MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO COMPORTAMENTO DO ATERRO DE SANTA EULÁLIA

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE BEHAVIOUR OF SANTA EULÁLIA EMBANKMENT

Cruz, Francisco P. M. L., *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, francisco.cruz@cenor.pt*
Venda Oliveira, Paulo J., *FCTUC, Coimbra, Portugal, pjvo@dec.uc.pt*
Almeida e Sousa, Jorge N. V., *FCTUC, Coimbra, Portugal, jas@dec.uc.pt*

RESUMO

Neste trabalho é efectuada uma retroanálise do comportamento de um aterro pertencente à Auto-estrada A14. Tendo em conta a existência de geodrenos e a influência que estes têm na trajectória percorrida pela água durante o processo de dissipação das pressões intersticiais, é efectuado um cálculo tridimensional. Para tal, é usado o programa UCGeoCode, baseado no Método de Elementos Finitos com formulação de consolidação acoplada. O comportamento das camadas aluvionares é simulado pelo modelo constitutivo de Cam Clay Modificado. O artigo incidirá na apresentação das características do modelo usado no cálculo, bem como na comparação dos resultados numéricos com os valores medidos *in situ*, em termos de assentamentos e de excessos de pressão intersticial.

ABSTRACT

In this paper is carried out a back analysis of the behavior of a embankment in the A14 Highway. Considering the existence of prefabricated vertical drains and its influence on the water path during the interstitial pore pressure dissipation procedure, a three-dimensional calculation is made. To this end, the software UCGeoCode is used, based on the Finit Element Method with coupled consolidation formulation. The Modified Cam Clay Model is used to simulate the behavior of the alluvial soils. This paper will focus on presenting the characteristics of the model used in calculation, and then comparing this results with those measured *in situ*, in terms of settlements and excess of pore pressures.

1. INTRODUÇÃO

Devido à expansão do negócio da construção e da demanda da sociedade por variadas obras de engenharia, nomeadamente de grande extensão como vias rodoviárias ou ferroviárias, a engenharia tem sido solicitada a executar obras sobre ou através de solos moles. Sendo o seu objectivo principal garantir uma obra económica que assegure a sua funcionalidade e segurança, é imprescindível que se possa caracterizar um dos fenómenos mais condicionantes e complexos deste tipo de solos, a consolidação. Um caso representativo deste tipo de obras localiza-se no troço da A14 entre Figueira da Foz e Montemor-o-Velho, tendo parte dos aterros desta auto-estrada sido construídos sobre os solos aluvionares da bacia do Baixo Mondego.

O trabalho desenvolvido no âmbito do presente artigo consiste na modelação de um aterro da referida obra, designado por aterro de Santa Eulália, de forma a simular o comportamento do solo de fundação quando sujeito a carregamento. Tendo em conta a informação obtida a partir

dos dispositivos de observação existentes na fase de obra, os resultados obtidos nos cálculos numéricos são comparados com o comportamento observado *in-situ*.

O cálculo numérico foi realizado com o programa UCGEOCODE, baseado no Método de Elementos Finitos. A análise numérica é efectuada com um modelo tridimensional, pretendendo-se desta forma simular as condições reais de percolação no solo de fundação, induzidas pela existência de uma malha de drenos verticais.

2. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O local em análise localiza-se ao Km 7,775 do troço Figueira da Foz - Santa Eulália, pertencente à A14, de acordo com o assinalado na Figura 1.

Figura 1 – Localização do Aterro de Santa Eulália (A14).

Nesta secção foram realizadas três sondagens (S1, S2 e S3), que permitiram o estabelecimento do perfil geotécnico da Figura 2, tendo-se detectado a existência de aluviões silto-arenosos e silto-argilosos, com espessura variável entre 5,5 e 8,5 metros, sobre um substracto rochoso composto pelos designados "Calcários de Tentúgal" (Venda Oliveira, 2000). O comportamento do aterro durante a sua construção foi periodicamente observado, sendo a instrumentação composta pelo seguinte equipamento (Figura 2):

- um tubo inclinométrico sub-vertical localizado na vertical do pé do talude do aterro principal, para medição dos deslocamentos horizontais;
- duas placas de assentamentos (T_1 e T_2) sob o aterro e uma marca superficial (M_1) na lateral da banqueta, para medição dos deslocamentos verticais;
- três piezómetros de corda vibrante (P_2, P_3 e P_5), para medição das pressões de água nos poros.

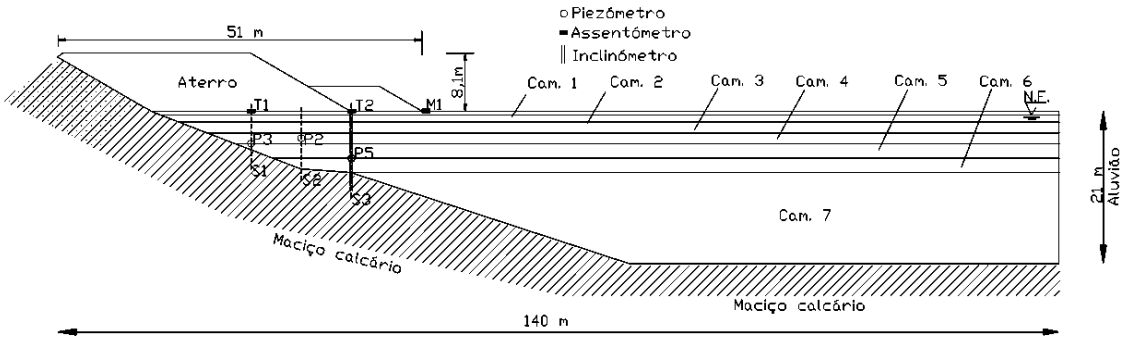


Figura 2 – Perfil Geotécnico da Secção Tipo e Localização da Instrumentação (Venda Oliveira, 2002).

3. MODELO DE CÁLCULO

O programa de elementos finitos UCGEOCODE teve a sua génese na Universidade do Porto, tendo sido posteriormente desenvolvido por Almeida e Sousa (1998) e Venda Oliveira (2000). As versões iniciais do programa permitiam efectuar cálculos 2D, tendo posteriormente sido desenvolvido para a realização de análises tridimensionais. Recentemente, o programa sofreu alguns avanços, permitindo actualmente efectuar análises 3D de problemas que envolvem consolidação (teoria de consolidação de Biot), em simultâneo com a utilização do modelo constitutivo Cam Clay Modificado.

No Quadro 1 apresentam-se as características do solo de fundação (subdivido em sete camadas) e do aterro. O comportamento da fundação é simulado com o modelo Cam Clay Modificado, admitindo-se em termos de permeabilidade uma relação entre os coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical de 3 (Venda Oliveira, 2000). Os parâmetros do modelo foram obtidos com base em ensaios laboratoriais, nomeadamente triaxiais e edométricos. O material de aterro é modelado por uma lei elástica linear, uma vez que, após um estudo de sensibilidade efectuado por Venda Oliveira (2000), se verificou que o modelo constitutivo utilizado para modelar estes materiais tem baixa influência no comportamento do solo de fundação. Ainda assim, o aterro é modelado por camadas, apresentando uma rigidez variável em altura, diminuindo da camada inferior para a superior, na tentativa de simular o efeito do confinamento lateral.

Quadro 1 – Parâmetros Mecânicos (Venda Oliveira, 2000).

Mat.	Prof. (m)	γ (kN/m^3)	K_0(nc)	OCR	Ko(oc)	Parâmetros Cam Clay Modificado					K_v (m/dia)
						e_o	$e_{\lambda o}$	λ	κ	M	
1	0 - 0,5	15,0	0,40	7,5	0,90	2,0	2,57	0,217	0,027	1,481	------
2	0,5 - 1,5	15,0	0,40	5,5	0,79	2,0	2,72	0,217	0,027	1,481	$1,3x10^{-4}$
3	1,5 - 3	14,8	0,40	3,5	0,66	2,0	2,88	0,261	0,035	1,481	$5,2x10^{-4}$
4	3 - 4,5	14,5	0,40	1,8	0,51	2,2	3,05	0,304	0,060	1,481	$8,64x10^{-4}$
5	4,5 - 6,5	14,5	0,40	1,0	0,40	2,1	3,13	0,304	0,060	1,481	$1,73x10^{-4}$
6	6,5 - 8,5	15,2	0,40	1,0	0,40	1,8	2,45	0,178	0,025	1,481	$0,43x10^{-4}$
7	8,5 - 21,0	15,0	0,40	1,0	0,40	1,9	2,76	0,217	0,026	1,481	$0,52x10^{-4}$
Aterro	------	22,0	0,50	1,0	0,50	-----	-----	-----	-----	-----	------

Os geodrenos usados *in situ* encontravam-se dispostos numa malha quadrada com espaçamento de 2,2m, possuindo cada geodreno 100mm de largura e 3mm de espessura. Numericamente, estes geodrenos são simulados por "tubos" de secção quadrada com o mesmo perímetro do geodreno real e com um coeficiente de permeabilidade elevado ($k_{geodreno}$ = 0,1 m/s), de modo a simular uma elevada capacidade de descarga. Na Figura 3 representa-se o solo de fundação com a malha de geodrenos.

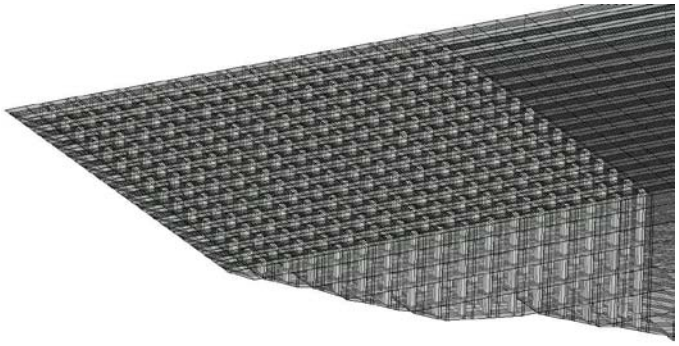


Figura 3 – Malha de Geodrenos (Cruz, 2008).

Uma vez que o tamanho da malha de elementos finitos condiciona o custo computacional em termos de memória e tempo de cálculo, pretende-se que a malha seja o mais simples possível, mas que traduza as hipóteses do cálculo em 3D. Assim, tendo em consideração a regularidade do perfil geológico na direcção longitudinal foi possível definir dois planos de simetria que simplificam muito o problema. A Figura 4 ilustra a simplificação efectuada.

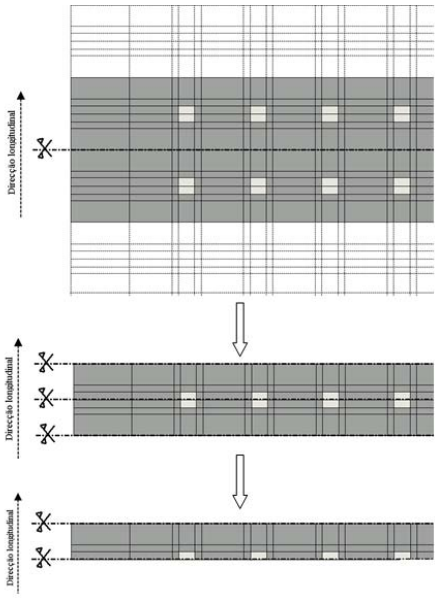


Figura 4 – Simplificação do Modelo Através das Considerações de Simetria (Cruz, 2008).

Tendo em consideração as condições de simetria (Figura 4), ilustra-se na Figura 5 o modelo de cálculo utilizado na análise numérica, o qual corresponde a uma pequena "fatia" da malha representada na Figura 3, preservando no entanto as características do modelo inicial. Tal como se pode observar, o aterro é composto por várias camadas de elementos, as quais simulam o seu faseamento construtivo, descrita na Figura 6.

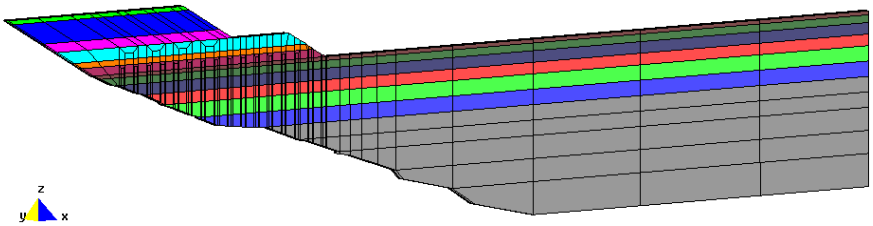


Figura 5 – Malha de Elementos Finitos (Cruz, 2008).

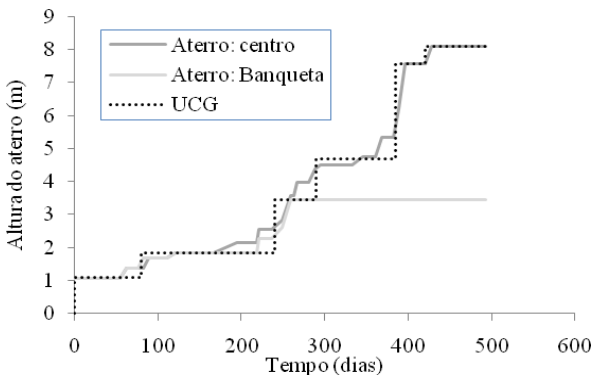


Figura 6 – Faseamento Construtivo do Aterro (Venda Oliveira, 2000).

O nível freático encontra-se a um metro de profundidade, na base da camada 1 (ver Figura 2). Todos os elementos da fundação situados abaixo do nível freático são do tipo 3D de 20/8 pontos nodais, (cálculo dos deslocamentos em 20 nós e das pressões intersticiais em 8 nós), permitindo simular o fenómeno de consolidação, enquanto que todos os elementos da camada 1 e do aterro são modelados por elementos 3D de 20 nós. Desta forma, a malha de elementos finitos é composta por um total de 1917 elementos e 10406 pontos nodais. As condições de fronteira são definidas da seguinte forma:

- deslocamentos impedidos no plano transversal (x e z) na linha de contacto da fundação com o maciço rochoso;
- deslocamentos impedidos na direcção vertical (z) na linha de contacto entre o aterro e o maciço rochoso, de forma a simular uma eventual "descolagem do talude" (Venda Oliveira, 2000);
- deslocamentos impedidos na direcção horizontal do plano transversal (x) no plano que simula a fronteira lateral da fundação;
- deslocamentos impedidos na direcção longitudinal (y) nos dois planos de simetria;
- fronteiras permeáveis no plano horizontal localizado à cota do nível freático;
- fronteiras impermeáveis no contacto do aterro e da fundação com o maciço rochoso e no plano da fronteira lateral da fundação;
- cargas hidráulicas fixas nas fronteiras permeáveis.

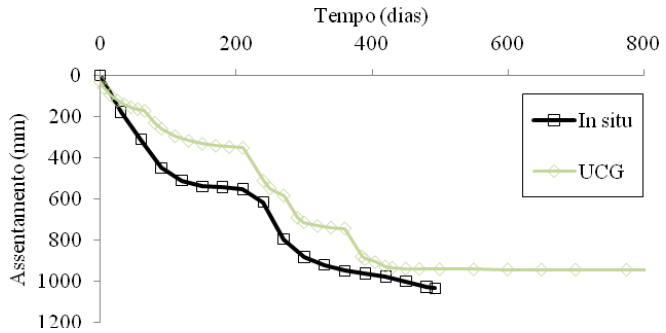
4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Análise das deformações

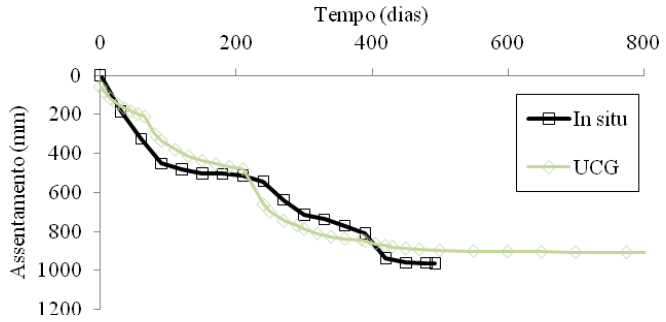
Na Figura 7 confrontam-se os resultados numéricos com os valores observados *in situ*, em termos da evolução temporal dos assentamentos em T_1, T_2 e M_1.

Em termos qualitativos, verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e o comportamento observado *in situ*, apesar de em termos quantitativos existirem algumas diferenças, sendo mais expressivas em M_1 (Figura 7c). Tendo em conta as discrepâncias existentes entre o faseamento de execução real da obra e o imposto nos cálculos, verifica-se que a análise numérica reproduz o efeito do carregamento do terreno, registando-se imediatamente após a instalação de uma camada de aterro uma elevada "taxa" de variação do assentamento, a qual se atenua com o tempo. Pela análise destes gráficos constata-se também que o efeito dos geodrenos é reproduzido, uma vez que se obtêm velocidades de deformações por consolidação elevadas, relativamente ao que é comum neste tipo de solos.

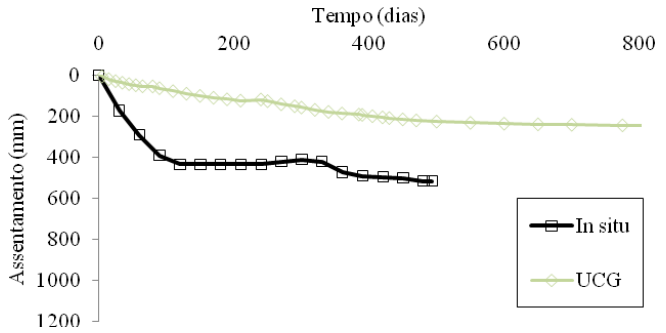
Relativamente à bacia de assentamentos (Figura 8), pode também constatar-se uma boa aproximação entre os valores medidos e os obtidos por via numérica, observando-se uma maior diferença no ponto mais próximo do maciço rochoso, o que poderá estar relacionado com uma deficiente interpretação da espessura do aluvião aí existente e com a consideração de deformações nulas no maciço rochoso.



a) Assentamentos na Placa T_1.

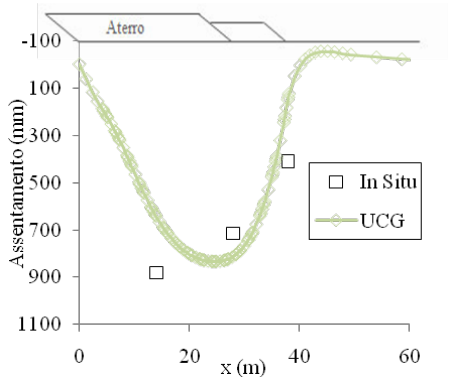


b) Assentamentos na Placa T_2.

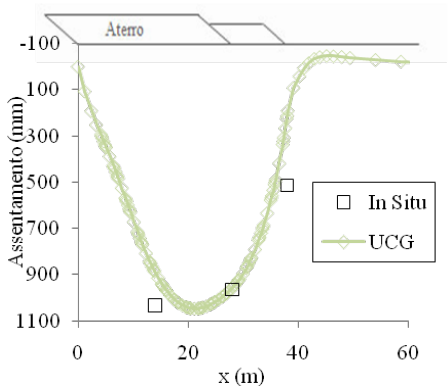


c) Assentamentos na Marca M_1.

Figura 7 – Evolução Temporal dos Assentamentos nas Placas T_1 e T_2 e na Marca M_1 (Cruz, 2008).



a) t = 290 dias.

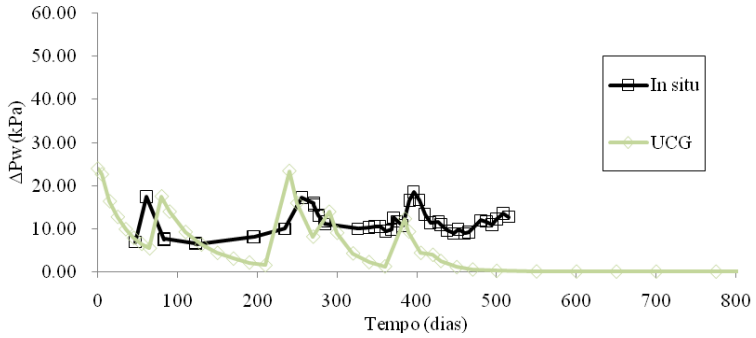


b) t = 500 dias.

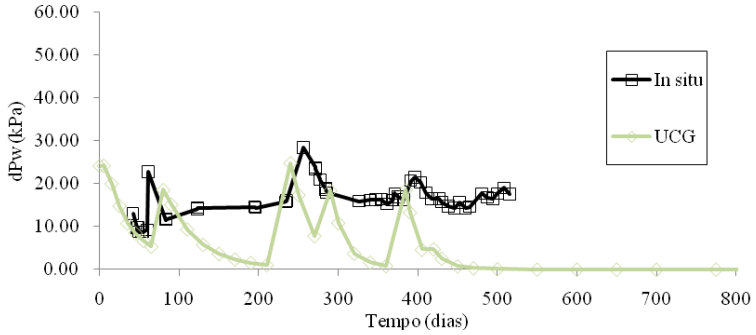
Figura 8 – Assentamentos Superficiais Transversais (Cruz, 2008).

4.2. Análise das pressões intersticiais

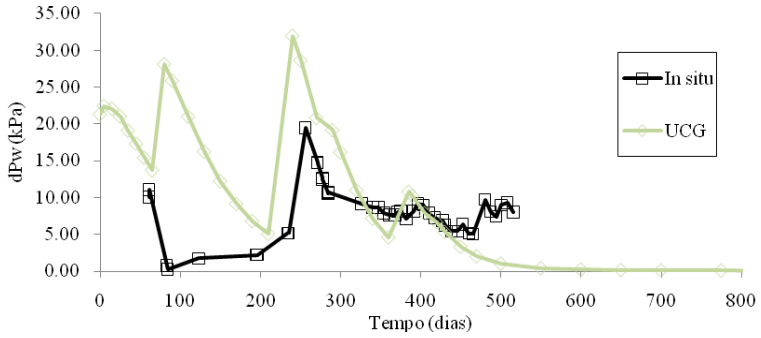
Em termos da evolução no tempo dos excessos de pressão intersticial (Figura 9), constata-se que a análise numérica origina uma evolução coerente com o faseamento construtivo, embora, em termos quantitativos, nomeadamente para P_5, se registem valores um pouco aquém dos medidos *in situ*. Julga-se que estas diferenças são devidas, para além de causas inerentes ao cálculo numérico, a uma deficiente sincronização entre o ritmo de construção do aterro e os instantes de registo das leituras, para além de reflectirem a subida sazonal do nível freático imposta por necessidades da agricultura local, observada para um tempo superior a 300 dias (Venda Oliveira e Lemos, 2002), não tendo sido este último fenómeno considerado no modelo de cálculo devido à inexistência de informações mais detalhadas.



a) Excessos de Pressão Intersticial no Piezómetro P_2.



b) Excessos de Pressão Intersticial no Piezómetro P_3.

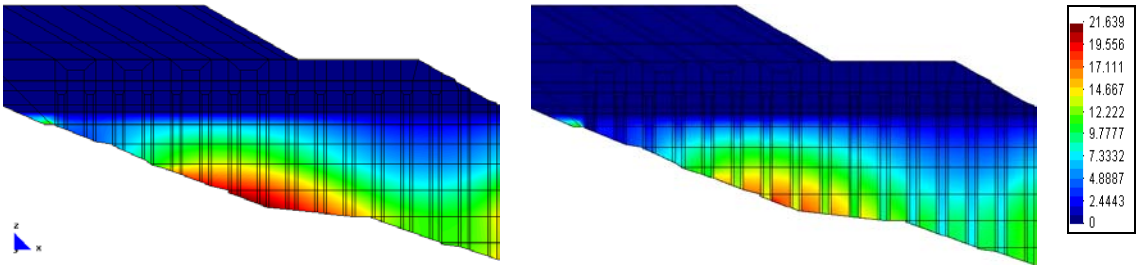


c) Excessos de Pressão Intersticial no Piezómetro P_5.

Figura 9 – Evolução dos Excessos de Pressão Intersticial nos Piezómetros P_2, P_3 e P_5 (Cruz, 2008).

Na Figura 10 apresentam-se as isolinhas dos excessos de pressão intersticial em dois cortes transversais, um no plano que intersecta os geodrenos (Figura 10a) e outro no plano intermédio

(Figura 10b). Como seria de esperar, a dissipação de pressão intersticial é mais rápida na zona envolvente dos geodrenos, comprovando o bom funcionamento do modelo 3D considerado.



a) Corte Transversal em Plano Sem Drenos. b) Corte Transversal em Plano Com Drenos.

Figura 10 – Isolinhas para os Excessos de Pressão Intersticial no Instante t = 390 dias (Cruz, 2008).

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi efectuada uma análise 3D do comportamento de um aterro da A14 em Santa Eulália, considerando o fenómeno de consolidação em conjunto com a utilização do modelo constitutivo Cam Clay Modificado para reproduzir o comportamento do solo de fundação. Os resultados obtidos por via numérica evidenciam uma concordância bastante razoável com as medições efectuadas *in-situ*, nomeadamente em termos de assentamentos. Relativamente à geração de pressões intersticiais, a evolução obtida por via numérica é coerente com o comportamento teórico previsto, nomeadamente na simulação das fases de carga e de consolidação e na simulação das condições de fluxo impostas pelos drenos verticais. Os resultados obtidos mostram que o programa de cálculo UCGeoCode funciona adequadamente, produzindo resultados coerentes e similares aos obtidos num caso real.

REFERÊNCIAS

Almeida e Sousa, J.N. (1998). *Túneis em maciços terrosos: Comportamento e modelação numérica*. Tese de dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, especialidade em Geotecnia, Universidade de Coimbra.

Coelho, Paulo A.L.F. (2000). *Caracterização geotécnica de solos moles: Estudo do local experimental da Quinta da Foja (Baixo Mondego).* Tese de dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Cruz, Francisco P.M.L. (2008). *Implementação do fenómeno de consolidação num programa de elementos finitos 3D*. Tese de dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia, Universidade de Coimbra.

Venda Oliveira, P.J. (2000). *Aterros sobre solos moles: modelação numérica*. Tese de dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, especialidade em Geotecnia, Universidade de Coimbra.

Venda Oliveira, P.J. e Lemos, L.J.L. (2002). Metodologias de simulação de drenos verticais em análises planas. *8º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 1, pp. 769-780, Lisboa.