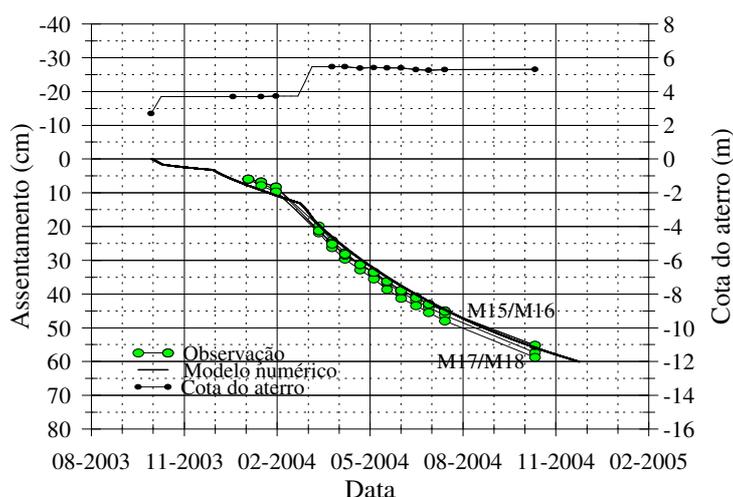


Figura 10 - Assentamentos do Aterro 4

fundação lodosa. De entre estes valores merece particular destaque aquele associado ao coeficiente de consolidação radial, que não tinha sido objecto de qualquer determinação experimental e que foi identificado com este estudo com sendo igual ao coeficiente de consolidação radial. Os restantes valores são idênticos aos estimados com base no programa de ensaios realizado.

## 7. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à empresa Teixeira Duarte, S.A. a possibilidade de levar a cabo, no âmbito de um trabalho prático de Engenharia Geotécnica, um estudo tão completo como aquele apresentado e ainda a autorização concedida para a divulgação dos seus resultados.<sup>78</sup>

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Teixeira Duarte, S.A. (1997). TD VIA - Plano de pormenor entre Santa Iria da Azoia e Alverca. Estudo Prévio. Reconhecimento Geotécnico.
- [2] Teixeira Duarte, S.A. (2002). TD VIA - Loteamento das Marinhas do Mulato, Vila Franca de Xira. Reconhecimento Geotécnico.
- [3] Consulgeo (2003). TD VIA - Loteamento em Marinhas do Mulato, Vila Franca de Xira. Estudo Geotécnico.
- [4] Parkin, A. (1978). Coefficient of consolidation by the velocity method. *Géotechnique*, Vol. 28, No.4, pp.472-474.
- [5] Guedes de Melo, P. (2005). Avaliação numérica do desenvolvimento do processo de consolidação de solos moles associado à utilização de geodrenos. 2<sup>as</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, LNEC.