

**TESES DE MESTRADO LNEC**

**ANÁLISE DISTORCIONAL DE SOLOS  
ALUVIONARES LODOSOS**

**Mariana dos Anjos Rodrigues de Carvalho**

Licenciada em Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos  
pela Universidade Nova de Lisboa

**LNEC•2003**



## RESUMO

Casos recentes de rotura desenvolvidos em fundações lodosas, em condições não drenadas, pelo peso de aterros altos ( $h \geq 9,0$  m), tais como os ocorridos durante a construção de aterros na Azambuja e nos terrenos da futura EXPO98 fizeram sobressair a necessidade de desenvolver métodos expeditos, baseados em dados de campo, para estimativas de: i) parâmetros característicos do comportamento de tensões-deformações de solos lodosos; ii) factor de segurança local.

De facto, a expansão da cidade de Lisboa e arredores sobre zonas cujo subsolo é constituído por depósitos aluvionares lodosos, de espessuras consideráveis ( $e \geq 10$  m), caracterizados por valores de  $C_{up}$  reduzidos e valores de sensibilidade relativamente altos, tornam o desenvolvimento dos métodos acima referidos uma contribuição importante.

Nesse sentido propõe-se: i) Obtenção de parâmetros característicos do comportamento de tensões-deformações de solos lodosos a partir dos resultados obtidos nos ensaios de Molinete efectuados no subsolo lodoso da Azambuja Teixeira Duarte (1994 a 1996). Confirmação desses parâmetros por intermédio de ensaios de laboratório (triaxiais e corte simples) em amostras, não remexidas, recolhidas de furos de sondagem efectuados no local pela Teixeira Duarte para fins de investigação; ii) Simulação analítica desses mesmos ensaios e da construção do aterro, usando o método de elementos finitos (MEF); iii) Obtenção de valores de distorção horizontal,  $\gamma_h$ , induzidos, em profundidade no subsolo lodoso da Azambuja pelo peso de aterros, a partir dos registos inclinométricos efectuados no local (LNEC, 1994); iv) Estimativas de factores de segurança local com base nos valores obtidos em i) e iii).

## ABSTRACT

Recent cases of total and partial foundation failures of soft soils during construction of tall embankments such as the case of the railroad overpass at Azambuja and waste fills constructed on the grounds of the future site of the EXPO98 in Lisbon, outstand the need to develop new methods based on in situ data to estimate:

i) stress-strain parameters for finite element stability analysis; ii) local factors of safety.

The expansion of the city of Lisbon to zones where the foundation soils are mainly composed of soft soils with significant thickness (over 10 m) and characterized by low peak shear resistance and high sensitivity made it important to develop such methods.

In this paper it is proposed a method to estimate stress-strain parameters from in situ vane test data. These parameters are compared with parameters obtained from the results of laboratory tests (triaxial and simple shear). These same stress-strain parameters are then used with a finite element analysis to model the total and partial foundation failures of the embankment of the railroad overpass at Azambuja. The results obtained are then analyzed to explain why the soft foundation that was previously treated with geomembranes to accelerate its consolidation, did not increase its undrained shear resistance as expected. The results are checked against topographic measurements of vertical displacements and inclinometer measurements of horizontal displacements. Combining the stress-strain data obtained from the results of the field (vane) and laboratory (triaxial and simple shear) tests with inclinometer field data a method is also proposed to estimate the evolution in the field of local factors of safety.

## ÍNDICE DE MATÉRIAS

	Pág.
INTRODUÇÃO .....	31
CAPITULO 1 - SOLOS ALUVIONARES .....	33
1.1 - Objectivo e descrição geral .....	35
1.2 - Depósitos aluvionares .....	35
1.3 - Causas da sobreconsolidação .....	40
1.4 - Causas da sensibilidade .....	44
1.5 - Caracterização de um depósito .....	45
1.6 - Controlo da evolução do comportamento da obra .....	47
1.7 - Alguns processos de “melhoria” das características dos solos aluvionares (lodosos) .....	48
CAPITULO 2 - RESUMO DOS ENSAIOS EXISTENTES PARA CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS LODOSOS .....	53
2.1 - Introdução .....	55
2.2 - Ensaios de laboratório .....	57
2.2.1 - Análise granulométrica .....	57
2.2.2 - Limites de consistência .....	58
2.2.3 - Teor em matéria orgânica .....	61
2.2.4 - Densidade das partículas .....	61
2.2.5 - Ensaio edométrico .....	61
2.2.6 - Ensaio triaxial .....	63
2.2.7 - Ensaio de corte simples ..	64
2.3 - Ensaios de campo ou “in situ” .....	66
2.3.1 - Ensaios de molinete .....	67
2.3.2 - Ensaios SPT .....	68
2.3.3 - Ensaios CPT .....	69
2.3.4 - Ensaios com pressiômetros .....	71
2.3.5 - Ensaios de carga em placa .....	75
2.4 - Conclusões .....	77

	Pág.
CAPITULO 3 - ANÁLISE TEÓRICA DO ENSAIO DE MOLINETE .....	79
3.1 - Introdução .....	81
3.2- Equipamento .....	82
3.2.1 - Pás de ensaio (molinete) .....	84
3.2.2 - Haste metálica .....	86
3.2.3 - Equipamento de aplicação do momento torsor e de registo .....	86
3.3 - Metodologia do ensaio de corte rotativo; vantagens e limitações .....	87
3.3.1 - Geral .....	87
3.3.2 - Características do equipamento utilizado nos ensaios executados (em 1994, 1995 e 1996) nos lodos da Azambuja .....	92
3.3.3 - Procedimentos nos ensaios realizados pela Teixeira Duarte nos lodos da Azambuja em 1994 e 1995 .....	92
3.3.4 - Procedimentos nos ensaios realizados pelo LNEC e pela Teixeira Duarte nos lodos da Azambuja em 1996 .....	93
3.4 - Considerações sobre o tipo de resistência determinada através do ensaio de corte rotativo .....	94
3.5 - Interpretação dos resultados do ensaio .....	101
3.5.1 - Materiais isotrópicos ( $\tau_v = \tau_h = \tau$ ) .....	104
3.5.2 - Materiais anisotrópicos ( $\tau_v \neq \tau_h$ ) .....	108
3.6 - Potencialidades de utilização dos resultados dos ensaios de molinete .....	109
3.6.1 - Potencialidades correntes .....	109
3.6.2 - Potencialidades de estimativa de parâmetros característicos de tensão-deformação .....	110
3.7 - Simulação do ensaio de molinete .....	114
3.7.1 - Considerações gerais .....	114
3.7.2 - Método dos Elementos Finitos .....	115
3.7.3 - Necessidade de uma solução linear-elástica .....	115
3.7.4 - Validação do modelo com solução linear-elástica .....	118
3.7.5 - Conclusões .....	132

CAPITULO 4 - OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLO A PARTIR DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO .....	133
4.1 - Introdução .....	135
4.2 - Resultados dos ensaios de laboratório .....	135
4.2.1 - Ensaio de identificação (propriedades físicas) .....	135
4.2.2 - Ensaio mecânicos .....	138
4.2.2.1 - Triaxial .....	138
4.2.2.2 - Corte simples .....	140
4.3 - Resultados dos ensaios de campo .....	143
4.4 - Modelo de comportamento analítico do solo .....	151
4.5 - Obtenção dos parâmetros de solo a partir de ensaios de laboratório .....	160
4.5.1 - Estimativa de parâmetros característicos de resistência .....	160
4.5.2 - Estimativa de parâmetros característicos de deformação .....	163
4.6 - Obtenção dos parâmetros de solo a partir de ensaios de campo (molinete) .....	166
4.6.1 - Estimativa de parâmetros característicos de resistência .....	166
4.6.2 - Estimativa de parâmetros característicos de deformação .....	167
4.7 - Simulação analítica e comparação com os resultados dos ensaios de laboratório .....	172
4.7.1 - Introdução.....	172
4.7.2 - Simulação e comparação de resultados dos ensaios de laboratório pelo MEF .....	173
4.7.3 - Simulação e comparação de resultados dos ensaios de laboratório através do conhecimento prévio do valor de deformação de corte , $\gamma$ ....	174
4.8 - Simulação analítica dos ensaios de molinete e comparação com os resultados dos ensaios de campo de molinete.....	178
4.8.1 - Introdução .....	178
4.8.2 - Correção dos resultados de campo .....	179
4.8.3 - Cálculo do desfasamento entre a rotação teórica e a rotação real das pás do molinete .....	180
4.8.4 - Simulação analítica dos ensaios de molinete e comparação com os resultados dos ensaios de campo .....	185
4.8.5 - Conclusões .....	190

	Pág.
CAPITULO 5 - ANÁLISE DO CASO PRÁTICO .....	193
5.1 - Caracterização geológica .....	195
5.1.1 - Trabalhos realizados no reconhecimento geotécnico .....	195
5.1.1.1 - Tecnasol, 1992 .....	195
5.1.1.2 - Teixeira Duarte 1994 e 1995 e LNEC - Teixeira Duarte 1996 .....	198
5.1.2 - Litologia .....	199
5.1.2.1 - Passagem Superior .....	199
5.1.2.2 - Zona da Estação .....	200
5.1.2.3 - Comparação dos resultados.....	204
5.2 - Descrição do caso prático .....	205
5.2.1 - Tipo de problema .....	205
5.2.2 - Antecedentes .....	208
5.2.3 - Análise mediática do problema .....	212
5.2.4 - Medidas tomadas após rotura das fundações do aterro .....	213
5.3 - Análises de estabilidade .....	214
5.3.1 - Introdução .....	214
5.3.2 - Equilíbrio limite; retro-análise .....	215
5.3.2.1 - Programa de cálculo .....	215
5.3.2.2 - Métodos de cálculo .....	216
5.3.2.3 - Análises .....	217
5.3.2.4 - Evolução do factor de segurança com a altura de aterro .....	227
5.3.3 - Elementos finitos .....	229
5.3.3.1 - Introdução .....	229
5.3.3.2 - Malha de elementos finitos e parâmetros de solo .....	231
5.3.3.3 - Casos analisados e apresentação de resultados .....	235
5.3.3.4 - Análise interpretativa dos resultados .....	236
5.3.3.5 - Estudo paramétrico da influência nos resultados de vários níveis de resistência dos lodos .....	251
5.3.3.6 - Estudo da eficiência do sistema drenante .....	253
5.4 - Relações semi-empíricas para estimativa do modelo hiperbólico .....	264
5.5 - Conclusões .....	268

	Pág.
CAPITULO 6 - ESTIMATIVAS DO FACTOR DE SEGURANÇA LOCAL .....	271
6.1 - Introdução .....	273
6.2 - Análise interpretativa da distribuição e evolução do factor de segurança ao longo da superfície de rotura .....	273
6.3 - Interpretação dos resultados inclinométricos .....	278
6.4 - Comparação entre resultados analíticos e de campo .....	280
6.5 - Estimativa do factor de segurança a partir dos dados inclinométricos .....	285
6.6 - Estimativa do valor máximo de distorção possível de registo nos tubos inclinométricos .....	290
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	293
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	297



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 - Planta de localização da Azambuja .....	37
Figura 1.2 - Principais ocorrências de solos moles em Portugal .....	39
Figura 1.3 - Efeito da consolidação secundária na compressibilidade de uma argila .....	42
Figura 1.4 - Variação das tensões efectivas e do OCR em profundidade .....	43
Figura 1.5 - Tensão geostática em solo com superfície horizontal .....	44
Figura 1.6 - Curvas de tensão-deformação para argila e areia densa pura .....	45
Figura 1.7 - Assentamentos .....	48
Figura 2.1 - Carta de plasticidade (segundo Casagrande) .....	60
Figura 2.2 - Esquema da sonda (pressiómetro de Menard) .....	72
Figura 2.3 - Resultado típico do pressiómetro de Menard .....	73
Figura 2.4 - Resultado típico do pressiómetro de Wroth e Huges .....	74
Figura 3.1 - Dispositivo de ensaios (molinete) .....	81
Figura 3.2 - Superfície de rotura assumida, superfície cilíndrica .....	81
Figura 3.3 - Metodologia dos ensaios de campo executados em 1996 .....	95
Figura 3.4 - Equipamento de calibração .....	95
Figura 3.5 - Factor empírico de correcção ( $\mu_{\leq 1,2}$ ) da resistência ao corte obtida em ensaios de corte rotativo em função do índice de plasticidade (Bjerrum); para argilas moles inorgânicas e siltes para análise de estabilidade de taludes, escavações e sapatas .....	96
Figura 3.6 - Valores do factor de correcção, para cálculo de $C_u$ , em função do limite de liquidez .....	98
Figura 3.7 - Valores do factor de correcção, para cálculo de $C_u$ , em função do índice de plasticidade e da tensão vertical efectiva .....	99
Figura 3.8 - Influência do valor da resistência ao corte não drenada registada no ensaio de molinete em função do tempo de espera na realização do ensaio ...	100
Figura 3.9 - Resultados típicos de solos sensíveis .....	102
Figura 3.10 - Ensaio de molinete realizados, a várias profundidades, nas fundações da Passagem Superior da Azambuja .....	111
Figura 3.11 - Ensaio de molinete realizados, a várias profundidades, nas fundações da Passagem Superior da Azambuja, representativos do comportamento dos lodos .....	112

	Pág.
Figura 3.12 - Resultados dos ensaios de campo obtidos em 1996: a) Furo ST1; b) Furo ST2; c) Furo ST3 .....	113
Figura 3.13 - Localização em plantas dos anéis; malha (bidimensional) de elementos finitos usada nas análises de tensão-deformação do ensaio de molinete .....	119
Figura 3.14 - Malha de elementos finitos: usada nas análises de tensão-deformação do ensaio de molinete; localização do 1º e 2º anel .....	120
Figura 3.15 - Malha (tridimensional) de elementos finitos usada nas análises de tensão -deformação das soluções não linear e elástica do ensaio de molinete .....	121
Figura 3.16 - Esquema representativo do elemento “viga” .....	122
Figura 3.17 - Esquema representativo do molinete-referenciais .....	122
Figura 3.18 - Dimensões do molinete .....	123
Figura 3.19 - Resistência ao corte em função da distância ao centro do molinete .....	124
Figura 3.20 - Deformação de corte em função da distância ao centro do molinete .....	125
Figura 3.21 - Deslocamentos em função da distância ao centro do molinete .....	125
Figura 3.22 - Análises, bidimensional e tridimensional, de tensão-deformação da solução elástica do ensaio de molinete, deslocamentos vectoriais em 11 anéis ( $\tau_{\text{máx}}=24,5$ kPa).....	127
Figura 3.23 - Análises, bidimensional e tridimensional, de tensão-deformação da solução elástica do ensaio de molinete, deslocamentos vectoriais em 4 anéis ( $\tau_{\text{máx}}=24,5$ kPa).....	128
Figura 3.24 - Análises, bidimensional e tridimensional, de tensão-deformação da solução elástica do ensaio de molinete, deformada em 4 anéis centrais ( $\tau_{\text{máx}}=24,5$ kPa).....	129
Figura 3.25 - Análises, bidimensional e tridimensional, de tensão-deformação da solução elástica do ensaio de molinete, distorção máxima em 6 anéis ( $\tau_{\text{máx}}=24,5$ kPa).....	130
Figura 3.26 - Análises, bidimensional e tridimensional, de tensão-deformação da solução elástica do ensaio de molinete, tensão de corte máxima em 5 anéis ( $\tau_{\text{máx}}=24,5$ kPa).....	131
Figura 4.1 - Planta de localização dos ensaios .....	136
Figura 4.2 - Carta de plasticidade para os lodos superiores da P.S. da Azambuja .....	138
Figura 4.3 - Provetes após realização dos ensaios .....	139
Figura 4.4 - Resultados dos ensaios triaxiais .....	140

	Pág.
Figura 4.5 - Equipamento de corte simples (LNEC) .....	141
Figura 4.6 - Preparação da amostra .....	141
Figura 4.7 - Amostrador e amostra .....	142
Figura 4.8 - Amostrador com amostra .....	142
Figura 4.9 - Consolidação da mostra .....	142
Figura 4.10 - Resultados dos ensaios de corte simples .....	143
Figura 4.11.- Molinetes tipo I e II .....	144
Figura 4.12 - Planta de localização .....	145
Figura 4.13 - Evolução de Cup em profundidade .....	147
Figura 4.14 - Evolução de Cu no tempo .....	148
Figura 4.15 - Resistência residual e de pico .....	149
Figura 4.16 - Sensibilidade dos lodos .....	150
Figura 4.17 - Módulo de descarga e recarga .....	152
Figura 4.18 - Representação hiperbólica da curva de tensões-deformações .....	153
Figura 4.19 - Variação de $E_i$ com $\sigma_3$ .....	154
Figura 4.20 - Variação da resistência com a tensão de confinamento .....	155
Figura 4.21 - Comportamento de tensão-deformação dos elementos da estrutura (molinete) .....	158
Figura 4.22 - relação entre a curvatura e o momento gerado nos elementos “visa” da estrutura (molinete) .....	159
Figura 4.23 - Ensaio triaxial .....	161
Figura 4.24 - Definição da tensão de corte .....	161
Figura 4.25 - Ensaio 10 B n.º 1; percurso de tensões .....	162
Figura 4.26 - Percurso de tensões dos ensaios triaxiais .....	162
Figura 4.27 - Ensaio 10B n.º1, transformada; estimativa de $E_i$ e $R_f$ .....	163
Figura 4.28 - Ensaio 10B n.º1, transformada; estimativa de $G_i$ e $R_f$ .....	164
Figura 4.29 - Ensaio 10A n.º4, transformada .....	165
Figura 4.30 - Determinação de $k_E$ .....	165
Figura 4.31 - Comparação entre os resultados de Cu obtidos no molinete e no laboratório .....	167
Figura 4.32 - Ensaio de corte simples .....	168
Figura 4.33 - Determinação dos parâmetros característicos de deformabilidade a partir dos ensaios de molinete .....	169

	Pág.
Figura 4.34 - Determinação de $n$ e $k_E$ .....	170
Figura 4.35 - Determinação de $n$ e $k_E$ (dados seleccionados) .....	171
Figura 4.36 - Discretização do provete de ensaio triaxial .....	172
Figura 4.37 - Discretização do provete de ensaio de corte simples .....	173
Figura 4.38 - Tensão-deformação .....	173
Figura 4.39 - Simulação do ensaio triaxial do provete 10B nº1 .....	174
Figura 4.40 - Simulação do ensaio de corte simples do provete 10A nº4 .....	174
Figura 4.41 - Curva de tensão-deformação .....	175
Figura 4.42 - Transformada da curva de tensão-deformação .....	175
Figura 4.43 - Curva de tensão-deformação .....	176
Figura 4.44 - Simulação, análises comparativas com os resultados dos ensaios .....	177
Figura 4.45 - Comportamento para vários níveis de $C_u$ de um material rígido-plástico: usando a nova metodologia e usando a metodologia corrente .....	183
Figura 4.46 - Níveis de resistência em função da rotação da mola .....	183
Figura 4.47 - Curva de calibração .....	184
Figura 4.48 - Calibração dos resultados em função da correcção da mola da cabeça do molinete .....	184
Figura 4.49 - Ensaio ST2-5: influência de $k_0$ nos resultados da simulação e comparação de resultados para os casos A e B .....	189
Figura 4.50 - Ensaio ST23-5: influência de $k_0$ nos resultados da simulação e comparação de resultados para os casos A e B .....	190
Figura 5.1 - Reconhecimento geotécnico da zona da Passagem Superior da Azambuja ...	195
Figura 5.2 - Reconhecimento geotécnico da zona da Estação da Azambuja .....	196
Figura 5.3 - Resultados dos ensaios de molinete nos Furos VPS1 e VPS2 .....	197
Figura 5.4 - Resultados dos ensaios de molinete dos Furos SE1 a SE4 .....	198
Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de molinete .....	198
Figura 5.6 - Perfil geológico, A-B, da Passagem Superior da Azambuja .....	199
Figura 5.7 - Perfil geológico da zona da Estação da Azambuja: perfis A-B, C-D, E-F e G-H .....	201
Figura 5.8 - Carta geológica da Azambuja .....	202
Figura 5.9 - Planta de localização da Estação e da Passagem Superior da Azambuja .....	204
Figura 5.10 - Perfil do aterro Sul antes da rotura .....	205
Figura 5.11 - Rotura do aterro Sul da Passagem Superior da Azambuja .....	206

	Pág.
Figura 5.12 - Perfil P11 do aterro Sul após rotura .....	208
Figura 5.13 - Localização das marcas topográficas, dos inclinómetros e representação esquemática da zona envolvida pela rotura .....	210
Figura 5.14 - Registos topográficos dos prumos Pl a Pó, do aterro Sul, e P7 e P8 do aterro Norte e evolução da altura de aterro no local dos prumos .....	211
Figura 5.15 - Aspecto final da obra .....	211
Figura 5.16 - Registos inclinométricos no tubo IN4 .....	212
Figura 5.17 - Superfície potencial de rotura esquemática .....	216
Figura 5.18 - Efeitos do coeficiente de correcção nos resultados dos ensaios de molinete .....	218
Figura 5.19 - Zona do aterro Sul (H=8,5 m); pesquisa das superfícies de rotura pelo método de Bishop simplificado nos taludes do lado convexo e do lado côncavo.....	220
Figura 5.20 - Zona do aterro Sul (H=8,5 m); retro-análise dos taludes do lado convexo e do lado côncavo para as superfícies de rotura ocorridas em 94/6/23 (geometria antes da rotura) .....	222
Figura 5.21 - Resultados dos ensaios de molinete nos furo 4 e 11 A .....	224
Figura 5.22 - Zona do aterro Sul (H=8,5 m); análise dos taludes do lado convexo e do lado côncavo para as superfícies de rotura ocorridas em 94/6/23 (geometria após rotura) .....	226
Figura 5.23 - Análises dos resultados de equilíbrio limite .....	227
Figura 5.24 - Curva de Bjerrum com dados referentes ao caso da Passagem Superior da Azambuja .....	228
Figura 5.25 - Malha de elementos finitos .....	232
Figura 5.26 - Definição do topo da camada a aplicar na fase construtiva .....	234
Figura 5.27 - Análises de tensão-deformação (MEF); deformadas .....	237
Figura 5.28 - Análises de tensão-deformação (MEF); deslocamentos vectoriais .....	239
Figura 5.29 - Análises de tensão-deformação (MEF); distribuição de $k_0$ .....	241
Figura 5.30 - Análises de tensão-deformação (MEF); estado de tensão local .....	242
Figura 5.31 - Análises de tensão-deformação (MEF); tensão vertical total/Pa .....	243
Figura 5.32 - Análises de tensão-deformação (MEF); tensão tangencial máxima nos lodos .....	244
Figura 5.33 - Análises de tensão-deformação (MEF); relação $\sigma_1 / \sigma_3$ .....	245

	Pág.
Figura 5.34 - Análises de tensão-deformação (MEF); $\gamma_{m\acute{a}x}$ e FS .....	246
Figura 5.35 - Trajectória de tensões, pelo MEF, elementos 504, 1028, 1051 e 758 .....	249
Figura 5.36 - Ampliação da trajectória de tensões do elemento 758 (MEF) .....	250
Figura 5.37 - Variação da altura de aterro e deslocamentos máximos (MEF) .....	250
Figura 5.38 - Deslocamentos horizontais e verticais para diferentes resistências não drenadas das fundações lodosas .....	251
Figura 5.39 - Diferença da altura de aterro e deslocamentos verticais, para diferentes resistências não drenadas das fundações lodosas .....	251
Figura 5.40 - Representação esquemática da ocorrência dos deslocamentos nas fundações de um aterro .....	252
Figura 5.41 - Evolução da altura de aterro e dos assentamentos nas fundações .....	253
Figura 5.42 - Perfil tipo do projecto do aterro com implementação dos geodrenos .....	254
Figura 5.43 - Representação esquemática da relação $Cu/\sigma'_v$ .....	255
Figura 5.44 - Resistência não drenada de ensaios de molinete para solos inorgânicos e siltes .....	255
Figura 5.45 - Mineiro, comparação das propostas de Wroth, Jamiolkowski e Mineiro ....	257
Figura 5.46 - Relação entre a resistência não drenada e a pressão de consolidação aplicada em ensaios laboratoriais; factor de correcção a aplicar nos resultados dos ensaios laboratoriais face às diferenças da velocidade de rotura campo/ensaio .....	257
Figura 5.47 - Bolbo de pressões .....	259
Figura 5.48 - Análises de tensão-deformação (MEF); SSL e FS contabilizando $\Delta Cu$ ....	261
Figura 5.49- Evolução das zonas de rotura (com a altura de aterro) com $Cu=20$ kPa ....	262
Figura 5.50- Evolução das zonas de rotura (com a altura de aterro) com $Cu=31$ kPa ....	263
Figura 5.51 - Definição da tensão vertical .....	264
Figura 5.52 - Estimativas de $K_0$ para argilas a partir do IP .....	266
Figura 5.53 - Determinação de $E_u$ em $f(\tau_u)$ , da razão de sobreconsolidação e do IP .....	266
Figura 5.54 - variação do módulo expoente n, para argilas, a partir do IP .....	267
Figura 6.1 - Malha de elementos finitos com implementação, e identificação dos elementos, da superfície de rotura ocorrida no lado convexo do aterro .....	274
Figura 6.2 - Evolução do factor de segurança, com a altura de aterro, dos elementos finitos interceptados pela superfície de rotura ocorrida (no lado convexo) nos lodos superiores e na camada de topo .....	276

	Pág.
Figura 6.3 - Evolução do factor de segurança, com a altura de aterro, dos elementos finitos interceptados pela superfície de rotura ocorrida (no lado convexo) nos lodos superiores .....	276
Figura 6.4 - Evolução do factor de segurança, com a altura de aterro, de 3 elementos finitos interceptados pela superfície de rotura ocorrida .....	277
Figura 6.5 - Evolução do factor de segurança, com a altura de aterro, dos elementos finitos do aterro interceptados pela superfície de rotura ocorrida (no lado convexo) .....	277
Figura 6.6 - Deformada do MEF para H=8,5 m e localização do inclinómetro IN4 .....	278
Figura 6.7 - Evolução da resultante dos deslocamentos horizontais no tempo, no inclinómetro IN4, a 3 profundidades em relação à observação de 94/05/18...	278
Figura 6.8 - Resultados inclinométricos do tubo IN4: a) evolução da resultante dos deslocamentos horizontais; b) evolução da distorção horizontal .....	280
Figura 6.9 - Deslocamentos horizontais (MEF), dos elementos finitos correspondentes à secção em que IN4 se encontrava instalado: desde o início da construção do aterro e considerando que na data de instalação h=5 m .....	280
Figura 6.10 - Distorções horizontais (MEF), dos elementos finitos correspondentes à secção em que IN4 se encontrava instalado: desde o início da construção do aterro e considerando que na data de instalação h= 5 m .....	281
Figura 6.11 - Comparação dos resultados dos elementos finitos com os registos efectuados em IN4: deslocamentos horizontais e distorções horizontais .....	281
Figura 6.12 - Comparação dos resultados dos registos inclinométricos do tubo IN4 com os do MEF: deslocamentos horizontais; distorções horizontais e análises de tensão-deformação (MEF) - $\gamma_{\text{máx}}$ .....	282
Figura 6.13 - Evolução dos deslocamentos horizontais em função da altura do aterro (não corrigida), a uma profundidade de 9,5 m .....	284
Figura 6.14 - Análises de tensão-deformação (MEF) evolução de $\gamma_h/\gamma_{\text{máx}}$ .....	286
Figura 6.15 - Análises de tensão-deformação (MEF) evolução de $\gamma_{\text{máx}}$ .....	287
Figura 6.16 - Análises de tensão-deformação (MEF) evolução de: SSL e FS em $f(\gamma_{\text{máx}})$ ..	288
Figura 6.17 - Factor de Segurança (FS): dos elementos finitos correspondentes à secção em que IN4 se encontrava instalado e no tubo IN4 (h>5 m) .....	289
Figura 6.18 - Representação esquemática de uma distorção de um tubo inclinométrico ..	290
Figura 6.19 - Caso de obra com tubo inclinométrico de diâmetro largo: resultantes dos deslocamentos horizontais e distorção horizontal .....	291
Figura 6.20 - Caso de obra com tubo inclinométrico de diâmetro médio: resultantes dos deslocamentos horizontais .....	292



## ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 2.1 - Classificação da consistência de uma argila .....	59
Quadro 2.2 - Classificação das argilas puras em função do LL e do IP .....	60
Quadro 2.3 - Relação entre a consistência de uma argila, o N (SPT), Cu e IC .....	69
Quadro 3.1 - Dimensões do molinete (norma ASTM D2573-94) .....	85
Quadro 3.2 - Dimensões dos molinetes usados nos ensaios realizados .....	92
Quadro 3.3 - Classificação do solo quanto à sua sensibilidade .....	110
Quadro 3.4 - Simulação bi e tridimensional do ensaio de molinete .....	123
Quadro 4.1 - Ensaio de identificação .....	137
Quadro 4.2 - Constituição dos lodos .....	137
Quadro 4.3 - Tensões de consolidação dos provetes de ensaio (triaxiais) .....	139
Quadro 4.4 - Tensões iniciais dos provetes nos ensaios de corte simples .....	140
Quadro 4.5 - Características geométricas dos provetes dos ensaios de corte simples .....	143
Quadro 4.6 - Parâmetros do modelo hiperbólico .....	155
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios triaxiais em termos de tensão-deformação .....	160
Quadro 4.8 - Ângulo de fricção dos provetes (triaxiais) .....	162
Quadro 4.9 - Tensão de corte e distorção (nos provetes dos ensaios de corte simples).....	163
Quadro 4.10 - Características de deformação a partir dos ensaios triaxiais .....	164
Quadro 4.11 - Características de deformação a partir dos ensaios de corte simples .....	165
Quadro 4.12 - Características de deformação a partir dos ensaios de molinete .....	170
Quadro 4.13 - Parâmetros do modelo hiperbólico .....	174
Quadro 4.14 - Estados de tensão inicial nos lodos superiores .....	187
Quadro 4.15 - Características dos solos usados na simulação analítica dos ensaios de molinete .....	188
Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios de SPT na zona da P.S. da Azambuja .....	197
Quadro 5.2 - Resultados dos ensaios de SPT na zona da Estação .....	197
Quadro 5.3 - Resultados do coeficiente de correcção ( $\mu$ ): Análises de equilíbrio limite (lado convexo do aterro) .....	228
Quadro 5.4 - Resultados do coeficiente de correcção ( $\mu$ ): Análises de equilíbrio limite (lado côncavo do aterro) .....	228
Quadro 5.5 - Características e parâmetros dos solos usados no MEF .....	232
Quadro 5.6 - Cálculo de $\Delta C_u$ para $U=100\%$ e altura de aterro de 5 m .....	259

	Pág.
Quadro 5.7 - Estimativa dos valores do IP, $\tau_{up}$ e $\tau_{ur}$ .....	265
Quadro 5.8 - Determinação dos parâmetros do modelo hiperbólico (condições iniciais) .....	268
Quadro 6.1 - Factor de segurança médio (MEF) ao longo de uma superfície de rotura ...	275
Quadro 6.2 - Valores limites de $\gamma_h$ de registo possível nos tubos de inclinómetro .....	291

## **AGRADECIMENTOS**

A autora deseja expressar o seu reconhecimento e agradecimento às entidades e às pessoas que de diversas formas contribuíram para a realização deste trabalho:

- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) nas pessoas do Director, Professor de Arantes e Oliveira, ao Chefe do Departamento de Geotécnica (DG), Eng<sup>o</sup> Rui Correia, ao Chefe do Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais (NEGE), Eng<sup>o</sup> Sêco Pinto, pela oportunidade, pelos recursos humanos e materiais colocados à disposição.

- Ao Eng.<sup>o</sup> Francisco Salgado que orientou a realização desta dissertação, pelo apoio inextinguível e permanente disponibilidade para troca de impressões, ensinamentos, estímulo e condições proporcionadas, bem como da amizade que demonstrou.

- Ao Eng.<sup>o</sup> Rui Correia pelo apoio, incentivo, confiança depositada e amizade ao longo dos anos de trabalho no LNEC.

- Ao Eng.<sup>o</sup> Maranha das Neves (JAE/ex. Chefe do DG/LNEC) pelo incentivo e interesse demonstrado.

- Ao NEGE em especial aos técnicos de experimentação Pedro Ramos, Ricardo Oliveira, Celeste Guerreiro, António Coelho e Arlindo de Sousa cujo apoio foi de significativamente manifesto.

- Ao Núcleo de Fundações (LNEC/DG/NF) que realizou os ensaios de laboratório, destacando o apoio dos técnicos de experimentação José Alberto Reis e Gaspar Pereira.

- Aos Caminhos de Ferro Portugueses (CP) por tornarem disponível todos os elementos geotécnicos relacionados com esta investigação; destacando os Eng.<sup>os</sup> Fonseca Neves e Luis Rodrigues.

- À Teixeira Duarte, em especial ao Dr. Machado Leite, ao Eng.<sup>o</sup> Cerejo e à equipa que colaborou na execução dos ensaios de campo e na recolha de amostras.

- À Soares da Costa na pessoa do Eng.º Martins de Sousa, pela disponibilidade dos dados topográficos.

- À Universidade Nova de Lisboa (FCTUNL) na pessoa do Doutor António Mineiro pela sua colaboração, troca de informações e conselhos que transmitiu.

- Ao pessoal do sector das artes gráficas do LNEC, pela eficiência e competência postas na encadernação deste trabalho.

- Ao Sr. Rui Oliveira da sala de desenho do DG (LNEC) pela sua colaboração na montagem e execução de alguns desenhos.

- Aos colegas e amigos pela sua amizade e incentivo.

Quer a autora por fim expressar o seu profundo agradecimento aos Pais e irmão, e de um modo especial ao José Dinis, pelo incentivo e compreensão que souberam demonstrar.

## **PREÂMBULO**

O presente trabalho corresponde á tese de dissertação de mestrado em Mecânica dos Solos da autora. Na sua génese o documento é composto por dois volumes, o primeiro volume apresenta-se neste documento e o segundo volume corresponde a documentos que se apresentaram sob a forma de anexos. Dadas que as características do segundo volume encarecem substancialmente o preço de venda desta obra, não se colocou à venda a segunda parte deste trabalho. Desta forma, sempre que a autora se refira neste documento ao segundo volume ou a qualquer anexo entenda-se que se refere o II Volume, do trabalho de dissertação, que se encontra disponível para consulta na biblioteca do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.



## SIMBOLOGIA

- A - área; actividade de um solo
- a - raio do molinete
- ASCE - American Society of Civil Engineering
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- $a_v$  - coeficiente de compressibilidade
- $B_t$  - módulo tangente de extensão volumétrico (Bulk modulus)
- $C'$  - coesão efectiva
- $C_c$  - parâmetro de compressibilidade edométrica no ramo virgem
- $C_h$  - coeficiente de consolidação horizontal
- $C_r$  - coeficiente de consolidação radial (ou horizontal)
- $C_k$  - parâmetro que define a variabilidade da permeabilidade com o índice de vazios
- CPT - penetrómetro estático (Cone Penetration Test)
- CU - ensaio consolidado não drenado
- $C_u$  - coesão não drenada
- $C_{up}$ ,  $C_{ur}$  - coesão não drenada máxima (de pico) e residual
- $C_v$  - coeficiente de consolidação vertical
- D - diâmetro do molinete
- d - deslocamento
- de - diâmetro do domínio exterior da simulação do ensaio de molinete
- $d_e$  - diâmetro equivalente
- $d_i$  - deslocamento imediato
- $D_L$  - espessura dos lodos
- $d_{pá}$  - deslocamento da pá do molinete
- DSS - ensaio de corte directo
- DTA- análise térmica diferencial
- $d_v$  - deslocamento vertical
- $d_1$  - deslocamento primário
- $d_2$  - deslocamento secundário
- e,  $e_o$  - índice de vazios e índice de vazios inicial
- e - espessura
- $e_f$ ,  $e_f$  - espessura efectiva
- $E_i$  - módulo de elasticidade inicial

Em - módulo pressiométrico  
Es - módulo de elasticidade secante  
Et - módulo de elasticidade tangente; módulo tangente de Young  
Eu - módulo de elasticidade não drenado  
F - força  
 $f_d$  - factor de drenagem  
FS - factor de segurança  
FV - ensaio de corte rotativo (field vane)  
G - densidade específica das partículas sólidas; módulo de distorção ao corte  
 $G^*$  - módulo de corte equivalente  
 $G_i$  - módulo de distorção de corte inicial  
 $G_{máx}$  - módulo de distorção de corte máximo  
H, h - altura de aterro  
H - altura do molinete  
 $H^*$  - altura fictícia (ou equivalente) do molinete  
 $H_0$  - altura inicial  
h - profundidade  
 $h^*$  - altura equivalente  
I - momento de inércia  
IC - índice de consistência  
IL - índice de liquidez  
IP - índice de plasticidade  
k - coeficiente de permeabilidade  
K - coeficiente de módulo de carga  
 $k_B, k_b$  - coeficiente de extensão volumétrica  
 $k_E$  - coeficiente elástico  
 $k_G$  - coeficiente de distorção  
 $k_v$  - coeficiente de permeabilidade vertical  
 $k_0 = \sigma'_{ho} / \sigma'_{vo}$  - relação entre a tensão efectiva horizontal, ou radial, e vertical  
no estado de repouso  
 $K_0 = \sigma_{ho} / \sigma_{vo}$  - relação entre a tensão total horizontal, ou radial, e vertical  
L - comprimento  
LC - limite de consistência  
LL - limite de liquidez

LP - limite de plasticidade  
log - logaritmo decimal  
LR - limite de retracção  
M - momento aplicado  
m - módulo expoente  
MEF - método de elementos finitos  
MO - matéria orgânica  
 $M_p^*$  - momento de plasticidade completa  
 $m_v$  - compressibilidade volumétrica  
 $M_y^*$  - momento de cedência  
N - número de pancadas do ensaio SPT  
n - porosidade ou módulo expoente  
NC - normalmente consolidado  
nCU - média calculada de n ensaios triaxiais consolidados não drenados  
 $n_r$  - coeficiente de drenagem  
nSS - média calculada de n ensaios de corte simples (CU)  
OC - sobreconsolidado  
OCR - grau de sobreconsolidação  
P - força axial  
p - profundidade  
 $P_a$  - pressão atmosférica  
 $P_p$  - força axial correspondente à plasticidade  
 $p_0$  - tensão vertical “in situ”  
qu - resistência ao corte não drenada ( $=\sigma_d=2C_u$ )  
R - raio de influência dos geodrenos  
r - distância radial  
 $r_d$  - raio do geodreno  
 $R_f$  - coeficiente de rotura  
 $R_0$  - raio do pressiómetro  
 $R_p$  - resistência de ponta  
 $R_u$  - coeficiente de pressões intersticiais  
S - fragilidade de um solo  
SPT - ensaios de penetração dinâmica  
SS - ensaio de corte simples; estado de corte simples

SSL - “shear stress level”  
SSU - ensaio de corte simples consolidado não drenado  
T, t - tempo  
tc - tempo de construção  
TC - estado de compressão  
TE - estado de extensão  
Tr - factor correspondente ao Ur  
Tv - factor correspondente ao Uv  
U - grau de consolidação  
UC - sub-consolidado, solo não consolidado não drenado  
Ur - grau de consolidação radial  
UU - ensaio triaxial não consolidado não drenado  
Uv - grau de consolidação vertical  
u - pressão intersticial  
u<sub>0</sub> - pressão intersticial inicial  
V, v - velocidade  
W - teor em água natural  
 $\alpha$  - ângulo  
 $\beta$  - inclinação de taludes  
 $\gamma$  - deformação de corte (distorção)  
 $\gamma_d$  - peso específico aparente do solo  
 $\gamma_h$  - deformação de corte horizontal  
 $\gamma_{m\acute{a}x}$ ,  $\gamma_m$  - deformação de corte máxima  
 $\gamma_t$  - peso específico total do solo  
 $\gamma_{rot}$  - deformação de corte de rotura  
 $\gamma_w$  - peso específico da água  
 $\gamma_{xyrot}$  - deformação de corte horizontal de rotura  
 $\Delta$  - variação ou incremento  
 $\Delta e$  - diminuição do índice de vazios  
 $\Delta H$  - assentamento  
 $\Delta p$  - incremento de tensão efectiva  
 $\delta$  - deslocamento  
 $\epsilon_1$  - deformação principal máxima

$\epsilon_{1rot}$  - deformação principal de rotura  
 $\epsilon_2$  - deformação principal intermédia  
 $\epsilon_3$  - deformação principal mínima  
 $\epsilon_v$  - variação volumétrica  
 $\eta$  - viscosidade de um fluido  
 $\theta$  - rotação  
 $\mu$  - coeficiente de correcção (Bjerrum)  
 $\mu_r$  - factor de correcção devido à velocidade de rotura  
 $\nu$  - coeficiente de Poisson  
 $\nu_t$  - coeficiente de Poisson tangente  
 $\sigma, \sigma'$  - tensão total, tensão efectiva  
 $\sigma_a, \sigma_r$  - tensão axial e radial  
 $\sigma_c$  - tensão de consolidação (isotrópica)  
 $\sigma_d$  - tensão deviatória ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )  
 $\sigma_{drot}$  - tensão deviatória de rotura  
 $\sigma_{dsoft}$  - tensão deviatória “amolecida”  
 $\sigma_{dult}$  - tensão deviatória última  
 $\sigma_h, \sigma_v$  - tensão horizontal e vertical  
 $\sigma'_{hc}, \sigma'_{vc}$  - tensão efectiva de consolidação horizontal e vertical  
 $\sigma'_{h0}, \sigma'_{v0}$  - tensão efectiva de repouso horizontal e vertical  
 $\sigma_n$  - tensão normal  
 $\sigma'_p$  - tensão de préconsolidação  
 $(\Delta\sigma_r)_{face}$  - decréscimo da tensão radial  
 $\sigma'_{vm}$  - tensão de pré-consolidação  
 $\sigma_x, \sigma_y$  - tensão horizontal  
 $\sigma_z$  - tensão vertical  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - tensões principais máxima, intermédia e mínima  
 $\tau$  - tensão/resistência de corte  
 $\tau_h$  - resistência de corte horizontal  
 $\tau_i$  - resistência de corte inicial  
 $\tau_{máx}, \tau_{pico}$  - resistência ao corte máxima disponível ou resistência de pico  
 $\tau_r, \tau_{rot}$  - resistência ao corte de rotura  
 $\tau_{soft}$  - resistência ao corte amolecida

$\tau_u$  - resistência ao corte não drenada  
 $\tau_{ult}$  - resistência ao corte última  
 $\tau_v, \tau_h$  - resistência ao corte no plano vertical e horizontal  
 $\tau_{xyrot}$  - resistência de corte horizontal de rotura  
 $\phi', \phi_u$  - ângulos de atrito efectivo e de consolidação não drenado  
 $\phi_{int.}$  - diâmetro interior (do tubo inclinométrico)  
 $\phi_{inc.}$  - diâmetro do inclinómetro (sonda inclinométrica)  
 $\phi_p$  - ângulo de atrito de pico  
 $\phi_r$  - ângulo de atrito residual  
[K] - matriz global de rigidez  
[k] - matriz de rigidez  
[K<sub>w</sub>] - matriz associada ao incremento de pressão intersticial  
{F}, {f} - vector do incremento de forças nodais  
{Q} - vector de forças nodais  
{q} - vector dos deslocamentos nodais  
{K<sub>w</sub>} - vector associado ao incremento de pressão intersticial  
{Δ} - vector incremento dos deslocamentos nodais  
{Δu} - vector incremento de pressão  
{δ} - vector incremento dos deslocamentos nodais

## **INTRODUÇÃO**



## INTRODUÇÃO

Com a designação de “solos aluvionares” procura abranger-se todo o tipo de solos com características de elevada compressibilidade, permeabilidade reduzida, sensibilidade significativa, fraca resistência ao corte e comportamento diferido no tempo (independentemente da classificação usada nos sistemas a que a Geologia de Engenharia ou a Mecânica dos Solos recorrem). Geralmente são solos de formação recente (com uma percentagem de matéria orgânica igual ou superior a 2%), argilosos, siltosos ou arenosos, aparecendo com diferentes granulometrias (com predominância da fracção fina), e combinações várias na natureza. Sendo quase exclusivamente solos finos podem apresentar, de modo intercalado, estratos de solo com maiores dimensões (mais rígidos e permeáveis); a título exemplificativo referem-se os burgaus. Nesta dissertação dá-se particular atenção aos solos aluvionares lodosos (i.e. com predominância da fracção argilosa).

Entende-se por análise distorcional o estudo que visa o comportamento de um solo (sujeito a acções externas) no que se refere às suas características de resistência ao corte (análise de equilíbrio limite) e de tensão-deformação (análise pelo método dos elementos finitos).

A necessidade de desenvolvimento de métodos expeditos com base em dados de campo para estimativa dos parâmetros característicos do comportamento de tensões-deformações e do factor de segurança é obvia face a casos recentes de rotura (Azambuja, EXPO98) em fundações lodosas, (em condições não drenadas, i.e. curto prazo). A expansão das grandes cidades (como Lisboa) e arredores sobre zonas cujo subsolo é constituído por estratos lodosos de espessura significativa (superior a 10 m) vem confirmar a importância do desenvolvimento destes métodos.

Efectua-se uma análise dos resultados de ensaios de molinete realizados pela Teixeira Duarte no subsolo lodoso na Azambuja em 1994, 1995 e 1996 (neste último ano o LNEC orientou a execução dos ensaios segundo novos procedimentos). Realiza-se uma análise dos resultados de ensaios laboratoriais (triaxiais e de corte simples), efectuados pelo LNEC sobre amostras não remexidas, desses solos, que foram recolhidas pela Teixeira Duarte (1995) para fins de investigação. Apresenta-se uma simulação analítica dos ensaios de molinete (bidimensional e tridimensional) e da construção de um aterro (bidimensional), recorrendo para tal ao Método dos Elementos Finitos. A partir de registos inclinométricos efectuados pelo LNEC no local,

em 1994, avalia-se a evolução da distorção horizontal em profundidade, no subsolo lodoso da Azambuja, induzida pelo peso de aterros. Efectua-se ainda uma análise da evolução do factor de segurança com base em dados de campo.

## ***NOTA INTRODUTÓRIA***

O documento que se apresenta constitui a dissertação de Mestrado que a engenheira Mariana dos Anjos Rodrigues de Carvalho submeteu, em 1997, à FCT/UNL para obtenção do Grau de Mestre de Mecânica dos Solos. A classificação que obteve foi de Muito Bom, por unanimidade.

Trata-se de um estudo desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia de Civil, para cuja realização teve a orientação do Eng.º Francisco Salgado, que desempenha funções como Investigador Principal no Departamento de Geotecnia/ Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais (DG/NEGE), designado em 2003 como Núcleo de Fundações, Taludes e Obras de Suporte (NFTOS), do mesmo Laboratório.

Este trabalho surgiu na sequência das actividades desenvolvidas pelos investigadores do DG/NEGE, no âmbito da construção de aterros em solos lodosos; em Outubro de 1999, no biénio 97/98, este trabalho foi galardoado com o 2º prémio (menção honrosa) da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG).

Na sequência deste trabalho publicaram-se os artigos seguintes:

- \* M. R. de Carvalho; F. M. Salgado (1998) - New Developments on the Interpretation of in Situ Vane Test Data. 8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. Vancouver, pp. 409-416 (V.1).<sup>(1)</sup>
- \* M. R. de Carvalho; F. M. Salgado (1998) - Evaluation of the local factor of safety from in situ inclinometer and Vane Test Data. 8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. Vancouver, pp. 3387-3394 (V.5).<sup>(1)</sup>
- \* F. M. Salgado; M. R. de Carvalho (1998) - New Developments on the Interpretation of Inclinometer Field Data. 8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. Vancouver, pp. 401-408 (V.1).<sup>(1)</sup>
- \* M. R. de Carvalho; F. M. Salgado (1997) - Distortional Analysis of Soft Soils. International Conference on Ground Improvement Techniques. Macau, pp. 101-110.

Nota: <sup>(1)</sup> dada a qualidade do trabalho apresentado a Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SG) publicou este artigo, traduzido para Português, na revista n.º 86, de Julho de 1999, da SPG.



Casos de roturas desenvolvidas em fundações lodosas, em condições não drenadas, pelo peso de aterros altos ( $h \geq 9,0$  m), fizeram sobressair a necessidade de desenvolver métodos expeditos, baseados em dados de campo, para estimativas de parâmetros característicos do comportamento de tensões-deformações de solos lodosos e do factor de segurança local.

De facto, a expansão da cidade de Lisboa e arredores sobre zonas cujo subsolo é constituído por depósitos aluvionares lodosos, de espessuras consideráveis ( $e \geq 10$  m), caracterizados por valores de  $c_{up}$  reduzidos e valores de sensibilidade relativamente altos, torna o desenvolvimento dos métodos referidos uma contribuição importante.

Assim, neste documento propõe-se: i) a obtenção de parâmetros característicos do comportamento de tensões-deformações de solos lodosos a partir dos resultados obtidos nos ensaios de Molinete, efectuados no subsolo lodoso, efectuando-se uma confirmação desses parâmetros recorrendo a ensaios de laboratório (triaxiais e corte simples) em amostras não remexidas; ii) uma metodologia de simulação analítica dos ensaios e da construção do aterro, usando o método de elementos finitos; iii) a obtenção de valores de distorção horizontal,  $\gamma_h$ , induzidos, em profundidade no subsolo lodoso pelo peso de aterros, a partir dos registos inclinométricos efectuados no local; iv) a estimativa de factores de segurança local com base nos valores obtidos em i) e iii).

*Mariana dos Anjos Rodrigues de Carvalho licenciou-se, em 1991, em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Foi estagiária com bolsa concedida pelo LNETI através do 5º programa dos Jovens Técnicos para a Indústria, no período correspondente a 1990/1991. Em 1992 prestou serviços na Câmara Municipal de Lisboa. Iniciou a sua actividade no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em 1993.*

*Desde essa data, enquanto Estagiária e Assistente de Investigação, tem desenvolvido a sua actividade no Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais, onde realizou estudos de Investigação Programada e de Investigação por Contrato sobre ancoragens em estruturas de suporte, túneis, taludes, estabilidade, instrumentação, observação e tratamento automatizado para obtenção de dados a partir de dispositivos de observação.*

*Em 1997 obteve o grau de Mestre em Mecânica dos Solos pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A autora desenvolveu o presente trabalho, que corresponde a um estudo de investigação sobre a análise distorcional de solos aluvionares lodosos, no âmbito da dissertação de Mestrado.*

