

MONITORIZAÇÃO DE ATERROS

EDUARDO M. MIRA FERNANDES

ELSAMEX PORTUGAL

FRANCISCO ADELL ARGILES

ELSAMEX / CENTRO DE INVESTIGACIÓN ELPÍDIO SANCHEZ MARCOS

LUÍS BUDIA MARIGIL

ELSAMEX / CENTRO DE INVESTIGACIÓN ELPÍDIO SANCHEZ MARCOS

RESUMO

A recente realização de obras rodoviárias e ferroviárias importantes e com imposições de traçado em termos de características geométricas e de largura das plataformas, por vezes associadas a condições de ocupação do solo e orográficas particulares, tem potenciado a necessidade de construir aterros com alturas bastante significativas e interessando condições de fundação singulares, associadas por exemplo, a baixas aluvionares e depósitos a meia-encosta. Assim, para além dos cuidados necessários a ter ao nível das várias fases do projecto, nomeadamente no que diz respeito a uma cuidada Prospecção Geotécnica e convenientes estudos de estabilidade e deformabilidade torna-se imprescindível o recurso à instrumentação dos aterros, de modo a acompanhar o comportamento destes durante a obra e durante a sua vida útil. Nesta comunicação, para além de se estabelecer alguns critérios de utilização, refere-se a experiência da Elsamex Portugal em algumas situações.

1. INTRODUÇÃO

A recente realização de obras rodoviárias e ferroviárias importantes, envolvendo grandes volumes de terraplenagens, face às velocidades de Projecto e às imposições de traçado em termos de características geométricas e de largura das plataformas, tem criado a necessidade de construir aterros com alturas bastante significativas e interessando condições de fundação singulares, associadas por exemplo, a baixas aluvionares e a depósitos a meia-encosta. Se por um lado, estes grandes investimentos económicos têm sido acompanhados duma evolução técnico-científica, por exemplo nas áreas do Projecto e da Construção, nos domínios da instrumentação e da observação do comportamento das obras geotécnicas parece haver ainda alguma inércia na adopção sistemática de medidas planeadas que permitam efectivamente

acompanhar o comportamento das obras, neste caso dos aterros, não durante a vida útil como também durante a construção. Admite-se que esta situação possa resultar da falta de tradição neste domínio da Geotecnia face à ocupação recente de zonas de orografia mais acidentada e maciços de materiais com características geotécnicas singulares.

Nesta comunicação, para além de se estabelecer alguns critérios de utilização, refere-se a experiência da Elsamex Portugal no caso particular do atravessamento em aterro da baixa aluvionar do Rio Alenquer, onde foram caracterizados solos de resistência ao corte baixa, deformabilidade elevada e permeabilidade baixa, que acarretam assentamentos no tempo elevados e condicionam a curto prazo (fase construtiva) a altura do aterro.

2. DISPOSITIVOS DE OBSERVAÇÃO

Os dispositivos utilizados na observação do comportamento dos aterros, podem ser de 4 tipos, saber: i) deslocamentos (superficiais e internos); ii) tensões; iii) vibrações; iv) dados meteorológicos. Usualmente, têm sido utilizados na observação de obras de aterro, rodoviários e ferroviários, dispositivos de observação dos deslocamentos e das tensões. A Elsamex tem aplicado principalmente dispositivos pouco sofisticados, normalmente de maior durabilidade e menor taxa de mortalidade, como sejam: i1) deslocamentos superficiais – medição em pontos topográficos (segundo 3 direcções); i2) deslocamentos internos verticais – placas de nivelamento e medição em pontos topográficos no interior de PH's; i3) deslocamentos internos horizontais - inclinómetros); ii) tensões - piezómetros de tubo aberto.

3. CENÁRIO GEOTÉCNICO

O aterro em estudo foi executado no âmbito da construção de uma estrada, cujo traçado se desenvolve em aterro sobre a margem aluvionar do Rio Alenquer entre o Pk 0+100 e o 0+850 e sobre uma linha de água entre o Pk 1+300 e o 1+350. Nestes locais, o aterro apresenta, ao eixo, uma altura máxima de 7 m no primeiro troço e de 8 m no segundo. A espessura dos terrenos de natureza aluvionar varia entre 20 m e os 8/10 m. A litologia dos materiais aluvionares varia entre areias finas a médias siltosas a siltes argilosos\lodosos. O nível freático encontra-se entre os 0 e os 3 m de profundidade.

Previo-se que os terrenos aluvionares pudessem atingir uma espessura da ordem de 21 m e corresponderiam a um complexo litologicamente heterogéneo e de estrutura complexa, englobando fácies argilosas, arenosas e cascalhentas, em camadas com espessura variável, por vezes com carácter lodoso. Alguns níveis argilosos poderiam exhibir resistência muito baixa e elevada compressibilidade, com valores de SPT muito baixos, por vezes nulos. Tendo em

atenção o perfil geológico e geotécnico, foram consideradas 4 zonas distintas, definidas em função da altura do aterro e da espessura de aluvião, como indicado no quadro 1.

Quadro 1 - Zonas geotécnicas

Zona	Localização	Altura do aterro	Altura do aluvião
I	Pk 0+100 ao Pk 0+680	≈ 4 m	≈ 10 m
II	Pk 0+680 ao 0+900	≈ 7 m	≈ 21 m
III	Nó / Ramo A+B	≈ 12 m	≈ 10 m
IV	cerca do Pk 1+300	≈ 8 m	≈ 8 m

O quadro 2 resume, nas secções passíveis de comparação, os resultados obtidos nos ensaios edométricos e de corte directo realizados na fase de Projecto de Execução, no que diz respeito ao coeficiente de consolidação c_v , ao coeficiente de compressibilidade volumétrica m_v , à coesão c' e ao ângulo de atrito interno f' .

Quadro 2 - Resumo dos ensaios edométricos e de corte directo

Localização	c_v (m ² /s)	m_v (MPa ⁻¹)	c' (KPa)	f' (°)
PK 0+650	$6,4 \times 10^{-7}$	0,851	58	19
PK 0+800	$1,2 \times 10^{-7}$	1,48	11	34
PK 0+150	$3,4 \times 10^{-7}$	-	11	31
PK 0+300	$1,1 \times 10^{-6}$	0,97	30	31

4. PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O “Plano de Instrumentação” consistiu, no início da construção, da colocação nas secções consideradas mais representativas, de piezómetros do tipo hidráulico (Casagrande), de inclinómetros localizados nos pés dos aterros e de placas de assentamento constituídas por placas de aço acopladas a varões roscados localizadas na superfície destes. Estes equipamentos seguiram a frequência de leituras dada pelo quadro 3.

Quadro 3 - Frequência de leituras

Período de leitura	Frequência	Duração
Construção	2 a 3 vezes/semana	9 meses
Pós-Construção	1 a 2 vezes/mês	3 meses
Pós-Construção/Estabilização	1 vez/mês	6 meses

Apresenta-se na figura o perfil Geotécnico Interpretativo (longitudinal), com referência à localização das secções instrumentadas. Como complemento a este plano e face ao desenvolvimento dos trabalhos e às observações realizadas em campo, foi complementado o dispositivo de observação com a instalação de marcas de observação topográfica ao nível da soleira das passagens hidráulicas em três pontos/alvos fixos, 2 nos extremos e 1 no centro, de modo a determinar a deformação vertical (assentamento) destas, consentâneas com o aterro. Estas marcas, seguiram a frequência de leituras referida no quadro 3 e no total foram instrumentadas quatro passagens hidráulicas, situadas aos PK's: 0+500, 0+650, 0+725 e 0+800. O quadro 4, evidencia a localização das secções instrumentadas com os restantes equipamentos com referência à zona geotécnica a que pertencem.

Quadro 4 - Localização das secções instrumentadas e equipamentos instalados

Secção	Localização	Zona geotécnica	Inclinómetro	Piezómetro	Placa de assentamento
S1	Pk 0+325	Zona I	I1D	P1D (a 2 profundidades)	1
S2	Pk 0+750	Zona II	I2E, I2D	P2E (a 2 profundidades)	1
S3	Pk 0+800	Zona II	I3D, I3DII	P3D (a 2 profundidades)	1
S4	Pk 0+850	Zona II	I4E, I4D	P4D, P4E (a 2 profundidades)	1
S5	Pk 1+315	Zona IV	-	-	1
S6	Pk 0+050	Zona III	-	P6E (a 2 profundidades)	1
S7	Pk 0+100	Zona III	-	-	1

O “Plano de Instrumentação” consistiu também, da realização de campanhas de ensaio com o piezcone (CPTU), com o “*Vane Test*” e de dissipação em três fases distintas: no início de obra, com o aterro a meia altura e no final da construção. O quadro 5, resume os ensaios realizados “*in situ*”, por secção instrumentada.

Quadro 5 - Ensaios “*in situ*”

Secção	CPTU	“ <i>Vane Test</i> ”	Dissipação
S1	CPTU 1 D	V1D1, V1D2 e V1D3	1
S2	CPTU 2 E	V2E1, V2E3 e V2E4	1
S3	CPTU 3 D	V3D1, V3D2 e V3D3	2
S4	CPTU 4 D e CPTU 4 E	V4D1, V4D2, V3D3, V4E2 e V4E3	2
S5	-	-	-
S6*	CPTU 6 E	V6E1 V6E2 e V6E3	-
S7	-	-	-

* A secção S 6 foi reposicionada para o Pk 0+390

5. RESULTADOS OBTIDOS

Após a realização dos ensaios de campo e análise das leituras de observação periódicas aferiram-se as profundidades da aluvião por secção instrumentada, como se esquematiza no quadro 7. Com a figura 2, pretende-se evidenciar alguns dos resultados obtidos na fase final da construção no que diz respeito à resistência de ponta lida nos ensaios CPTU, à resistência não drenada obtida pelos ensaios de “*Vane Test*” e ao deslocamento horizontal sofrido pelo aterro (lido nos inclinómetros), por secção transversal e com referência à litologia do terreno de fundação.

Quadro 7 - Profundidades da aluvião

Secção	Altura do aluvião	Altura do aterro
S1	≈ 10 m	≈ 4 m
S2	≈ 20 m	≈ 6 m
S3	≈ 22 m	≈ 6 m
S4	≈ 20 m	≈ 7 m
S6	≈ 10 m	≈ 12 m

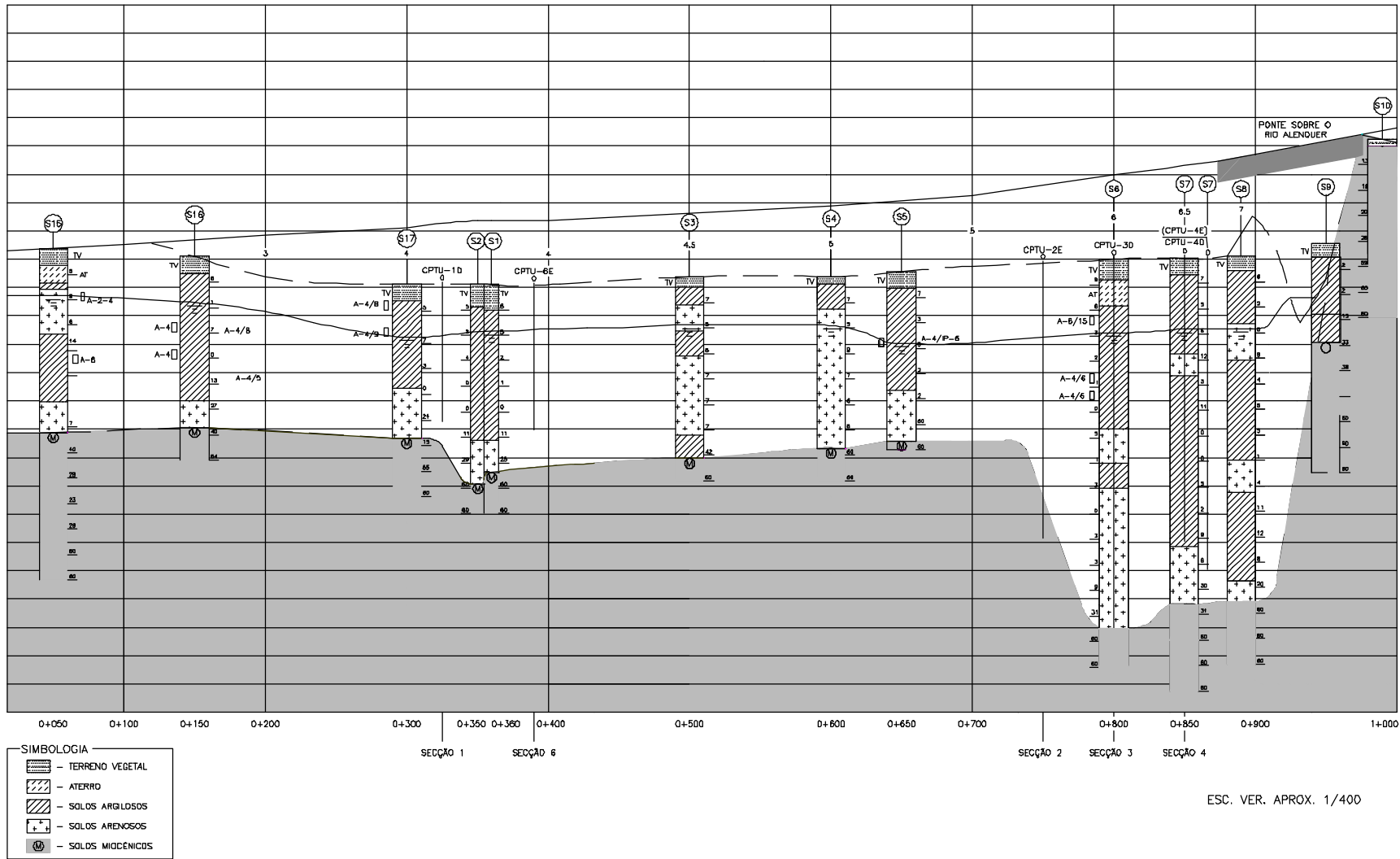


Figura 1- Perfil Geotécnico Interpretativo (longitudinal)

ESC. VER. APROX. 1/400

5.1 Campanhas de observação periódicas

Através das leituras de observação topográfica efectuadas nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas, estimou-se o coeficiente de compressibilidade volumétrica, m_v pela equação 1, em que $\Delta s'$ é o incremento de tensão efectiva, s_c a variação da espessura do estrato (assentamento total por consolidação) e h_0 a altura do estrato.

$$\Delta s' = \frac{1}{m_v} \frac{s_c}{h_0} \quad (1)$$

No quadro 8 apresentam-se os resultados obtidos para o coeficiente de compressibilidade volumétrica, quer através das leituras efectuadas nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas, quer através dos ensaios edométricos realizados na fase de Projecto de Execução.

Quadro 8 - Resultados de m_v (MPa^{-1})

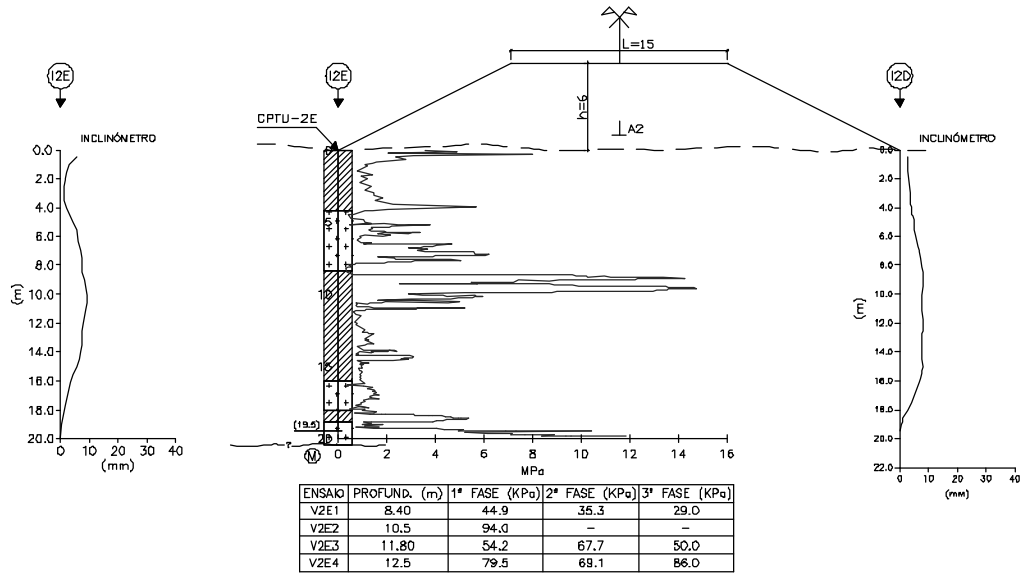
Pk	Placas de assentamento	Passagens hidráulicas	Ensaio edométrico - acréscimo de tensão lido:		Profundidade da aluvião
			Placas de assentamento	Passagens hidráulicas	
PK 0+300			0,97		± 10 m
PK 0+315	0,18				
PK 0+320	0,26				
PK 0+500		0,3			10 a 15 m
PK 0+650		0,17		0,85	
PK 0+725		0,29			
PK 0+745	0,07				15 a 20 m
PK 0+755	0,17				
PK 0+795	0,07				
PK 0+800		0,25	1,53	1,37	
PK 0+805	0,06				
PK 0+830	0,08				
PK 0+840	0,07				

Face aos resultados, verificou-se que os valores para m_v obtidos através das leituras nas placas de assentamento não se enquadram nos valores obtidos para as passagens hidráulicas. Também verificou-se que os valores obtidos para m_v no ensaio edométrico são aproximadamente cinco vezes maiores, comparativamente com os valores obtidos através das leituras do assentamento lidos, quer nas placas de assentamento, quer nas passagens hidráulicas.

Através das leituras de observação topográfica efectuadas nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas, estimou-se o coeficiente de consolidação, α_v pelo método de Taylor como indicado na equação 2, em que T_{90} corresponde ao factor tempo para um grau de consolidação médio de 90%, t_{90} é o tempo necessário para atingir 90% da consolidação total e H é a maior distância que uma partícula de água tem de percorrer para abandonar o estrato em consolidação em direcção a uma fronteira drenante.

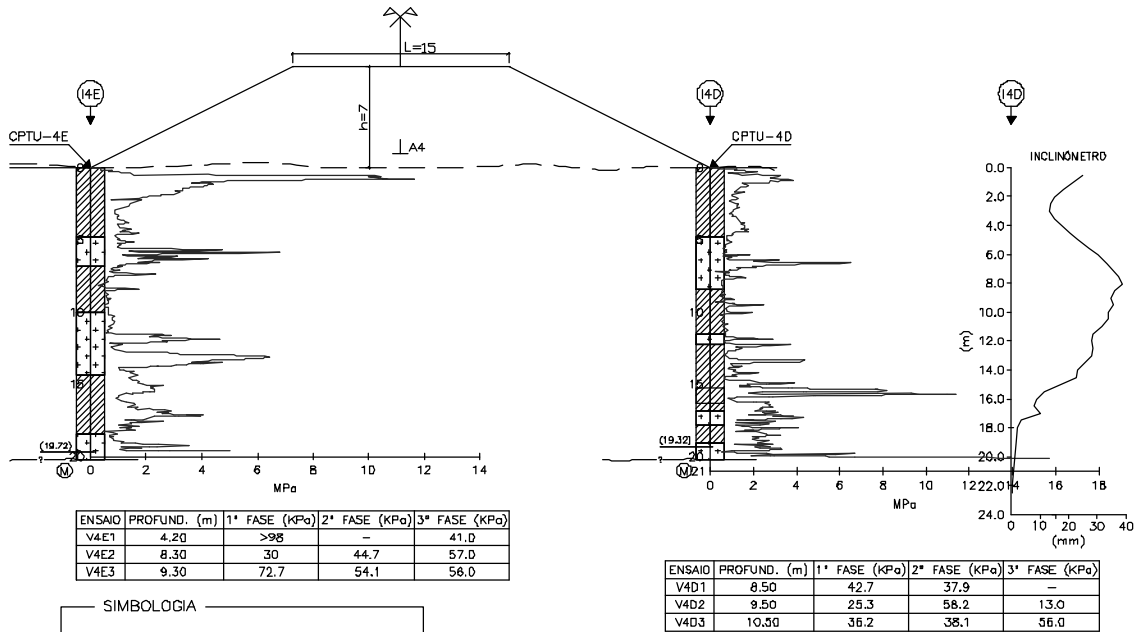
SECÇÃO 2 - PT 31

PK 0+750



SECÇÃO 4 - PT 35

PK 0+850 (Viaduto R. Alenquer)



SIMBOLOGIA

- ⊥ A6 - PLACA DE ASSENTAMENTO
- I6E - INCLINÓMETRO
- CPTU - ENSAIO DE PERFURAÇÃO ESTÁTICA, COM MEDIÇÃO DE u
- ▨ - SOLOS ARGILOSOS
- ▤ - SOLOS ARENOSOS
- Ⓜ - SOLOS MIOCÊNICOS

ESC. VER. APRO. 1/500

Figura 2- Resultados obtidos por perfil transversal

Através das leituras de observação topográfica efectuadas nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas, estimou-se o coeficiente de consolidação, c_v pelo método de Taylor como indicado na equação 2, em que T_{90} corresponde ao factor tempo para um grau de consolidação médio de 90%, t_{90} é o tempo necessário para atingir 90% da consolidação total e H é a maior distância que uma partícula de água tem de percorrer para abandonar o estrato em consolidação em direcção a uma fronteira drenante.

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H^2} \quad (2)$$

No quadro 9 apresentam-se os resultados obtidos de c_v , quer através das leituras efectuadas nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas, quer através dos ensaios de dissipação realizados na fase de Obra, quer ainda dos ensaios edométricos realizados na fase de Projecto de Execução.

Quadro 9 - Resultados de c_v (m^2/s)

Pk	Placas de assentamento	Passagens hidráulicas	Ensaio de dissipação	Ensaio edométrico	Profundidade da aluvião
PK 0+150				3,40E-07	± 10 m
PK 0+300				1,10E-06	
PK 0+315	5,66E-05				
PK 0+320	7,78E-05		5,00E-07		
Pk 0+500		1,10E-05			10 a 15 m
Pk 0+650				6,40E-07	
PK 0+725					
PK 0+745	3,24E-05		4,90E-08		15 a 20 m
PK 0+755	3,31E-05				
PK 0+795	3,46E-05				
PK 0+800			6,60E-08 / 6,40E-08	1,20E-07	
PK 0+805	3,53E-05				
PK 0+830	3,61E-05				
PK 0+840	3,70E-05				
PK 0+850			4,10E-07 / 5,90E-07		

Face aos resultados, verificou-se que os valores para c_v obtidos através das leituras nas placas de assentamento e nas passagens hidráulicas são da mesma ordem de grandeza. Ao comparar estes resultados com os obtidos através dos ensaios de dissipação e edométricos, verificou-se que estes são muito inferiores (da ordem de 10 a 100 vezes menores). Também, constatou-se que os valores de c_v , obtidos pelos ensaios são em 50% dos casos como da mesma ordem de grandeza e nos restantes 50% como 10 vezes inferiores. Refere-se que o valor de c_v obtido através das leituras efectuadas nas PH's pode não ser o correctamente estimado pelo Método de Taylor, uma vez que as leituras só se iniciaram quando o aterro já se encontrava na fase de consolidação secundária.

5.2 Ensaios “*in situ*”

Após comparação das resistências não drenadas, de ponta c_{ul} , e residual c_{ur} , obtidas no ensaio “*Vane Test*” e face aos resultados obtidos no ensaio CPTU, consideraram-se como representativas, as secções indicadas no quadro 10.

Quadro 10 - Secções representativas

“Vane-Test” nº	Localização	Z (m)	Cu / Cur (1ªF)	Cu / Cur (2ªF)	Cu / Cur (3ªF)	Δ Cu (1ªF-2ªF)	Δ Cu (1ªF-3ªF)
V3D2	0+800	7,3	26 / 17	27 / 17	37 / 18,5	1,0	11,0
V4D3	0+850	10,5	36,2 / 16	38 / 16	56 / 18	2,0	19,8
V1D2	0+325	6,5	20,8 / 15	12,5 / 8	29 / 11,5	- 7,3	8,2
V6E3 (D)	0+390	6,7	26 / 10	14,2 / 10	53 / 18	- 11,8	27

Note-se que os valores de c_u registados durante a 2ª campanha de ensaios, realizada no mês de Março/2002 foram obtidos após um período chuvoso numa fase de obra em que as terraplenagens estiveram paradas. Estes factos, na altura, permitiram considerar adequadas as condições de fundação dos aterros e assegurar a continuidade dos trabalhos. Quanto à 1ª e 3ª campanha de ensaios, estas foram realizadas em Agosto/2001 no início da construção dos aterros e em Novembro/2003 quando a via já se encontrava em serviço. Na figura 3, representam-se os resultados de c_u obtidos directamente do ensaio “Vane Test” em função da profundidade do solo aluvionar, para as secções mais representativas.

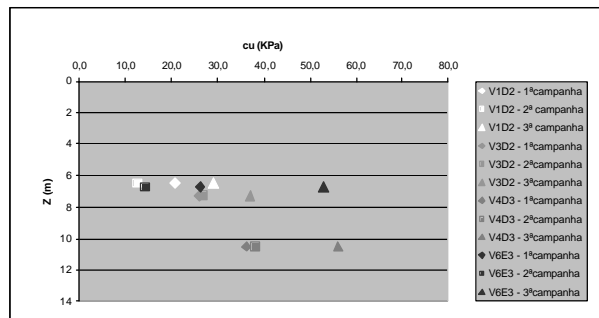


Figura 3 – c_u função da profundidade

Para as secções mais representativas, parece ter ocorrido um acréscimo de resistência entre a 1ª e a 3ª campanha, como já indicado no quadro 10. Também, o valor de c_u parece crescer mais ou menos linearmente em profundidade, estando compreendido grosseiramente entre os 10 e os 60 KPa. De acordo com vários autores, a razão entre c_u e a tensão efectiva, s_{vo}' é da ordem de 0,2 e para solos normalmente consolidados, para valores de f entre 20° e 35°, pode variar entre 0,2 a 0,4. Na figura 4, representam-se os resultados de c_u/s_{vo}' em função da profundidade do solo aluvionar, para as secções mais representativas, assinalando o limite de variação entre 0,2 e 0,4. Face aos resultados, verificou-se que 66% destes pertenciam ao intervalo entre 0,2 e 0,4.

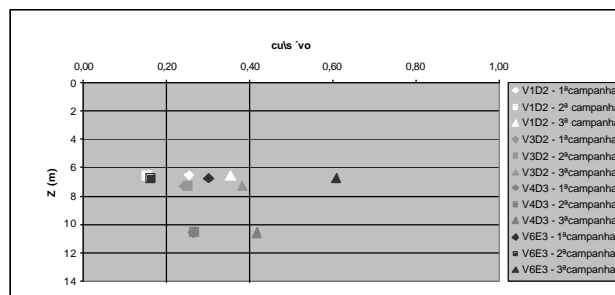


Figura 4 – c_u/s_{vo}' função da profundidade

A resistência não drenada pode ser obtida conhecendo o valor da resistência de ponta, q_c , lida directamente no ensaio CPTU através do factor de cone, N_c , dado pela equação 3.

$$N_c = \frac{q_c - S_{v0}}{c_u} \quad (3)$$

Admite-se que em função do tipo de argila os valores de N_c tomam o valor de 15 ± 5 , de acordo com a experiência acumulada de vários autores. Adoptou-se para o cálculo de c_u o valor intermédio de 15, tendo em atenção o índice de plasticidade, I_p , obtido nas sondagens realizadas para o Projecto de Execução que variou entre 3 e 15, uma vez que o valor do parâmetro N_c pode ser relacionado com este índice pela equação 4.

$$N_c = 13 + \frac{5,5}{50} I_p (\pm 2) \quad (4)$$

Na figura 5, representam-se os resultados de c_u obtidos a partir do ensaio CPTU em função da profundidade do solo aluvionar, para as secções mais representativas.

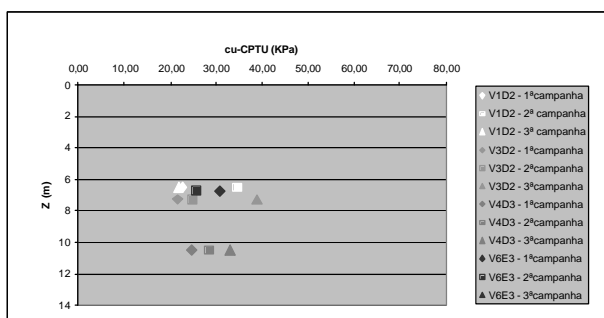


Figura 5 – c_u a partir do CPTU função da profundidade

Verificou-se que os resultados de c_u obtidos a partir do CPTU são mais uniformes e estão compreendidos entre os 20 e os 40 KPa, comparativamente com os resultados obtidos a partir do “*Vane Test*”. Na figura 6, representam-se os resultados de c_u/s'_{vo} obtidos a partir do CPTU em função da profundidade do solo aluvionar, para as secções mais representativas. Face aos resultados, verificou-se que quase a totalidade dos resultados obtidos para a razão de c_u/s'_{vo} estão compreendidos entre o intervalo de 0,2 e 0,4.

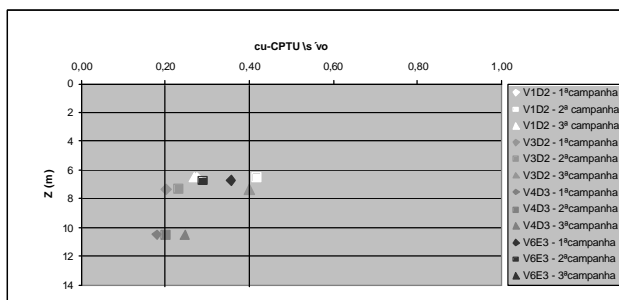


Figura 6 – c_u/s'_{vo} a partir do CPTU função da profundidade

Pela equação 3, também foi avaliado o valor de N_c , a partir do valor de c_u obtido no ensaio de “*Vane Test*” e do valor de q_c obtido no ensaio CPTU, que se apresenta na figura 7. Na figura 8, indica-se a variação do N_c , com o I_p . Face aos resultados, verificou-se que mais de 50% dos valores obtidos para N_c estão compreendidos entre o intervalo de 10 a 20.

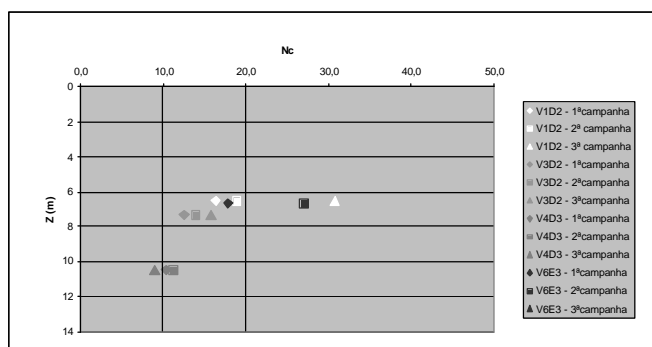


Figura 7 – N_c função da profundidade

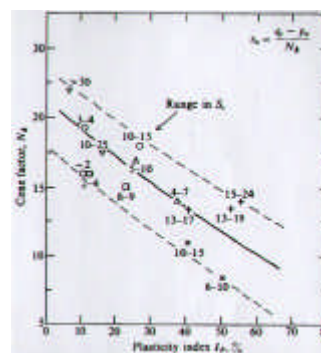


Figura 8 – N_c função de IP

6. CONCLUSÕES

A instrumentação e os ensaios de campo em fase de Obra assumem um papel importante na avaliação da estabilidade e da segurança de qualquer obra geotécnica, ao permitirem em tempo útil controlar certas grandezas. Foi, nesta perspectiva que se previu no Projecto de Execução a instrumentação da obra, mediante a colocação de piezómetros, inclinómetros e de marcas de observação topográfica. Estes instrumentos de medição são os usualmente utilizados em estruturas rodoviárias na avaliação dos deslocamentos, horizontais e verticais. Como complemento a esta avaliação, efectuaram-se leituras dos deslocamentos nas PH's, cujos resultados foram uniformes, pelo que se considera que esta técnica simples e directa de avaliação possa ser um instrumento precioso na observação deste tipo de obra.

Dadas as características peculiares dos aterros e da respectiva fundação, considera-se importante proceder à avaliação das características de resistência com as deformações experimentadas pela estrutura (aterro e fundação) e extrapolar dentro de certos limites, as futuras e eventualmente proceder à re-avaliação dos critérios de segurança da obra. Neste caso, foram realizadas três campanhas de CPTU e de "Vane-Test" durante a construção.

Ao comparar os resultados obtidos através do ensaio edométrico executado em Fase de Projecto de Execução com os obtidos quer através das leituras nas placas de assentamento, quer através das leituras das PH's, verifica-se que tal como referido na bibliografia, aquele fornece valores mais conservativos (em termos de assentamento ao longo do tempo e na avaliação do tempo de consolidação), que podem, ser devidas ao efeito de descompressão e remeximento dos solos no momento da amostragem e da preparação dos ensaios.

A campanha de ensaios "in situ" levada a cabo em três fases distintas, permitiu aferir a espessura da camada aluvionar nas várias secções e definir as situações mais representativas às profundidades ensaiadas, uma vez que se obteve resultados coerentes e comparativos. Também, esta campanha permitiu conhecer dentro de certas medidas, a evolução dos parâmetros de resistência da fundação, essencialmente em termos de c_u e de q_c . Estas

grandezas, foram relacionadas através do N_c o que permitiu extrapolar o valor de c_u com eficácia e de uma forma contínua em profundidade, salvo algumas situações. No entanto, verificou-se que os resultados obtidos para c_u através da q_c do ensaio CPTU, são maiores mas mais uniformes. Partindo dos valores medidos de q_c e de c_u , conclui-se que mais de 50% dos valores obtidos para o N_c pertencem ao intervalo 10 - 20, de acordo com o indicado na figura 8. Quanto à razão entre c_u/s_{vo} , verifica-se que mais de 50% dos resultados passíveis de comparação estão compreendidos entre 0,2 e 0,4, como referido na bibliografia, para o caso dos solos normalmente consolidados. Parece credível de afirmar, tendo sempre presente a amostragem, que as campanhas de ensaio contribuíram eficazmente para o esclarecimento das condições geológicas e geotécnicas da aluvião e para o conhecimento da variação das mesmas por perfil transversal e em profundidade e durante a construção.

BIBLIOGRAFIA

[1] – ELSAMEX Portugal (2001-2003).– Execução dos aterros sobre a baixa aluvionar do Rio Alenquer – Relatórios Factuais e Notas Técnicas, Sintra;

[2] – Bowles, Joseph - E. *Foundation Analysis and Design – Fifth edition*. McGraw Hill, 1996

[3] – FEUP – DECivil “Projecto de Estruturas - Concepção e dimensionamento de fundações”; 2000

[4] – FEUP - Fernandes, Manuel de Matos “Mecânica dos Solos”, 2000

[5] – UNL/FCT - Caspurro, Isabel Maria Neves dos Santos – “Observação do Comportamento de Obras Geotécnicas. Dissertação para o Grau de Mestre”, Lisboa, 1999