



Christiano Faria Teixeira

Análise Numérica de Ensaios em Solo Reforçado com Geogrelha

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Geotecnia.

Orientadores: Alberto S. F. J. Sayão
Ana Cristina C. F. Sieira

Rio de Janeiro
Agosto de 2006



Christiano Faria Teixeira

Análise Numérica de Ensaios em Solo Reforçado com Geogrelha

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão
Presidente / Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC – Rio

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira
Co-orientador
UERJ

Prof. Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa
Universidade de Coimbra - Portugal

Prof^a. Anna Laura Lopes da Silva Nunes
UFRJ

Prof. Luciano Vicente de Medeiros
Departamento de Engenharia Civil - PUC - Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de agosto de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Christiano Faria Teixeira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2003.

Ficha Catalográfica

Teixeira, Christiano Faria

Análise Numérica de Ensaios em Solo Reforçado com Geogrelhas / Christiano Faria Teixeira; orientador: Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientador: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

171 f.; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Dissertações. 2. Solo Reforçado
3. Geogrelha 4. Análise Numérica 5. Ensaios I. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão. II. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título

CDD: 624

Agradecimentos

Acima de tudo, a Deus, por permitir que todo este caminho fosse percorrido por mim.

Aos meus pais, pelo incentivo, apoio, compreensão e amizade ao longo deste trabalho e de toda a vida.

Aos meus irmãos, Guilherme e Bernard, por todo companheirismo, amizade e cumplicidade.

Aos professores Alberto Sayão e Ana Cristina Sieira, pela orientação e pelo aprendizado recebido ao longo deste trabalho.

Aos amigos de Belo Horizonte, por estarem sempre presentes, mesmo distantes.

Aos amigos Thiago Pecin, Ygor Netto, Diego, por me acompanharem na vida noturna carioca, essenciais para contrabalançar o estresse do “trabalho”.

Aos amigos da PUC, por terem sido grandes companheiros. Em especial, cito: Álvaro, Tiago Proto, Adriano Santos, Renato, Adenilson e Cláudia, pela cumplicidade.

A Elaine, pelo incentivo e força e, também, por acreditar muito em mim.

A Secretária de Pós-Graduação, Rita, pela ajuda nos assuntos burocráticos.

A minha avó, Lilia, e a minha madrinha, Dinha'ada, que nunca serão esquecidas (em memória).

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Resumo

Teixeira, Christiano Faria; Sayão, Alberto de Ferraz Sampaio Jardim; Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. Análise Numérica de Ensaios em Solo Reforçado com Geogrelha. Rio de Janeiro, 2006. 171p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização de materiais geossintéticos como reforço em obras geotécnicas vem crescendo bastante nas últimas décadas. A geogrelha, cuja função primária é o reforço de solos, é um entre os diversos tipos de geossintéticos, que vêm sendo utilizados. Diversas são as formas de interação da geogrelha com o solo em um maciço reforçado e o entendimento dos mecanismos que se desenvolvem nestas interações é essencial, pois só a partir daí pode-se obter parâmetros confiáveis para projeto. Pesquisas vêm sendo realizadas por diversos autores, mas muitos aspectos ainda devem ser estudados para que se tenha uma melhor compreensão do comportamento de solos reforçados com geogrelhas. A utilização de uma ferramenta numérica pode ser uma alternativa para que consigamos dar um passo adiante no entendimento da técnica de solo reforçado. Então, modelagens numéricas de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em solos reforçados e não reforçados foram realizadas com a utilização do programa Plaxis. Foram analisadas a influência do reforço no aumento da rigidez e resistência do solo e a resistência de interface solo-reforço. Para calibrar o programa e validar as análises numéricas, foram realizadas retro-análises dos ensaios realizados por Sieira (2003), onde se definiram aspectos importantes para modelar os ensaios, tal como, a melhor forma de impor as condições de contorno. Os resultados obtidos nas análises numéricas dos ensaios triaxiais sugerem que o programa Plaxis permite de forma razoável a reprodução dos ensaios reforçados, sendo possível prever o ganho de resistência do solo com a inclusão do reforço. Uma análise alternativa, onde se aplica um incremento de tensão confinante representativo da influência do reforço, foi também realizada. As análises numéricas dos ensaios de cisalhamento direto em solo arenoso não reforçado permitiram verificar a rotação do eixo das direções das tensões principais quando é aplicado carregamento cisalhante e a presença de uma zona central de cisalhamento (zona de cisalhamento). A resistência de interface solo-geogrelha não foi bem reproduzida, indicando que o Plaxis não permite este tipo de avaliação. Quando os reforços encontravam-se inclinados, verificou-se a maior eficiência do reforço rígido e fazendo ângulo de 60° com a superfície de ruptura.

Palavras-chave:

Solo reforçado, Geogrelha, Análises Numéricas e Ensaios.

Abstract

Teixeira, Christiano Faria; Sayão, Alberto de Ferraz Sampaio Jardim (advisor); Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla (co-advisor). Numerical Analysis of Geogrid Reinforced Soil Tests. Rio de Janeiro, 2006. 171p. MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Catholic University of Rio de Janeiro.

The use of geosynthetic materials as reinforcement in geotechnical engineering works is significantly increasing over the past decades. Geogrid, whose primary functions is reinforcing the soil mass, is one of the geosynthetics that has been used. In a reinforced soil structure, there are different types of interaction between soil and geogrid. To be possible to obtain reliable design parameters is essential to know the mobilized mechanisms in the interaction. This situation has been investigated by many researchers, but there are still many aspects to be better understood about geogrid reinforced soil behavior. In this research, numerical tools have been used to improve our knowledge about reinforced soil techniques. Numerical modeling of triaxial and direct shear tests on reinforced and non reinforced soils were carried out using software Plaxis. It was verified the resistance and stiffness increase of the soil due to geogrid inclusion and the interface soil-reinforcement resistance parameters. To calibrate the software and to validate the numerical analyses, back-analyses of the tests carried out by Sieira (2003) were done. These results helped to define important aspects to the tests modeling such as geometry and tests boundary conditions. The numerical analyses of the triaxial tests suggest that the software Plaxis reasonably allow an adequate reproduction of the reinforced soil tests. It was possible to foresee the increase of soil resistance because of reinforcement inclusion. In addition, an alternative analysis, where one applies a confining stress that reproduces the reinforcement influence, it was done. Numerical analyses of non reinforced direct shear tests had numerically evidenced the rotation of the axis of the principal stresses directions and the presence of a central zone of shear (shear zone). The soil-geogrid interface resistance was not well reproduced, indicating that Plaxis does not allow this type of evaluation. To inclined reinforcement relative to failure plane, it was verified the maximum gain of resistance is achieved with inclined reinforcement at 60° and when rigid geogrids are used.

Keywords:

Reinforced Soils, Geogrid, Numerical Analyses, Tests.

Sumário

1	Introdução	24
1.1.	Motivação	24
1.2.	Objetivos	24
1.3.	Metodologia da Pesquisa	25
1.4.	Estrutura da Dissertação	26
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1.	Introdução	27
2.2.	Geogrelha	28
2.3.	Uso da geogrelha como elemento de reforço do solo	30
2.4.	Mecanismos de interação que ocorrem na solicitação da geogrelha	32
2.5.	Procedimentos de laboratório	35
2.5.1.	Ensaio de cisalhamento direto	35
2.5.1.1.	Reforço no Plano Horizontal	36
2.5.1.2.	Reforço inclinado	41
2.5.2.	Ensaio triaxial	46
2.5.3.	Ensaio de cisalhamento em plano inclinado	49
2.5.4.	Ensaio de Arrancamento	55
3	Ferramenta Numérica e Casos Analisados	64
3.1.	Método dos Elementos Finitos	64
3.2.	Modelos Constitutivos	68
3.2.1.	Modelo Elástico	69
3.2.2.	Modelo Hiperbólico	71
3.2.3.	Modelo de Mohr-Coulomb	73
3.2.4.	Modelo de Solo com Endurecimento (<i>Hardening Soil Model - HSM</i>)	76
3.3.	Estrutura do Plaxis	80
3.3.1.	Entrada de Dados - (<i>Input</i>)	80
3.3.1.1.	Modelo e Tipo de Elemento Finito	80
3.3.1.2.	Geometria, Condições de Contorno e Propriedades dos Materiais	82
3.3.1.3.	Condições Iniciais do Problema e Geração da Malha de Elementos Finitos	84

3.3.2. Cálculo – (<i>Calculation</i>)	84
3.3.3. Saída de Dados – (<i>Output</i>)	85
3.3.4. Curvas (<i>Curves</i>)	86
3.4. Casos Analisados	86
3.4.1. Característica dos materiais	86
3.4.1.1. Geogrelha MacGrid 11/3 - W	87
3.4.1.2. Solo Arenoso	88
3.4.2. Programa experimental de Ensaios Triaxiais	89
3.4.3. Programa experimental de Ensaios de Cisalhamento Direto	92
4 Modelagem Numérica dos Ensaios Triaxiais	96
4.1. Introdução	96
4.2. Modelagem hiperbólica	96
4.3. Modelagem Numérica	99
4.3.1. Geometria e condições de contorno	99
4.3.2. Malha de elementos finitos	101
4.3.3. Modelos constitutivos	102
4.3.3.1. Análise dos resultados com adoção do Modelo de Mohr-Coulomb	102
4.3.3.2. Análise dos resultados com adoção do Modelo de Solo com Endurecimento (HSM)	108
4.3.4. Análise dos Ensaios com Solo Reforçado	110
4.3.5. Análise alternativa	118
5 Análise Numérica do Ensaio de Cisalhamento Direto	124
5.1. Modelagem Numérica do Ensaio de Cisalhamento Direto	124
5.1.1. Modelagem do Problema	124
5.1.1.1. Geometria e condições de contorno do problema	125
5.1.1.2. Malha de elementos finitos	127
5.1.1.3. Modelos constitutivos	129
5.1.2. Análise dos Resultados	130
5.1.2.1. Ensaios de Cisalhamento Direto em Solo Não Reforçados	130
5.1.2.2. Ensaios de Cisalhamento Direto em Solo Reforçado	136
5.1.3. Análise Paramétrica	147
5.1.3.1. Influência das dimensões do Corpo de Prova	148
5.1.3.2. Influência da inclinação do reforço	150
5.1.3.3. Influência da rigidez do reforço	151

6 Conclusões	153
6.1. Conclusões	153
6.1.1. Conclusões da Análise Numérica do Ensaio Triaxial	153
6.1.2. Conclusões da Análise Numérica do Ensaio de Cisalhamento Direto	154
6.2. Sugestões para pesquisas futuras	156
Referências Bibliográficas	157
Apêndice	162

Lista de figuras

- Figura 1 - Tipos de geogrelhas: (a) extrudada unidirecional; (b) extrudada bidirecional; (c) soldadas; (d) tecidas. 29
- Figura 2 - Efeito da inclusão da geogrelha na massa de solo carregada verticalmente: (a) elemento de solo sem reforço; (b) elemento de solo com reforço (adaptada de Abramento, 1998). 31
- Figura 3 - Efeito do reforço na resistência do solo (adaptado de Abramento, 1998). 32
- Figura 4 – Mecanismos de interação solo-geogrelha: (a) atrito superficial; (b) resistência passiva (Jewell, 1996). 33
- Figura 5 - Modos de interação solo-geogrelha (adaptado de Sieira, 2003). 34
- Figura 6 - Arranjo do ensaio de cisalhamento direto com reforço horizontal: (a) geogrelha entre duas camadas de solo; (b) geogrelha sobre base rígida (adaptado de Aguiar, 2003). 37
- Figura 7 – Determinação dos parâmetros de interface em ensaio de cisalhamento direto com reforço horizontal: (a) curvas tensão-deslocamento e (b) envoltória de resistência (Sieira, 2003). 37
- Figura 8 - Efeito das dimensões do equipamento de cisalhamento direto de areia com geogrelha (adaptado de Saez, 1997). 39
- Figura 9 - Arranjo do ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado (Lopes, 2000). 41
- Figura 10 - Esforços atuantes durante o Ensaio de Cisalhamento Direto (adaptado de Sieira, 2003). 42
- Figura 11 – Variação dos parâmetros de resistência quando da inclinação da geogrelha varia (adaptado de Sieira, 2003). 44
- Figura 12 – Distorção da geogrelha em ensaios de cisalhamento direto com reforço vertical (Sieira, 2003). 45
- Figura 13 - Influência da rigidez do reforço na resposta ao ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado (adaptado de Jewell e Wroth, 1987). 46
- Figura 14 – Composição da tensão principal menor que ocorre no momento da ruptura no ensaio de triaxial: (a) acréscimo do esforço de tração na geogrelha; (b) acréscimo do esforço de cisalhamento na interface (Sieira, 2003). 47
- Figura 15 – Avaliação da variação do modulo de rigidez, E_{50} , com a introdução de camadas múltiplas de reforço (Sieira, 2003). 49
- Figura 16 – Aumento da resistência com o aumento do número de inclusões

(Sieira, 2003).	49
Figura 17 – Envoltórias de resistência na interface solo-reforço: (a) ensaios de cisalhamento direto; b) detalhe próximo à origem dos resultados de ensaios de plano inclinado (adaptado de Giroud et al., 1990).	50
Figura 18 - Esquema de ensaio de plano inclinado da PUC-Rio (Aguiar, 2003).	52
Figura 19 – Distribuição dos esforços atuantes no ensaio de rampa (Mello et al., 2003).	52
Figura 20 - Influência do topo da caixa na aplicação da sobrecarga (adaptado - Palmeira, 1987).	58
Figura 21 - Efeito da extensão da luva no ensaio de arrancamento (adaptado de Farrag <i>et al.</i> , 1993).	59
Figura 22 - Variação do tamanho relativo do grão na resposta ao arrancamento de geogrelha (adaptado de Sieira, 2003).	60
Figura 23 - Efeito da espessura da camada de solo que envolve a geogrelha (adaptado de Farrag <i>et al.</i> , 1993).	61
Figura 24 – Influência da velocidade de ensaio no arrancamento de geogrelha (adaptado de Farrag <i>et al.</i> , 1993).	62
Figura 25 – Efeito da densidade relativa na resistência ao arrancamento da geogrelha (Sieira, 2003).	62
Figura 26 - Força de arrancamento em função da tensão de confinamento (Sieira, 2003).	63
Figura 27 – Contexto do estabelecimento e análise de um problema de meio contínuo com o método dos elementos finitos (adaptado de Bathe, 1982).	65
Figura 28 – Modelos elásticos: (a) linear e (b) não linear.	70
Figura 29 – Modelo hiperbólico – curva tensão versus deformação.	71
Figura 30 – Modelo elástico perfeitamente plástico.	74
Figura 31 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no plano ($\sigma - \tau$).	75
Figura 32 – Modelo HSM – relação tensão-deformação hiperbólica para o primeiro carregamento em ensaio triaxial drenado (Ibañes, 2003).	78
Figura 33 – Superfície de plastificação no plano p'-q (adaptado de Brinkgreve, 2002).	78
Figura 34 – Modelos de análise: (a) deformação plana e (b) axissimetria (Brinkgreve, 2002).	81
Figura 35 – Tipos de elemento: (a) triangular de 6 nós e (b) triangular de 15 nós (adaptado Brinkgreve, 2002).	81
Figura 36 – Geogrelha MacGrid (Sieira, 2003).	87

Figura 37 - Disposição das geogrelhas no corpo de prova: (a) uma camada, (b) duas camadas e (c) quatro camadas (Sieira, 2003).	89
Figura 38 – Envoltória de resistência do solo arenoso no diagrama de Lambe.	90
Figura 39 - Mecanismo de interação reproduzido pelos Ensaios de Cisalhamento Direto.	93
Figura 40 - Envoltórias de resistência da campanha experimental (ensaio de cisalhamento direto).	94
Figura 41 – Modelagem dos ensaios triaxiais com modelo hiperbólico: gráfico tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial.	98
Figura 42 – Modelagem dos ensaios triaxiais com modelo hiperbólico: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	98
Figura 43 - Condições de contorno na modelagem do ensaio triaxial com solo não reforçado (de acordo com Brinkgreve <i>et. al.</i> , 2002).	100
Figura 44 - Condições de contorno na modelagem do ensaio triaxial com solo reforçado.	101
Figura 45 – Malha de elementos finitos gerada pelo programa (modelagem do ensaio reforçado).	102
Figura 46 – Resultado da modelagem numérica realizadas com o modelo MC: gráfico tensão desviadora <i>versus</i> deformação.	104
Figura 47 - Resultado da modelagem numérica realizadas com o modelo MC: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	104
Figura 48 – Definição do módulo de rigidez mais adequado nas modelagens: gráfico tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial.	106
Figura 49 - Definição do módulo de rigidez mais adequado nas modelagens: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	106
Figura 50 – Resultado da modelagem utilizando rigidez variada ao longo do ensaio: gráfico tensão desviadora <i>versus</i> deformação.	107
Figura 51 – Resultado da modelagem utilizando rigidez variada ao longo do ensaio gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	107
Figura 52 – Modelagem dos ensaios com o Modelo HS: gráfico tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial.	109
Figura 53 – Modelagem dos ensaios com o Modelo HS: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	109
Figura 54 – Comparação entre os resultados experimentais e da modelagem numérica: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial (duas camadas de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa).	111

Figura 55 – Comparação entre os resultados experimentais e da modelagem numérica: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial (duas camadas de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa).	111
Figura 56 - Malha de elementos finitos deformada do ensaio triaxial, com seção mostrando o padrão de deslocamentos horizontais ocorridos nos bordos laterais do corpo de prova.	112
Figura 57 – Pontos de plastificação do ensaio solo com duas camadas de reforço.	113
Figura 58 - Pontos de plastificação do ensaio em solo com quatro camadas de reforço.	113
Figura 59 – Modelagem do ensaio triaxial – confirmação da calibração do modelo, variando as condições de contorno impostas (solo não reforçado).	114
Figura 60 – Modelagem do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço.	115
Figura 61 - Modelagem do ensaio triaxial reforçado com 2 camadas de reforço.	115
Figura 62 - Modelagem do ensaio triaxial reforçado com 4 camadas de reforço.	116
Figura 63 – Comparação da rigidez inicial nas modelagens dos ensaios triaxiais reforçados e não reforçado (ensaio com $\sigma_c = 150$ kPa).	117
Figura 64 – Deformações radiais ao longo da altura do corpo de prova – bordo lateral.	118
Figura 65 – Acréscimo de tensão confinante do ensaio em solo com uma camada de reforço.	119
Figura 66 - Acréscimo de tensão confinante em solo com duas camadas de reforço.	120
Figura 67 - Acréscimo de tensão confinante em solo com quatro camadas de reforço.	120
Figura 68 – Resultado da modelagem alternativa para ensaios triaxiais com 1 camada de reforço.	121
Figura 69 - Resultado da modelagem alternativa para ensaios com 2 camadas de reforço.	122
Figura 70 - Resultado da modelagem alternativa para ensaios com 4 camadas de reforço.	122
Figura 71 – Condições de Contorno e Geometria impostas na modelagem do ensaio de cisalhamento direto.	125

Figura 72 – Distribuição da tensão normal no plano de ruptura, na ruptura: (a) carregamento concentrado e (b) carregamento distribuído.	127
Figura 73 – Malha de elementos finitos (1144 elementos) gerada na modelagem do ensaio reforçado.	128
Figura 74 – Modelagem dos ensaios de cisalhamento direto em material não reforçado.	131
Figura 75 - Envoltórias de resistência – experimental e numérica.	132
Figura 76 - Rotação da direção das tensões principais em ensaios de cisalhamento direto – $\sigma_v = 200\text{kPa}$.	133
Figura 77 – Tensões cisalhantes no momento da ruptura em ensaio de cisalhamento direto - $\sigma_v = 200\text{ kPa}$.	134
Figura 78 – Gráfico comparativo da influência da altura, H , da caixa de cisalhamento direto no ensaio em solo não reforçado.	135
Figura 79 - Pontos de plastificação - $\sigma_v = 200\text{ kPa}$.	135
Figura 80 – Resultado das análises dos ensaios de cisalhamento direto em solo com reforço horizontal (análise com controle de tensões).	136
Figura 81 – Resultado das análises dos ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal (análise com controle de deformação).	137
Figura 82 - Pontos de plastificação: (a) deslocamento de cerca de 1% de deformação e (b) ruptura.	139
Figura 83 – Malha deformada do ensaio com reforço horizontal – $\sigma_v = 100\text{kPa}$	140
Figura 84 - Força axial de tração desenvolvida no reforço – $\sigma_v = 100\text{kPa}$.	140
Figura 85 – Deslocamento horizontal do reforço – $\sigma_v = 100\text{kPa}$.	141
Figura 86 – Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 30^\circ$ e tensão controlada).	142
Figura 87 – Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 30^\circ$ e deformação controlada).	142
Figura 88 – Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 60^\circ$ e tensão controlada).	143
Figura 89 – Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 60^\circ$ e deformação controlada).	143
Figura 90 - Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 90^\circ$ e tensão controlada).	144

Figura 91 – Resultado das análises numéricas dos ensaios reforçados ($\theta = 90^\circ$ e deformação controlada).	144
Figura 92 - Distribuição de tensões cisalhantes nas análises numéricas reforçadas ($\theta = 60^\circ$ e $\sigma_v = 100$ kPa).	146
Figura 93 – Distorção final do reforço: (a) $\sigma_v = 50$ kPa, (b) $\sigma_v = 100$ kPa e (c) $\sigma_v = 200$ kPa .	147
Figura 94 – Resultado da análise comparativa da variação de altura da caixa de cisalhamento ($\theta = 60^\circ$ e $\sigma_v = 100$ kPa).	149
Figura 95 – Distribuição de tensões cisalhantes na análise com caixa de cisalhamento com dimensões iguais a 1 m.	149
Figura 96 - Resultado da análise comparativa da variação da inclinação do reforço ($\sigma_v = 100$ kPa).	150
Figura 97 – Resultado da análise comparativa da rigidez do reforço na resistência ao cisalhamento ($\theta = 60^\circ$ e $\sigma_v = 100$ kPa).	152
Figura 98 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	163
Figura 99 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	163
Figura 100 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	164
Figura 101 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	164
Figura 102 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	165
Figura 103 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 1 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	165
Figura 104 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	166
Figura 105 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	166
Figura 106 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	167

Figura 107 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	167
Figura 108 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	168
Figura 109 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 2 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	168
Figura 110 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	169
Figura 111 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 50$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	169
Figura 112 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> deformação axial.	170
Figura 113 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 150$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	170
Figura 114 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico tensão <i>versus</i> def. axial.	171
Figura 115 – Resultado do ensaio triaxial reforçado com 4 camada de reforço e $\sigma_c = 300$ kPa: gráfico def. volumétrica <i>versus</i> def. axial.	171

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais polímeros constituintes dos geossintéticos.	30
Tabela 2 - Dimensões nominais da geogrelha MacGrid (Sieira, 2003).	88
Tabela 3 – Caracterização da areia.	88
Tabela 4 – Parâmetros de resistência do solo arenoso.	91
Tabela 5 – Incremento de tensão desviadora nos ensaios reforçados.	92
Tabela 6 - Parâmetros de resistência c' , ϕ' , c'_a , δ' , c_a^* e δ^* obtidos na campanha experimental – Ensaio de Cisalhamento Direto.	95
Tabela 7 - Parâmetros do Modelo Hiperbólico.	97
Tabela 8 – Parâmetros do Modelo MC.	103
Tabela 10 - Incrementos de tensão confinante incorporados nas análises alternativas.	121
Tabela 11 – Parâmetros de alimentação do programa relativos aos elementos utilizados na modelagem.	130
Tabela 12 - Parâmetros de deformabilidade do solo.	131
Tabela 13 – Módulos de deformabilidade adotados nas modelagens dos ensaios em solo com reforço horizontal.	138
Tabela 14 – Módulos de rigidez do solo adotados nas análises	145

Lista de Símbolos

Romanos

a	Adesão solo-geogrelha (ensaio de rampa)
A	Área plana total da geogrelha
A	Área de contato solo-reforço
A	Área de contato solo-geossintético
A_p	Área da seção transversal de puncionamento
A.C.	Antes de Cristo
ASTM	American Society for Testing Materials
B	Largura do geossintético
$[B]$	Matriz deformação-deslocamento
c	Intercepto coesivo
c'	Intercepto coesivo efetivo
c'_a	Adesão na interface solo-geossintético (cisalhamento direto e arrancamento)
c_i	Coesão da interface (programa Plaxis)
c_{solo}	Coesão do solo (Plaxis)
cm	Centímetro
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CID	Ensaio triaxial adensado isotropicamente e drenado
CNU	Coeficiente de não uniformidade
CP's	Corpos de provas
$[C]$	Matriz tensão-deformação (matriz constitutiva)
$[D]^{-1}$	Matriz tensão-deformação (matriz constitutiva)
D_R	Densidade relativa
D_{50}	Diâmetro médio das partículas de solo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
E	Módulo de elasticidade
EA	Rigidez axial
EI	Rigidez à flexão

E_i	Módulo de rigidez inicial
E_{oed}	Módulo de rigidez oedométrico
E_{oed}^{ref}	Módulo de rigidez oedométrico de referência (modelo HSM)
E_t	Módulo elástico tangente
E_{ti}	Módulo de rigidez tangente inicial
E_{ur}	Módulo de rigidez de descarregamento/recarregamento
E_{ur}^{ref}	Módulo de rigidez de descarregamento/recarregamento de referência (modelo HSM)
E_0	Módulo de rigidez inicial
E_{50}	Módulo de rigidez secante correspondente a 50% de $\sigma_{d,máx}$
E_{75}	Módulo de rigidez secante correspondente a 75% de $\sigma_{d,máx}$
E_{90}	Módulo de rigidez secante correspondente a 90% de $\sigma_{d,máx}$
E_{50}^{ref}	Módulo de rigidez no carregamento de referência correspondente a 50% de $\sigma_{d,máx}$.
f	Coefficiente de atrito
f^c	Função que define a superfície cap (modelo HSM)
f_{ij}	Funcões de resposta do material (modelo linear)
F	Força vertical (ensaio de cisalhamento direto)
$\{F_e\}$	Vetor carregamento do elemento
$\{F_g\}$	Vetor carregamento global
g	Gramas
G	Módulo cisalhante ou módulo de elasticidade transversal
GGB	Geogrelha soldada
GGE	Geogrelha extrudada
GGW	Geogrelha tecida
H	Altura do corpo de prova (modelo HSM)
h	Altura da amostra de solo
HSM	Hardening Soil Model
IGS	International Geosynthetic Society
ISO	International Organization for Standardization
k	Módulo de deformação volumétrica
K_h	Parâmetro do material (modelo hiperbólico)
kN/m	Quilo-newton por metro

kN/m^2	Quilo-newton por metroquadrado
kN/m^3	Quilo-newton por metro cúbico
kPa	Quilo-Pascal
K_0^{NC}	Coeficiente de empuxo no repouso
$[K_e]$	Matriz de rigidez do elemento
$[K_g]$	Matriz de rigidez global
L	Comprimento enterrado do geossintético
L	Comprimento da base da amostra de solo
LTDA	Limitada
m	Parâmetro que controla a variação da rigidez com o estado de tensão
m	Metro
m^2	Metro quadrado
mm	Milímetro
mm^2	Milímetro quadrado
min	Minuto
mm/min	Milímetro por minuto
MC	Critério de plastificação de Mohr-Coulomb
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPa	Mega-Pascal
N	Força normal na interface
N_c	Coeficiente de capacidade de carga ou de puncionamento
n	Parâmetro do material (modelo hiperbólico)
P	Ponto de plastificação (esquema do modelo MC)
p'	Tensão hidrostática
p_a	Pressão atmosférica
p^{ref}	Pressão de referência (modelo HSM)
P_{max}	Força máxima de arrancamento
p_p	Pressão de pré-adensamento isotrópico
P	Força de arrancamento
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Poliéster
PP	Polipropileno

PVC	Policloreto de vilina
q	Tensão desviadora (modelo HSM)
q_a	Valor assintótico da resistência ao cisalhamento (modelo HSM)
q_f	Valor correspondente à ruptura (modelo HSM)
q_{50}	Tensão desviadora igual a 50% de $\sigma_{desv;máx}$.
\bar{q}	Medida especial de tensão desviadora (modelo HSM)
R_f	Razão de ruptura
R_{inter}	Fator de redução de resistência (programa Plaxis)
S	Menor abertura da geogrelha
S	Abertura da malha
T	Força horizontal (ensaio de cisalhamento direto)
T_R	Tensão de tração no reforço
U_n	Unidade
v_T	Espessura virtual (programa Plaxis)
W	Peso da amostra
x	Distância entre a extremidade inferior do bloco de solo e o ponto de aplicação da força normal na interface
y	Tensão de plastificação (esquema do modelo MC)

Gregos

α	Ângulo de inclinação da rampa
α	Parâmetro auxiliar (modelo HSM)
α_s	Porcentagem de área sólida da geogrelha disponível para atrito
β	Fator de tensão de interface
$\Delta\sigma_c$	Incremento de tensão de confinamento
$\Delta\sigma$	Incremento de tensão de confinamento
$\Delta\sigma_d$	Incremento de tensão desviadora
δ	Parâmetro auxiliar (modelo HSM)
δ'	Ângulo de atrito na interface solo-reforço (cisalhamento direto e arrancamento)
δ_i	Ângulo de atrito da interface (Plaxis)
$\{\delta\}$	Vetor de deslocamentos
$\{\delta_e\}$	Vetor de deslocamentos nodais do elemento
$\{\delta_g\}$	Vetor de deslocamentos nodais global

ε	Deformação
ε	Deformação axial
ε_a	Deformação axial
ε_1	Deformação axial (modelo HSM)
ε^e	Deformação elástica
ε^p	Deformação plástica
ε_{kl}	Tensor de deformação
$\{\varepsilon\}$	Vetor de deformações
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ_{SG}	Ângulo de atrito da interface solo-geogrelha (ensaio de rampa)
ϕ_{solo}	Ângulo de atrito do solo (programa Plaxis)
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
ϕ'_{sr}	Ângulo de atrito entre a superfície da geogrelha e o solo
φ	Diâmetro do corpo de prova
$\gamma_{d,máx}$	Peso específico máximo
$\gamma_{d,mín}$	Peso específico mínimo
λ	Coeficiente de aderência
θ	Ângulo entre o reforço e o plano horizontal
θ_R	Ângulo entre o reforço e o plano vertical
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão normal no plano de ruptura (tensão total)
σ	Tensão normal
σ	Tensão normal média
σ	Tensão normal na interface
σ_c	Tensão de confinamento
σ_{desv}	Tensão desviadora
$\sigma_{d,máx}$	Tensão desviadora máxima
σ_f	Tensão desviadora na ruptura
σ_{ij}	Tensor de tensão
$\sigma_{máx}$	Tensão normal máxima
$\sigma_{mín}$	Tensão normal mínima
σ_{ult}	Tensão desviadora última
σ_y	Tensão vertical

σ'	Tensão normal efetiva atuante no plano de ruptura
σ'	Tensão normal efetiva
σ'_v	Tensão efetiva vertical
σ_1	Tensão principal maior
σ_1	Tensão vertical
σ_2	Tensão intermediária
σ_3	Tensão confinante
σ_3	Tensão de confinamento
σ_3	Tensão principal menor
$\sigma_1 - \sigma_3$	Tensão desviadora
$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	Tensão desviadora na ruptura
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$	Tensão desviadora última ou assintótica
σ'_1	Tensão normal efetiva (nível 1 de tensão)
σ'_1	Tensão principal maior (modelo HSM)
σ'_2	Tensão normal efetiva (nível 2 de tensão)
σ'_3	Tensão normal efetiva (nível 3 de tensão)
σ'_3	Tensão principal menor (modelo HSM)
$\{\sigma\}$	Vetor de tensões
τ_u	Resistência a cisalhamento do solo na ruptura
τ_G	Resistência à tração do reforço
τ_{SG}	Resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha
τ	Tensão cisalhante
τ_R	Tensão cisalhante de ruptura
ψ_i	Ângulo de dilatância as interface (programa Plaxis)
ψ	Ângulo de dilatância
ψ_{solo}	Ângulo de dilatância do solo (programa Plaxis)