



Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

**Estudo Experimental dos
Mecanismos de Interação
Solo-Geogrelha**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia.

Orientador: Alberto S. F. J. Sayão

Rio de Janeiro
Abril de 2003

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

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em 1991. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) no ano de 1996, atuando na área de Geotecnia Experimental. Desenvolveu pesquisa sobre a reutilização de pneus em obras de estabilização de taludes, escrevendo artigos técnicos sobre este assunto e participando de congressos nacionais e internacionais em Geotecnia. Recebeu o prêmio AEERJ pela melhor tese de Mestrado em Engenharia Civil do Rio de Janeiro em 1998. Recebeu um prêmio concedido pela Revista Geotecnia de Portugal pelo melhor artigo técnico publicado no biênio 2001/2002.

Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla

Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha / Ana Cristina Castro Fontenla Sieira; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[33]., 363 f.: il. ; 30,0 cm

1. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Barragens de terra. 3. Fluxo. 4. Análise numérica. I. Sayão, Alberto S. F. J. (Alberto de Ferraz Jardim). II. Gerscovich, Denise Maria Soares. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

Ficha Catalográfica

Dedico esta tese à pessoa que mais admirei na vida, a quem devo todas as minhas conquistas:
meu pai José Castro, com muita saudade...

Agradecimentos

À minha mãe Carmen Castro, por todo o apoio e amor. Certamente, a maior responsável por mais este passo em minha vida.

Ao meu querido irmão Luiz Fernando, pelo apoio constante e pela grande amizade que nos une.

Aos meus queridos filhos, Luis Fernando e Felipe, por compreenderem a minha ausência e me cobrirem sempre de carinho.

Ao Prof. Alberto Sayão, meu orientador, pela competência demonstrada na orientação deste trabalho e pela amizade construída nestes anos de convívio.

À Prof. Denise Gerscovich, minha grande amiga, pelo apoio em todos os momentos, tanto profissionais quanto pessoais. Sem dúvida, uma pessoa que será sempre especial para mim.

Ao Prof. e amigo Luciano Medeiros, a quem muito admiro, pelos comentários sempre relevantes durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos ensinamentos que muito contribuíram para a minha formação, em especial ao Prof. Franklin Antunes pela forma carinhosa de ser.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em particular à amiga Ana Roxo.

À Empresa Maccaferri do Brasil, pelo integral apoio ao projeto de pesquisa, em especial aos engenheiros Jaime Duran, Alexandre Texeira e Lavoisier Machado.

Ao Laboratório de Geotecnia do Cedex, pela disponibilidade de equipamentos para execução do programa experimental. Agradeço especialmente aos professores Luis Sopena, Jesus Saez e Vicente Cuellar pela recepção calorosa e pelo apoio constante durante o programa de doutorado-sanduíche em Madri.

Aos meus queridos amigos Toledo, Clemente, Felipe e José Luís Gomez, técnicos do Laboratório de Geotecnia do Cedex, pela ajuda durante o programa experimental e pela alegria demonstrada na execução do trabalho.

Aos meus inesquecíveis amigos da sala 329L, Alexandre Saré, Luis Eduardo Formigheri, Maristâni Spannenberg, Laryssa Ligoeki e André Lima, pela grande amizade construída e pelos agradáveis momentos compartilhados.

Aos grandes amigos Cláudio Rabe e Paulo Maia, pela ajuda em diferentes etapas do trabalho e pelo senso de companheirismo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro representado pela bolsa de estudos.

Resumo

Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha**. Rio de Janeiro, 2003. 363p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo dos mecanismos de interação solo-geogrelha foi abordado a partir de um programa detalhado de ensaios de laboratório, executados em equipamentos de grandes dimensões, no Laboratório de Geotecnia do CEDEX (Madri). O programa experimental foi elaborado visando a reprodução dos diferentes mecanismos de interação desenvolvidos na interface solo-geogrelha, em maciços reforçados. Foram utilizados 3 tipos distintos de geogrelhas e 2 tipos de solo em ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e triaxiais.

Os ensaios de arrancamento objetivaram a investigação detalhada dos efeitos da tensão confinante, tipo de solo, densidade relativa, geometria da malha e presença de elementos danificados no comportamento de geogrelhas. Os resultados mostram que a densidade relativa exerce uma influência semelhante à tensão confinante na resistência da interface solo-geogrelha. A magnitude da resistência ao arrancamento pode ser desmembrada em três parcelas, que correspondem à mobilização do atrito, da adesão e da resistência passiva dos elementos transversais. Dependendo do tipo de geogrelha, observa-se a predominância de uma das parcelas.

Com os ensaios de cisalhamento direto, foram obtidos os parâmetros de resistência da interface e a variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação da geogrelha. Observou-se que existe uma inclinação ótima da geogrelha, próxima a $\theta=60^\circ$, correspondente a um valor máximo de resistência. Os resultados sugerem que, em maciços reforçados, a geogrelha deve ser posicionada na direção horizontal. Análises experimental e numérica da configuração deformada da geogrelha na caixa de cisalhamento permitiram definir que a zona central, onde ocorre o cisalhamento, corresponde a aproximadamente 40% da altura da caixa.

Os ensaios triaxiais em corpos de prova permitiram o estudo da influência do número de camadas de geogrelha na resistência e deformabilidade do

material reforçado. Observou-se que a introdução do reforço exerce uma influência similar a um aumento da tensão confinante.

Finalmente, os ensaios de tração não confinada, arrancamento e cisalhamento direto possibilitaram uma investigação da influência do dano mecânico na interação solo-geogrelha. O dano natural, provocado por simulações de procedimentos de compactação, mostrou-se mais acentuado quando se utilizam solos de granulometria grosseira e métodos de compactação agressivos. Em solicitações de cisalhamento direto, os resultados sugerem que, em situações com superfície de ruptura perpendicular à geogrelha, a ocorrência de danos não compromete a integridade do maciço reforçado. Este tipo de situação ocorre usualmente nas camadas superiores dos maciços reforçados.

Palavras-chave

Engenharia Civil; Solo Reforçado; Geogrelhas;

Ensaio de Laboratório; Mecanismos de Interação

Abstract

Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. **Experimental Study on the Soil-Geogrid Interaction Mechanisms**. Rio de Janeiro, 2003. 363p. DSc. Thesis – Department of Civil Engineering, Catholic University of Rio de Janeiro.

A study of soil-geogrid interaction mechanisms was carried out through a detailed testing program in large dimensions equipments at the Geotechnical Laboratory of Cedex, Spain. Three different types of geogrids on sand and clayey-silt were considered in pullout, direct shear and triaxial tests. Additional tension tests on geogrid specimens were also carried out. The pullout tests were performed for investigating the effects of confining pressure, relative density, geogrid geometry and damaged elements on the behavior of geogrids. Based on the test results, it is shown that the pullout strength may be divided into three main components, corresponding to friction, adhesion and passive resistance of transversal elements. The direct shear tests were used for obtaining interface strength parameters and the effect of the inclination angle between the geogrid and the failure surface. It is shown that the optimum inclination is about 60 degrees. This suggests that, in reinforced fills, geogrid layers shall be positioned horizontally. Experimental results and numerical analysis indicate that only the central portion of the direct shear box is subjected to shear stresses and strains. This central zone corresponds to about 40% of the specimen height. The triaxial tests were performed for evaluating the effect of the number of geogrid layers on the deformability and strength of reinforced specimens. Introduction of additional reinforcement layers has a similar effect to an increase of confining pressure. The unconfined tension tests allowed a detailed investigation of the effects of grid damage on the strength parameters of geogrids. Natural damage, induced by compaction procedures, is shown to be more intense when coarse soil is used.

Keywords

Civil Engineering; Reinforced Soil; Geogrids;
Laboratory Tests; Soil-Reinforcement Interaction.

Sumário

1 Introdução	34
1.1. Considerações Iniciais	34
1.2. Motivação e Objetivos da Tese	35
1.3. Escopo da Tese	36
2 Uso de Geossintéticos como Elemento de Reforço de Solos	39
2.1. Introdução	39
2.2. Geossintéticos	39
2.2.1. Histórico	41
2.2.2. Terminologia e Classificação dos Geossintéticos	43
2.2.3. Principais Aplicações dos Geossintéticos	48
2.2.4. Materiais Constituintes	49
2.2.5. Propriedades Físicas	51
2.2.6. Propriedades Mecânicas	53
2.3. Maciços Reforçados com Geossintéticos	56
2.3.1. O Conceito de Solo Reforçado	56
2.3.2. Estabilidade de Maciços Reforçados com Geossintéticos	59
2.3.3. Definição de parâmetros de dimensionamento	64
2.3.4. Vantagens da Técnica de Solo Reforçado com Geossintéticos	74
2.4. Considerações Finais	75
3 Interação Solo-Geogrelha	77
3.1. Introdução	77
3.2. Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha	77
3.3. Obtenção dos Parâmetros de Resistência da Interface	81
3.3.1. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencionais	82
3.3.2. Comentários Sobre os Ensaio de Cisalhamento Direto	88
3.3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado	89
3.3.4. Ensaio de Cisalhamento em Plano Inclinado	93
3.3.5. Ensaio de Arrancamento	97
3.4. Discussão Sobre os Diferentes Ensaio	110
3.5. Resistência da Interface Solo-Geogrelha	113

3.6. Influência das Dimensões das Partículas de Solo na Interação Solo-Geogrelha	118
3.7. Influência da Tensão Confinante na Interação Solo-Geogrelha	120
3.8. Influência da Densidade Relativa na Interação Solo-Geogrelha	123
3.9. Influência da Estrutura da Geogrelha na Interação Solo-Geogrelha	124
3.10. Considerações Finais	125
 4 Dano Mecânico	 126
4.1. Introdução	126
4.2. Fatores de Redução	126
4.2.1. Fator de Redução Devido à Fluência	129
4.2.2. Fator de Redução Devido à Degradação pelo Meio Ambiente	130
4.2.3. Fator de Redução Devido a Emendas	133
4.2.4. Fator de Redução Devido a Danos Mecânicos	134
4.3. Investigação do Dano Mecânico	135
4.3.1. Programas Experimentais	136
4.3.2. Critérios de Inspeção Visual	139
4.4. Considerações Finais	141
 5 Materiais de Estudo	 143
5.1. Introdução	143
5.2. Características das Geogrelhas	143
5.2.1. Geogrelha ParaGrid 200/15	144
5.2.2. Geogrelha MacGrid 11/3-W	144
5.2.3. Malha Hexagonal de Dupla Torção	146
5.3. Dados Fornecidos pelos Fabricantes	147
5.4. Ensaio de Caracterização das Geogrelhas	148
5.4.1. Ensaio Executado com as Geogrelhas Poliméricas	148
5.4.2. Ensaio Executado com a Malha Hexagonal	151
5.5. Características dos Solos	155
5.6. Resistência dos Solos	158
5.7. Considerações Finais	162
 6 Metodologia e Programa de Ensaio	 163
6.1. Introdução	163
6.2. Ensaio de Cisalhamento Direto	164
6.2.1. Descrição do Equipamento	164

6.2.2. Ensaaios Executados	166
6.2.3. Procedimento de Ensaio	168
6.3. Ensaaios de Arrancamento	173
6.3.1. Descrição do Equipamento	173
6.3.2. Ensaaios Executados	175
6.3.3. Procedimento de Ensaio	175
6.3.4. Instrumentação	177
6.4. Ensaaios Triaxiais	181
6.4.1. Descrição do Equipamento	181
6.4.2. Ensaaios Executados	182
6.4.3. Procedimento de Ensaio	183
6.5. Investigação do Dano Mecânico	185
6.5.1. Ensaaios de Tração Simples: Amostras Danificadas Naturalmente	185
6.5.2. Ensaaios Tração Simples: Amostras Danificadas Artificialmente	187
6.5.3. Ensaaios de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente	189
6.5.4. Ensaaios de Cisalhamento Direto: Amostras Danificadas Artificialmente	191
6.6. Considerações Finais	192
7 Resultados dos Ensaaios de Arrancamento	193
7.1. Introdução	193
7.2. Apresentação dos Resultados	194
7.3. Fatores que Influenciam os Ensaaios de Arrancamento	196
7.3.1. Tensão Confinante	198
7.3.2. Densidade Relativa	208
7.3.3. Tipo de Solo	212
7.3.4. Tipo de Geogrelha	217
7.4. Obtenção da Tensão Cisalhante na Interface	225
7.5. Envoltórias de Resistência	227
7.6. Parâmetros de Resistência da Interface Solo-Geogrelha	234
7.7. Resistência ao Arrancamento	236
7.8. Mobilização da Resistência ao Arrancamento ao Longo da Geogrelha	240
7.8.1. Metodologia Adotada	240
7.8.2. Análise dos Resultados	242
7.9. Modelagem dos Ensaaios de Arrancamento	256
7.10. Obtenção de Ábacos de Dimensionamento	260
7.11. Considerações Finais	268

8 Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto	270
8.1. Introdução	270
8.2. Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal	271
8.3. Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado	279
8.3.1. Parâmetros de Resistência	280
8.3.2. Distorção da Geogrelha Durante o Cisalhamento	284
8.4 Discussão: Arrancamento x Cisalhamento Direto	287
8.5 Considerações Finais	291
9 Resultados dos Ensaios Triaxiais	292
9.1. Introdução	292
9.2. Ensaios em Corpos de Prova Não Reforçados	292
9.3. Ensaios em Corpos de Prova de Areia Reforçados	295
9.4. Ensaios em Corpos de Prova de Silte Reforçados	299
9.5. Influência das Camadas de Reforço	301
9.6. Considerações Finais	310
10 Resultados dos Ensaios com Geogrelhas Danificadas	312
10.1. Introdução	312
10.2. Ensaios de Tração Simples: Amostras Danificadas Naturalmente	313
10.3. Ensaios de Tração Simples: Amostras Danificadas Artificialmente	321
10.4. Ensaios de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente	325
10.5. Susceptibilidade ao Dano em Solicitações de Arrancamento	337
10.6. Ensaios de Cisalhamento Direto: Amostras Danificadas Artificialmente	340
10.7. Considerações Finais	341
11 Conclusões e Recomendações	344
11.1. Sobre os Ensaios de Resistência dos Solos e das Geogrelhas	344
11.2. Sobre os Ensaios de Arrancamento	345
11.3. Sobre os Ensaios de Cisalhamento Direto	346
11.4. Sobre os Ensaios Triaxiais	346
11.5. Sobre os Ensaios para Avaliação do Dano Mecânico	347
11.6. Sobre o Comportamento dos Diferentes Tipos de Geogrelha	348
11.7. Sobre os Diferentes Ensaios	349
11.8. Sobre o Desempenho dos Equipamentos	350
11.9. Sugestões para Futuras Pesquisas	351

Lista de Figuras

Figura 1 - Trecho da Rodovia com Solo Reforçado na Malásia (Maccaferri, 1997)	42
Figura 2 - Principais Tipos de Geossintéticos	45
Figura 3 - Tipos de Geogrelha	46
Figura 4 - Elementos Componentes de uma Geogrelha	47
Figura 5 - Elementos de Solo Com e Sem Reforço (Abramento, 1998)	57
Figura 6 - Aumento de Resistência com a Introdução do Reforço	58
Figura 7 - Ensaios Triaxiais Reforçados: Areia Densa, $\sigma'_v=21\text{kPa}$ (Broms, 1977a)	59
Figura 8 - Mecanismos de Ruptura Externa	60
Figura 9 - Mecanismos de Ruptura Interna	61
Figura 10 - Mobilização de Tensões em uma Massa de Solo Reforçado (Ehrlich e Mitchell, 1994)	67
Figura 11 - Geometria de um Muro Reforçado com Geossintético	69
Figura 12 - Tensões Induzidas pela Compactação (Ehrlich e Mitchell, 1994)	72
Figura 13 – Distribuição dos Esforços de Tração na Camada de Reforço (Silva, 1991)	73
Figura 14 - Ponto de Atuação de T_{\max} para Muros Reforçados (Christopher et al, 1990)	73
Figura 15 - Ponto de Atuação de T_{\max} para Reforço de Taludes Íngremes (Dantas e Ehrlich, 2000)	73
Figura 16 - Tipos de Acabamento da Face	75
Figura 17 - Mecanismos de Interação entre Solo e Geogrelha (Bauer e Mowafy, 1988)	78
Figura 18 - Mecanismos de Interação em Maciços Reforçados com Geogrelhas	80
Figura 19 - Movimentos Relativos entre o Solo e o Geossintético (Collios et al, 1980)	81
Figura 20 - Sistema Solo-Geossintético no Equipamento de Cisalhamento Direto	83
Figura 21 - Obtenção dos Parâmetros de Resistência da Interface: Ensaios de Cisalhamento Direto	84
Figura 22 - Efeito da Montagem do Ensaio de Cisalhamento Direto (Adaptado de	

Saez, 1997)	85
Figura 23 - Efeito das Dimensões do Equipamento dos Ensaio de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)	87
Figura 24 - Ensaio de Cisalhamento com Reforço Inclinado (Lopes, 2000a)	89
Figura 25 - Comportamento de um Reforço em uma Zona de Cisalhamento	90
Figura 26 - Esforços Atuantes durante o Ensaio de Cisalhamento Direto	91
Figura 27 - Envoltória de Ruptura para a Areia não Reforçada e para a Areia Reforçada com Geotêxtil (Adaptado de Athanasopoulos, 1993)	93
Figura 28 - Representação Esquemática do Ensaio de Cisalhamento em Plano Inclinado	94
Figura 29 – Posicionamentos do Corpo de Prova em Ensaio em Plano Inclinado	95
Figura 30 - Equipamento de Cisalhamento em Plano Inclinado (Lopes, 2000a)	97
Figura 31 - Influência da Luva nos Ensaio de Arrancamento (Lopes e Ladeira, 1996)	102
Figura 32 - Valores do Coeficiente de Atrito f Obtidos em Ensaio de Arrancamento e Ensaio de Cisalhamento Direto (Farrag et al, 1993)	112
Figura 33 - Geometria de uma Geogrelha durante o Arrancamento	115
Figura 34 - Comparação entre Valores Teóricos e Experimentais da Resistência Passiva nos Elementos Transversais de Geogrelhas (Adaptado de Jewell, 1990)	117
Figura 35 - Influência da Dimensão dos Grãos de Solo na Resistência Passiva do Reforço (Adaptado de Jewell, 1990)	119
Figura 36 - Efeito da Tensão Confinante (Sayão et al, 2002)	122
Figura 37 - Mecanismo Gerador de Dano em Geossintéticos Utilizados como Elementos de Reforço de Solos (Azambuja, 1994)	139
Figura 38 - Geogrelhas Utilizadas no Programa Experimental	144
Figura 39 - Detalhes das Geogrelhas	145
Figura 40 - Equipamento de Tração Simples - Geogrelhas Poliméricas	149
Figura 41 - Resultados dos 5 Ensaio de Tração Simples na Geogrelha MacGrid	150
Figura 42 - Resultados dos 5 Ensaio de Tração Simples na Geogrelha ParaGrid	151
Figura 43 - Resultados dos 3 Ensaio de Tração Simples na Malha Metálica	153
Figura 44 - Ensaio de Tração Simples na Malha Metálica Hexagonal	154
Figura 45 - Curvas Granulométricas dos Solos Arenoso (A) e Silto-Argiloso (B)	

	156
Figura 46 - Sistema Unificado de Classificação (Gráfico de Casagrande)	156
Figura 47 - Curvas obtidas em Ensaio de Compactação Proctor Normal	157
Figura 48 - Equipamento de Cisalhamento Direto (30x30)cm ²	158
Figura 49 - Envoltória de Resistência da Areia (Cisalhamento Direto de 1m x 1m)	159
Figura 50 - Resultados dos Ensaios Triaxiais Executados com Areia	160
Figura 51 - Envoltória de Resistência Obtida nos Ensaios Triaxiais em Areia	161
Figura 52 - Equipamento de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões	164
Figura 53 - Sistemas de Aplicação de Carga	165
Figura 54 - Detalhes da Caixa de Cisalhamento	167
Figura 55 - Mecanismo de Interação Reproduzido nos Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado	167
Figura 56 - Curva de Calibração do Macaco Hidráulico Horizontal	169
Figura 57 - Corte Esquemático da Caixa de Cisalhamento	170
Figura 58 - Posicionamento da Geogrelha no Ensaio de Cisalhamento ($\theta=60^\circ$)	171
Figura 59 - Sistema de Fixação da Geogrelha - Ensaios de Cisalhamento Direto com Geogrelha Horizontal	173
Figura 60 - Esquema do Equipamento de Arrancamento (Castro, 1999)	174
Figura 61 - Detalhe da Garra	174
Figura 62 - Procedimentos de Montagem dos Ensaios de Arrancamento	177
Figura 63 - Posicionamento dos tell-tails e dos strain-gages	179
Figura 64 - Procedimento de Colagem dos <i>Strain gages</i>	180
Figura 65 - Geogrelha Instrumentada para Ensaio de Arrancamento	181
Figura 66 - Detalhes do Equipamento Triaxial de Grandes Dimensões	182
Figura 67 - Compactador Mecânico	184
Figura 68 - Detalhes da Montagem do Corpo de Prova: Ensaios Triaxiais	184
Figura 69 - Simulação Experimental do Dano Mecânico – Geogrelhas Poliméricas	186
Figura 70 - Simulação Experimental do Dano Mecânico – Malha Metálica	186
Figura 71 - Inspeção Microscópica das Geogrelhas Exumadas	187
Figura 72 - Localização dos Elementos Danificados – Geogrelha MacGrid	188
Figura 73 - Localização dos Elementos Danificados – Geogrelha MH	189
Figura 74 - Localização dos Elementos Danificados Artificialmente	190
Figura 75 - Ensaios de Arrancamento: MacGrid com 1 Elemento Danificado x	

MacGrid Intacta	191
Figura 76 - Ensaio de Arrancamento com Geogrelha MacGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	197
Figura 77 - Ensaio de Arrancamento: Malha Metálica em Areia ($D_R = 60\%$)	199
Figura 78 - Ensaio de Arrancamento: Malha Metálica em Areia ($D_R = 80\%$)	200
Figura 79 - Ensaio de Arrancamento: Malha Metálica em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	201
Figura 80 - Extrapolação dos Resultados em Ensaio de Arrancamento	202
Figura 81 - Ensaio de Arrancamento: ParaGrid em Solo Arenoso ($D_R = 80\%$)	203
Figura 82 - Ensaio de Arrancamento: ParaGrid em Silte argiloso ($GC = 100\%$)	203
Figura 83 - Ensaio de Arrancamento: MacGrid em Solo Arenoso ($D_R = 80\%$)	204
Figura 84 - Ensaio de Arrancamento: MacGrid em Solo Arenoso ($D_R = 60\%$)	205
Figura 85 - Ensaio de Arrancamento: MacGrid em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	206
Figura 86 – Variação da Resistência ao Arrancamento com a Tensão Confinante: Areia	207
Figura 87 - Variação da Resistência ao Arrancamento com a Tensão Confinante: Silte Argiloso	207
Figura 88 - Deslocamentos Horizontais Medidos no Instante da Ruptura por Arrancamento, em Função da Tensão Confinante	208
Figura 89 - Efeito da Densidade Relativa no Arrancamento com $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$	209
Figura 90 - Efeito da Densidade Relativa no Arrancamento com $\sigma'_v = 25\text{kPa}$	211
Figura 91 - Deslocamentos Internos no Ponto 3 durante o Arrancamento da Malha Metálica em Areia.	212
Figura 92 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: Malha Metálica	213
Figura 93 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: ParaGrid	214
Figura 94 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: MacGrid	216
Figura 95 - Variação da Resistência ao Arrancamento com o Diâmetro dos Grãos (D_{50})	217
Figura 96 - Efeito do Tipo de Geogrelha: Arrancamento em Solo Arenoso	219
Figura 97 - Efeito do Tipo de Geogrelha: Arrancamento em Solo Silto-Argiloso	219
Figura 98 - Efeito do Tipo de Geogrelha na Resistência ao Arrancamento ($\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$)	220
Figura 99 - Efeito do Tipo de Geogrelha nos Deslocamentos na Ruptura em	

Ensaio de Arrancamento	221
Figura 100 – Cálculo do parâmetro K_{50} a Partir dos Deslocamentos Internos dh_1	222
Figura 101 - Efeito do Tipo de Geogrelha no Parâmetro K_{50} ($\sigma'_v=12,5\text{kPa}$)	222
Figura 102 - Variação da Resistência ao Arrancamento com a Razão S/D_{50}	224
Figura 103 – Comparação dos Resultados de Arrancamento para as Diferentes Opções de Correção de Área da Geogrelha	226
Figura 104 - Envoltória de Resistência ao Arrancamento: Malha Metálica em Areia ($D_R=80\%$)	228
Figura 105 - Envoltória de Resistência: Malha Metálica em Areia ($D_R = 60\%$)	229
Figura 106 - Envoltória de Resistência: Malha Metálica em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	229
Figura 107 - Envoltória de Resistência: ParaGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	230
Figura 108 - Envoltória de Resistência: ParaGrid em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	230
Figura 109 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	231
Figura 110 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Areia ($D_R = 60\%$)	231
Figura 111 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	232
Figura 112 - Envoltórias de Resistência Obtidas nos Ensaio de Arrancamento	233
Figura 113 – Força de Arrancamento: Parcela de Resistência Passiva para a Geogrelha MacGrid em Areia	238
Figura 114 – Força de Arrancamento: Parcela de Resistência Passiva para Geogrelha MacGrid em Silte Argiloso	238
Figura 115 – Força de Arrancamento: Parcela da Resistência Passiva para Geogrelha ParaGrid em Areia	239
Figura 116 - Parcelas que compõem a resistência ao arrancamento na geogrelha MacGrid	240
Figura 113 - Seções da Geogrelha e Posição da Instrumentação	242
Figura 114 - Força de Arrancamento vs Deslocamentos Internos: MacGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	244
Figura 115 - Deslocamentos Internos vs Deslocamento Frontal: MacGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	245
Figura 116 - Deformação vs Deslocamento Frontal: MacGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	246
Figura 117 - Deslocamentos Internos na Ruptura por Arrancamento da	

Geogrelha MacGrid em Areia	247
Figura 118 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Geogrelha MacGrid em Areia	247
Figura 119 - Distribuição da Força de Arrancamento ao Longo da Geogrelha MacGrid em Areia	248
Figura 120 - Deslocamentos e Deformações na Ruptura por Arrancamento da Geogrelha ParaGrid em Areia ($D_R = 80\%$)	249
Figura 121 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência no Arrancamento da Geogrelha ParaGrid em Areia	250
Figura 122 - Deslocamentos Internos na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Areia ($D_R = 80\%$)	251
Figura 123 - Configuração Deformada Típica da Malha Metálica no Final de um Ensaio de Arrancamento	251
Figura 124 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Areia	252
Figura 125 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da Malha Metálica em Areia	253
Figura 126 - Deslocamentos na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso	254
Figura 127 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso	254
Figura 128 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso	255
Figura 129 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da MacGrid em Silte Argiloso	255
Figura 130 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha ParaGrid em Areia	257
Figura 131 - Ajuste dos Ensaios com a Malha Metálica em Areia	258
Figura 132 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha MacGrid em Areia	258
Figura 133 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha ParaGrid em Silte Argiloso	258
Figura 134 - Ajuste dos Ensaios com a Malha Metálica em Silte Argiloso	259
Figura 135 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha MacGrid em Silte Argiloso	259
Figura 136 - Parâmetro F^* para Maciços Reforçados com a Geogrelha PG	262
Figura 137 - Parâmetro F^* para Maciços Reforçados com a Geogrelha MH	263
Figura 138 - Parâmetro F^* para Maciços Reforçados com a Geogrelha MG	264
Figura 139 - Parâmetro F^* em Função do Deslocamento Admissível de Projeto: Solo Arenoso	266

Figura 140 - Parâmetro F^* em Função do Deslocamento Admissível de Projeto: Solo Silto-Argiloso	267
Figura 141 - Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha	270
Figura 142 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal em Areia ($D_R = 80\%$)	272
Figura 143 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal em Silte Argiloso ($GC = 100\%$)	273
Figura 144 - Envoltórias de Resistência: Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal	274
Figura 145 - Variação da Razão τ_{SG}/τ_S com o Deslocamento na Interface	276
Figura 146 - Efeito da Saturação nas Envoltórias de Resistência	277
Figura 147 - Efeito da Sucção no Valor da Razão τ_{SG}/τ_S	279
Figura 148 - Variação dos Parâmetros de Resistência com a Inclinação da Geogrelha	281
Figura 149 - Resistência ao Cisalhamento com a Inclinação da Geogrelha	282
Figura 150 - Envoltórias de Resistência: Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado	283
Figura 151 – Procedimento Gráfico para Obtenção de σ_θ	284
Figura 152 - Tensão Atuante no Plano da Geogrelha	284
Figura 153 - Configuração Deformada da Geogrelha na Caixa de Cisalhamento	285
Figura 154 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 90^\circ$)	286
Figura 155 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 60^\circ$)	286
Figura 156 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 30^\circ$)	287
Figura 157 - Variação do Parâmetro de Resistência F^*_{CD} com a Tensão Vertical	290
Figura 158 - Ensaios Triaxiais: Areia Não Reforçada	293
Figura 159 - Ensaios Triaxiais: Silte Argiloso Não Reforçado	294
Figura 160 - Ensaios Triaxiais: Areia com 1 Camada de Geogrelha	295
Figura 161 - Ensaios Triaxiais: Areia com 2 Camadas de Geogrelha	296
Figura 162 - Ensaios Triaxiais: Areia com 4 Camadas de Geogrelha	297
Figura 163 - Deformação Axial na Ruptura: Ensaios Triaxiais em Areia	298
Figura 164 - Corpo de Prova com 4 Camadas de Geogrelha ao Término dos Ensaios.	298
Figura 165 - Ensaios Triaxiais: Silte com 1 Camada de Geogrelha	299
Figura 166 - Ensaios Triaxiais: Silte Argiloso com 4 Camadas de Geogrelha	300

Figura 167 - Ensaios Triaxiais: Areia Não Reforçada x Areia Reforçada	302
Figura 168 - Ensaios Triaxiais: Silte Não Reforçado x Silte Reforçado	303
Figura 169 - Valores de E_{50} / σ_3 Obtidos a Partir dos Ensaios Triaxiais	304
Figura 170 - Envoltórias Obtidas a Partir de Ensaios Triaxiais Reforçados e Não Reforçados	305
Figura 171 – Mecanismos Observados em Ensaios Triaxiais de Solos Reforçados com Geossintéticos	306
Figura 172 - Envoltórias de Resistência: Ensaios Triaxiais em Areia	307
Figura 173 – Aumento de σ_3 : Ensaios Triaxiais em Areia	308
Figura 174 - Aumento de σ_3 : Ensaios Triaxiais em Silte Argiloso	309
Figura 175 - Envoltórias de Resistência: Ensaios Triaxiais em Silte Argiloso	310
Figura 176 - Material Granular Utilizado no Programa Experimental	314
Figura 177 - Inspeção Microscópica do Dano Natural Após a Compactação no Laboratório	316
Figura 178 - Inspeção Visual do Dano Natural Após a Compactação no Laboratório	317
Figura 179 - Ensaios de Tração Simples em Amostras Danificadas Artificialmente: MacGrid	322
Figura 180 - Geogrelha MacGrid ao Término dos Ensaios de Tração Simples	323
Figura 181 - Execução do Dano Artificial na Malha Metálica	323
Figura 182 - Ensaios de Tração Simples em Amostras Danificadas Artificialmente: Malha Metálica	324
Figura 183 - Malhas Metálicas Após Ruptura em Ensaios de Tração Simples	325
Figura 184- Localização dos Elementos Danificados Artificialmente em Ensaios de Arrancamento	327
Figura 185 - Ensaios de Arrancamento em Areia ($D_R=30\%$): Malha Metálica com Danos no Sentido Longitudinal	328
Figura 186 - Influência do Dano Artificial no Sentido Longitudinal: Malha Metálica	329
Figura 187 - Ensaios de Arrancamento em Areia ($D_R=30\%$): Malha Metálica com Danos no Sentido Transversal ao Arrancamento	330
Figura 188 - Detalhe do Dano ao Término dos Ensaios	331
Figura 189 - Ensaios de Arrancamento em Areia ($D_R=80\%$): Malha Metálica com Danos no Sentido Longitudinal	332
Figura 190 - Ensaios de Arrancamento em Areia ($D_R=80\%$): MacGrid com Danos na Tira Longitudinal, no Sentido do Arrancamento	333

Figura 191 - Influência do Dano Artificial no Sentido Longitudinal : MacGrid	334
Figura 192 - Ensaios de Arrancamento em Silte Argiloso: Macgrid com Danos na Tira Longitudinal, no Sentido do Arrancamento	335
Figura 193 - Ensaios de Arrancamento em Areia: Macgrid com Danos na Tira Transversal, no Sentido do Arrancamento.	336
Figura 194 - Susceptibilidade ao Dano: Malha Metálica Embutida em Solo Arenoso	338
Figura 195 - Susceptibilidade ao Dano: MacGrid Embutida em Areia e em Silte Argiloso	339
Figura 196 - Susceptibilidade ao Dano das Geogrelhas MH e MG Embutidas em Areia	339
Figura 197 - Ensaios de Cisalhamento Direto em Amostras Danificadas Artificialmente	341

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de Geossintéticos e suas Principais Aplicações (adaptado de Koerner, 1998)	48
Tabela 2 - Resumo das Principais Aplicações	49
Tabela 3 - Monômeros dos Principais Polímeros em Geossintéticos (Koerner, 1998)	50
Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens dos Principais Polímeros	52
Tabela 5 - Métodos para Análise da Estabilidade Interna de Maciços Reforçados	63
Tabela 6 - Características de Alguns Equipamentos de Arrancamento (Adaptado de Teixeira, 1999)	99
Tabela 7 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Aplicação do Geossintético (Adaptado de Koerner, 1998)	128
Tabela 8 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Polímero (Adaptado de Vidal et al, 1999)	129
Tabela 9 - Resistência aos Processos de Degradação dos Polímeros (Adaptado de Abramento, 1995b)	133
Tabela 10 - Critério para Classificação da Capacidade de Sobrevivência de Geossintéticos (Adaptado de Azambuja, 1994)	136
Tabela 11 - Classificação da Severidade do Meio (Allen 1991, citado por Azambuja 1999)	136
Tabela 12 - Classificação das Lesões em Geossintéticos (Billing et al, 1990)	140
Tabela 13 - Classificação das Lesões no Geotêxtil Não Tecido Conforme a Forma e as Dimensões (Azambuja, 1994)	141
Tabela 14 - Resistência Remanescente das Amostras de Geotêxteis Danificadas (Adaptado de Azambuja, 1999)	141
Tabela 15 - Características das Geogrelhas	147
Tabela 16 - Ensaios de Caracterização das Geogrelhas	148
Tabela 17 - Ensaios de Tração Simples - Geogrelhas Poliméricas	150
Tabela 18 - Diâmetro dos Arames	151
Tabela 19 - Resistência dos Arames que Compõem a Malha Hexagonal	152
Tabela 20 - Determinação da Massa por Metro Quadrado de Malha	152
Tabela 21 - Ensaios de Tração Longitudinal da Malha Metálica Hexagonal	153
Tabela 22 - Caracterização dos Solos	156

Tabela 23 - Pesos Específicos e Índices de Vazios Máximos e Mínimos da Areia.	157
Tabela 24 – Parâmetros de Resistência dos Solos	158
Tabela 25 - Ensaios de Cisalhamento Direto sob Diferentes Condições de Compactação	161

Lista de Símbolos e Siglas

Tabela 1 - Tipos de Geossintéticos e suas Principais Aplicações (adaptado de Koerner, 1998).....	48
Tabela 2 - Resumo das Principais Aplicações	49
Tabela 3 - Monômeros dos Principais Polímeros em Geossintéticos (Koerner, 1998)	50
Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens dos Principais Polímeros	52
Tabela 5 - Métodos para Análise da Estabilidade Interna de Maciços Reforçados	63
Tabela 6 - Características de Alguns Equipamentos de Arrancamento (Adaptado de Teixeira, 1999)	99
Tabela 7 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Aplicação do Geossintético (Adaptado de Koerner, 1998)	128
Tabela 8 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Polímero (Adaptado de Vidal et al, 1999)	129
Tabela 9 - Resistência aos Processos de Degradação dos Polímeros (Adaptado de Abramento, 1995b)	133
Tabela 10 - Critério para Classificação da Capacidade de Sobrevivência de Geossintéticos (Adaptado de Azambuja, 1994)	136
Tabela 11 - Classificação da Severidade do Meio (Allen 1991, citado por Azambuja 1999).....	136
Tabela 12 - Classificação das Lesões em Geossintéticos (Billing et al, 1990) .	140
Tabela 13 - Classificação das Lesões no Geotêxtil Não Tecido Conforme a Forma e as Dimensões (Azambuja, 1994)	141
Tabela 14 - Resistência Remanescente das Amostras de Geotêxteis Danificadas (Adaptado de Azambuja, 1999).....	141
Tabela 15 - Características das Geogrelhas.....	147
Tabela 16 - Ensaios de Caracterização das Geogrelhas	148
Tabela 17 - Ensaios de Tração Simples - Geogrelhas Poliméricas.....	150
Tabela 18 - Diâmetro dos Arames	151
Tabela 19 - Resistência dos Arames que Compõem a Malha Hexagonal.....	152
Tabela 20 - Determinação da Massa por Metro Quadrado de Malha.....	152
Tabela 21 - Ensaios de Tração Longitudinal da Malha Metálica Hexagonal	153
Tabela 22 - Caracterização dos Solos	156

Tabela 23 - Pesos Específicos e Índices de Vazios Máximos e Mínimos da Areia.....	157
Tabela 24 – Parâmetros de Resistência dos Solos.....	158
Tabela 25 - Ensaio de Cisalhamento Direto sob Diferentes Condições de Compactação.....	161
Tabela 26 - Programa de Ensaio de Cisalhamento Direto	168
Tabela 27 - Programa de Ensaio de Arrancamento	176
Tabela 28 - Programa de Ensaio Triaxiais com a Geogrelha MacGrid.....	183
Tabela 29 - Ensaio de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente .	190
Tabela 30 - Resumo dos Resultados dos Ensaio de Arrancamento.....	195
Tabela 31 - Características Físicas dos Solos e das Geogrelhas	216
Tabela 32 - Parâmetros de Interface: Ensaio de Arrancamento.....	235
Tabela 33 - Parâmetros do Modelo: Ensaio de Arrancamento	259
Tabela 34 - Parâmetros de Interface: Ensaio de Cisalhamento Direto	275
Tabela 35 - Ensaio de Cisalhamento Direto com a Geogrelha MacGrid Inclinada	280
Tabela 36 - Parâmetro de Interação f: Cisalhamento Direto x Arrancamento ..	287
Tabela 37 - Valores de τ_G : Ensaio Triaxiais em Areia	308
Tabela 38 - Definição dos Fatores de Redução.....	313
Tabela 39 - Inspeção Visual do Dano Ocorrido Durante a Compactação em Laboratório	315
Tabela 40 - Ensaio de Tração Simples em Amostras Danificadas Naturalmente: Fatores de Redução	318
Tabela 41 - Faixa de Fatores de Dano para Geogrelhas (Azambuja, 1994)	320
Tabela 42 - Ensaio de Tração Simples: MacGrid Danificada Artificialmente ..	322
Tabela 43 - Ensaio de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente .	326

Lista de Símbolos

Abreviações

A.C.	Antes de Cristo
ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog to Digital Convert</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CBR	<i>Constant Bearing Ratio</i>
CD	Consolidado Drenado
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CH	Argila de Alta Compressibilidade
CL	Argila de Baixa Compressibilidade
GA	Geomanta
GB	Geobarra
GC	Geocomposto
GC	Grau de Compactação
GCD	Geocomposto para Drenagem
GCL	Geocomposto Argiloso para Impermeabilização
GCR	Geocomposto de Reforço
GG	Geogrelha
GGB	Geogrelha Soldada
GGE	Geogrelha Extrudada
GGW	Geogrelha Tecida
GI	Geotira
GL	Geocélula
GM	Geomembrana
GMR	Geomembrana Reforçada
GMT	Geomembrana Texturizada
GN	Georrede
GP	Geotubo
GS	Geoespaçador
GT	Geotêxtil
GTK	Geotêxtil Tricotado
GTN	Geotêxtil Não Tecido

GTN _a	Geotêxtil Não Tecido Agulhado
GTN _t	Geotêxtil Não Tecido Tricotado
GTW	Geotêxtil Tecido
IGS	International Geosynthetics Society
ISSMFE	International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MG	MacGrid
MH	Malha Metálica Hexagonal
MH	Silte de Alta Compressibilidade
ML	Silte de Baixa Compressibilidade
NBR	Norma Brasileira
Nº	Número
NR	Não recomendável
OH	Solo Orgânico de Compressibilidade Alta
OL	Solo Orgânico de Compressibilidade Baixa
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Poliéster
PG	ParaGrid
PP	Polipropileno
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PVC	Policloreto de Vinila
UV	Ultra-Violeta

Símbolos

A	Área de contato solo-geogrelha
A_a	Área ancorada da geogrelha
A_p	Área disponível para punção dos elementos transversais
A_t	Área da tampa do equipamento de cisalhamento direto
B	Largura da geogrelha
c'	Intercepto coesivo do solo
c'_a	Adesão solo-geossintético
CC	Coeficiente de curvatura
C_{sG}	Coeficiente de interação solo-geogrelha (Koutsourais et al., 1998)
d	Distância entre 2 pontos adjacentes da geogrelha (i e $i+1$)
D	Distância entre duas torções paralelas da malha metálica
dh	Deslocamento horizontal
dh_f	Deslocamento horizontal medido na garra (deslocamento frontal)
dh_i	Deslocamento horizontal medido no ponto i
DI	Grau de interferência entre elementos de ancoragem
D_R	Densidade relativa
e	Espessura dos elementos transversais da geogrelha
E	Módulo de deformabilidade
e_{max}	Índice de vazios máximo
e_{min}	Índice de vazios mínimo
e_v	Espaçamento vertical entre camadas de reforço
f	Coeficiente de atrito na interface solo-geogrelha
F	Parâmetro de interação solo-geogrelha (Castro, 1999)
F^*	Parâmetro de resistência da interface solo-geogrelha (proposto)
$F^*.\alpha$	Fator de interação solo-geogrelha (Christopher et al, 1990)
f_1	Fator de redução por dano natural em ensaios de tração simples
F_1	Efeito de escala devido à dimensão média das partículas de solo (D_{50})
f_2	Fator de redução por dano artificial obtido em ensaios de tração simples
F_2	Fator de forma

f_3	Fator de redução por dano artificial obtido em ensaios de arrancamento
f_4	Fator de redução por dano artificial obtido em ensaios de cisalhamento direto
f_a	Coeficiente de interação correspondente ao movimento de arrancamento
f_a	Fator de redução devido a degradação pelo meio ambiente (química e biológica)
f_{cd}	Coeficiente de interação (cisalhamento direto)
f_d	Fator de redução por dano mecânico
f_e	Fator de redução devido a eventuais emendas
f_f	Fator de redução devido a deformações por fluência
$F_{i-1, i}$	Força de tração atuante entre os pontos (i-1) e (i) da geogrelha
FS_a	Fator de segurança por arrancamento
FS_g	Fator de segurança global
f_T	Fator de redução total
G_s	Densidade específica real das partículas sólidas
H	Altura do maciço reforçado
h	Altura de aterro correspondente à tensão confinante aplicada
i	i-ésimo ponto da geogrelha, a partir do ponto de aplicação da carga
K	Coeficiente de proporcionalidade entre F e ε (ensaios de tração)
k_1	Número da rigidez no cisalhamento
K_{50}	Parâmetro de rigidez
k_a	Coeficiente de empuxo ativo
K_{sf}	Rigidez cisalhante inicial
L	Comprimento da geogrelha
L_a	Comprimento do reforço na região passiva
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
L_r	Comprimento do reforço na região ativa
M_A	Massa por unidade de área
n	Número de elementos de ancoragem

n_1	Expoente da rigidez no cisalhamento
N_c, N_q	Coeficientes de capacidade de carga
P	Força de arrancamento
P_a	Parcela de P correspondente à adesão solo-geogrelha
P_a	Pressão atmosférica
P_{max}	Força de arrancamento máxima
P_o	Força de arrancamento de 1 elemento longitudinal da geogrelha
P_p	Parcela de P correspondente à mobilização do empuxo passivo
$P_{s/g}$	Parcela de P correspondente à mobilização do atrito superficial
P_{ult}	Força de arrancamento na ruptura
q	Sobrecarga
S	Distância entre elementos transversais da geogrelha
S	Índice de susceptibilidade
s	Menor abertura da geogrelha
T_d	Resistência de projeto do geossintético
T_d	Esforço de tração de dimensionamento
t_{GT}	Espessura nominal do geossintético
T_i	Propriedade índice
T_k	Propriedade funcional de um geossintético
T_p	Parcela da resistência da interface solo-geogrelha (empuxo passivo)
T_R	Tensão de tração no reforço
T_{ref}	Resistência à tração fornecida pelos fabricantes
$T_{s/g}$	Parcela da resistência da interface solo-geogrelha (atrito superficial)
$T_{s/s}$	Parcela da resistência da interface solo-geogrelha (atrito solo-solo)
T_v	Temperatura de transição vítrea
U_d	Perímetro específico das lesões
W	Peso da amostra
W_t	Peso da tampa do equipamento de cisalhamento direto
x	Localização do ponto ao longo da geogrelha
X_i	Deslocamento do i -ésimo ponto da geogrelha
z	Profundidade

ϕ	Diâmetro dos corpos de prova dos ensaios triaxiais
γ_d	Peso específico seco
γ_{dmax}	Peso específico seco máximo
γ_{dmin}	Peso específico seco mínimo
σ_h	Tensão horizontal
w_{ot}	Umidade ótima
n_{GT}	Densidade relativa dos polímeros ou porosidade
$\Delta c'$	Variação de intercepto coesivo (cisalhamento direto no solo não reforçado)
Δc_a	Variação de intercepto coesivo (cisalhamento direto no solo reforçado)
Δf_3	Variação do fator de redução
Δn	Variação do número de elementos danificados
α	Inclinação da rampa com o plano horizontal (ensaios em rampa)
α_p	Fração da largura da geogrelha disponível para mobilização da resistência passiva
α_s	Porcentagem da área da geogrelha disponível para atrito no contato solo-geogrelha
β	Fator de tensão de interface
δ	Ângulo de atrito da interface solo-reforço
$\varepsilon_{i, i+1}$	Deformação da geogrelha entre 2 pontos adjacentes (i e i+1)
ϕ'	Ângulo de atrito do solo
ϕ_{max}	Diâmetro máximo
ϕ_{sg}	Ângulo de atrito da interface solo-geossintético, obtido em ensaios de rampa
ϕ_{sr}	Ângulo de atrito entre superfície das tiras e o solo
γ	Peso específico
γ_w	Peso específico da água
λ	Coeficiente de aderência solo-reforço
μ	Coeficiente de atrito interno
ν	Coeficiente de Poisson
θ	Ângulo entre a geogrelha e o plano de ruptura
θ_o	Ângulo inicial entre o reforço e o plano de ruptura
θ_R	Ângulo entre o reforço e o plano de ruptura no instante da ruptura
σ'	Tensão normal efetiva

σ'_p	Tensão passiva atuante nos elementos transversais da geogrelha
σ'_v	Tensão confinante vertical efetiva
σ_1	Tensão principal m aior
σ_3	Tensão principal menor
τ_R	Tensão cisalhante na ruptura
τ_s	Resistência ao cisalhamento do solo
τ_{SG}	Resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha
τ_u	Resistência ao cisalhamento última do solo