

REFORÇO DE SOLOS DE FUNDAÇÃO COM COLUNAS DE JET GROUTING ENCABEÇADAS POR GEOSSINTÉTICOS

DANIELA ALEXANDRA OLIVEIRA MARQUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor José Manuel Leitão Borges

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A vida é a arte de tirar conclusões suficientes a partir de premissas insuficientes

Samuel Butler

AGRADECIMENTOS

Deseja a autora expressar o seu agradecimento a todos os que de algum modo contribuíram para a concretização do presente trabalho, em especial:

- Ao Prof. Doutor José Leitão Borges, orientador desta tese, pela inextinguível disponibilidade e apoio, pelo interesse e entusiasmo que sempre demonstrou durante a elaboração da mesma;
- Aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo, pela amizade e pela partilha de conhecimentos que contribuíram para tornar este trabalho melhor e esta tarefa mais leve;
- Aos meus Pais, pela oportunidade e liberdade ao longo de todo o caminho que culmina com este trabalho. Aos meus irmãos, pela generosidade com que tornam a minha vida mais fácil; e, especialmente, por serem assim, uns para os outros.

RESUMO

A presente dissertação pretende contribuir para um melhor conhecimento da técnica de reforço de solos moles com colunas de jet grouting encabeçadas por plataformas de transferência de carga com geossintéticos, bem como do seu comportamento evolutivo no tempo resultante do processo de consolidação associado a um carregamento exterior materializado pela construção de um aterro.

Esta técnica construtiva é uma das mais adequadas em obras de aterro sobre solos moles, tanto do ponto de vista técnico como económico, quando se pretende que a construção do aterro seja rápida e os assentamentos da estrutura mínimos.

Pretende-se, através de um estudo numérico, investigar as interacções coluna-solo-geossintético e compreender os mecanismos de transferência de carga no sistema.

É apresentada uma revisão bibliográfica, que contempla a descrição dos fundamentos associados aos métodos de dimensionamento e aos mecanismos de transferência de carga desenvolvidos numa obra com esta concepção estrutural, da tecnologia de jet grouting e da caracterização dos geossintéticos.

É utilizado um programa de cálculo bidimensional, baseado no método dos elementos finitos, que permite proceder a análises de consolidação através de uma formulação acoplada mecânica-hidráulica (extensão da teoria de Biot), na qual o comportamento do solo é definido em termos de tensões efectivas. Para a modelação do comportamento do solo utiliza-se um modelo constitutivo elastoplástico não linear, baseado na Mecânica dos Solos dos Estados Críticos (modelo p-q- θ). Com a utilização deste modelo, estuda-se numericamente um problema base, recorrendo ao conceito de célula unitária. O comportamento da obra é analisado tanto durante a construção do aterro como no período pós-construtivo.

Posteriormente, realizam-se diversas análises paramétricas com o objectivo de perceber a importância de alguns parâmetros no comportamento global da obra, designadamente a altura do aterro, o módulo de deformabilidade das colunas, a rigidez à tracção do geossintético e o espaçamento entre as colunas de jet grouting.

Finalmente, enunciam-se algumas conclusões de carácter geral decorrentes do trabalho desenvolvido.

PALAVRAS-CHAVE: reforço de solos moles, colunas de jet grouting, geossintéticos, modelação numérica, consolidação, efeito de arco.

ABSTRACT

The aim of this work is to contribute for a better understanding of the geotechnical performance of geosynthetic-reinforced and jet-grouting column-supported embankments over soft soils, as well as their time-dependent behaviour determined by the consolidation process.

This technique is one of the most adequate solutions in embankments on soft soil, both in technical and economical terms, when the main purpose is to construct the embankment rapidly and to obtain low settlements (Han and Garb, 2002).

A numerical study is carried out in order to analyse the column-soil-geosynthetic interactions and understand the load transfer mechanisms in the problem.

A bibliographical revision, which describes the formulations of the design methods and of the load transfer mechanisms in this kind of structures, as well as the jet-grouting and geosynthetic technologies, is presented.

A computer program, based on the finite element method, is used. The program incorporates the Biot consolidation theory (coupled formulation of the flow and equilibrium equations) and soil constitutive relations simulated by the $p-q-\theta$ critical state model. An illustrative case is studied with the program, using the unit cell formulation. The problem is analysed both during and after the construction period.

In addition, parametric studies were performed in order to understand the influence of several parameters on the illustrative case, namely the height of the embankment fill, the column modulus, the geosynthetic stiffness and the column spacing.

Finally, general conclusions are put forward and some avenues for further investigation are indicated.

KEYWORDS: soft soil reinforcement, jet-grouting columns, geosynthetics, numerical modelling, consolidation, soil arching.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. ATERROS SOBRE SOLOS MOLES REFORÇADOS COM COLUNAS ENCABEÇADAS POR PLATAFORMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA.....	3
2.1. HISTÓRIA DOS ATERROS SOBRE COLUNAS.....	3
2.2. CONSTRUÇÃO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES.....	5
2.3. APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS	7
2.4. TIPOS DE COLUNAS	7
2.5. PLATAFORMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA.....	9
2.5.1. PTC CONVENCIONAL GRANULAR NÃO-REFORÇADA	9
2.5.2. PTC EM BETÃO (RÍGIDA)	9
2.5.3. PTC COM GEOSSINTÉTICO FUNCIONANDO COMO MEMBRANA (CABO, CATENÁRIA).....	9
2.5.4. PTC EM VIGA FLEXÍVEL REFORÇADA COM GEOSSINTÉTICOS (MÉTODO DE COLLIN).....	10
2.6. REFORÇO COM COLUNAS ENCABEÇADAS POR GEOSSINTÉTICOS FUNCIONANDO COMO MEMBRANA (CATENÁRIA).....	11
2.6.1. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA	11
2.6.2. MODELOS DE EFEITO DE ARCO.....	11
2.6.2.1. Teoria de efeito de arco de Terzaghi	13
2.6.2.2. Fórmula de Marston (BS8006)	13
2.6.2.3. Fórmula de Hewlett e Randolph.....	15
2.6.2.4. Método de Guido.....	16
2.6.2.5. Método Nórdico	17
2.6.2.6. Método Alemão	17
2.7. FACTOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.....	18
2.8. CÁLCULO DA FORÇA DE TRACÇÃO NO REFORÇO.....	18
2.9. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ATERROS SOBRE COLUNAS REFORÇADOS COM PLATAFORMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA	20

2.10. RESISTÊNCIA DO SOLO MOLE	20
2.11. ANÁLISE NUMÉRICA DE ATERROS REFORÇADOS COM COLUNAS ENCABEÇADAS POR GEOSSINTÉTICOS	21
3. JET GROUTING	23
3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA DE JET GROUTING	23
3.2.1. EQUIPAMENTO	24
3.2.2. PROCEDIMENTO	25
3.2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TÉCNICA DE JET GROUTING	25
3.3. SISTEMAS DE JET GROUTING	26
3.4. PARÂMETROS DE PROCEDIMENTO	31
3.5. CARACTERÍSTICAS DO TERRENO TRATADO	32
3.5.1. DIMENSÃO DAS COLUNAS	32
3.5.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA DO MATERIAL TRATADO	33
3.5.3. DEFORMABILIDADE	34
3.5.4. PERMEABILIDADE	34
4. GEOSSINTÉTICOS	35
4.1. INTRODUÇÃO	35
4.2. MATERIAIS E TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS	35
4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	37
4.4. FUNÇÕES	39
4.4.1. DRENAGEM	40
4.4.2. FILTRAGEM	40
4.4.3. SEPARAÇÃO	40
4.4.4. PROTECÇÃO	40
4.4.5. REFORÇO	40
4.5. PROPRIEDADES	41
4.6. COLOCAÇÃO EM OBRA	43
4.7. REFORÇO DE SOLOS	43
4.7.1. GEOSSINTÉTICOS USADOS NO REFORÇO DE SOLOS	43
4.7.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS	44

5. ESTUDO BASE	49
5.1. INTRODUÇÃO	49
5.2. MODELO NUMÉRICO	49
5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	49
5.2.2. CONSOLIDAÇÃO EM MEIOS POROSOS DEFORMÁVEIS	50
5.2.3. COMPORTAMENTO CONSTITUTIVO DOS SOLOS/MODELO P-Q- θ	51
5.3. ESTUDO BASE	54
5.3.1. INTRODUÇÃO	54
5.3.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA BASE	54
5.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	58
5.3.3.1. Introdução	58
5.3.3.2. Deslocamentos	59
5.3.3.3. Tensões	67
5.3.3.4. Assentamentos. Comparação com o problema não reforçado	67
6. ANÁLISES PARAMÉTRICAS	89
6.1. INTRODUÇÃO	89
6.2. INFLUÊNCIA DA ALTURA DO ATERRO	90
6.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	90
6.2.2. DESLOCAMENTOS	91
6.2.3. FACTOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	94
6.2.4. COEFICIENTE DE EFEITO DE ARCO	94
6.2.5. FORÇA DE TRACÇÃO NO GEOSSINTÉTICO	95
6.2.6. COEFICIENTE DE EFICÁCIA DO SISTEMA	96
6.2.7. COEFICIENTE DE REDUÇÃO DE ASSENTAMENTOS	97
6.2.8. NÍVEIS DE TENSÃO	98
6.2.9. EXCESSOS DE PRESSÕES NEUTRAS	99
6.3. INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS COLUNAS	100
6.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	100
6.3.2. DESLOCAMENTOS	101
6.3.3. COEFICIENTE DE EFEITO DE ARCO	103
6.3.4. FORÇA DE TRACÇÃO NO GEOSSINTÉTICO	104

6.3.5. COEFICIENTE DE EFICÁCIA DO SISTEMA	104
6.3.6. NÍVEIS DE TENSÃO.....	105
6.3.7. EXCESSOS DE PRESSÕES NEUTRAS	106
6.4. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ À TRACÇÃO DO GEOSSINTÉTICO	107
6.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	107
6.4.2. DESLOCAMENTOS	108
6.4.3. COEFICIENTE DE EFEITO DE ARCO	111
6.4.4. FORÇA DE TRACÇÃO NO GEOSSINTÉTICO	111
6.4.5. COEFICIENTE DE EFICÁCIA DO SISTEMA	112
6.4.6. NÍVEIS DE TENSÃO.....	112
6.4.7. EXCESSOS DE PRESSÕES NEUTRAS	113
6.5. INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE COLUNAS	114
6.5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	114
6.5.2. DESLOCAMENTOS	114
6.5.3. FACTOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	117
6.5.4. COEFICIENTE DE EFEITO DE ARCO	118
6.5.5. FORÇA DE TRACÇÃO NO GEOSSINTÉTICO	118
6.5.6. COEFICIENTE DE EFICÁCIA DO SISTEMA	119
6.5.7. NÍVEIS DE TENSÃO.....	120
6.5.8. EXCESSOS DE PRESSÕES NEUTRAS	121
6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	125
8. BIBLIOGRAFIA.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Aplicações da plataforma de transferência de carga sobre colunas (adaptado de Han e Garb, 2002)	4
Fig.2.2 – Aterro reforçado com colunas encabeçadas por geossintético	6
Fig.2.3 – Percentagem de área de cobertura das estacas para aterros construídos sobre estacas (Han e Garb, 2002)	6
Fig.2.4 – Diferentes tipos de plataformas de transferência de carga: (a) PTC granular não-reforçada; (b) PTC reforçada em betão armado; (c) PTC com geossintético funcionando como membrana (em Catenária); e (d) PTC em viga flexível reforçada com geossintéticos (adaptado de Abdullah (2006)).	11
Fig.2.5 – Mecanismo de transferência de carga num aterro reforçado com colunas encabeçadas por geossintéticos (adaptado de Han e Garb, 2002)	12
Fig.2.6 – Transferência da carga através do geossintético entre colunas adjacentes numa célula unitária na BS8006 (Russell e Pierpoint 1997)	15
Fig.2.7 – Modelo de Hewlett e Randolph (Hewlett e Randolph, 1988)	16
Fig.2.8 – Diagrama de carga e tracção no geossintético, de acordo com a teoria da membrana (Abdullah, 2006)	19
Fig.2.9 – Força de tracção no reforço sob um aterro de solo de densidade média (adaptado de Jones et al., 1990).....	21
Fig.3.1 – a) Diagrama esquemático da técnica de jet grouting em diferentes fases; b) Pormenores da extremidade da vara (Carreto, 1999)	24
Fig.3.2 – Limites granulométricos de técnicas de injeção de terrenos (Carreto, 1999).....	26
Fig.3.3 – Sistemas tradicionais de jet grouting: jacto simples, jacto duplo e jacto triplo (Layne Construction)	27
Fig.3.4 – Pormenores da parte inferior da vara para os três sistemas de jet grouting (adaptado de Carreto, 1999): a) jacto simples; b) jacto duplo; c) jacto triplo	28
Fig.3.5 – Limites máximo e mínimo do diâmetro de colunas realizadas em solos incoerentes (Carreto, 1999)	33
Fig.3.6 – Limites máximo e mínimo do diâmetro de colunas realizadas em solos coesivos (Carreto, 1999)	33
Fig.4.1 – Classificação dos geossintéticos (Quaresma, 1992)	37
Fig.4.2 – Geomembrana (Sieira, 2003).....	37
Fig.4.3 – Geotêxtil (Sieira, 2003).....	38
Fig.4.4 – Geocompósito (Sieira, 2003)	38
Fig.4.5 – Geogrelhas extrudidas, (a) unidireccional; (b) bidireccional (Sieira, 2003)	39
Fig.4.6 – Geogrelhas soldadas (Sieira, 2003).....	39
Fig.4.7 – Geogrelhas tecidas (Sieira, 2003).....	39

Fig.4.8 – Comportamento à tracção de diferentes geotêxteis (McGown et al., 1981).....	44
Fig.4.9 – Curvas tracção-deformação de geossintéticos: a) geotêxteis tecidos e não tecidos (McGown et al.,1982); b) geogrelhas uniaxiais e biaxiais (Yeo, 1985).....	45
Fig.4.10 – Influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico dos geossintéticos (Andrews et al., 1984).....	46
Fig.4.11 – Influência da temperatura no comportamento mecânico dos geossintéticos (Andrews et al., 1984).....	46
Fig.4.12 – Influência da tensão de confinamento no comportamento mecânico dos geossintéticos (Andrews et al., 1984).....	47
Fig.5.1 – Elementos finitos bidimensionais utilizados no modelo numérico: a) 12 incógnitas-deslocamentos e 3 incógnitas-excesso de pressão neutra; b) 12 incógnitas-deslocamentos e zero incógnitas-excesso de pressão neutra.....	51
Fig.5.2 – a) Superfícies de cedência e de estados críticos do modelo p-q- θ no espaço das tensões principais efectivas; b) superfícies de cedência do modelo p-q- θ (no referencial p,q); c) endurecimento (trajectória de tensões 1-2); d) amolecimento (trajectória de tensões 3-4) (Borges, 1995).....	53
Fig.5.3 – Representação esquemática do problema a estudar.....	55
Fig.5.4 – Representação esquemática da célula unitária.....	55
Fig.5.5 – Malha de elementos finitos (ao longo do processo construtivo).....	56
Fig.5.6 – Resultados de 5 ensaios de tracção simples (Sieira, 2003).....	58
Fig.5.7 – Configuração das deformadas ao fim de 2 semanas (final da construção), 56 semanas, 2,6 e 14,7 anos.....	59
Fig.5.8 – Evolução temporal do assentamento médio na coluna de jet grouting e no solo, para a profundidade z=0m.....	60
Fig.5.9 – Assentamento médio do conjunto coluna/solo, na base do aterro (z=0m), em função do tempo decorrido.....	60
Fig.5.10 – Assentamento na base do aterro (z=0), durante a construção.....	61
Fig.5.11 – Assentamento na base do aterro (z=0) no período pós-construtivo.....	61
Fig.5.12 – Evolução temporal do assentamento no centro da coluna (x=0), na interface coluna-solo (x=0,6m), no solo (x=0,7m) e na periferia da célula (x=2,15m), para a profundidade z=0m.....	62
Fig.5.13 – Evolução temporal do assentamento no centro da coluna (x=0), na periferia da célula (x=2.15m) e a evolução do assentamento diferencial entre elas, para a profundidade z=0m.....	63
Fig.5.14 – Deslocamento vertical para 3 instantes de tempo diferentes (4semanas, 9semanas e 14,7 anos): a) na interface coluna/solo (x=0,6m); b) no alinhamento x=2,15m (periferia da célula).....	64
Fig.5.15 – Deslocamentos verticais no final da construção para profundidades z=0, z=0,1m, z=0,5m, z=1,0m, z=2,0m.....	65
Fig.5.16 – Deslocamentos verticais no final da consolidação para profundidades z=0, z=0,1m, z=0,5m, z=1,0m, z=2,0m.....	65

Fig.5.17 – Evolução ao longo do tempo dos assentamentos máximos à superfície do aterro (z=2m), sobre a coluna e sobre o solo, e assentamento diferencial entre a coluna e o solo	66
Fig.5.18 – Excessos de pressão neutra durante a construção	67
Fig.5.19 – Excessos de pressão neutra após a construção	69
Fig.5.20 – Acréscimos de tensão efectiva vertical, σ'_y , ao longo do período de consolidação	70
Fig.5.21 – Incrementos de tensão efectiva vertical na base do aterro (z=0m), durante: a) a construção do aterro; b) após a construção do aterro	72
Fig.5.22 – Incrementos de tensão efectiva vertical à profundidade de 0,5m, durante: a) a construção do aterro; b) após a construção do aterro	73
Fig.5.23 – Incrementos de tensão efectiva vertical a uma profundidade de 1.0m: a) durante a construção do aterro; b) após a construção	74
Fig.5.24 – Evolução da tensão tangencial ao longo da interface coluna/solo, no final da consolidação	75
Fig.5.25 – Evolução do factor de concentração de tensões em profundidade, no final da consolidação	76
Fig.5.26 – Evolução do factor dos acréscimos de tensão efectiva vertical na coluna e no solo em profundidade, no final da consolidação	77
Fig.5.27 – Evolução do factor de concentração de tensões em profundidade, no período pós-construtivo	78
Fig.5.28 – Evolução ao longo do tempo do factor de concentração de tensões para a base do aterro, z=0m	78
Fig.5.29 – Níveis de tensão durante a construção do aterro	79
Fig.5.30 – Níveis de tensão após a construção do aterro	80
Fig.5.31 – Níveis de tensão em função da distância radial, para diversos instantes de tempo após a construção e a uma profundidade de z=0m	81
Fig.5.32 – Níveis de tensão em função da distância radial, para diversos instantes de tempo após a construção e a uma profundidade de z=1.0m	82
Fig.5.33 – Cruzetas de tensões efectivas no final da consolidação	83
Fig.5.34 – Evolução no tempo do coeficiente de efeito de arco durante a construção	84
Fig.5.35 – Evolução no tempo do coeficiente de efeito de arco após a construção	84
Fig.5.36 – Força de tracção no geossintético para o final da consolidação, em função da distância radial	85
Fig.5.37 – Extensão no geossintético para o final da consolidação, em função da distância radial	85
Fig.5.38 – Evolução no tempo do coeficiente de eficácia do sistema de reforço: a) durante a construção; b) após a construção	87
Fig.5.39 – Assentamentos médios na base do aterro ao longo do tempo para situações com e sem reforço (colunas de jet grouting e geossintético)	88

Fig.5.40 - Assentamentos máximo na base do aterro ao longo do tempo para situações com e sem reforço (colunas de jet grouting e geossintético).....	89
Fig.6.1 – Assentamentos máximos no final da consolidação, na base do aterro sobre, o solo mole e sobre a coluna, para as diferentes alturas de aterro.....	91
Fig.6.2 – Assentamentos diferenciais máximos no final da consolidação, na base do aterro, para as diferentes alturas de aterro.....	92
Fig.6.3 – Evolução temporal do assentamento máximo na coluna de jet grouting, para as diferentes alturas de aterro.....	92
Fig.6.4 – Evolução temporal do assentamento máximo do solo na base do aterro, para as diferentes alturas de aterro.....	93
Fig.6.5 – Evolução da percentagem de assentamento máximo na base do aterro em relação ao assentamento máximo final, para as diferentes alturas de aterro	93
Fig.6.6 – Factor de concentração de tensões, no final da consolidação, na base do aterro, para as diferentes alturas de aterro.....	94
Fig.6.7 – Coeficiente de efeito de arco, no final da consolidação, para as diferentes alturas de aterro	95
Fig.6.8 – Força máxima de tracção no geossintético, no final da consolidação, para as diferentes alturas de aterro.....	95
Fig.6.9 – Coeficiente de eficácia do sistema, no final da consolidação, para as diferentes alturas de aterro.....	96
Fig.6.10 – Coeficiente de redução do assentamento máximo, no final da consolidação, para as diferentes alturas de aterro.....	97
Fig.6.11 – Níveis de tensão no final da construção, para as diferentes alturas de aterro.....	98
Fig.6.12 – Níveis de tensão no final da consolidação, para as diferentes alturas de aterro.....	99
Fig.6.13 – Excessos de pressão neutra no final da construção, para as diferentes alturas de aterro	100
Fig.6.14 – Assentamentos máximos no final da consolidação, na base do aterro sobre o solo mole e sobre a coluna, para diferentes deformabilidades da coluna.....	101
Fig.6.15 – Assentamentos diferenciais máximos no final da consolidação, na base do aterro, para diferentes deformabilidades da coluna.....	102
Fig.6.16 – Evolução temporal dos assentamentos máximos do solo na base do aterro, para diferentes valores de deformabilidade da coluna.....	102
Fig.6.17 – Evolução temporal dos assentamentos máximos na coluna, para diferentes valores de deformabilidade da coluna	103
Fig.6.18 – Coeficiente de efeito de arco, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna	103
Fig.6.19 – Força máxima de tracção no geossintético, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna.....	104
Fig.6.20 – Coeficiente de eficácia do sistema de reforço, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna.....	105

Fig.6.21 – Níveis de tensão no final da construção, para diferentes deformabilidades da coluna	105
Fig.6.22 – Níveis de tensão no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna ..	106
Fig.6.23 – Excessos de pressões neutras no final da construção, para diferentes deformabilidades da coluna	107
Fig.6.24 – Assentamentos máximos no final da consolidação, na base do aterro sobre o solo mole e sobre a coluna, para diferentes valores de rigidez do geossintético	109
Fig.6.25 – Assentamentos diferenciais máximos no final da consolidação, na base do aterro, para diferentes valores de rigidez do geossintético	109
Fig.6.26 – Evolução temporal dos assentamentos máximos do solo na base do aterro, para os diferentes valores de rigidez do geossintético	110
Fig.6.27 – Evolução temporal dos assentamentos máximos do solo na coluna, para os diferentes valores de rigidez do geossintético	110
Fig.6.28 – Coeficiente de efeito de arco, no final da consolidação, para diferentes valores de rigidez do geossintético.....	111
Fig.6.29 – Força máxima de tracção no geossintético, no final da consolidação, para diferentes valores de rigidez do geossintético	111
Fig.6.30 – Coeficiente de eficácia do sistema de reforço, no final da consolidação, para diferentes valores de rigidez do geossintético	112
Fig.6.31 – Influência da rigidez do geossintético sobre os níveis de tensão mobilizados no final da construção: a) cálculo J1; b) cálculo J2; c) cálculo J3; d) cálculo J4; e) cálculo J0; f) cálculo J5	112
Fig.6.32 – Influência da rigidez do geossintético sobre os níveis de tensão mobilizados no final da consolidação: a) cálculo J1; b) cálculo J2; c) cálculo J3; d) cálculo J4; e) cálculo J0; f) cálculo J5....	113
Fig.6.33 – Influência da rigidez do geossintético sobre os excessos de pressão neutra no final da construção: a) cálculo J1; b) cálculo J2; c) cálculo J3; d) cálculo J4; e) cálculo J0; f) cálculo J5	114
Fig.6.34 – Assentamentos máximos no final da consolidação, na base do aterro sobre o solo mole e sobre a coluna, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária.....	115
Fig.6.35 – Assentamentos diferenciais máximos no final da consolidação, na base do aterro, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária.....	115
Fig.6.36 – Evolução temporal dos assentamentos máximos do solo na base do aterro, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária.....	116
Fig.6.37 – Evolução temporal dos assentamentos máximos na coluna de jet grouting, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária.....	116
Fig.6.38 – Evolução da percentagem de assentamento em função do tempo, para diferentes diâmetros da célula unitária	117
Fig.6.39 – Factor de concentração de tensões, no final da consolidação, na base do aterro, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária.....	117
Fig.6.40 – Coeficiente de efeito de arco, no final da consolidação, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária	118

Fig.6.41 – Força máxima de tracção no geossintético, no final da consolidação, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária	119
Fig.6.42 – Coeficiente de eficácia do sistema de reforço, no final da consolidação, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária	119
Fig.6.43 – Influência do espaçamento entre colunas sobre os níveis de tensão mobilizados no final da construção: a) cálculo L1; b) cálculo L0; c) cálculo L2; d) cálculo L3; e) cálculo L4.....	120
Fig.6.44 – Influência do espaçamento entre colunas sobre os níveis de tensão mobilizados no final da consolidação: a) cálculo L1; b) cálculo L0; c) cálculo L2; d) cálculo L3; e) cálculo L4	121
Fig.6.45 – Influência do espaçamento entre colunas sobre os excessos de pressões neutras no final da construção: a) cálculo L1; b) cálculo L0; c) cálculo L2; d) cálculo L3; e) cálculo L4.....	122
Fig.6.46 – Evolução da percentagem do assentamento máximo durante a construção do aterro, para os diferentes valores do diâmetro da célula unitária	123

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Diferentes tipos de estacas/colunas passíveis de serem usadas no reforço de aterros (adaptado de Collin 2004)	8
Quadro 2.2 – Coeficiente de arco para plataformas de transferência de carga em aterros reforçados	14
Quadro 3.1 – Equipamento utilizado nos procedimentos dos três principais sistemas jacto simples, jacto duplo e jacto triplo (Carreto, 1999)	27
Quadro 3.2 – Sistemas de jet grouting. Principais características (adaptado de Carreto, 1999)	29
Quadro 3.3 – Síntese da análise comparativa dos sistemas (Carreto, 1999)	30
Quadro 3.4 – Valores limites dos parâmetros do jet grouting. Sistemas de jacto simples, duplo e triplo (Carreto, 1999)	31
Quadro 4.1 – Propriedades dos polímeros sintéticos, para um peso idêntico (John, 1987)	36
Quadro 4.2 – Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (adaptado de Koerner, 1998)	41
Quadro 4.3 – Exigências operacionais e funcionais de maior relevância para as funções correntes (Lopes, 1992)	42
Quadro 5.1 – Características da argila e do material de aterro	57
Quadro 5.2 – Coeficientes de impulso em repouso (K_0) e de sobreconsolidação da argila (OCR)	57
Quadro 5.3 – Características do jet grouting	58
Quadro 6.1 – Síntese dos cálculos efectuados no estudo paramétrico	90
Quadro 6.2 – Rigidez à tracção do geossintético	108

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área da coluna de jet grouting

CRA – coeficiente de redução de assentamentos

d – largura da coluna

E - módulo de elasticidade

$E_{50\%}$ - módulo de deformabilidade secante para 50% da resistência à compressão simples

FC – factor de concentração de tensões

FCT – factor de Concentração de Tensões

f – coeficiente de eficácia do sistema de reforço

G – módulo de deformabilidade distorcional

H – altura do aterro

IGS – Sociedade Internacional de Geossintéticos

J – rigidez à tracção do geossintético

JET1 – sistema de jacto simples

JET2 – sistema de jacto duplo

JET3 – sistema de jacto triplo

K_0 – coeficiente de impulso em repouso

K_p – coeficiente de impulso passivo

k_x, k_y – coeficientes de permeabilidade segundo as direcções x e y

L – distância entre os apoios

M – declive da linha de estados críticos no referencial p-q

n – factor de melhoramento

N – parâmetro do modelo (p, q, θ) correspondente ao volume específico do solo sujeito a uma tensão p igual à unidade

p – tensão média efectiva

PTC – plataforma de transferência de carga

q – tensão de desvio

– tensão vertical sobre o geossintético

Qc – carga suportada por uma coluna

Qt – carga total do aterro na célula unitária

OCR – grau de sobreconsolidação

RPTCG – reforço através de uma plataforma de transferência de carga com geossintéticos

SL – nível de tensão

s – assentamento

T – força de tracção no geossintético

t – espessura do geossintético

x, y, z – coordenadas cartesianas

w – carga uniformemente distribuída aplicada no reforço

y – flecha máxima

Φ' – ângulo de atrito interno definido em termos de tensões efectivas

δ – assentamento máximo na base do aterro

γ – peso específico total

Γ – parâmetro do modelo (p, q, θ) correspondente ao volume específico do solo, em situação de estado crítico, sujeito a uma tensão p igual à unidade

ν – coeficiente de Poisson

ν' – coeficiente de Poisson definido em termos de tensões efectivas

λ – declive da linha de consolidação isotrópica virgem no referencial $(\ln p, \nu)$

ε – deformação

ε_q – deformação distorcional

ε_v – deformação volumétrica

ε_m – extensão média

ρ – coeficiente de efeito de arco

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ – tensões principais efectivas (máxima, intermédia e mínima)

σ_g – tensão vertical no geossintético

σ_c – tensão vertical no topo da coluna

σ_s – tensão vertical na superfície do solo mole

τ – tensão tangencial

θ – invariante das tensões

