

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Freddy Nelson Guevara Peralta**

**Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo  
Reforçado com Geossintéticos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão  
Leonardo de Bona Becker

Rio de Janeiro  
Novembro de 2007



**Freddy Nelson Guevara Peralta**

## **Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos**

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

**Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão**  
Orientador  
PUC-Rio

**Leonardo de Bona Becker**  
Co-Orientador  
UFRJ

**Sergio Augusto Barreto da Fontoura**  
PUC-Rio

**Anna Laura Lopes da Silva Nunes**  
COPPE-UFRJ

**Mauricio Ehrlich**  
COPPE-UFRJ

**José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de novembro de 2007

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

### **Freddy Nelson Guevara Peralta**

Graduou-se em Engenharia Civil em 2001 pela Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-Peru). Trabalhou na área de projetos, construção e supervisão de obras rodoviárias, Ingressou em 2005 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa experimental.

#### Ficha Catalográfica

Guevara, Freddy Nelson Peralta

Comparação de métodos de Projeto para Muros de Solos Reforçado com Geossintéticos / Freddy Nelson Guevara Peralta; Orientadores: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão e Leonardo de Bona Becker - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2007.

v., 162 f.: il. ; 29,7 cm.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Muros de solo Reforçado. 3. Geossintéticos. 4. Forças de tração. 5. Monitoramento. 6 Análise numérica. 7 Método de elementos finitos, I. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão. II. Leonardo de Bona Becker. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

É difícil poder expressar todo meu agradecimento somente com palavras às pessoas que me ajudaram e apoiaram no desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à minha esposa Milagros, pelo carinho e compreensão com minhas ausências junto a nosso filho Luis Enrique durante meus estudos de mestrado.

Agradeço aos meus queridos pais, Silvia e Urbano, pelo apoio, compreensão e carinho durante todo este tempo.

Aos meus irmãos, Armando, Ivan, Ruben, Pilar e Arturo, pelo apoio e a confiança.

À memória de meu irmão Luis que sempre está em minha mente e coração.

Aos meus sogros Victor e Victoria, pelo apoio e compreensão durante este tempo.

Ao Professor Alberto Sayão, pela orientação e amizade durante esta pesquisa.

Ao Professor Leonardo Becker, pela grande ajuda e incentivo no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores da PUC-Rio, obrigado pela aprendizagem.

Aos professores que participaram da comissão examinadora.

Aos meus amigos pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

À secretária de pós-graduação Rita de Cássia pela grande ajuda e amizade nestes anos de mestrado.

Ao professor Zenon Aguilar (UNI – Peru) pelo apoio e incentivo em estudar o mestrado.

Meus sinceros agradecimentos a todas aquelas pessoas não citadas, mas que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

À CAPES, ao CNPq e a PUC-Rio, pelo apoio financeiro, indispensável para a realização deste trabalho.

## Resumo

Freddy Nelson Guevara Peralta. **Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos**. Rio de Janeiro, 2007. 162p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente, muitos projetistas utilizam diferentes métodos para o projeto de muros de solo reforçado com geossintéticos. Uma avaliação desses diversos métodos pode ser realizada pela comparação com os resultados obtidos do monitoramento de casos reais e suas respectivas retro-análises, sendo este o objetivo desse trabalho. Na presente pesquisa, três casos reais bem documentados de muros de solo reforçado (MSR) com geossintéticos, construídos no Brasil, foram selecionados para análise. O monitoramento destas estruturas registra a força de tração em cada camada de reforço, ao final da construção. A magnitude de força máxima de tração, medida nos reforços foi comparada com os resultados previstos pelos diferentes métodos de projeto. Além disso, foram realizadas simulações numéricas para avaliar o desenvolvimento de forças de tração nos reforços e comparar os resultados medidos com os previstos pelas simulações. Estas comparações indicam que, em dois dos três casos avaliados, os métodos baseados em equilíbrio limite subestimaram os valores de força de tração, principalmente nas camadas superiores. Isto vale para MSR compactados com equipamentos de alta energia. O método analítico sob condições de trabalho, proposto por Ehrlich e Mitchell (1994), prevê resultados superiores aos registrados em campo, ou seja, a favor de segurança, para os três casos avaliados. A simulação numérica consegue obter ordens de grandeza das forças de tração máxima próxima aos resultados de campo. A formulação de Ehrlich e Mitchell (1994) para o cálculo da tensão vertical induzida durante a compactação, em conjunto com a modelagem por MEF, aponta resultados coerentes para os três muros.

## Palavras-chave

Muros de solo reforçado, Geossintéticos, Forças de tração, Análise numérica de muro reforçado.

## Abstract

Freddy Nelson Guevara Peralta. **Comparison of design methods for geosynthetics reinforced soil wall**. Rio de Janeiro, 2007. 162p. M.Sc. Dissertation - Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Currently, several different methods for designing geosynthetic reinforced soil walls are available in the literature. An evaluation of these methods can be carried on by a direct comparison with the observed response of instrumented walls in the field. This comparison is the main objective of this research work. Three case histories of geosynthetic reinforced soil wall, constructed in Brazil, were selected for this research. The monitored response of these structures registered the tension in each reinforcement layer during construction. The maximum values of reinforcement tension have been compared with the computed values from different design methods. Moreover, predicted tension values from numerical simulations were also compared to the measured values in each reinforcement layer in the instrumented field walls. These comparisons indicate that, in two of the three evaluated cases, the design methods based on limit equilibrium underestimated the maximum tension. This was noted to be particularly significant in the upper layers of reinforced walls compacted under high energy levels. The analytical method based on work conditions proposed by Ehrlich and Mitchell (1994) resulted in tension values higher than those registered in the field instrumentation, for the three selected cases. Numerical simulations predicted maximum tension in reinforcements with similar values than those from the field instrumentation. The Ehrlich and Mitchell (1994) formulation for predicting the vertical tension induced by compaction resulted coherent with computed values from numerical finite element method for the three walls evaluated herein.

## Keywords

Reinforced soil wall, Geosynthetics, Reinforcement tension, Numerical analysis of reinforced wall.

## Sumário

1	Introdução	23
1.1.	Considerações preliminares	23
1.2.	Objetivos da pesquisa	24
1.3.	Metodologia	24
1.4.	Estrutura da tese	25
2	Revisão bibliográfica	26
2.1.	Introdução	26
2.2.	Geossintéticos e suas propriedades relevantes	27
2.2.1.	Geossintéticos aplicados ao reforço de solos	30
2.2.1.1.	Geotêxteis	30
2.2.1.2.	Geogrelhas	32
2.3.	Estruturas de solo reforçado	34
2.3.1.	Sistemas construtivos disponíveis	34
2.3.2.	Estabilidade de muros reforçados	36
2.4.	Métodos de projeto para análise de estabilidade interna de MSR	39
2.4.1.	Métodos baseados nas condições de ruptura	40
2.4.1.1.	Método de equilíbrio limite - <i>Tieback</i>	41
2.4.1.2.	Métodos de <i>Slope Stability</i>	45
2.4.2.	Métodos baseados nas condições de trabalho	51
2.4.2.1.	Método de <i>K-Stiffness</i>	52
2.4.2.2.	Método de Ehrlich e Mitchell (1994)	54
2.4.3.	Análise numérica em solo reforçado	61
2.5.	Força de tração nos reforços	64
2.5.1.	Medições de forças de tração no reforço	65
2.5.2.	Influência da característica do solo	66
2.5.3.	Influência da rigidez do reforço	68
2.5.4.	Influência da compactação do solo	69
2.5.5.	Influência da rigidez da face	72

3 Análises de casos reais de muros de solo reforçados com geossintéticos	75
3.1. Introdução	75
3.2. Comportamento de geogrelhas em muros de solo reforçado	77
3.2.1. Vista geral	77
3.2.2. Características dos materiais	78
3.2.3. Plano de instrumentação	79
3.2.4. Resultados da instrumentação do muro	83
3.2.4.1. Recalques da base das seções instrumentadas	83
3.2.4.2. Resultados dos deslocamentos dos reforços	83
3.3. Avaliação experimental de protótipos de solo reforçado com geotêxtil	84
3.3.1. Descrição geral	84
3.3.2. Características dos materiais	85
3.3.3. Instrumentação	85
3.3.4. Resultados da instrumentação	88
3.3.4.1. Deslocamento e deformações no reforço	88
3.3.4.2. Deslocamentos da face do muro	90
3.4. Muro de solo reforçado construído com solos finos tropicais	91
3.4.1. Vista geral	91
3.4.2. Características dos materiais	92
3.4.3. Plano de instrumentação	93
3.4.4. Resultados da instrumentação do muro	94
3.4.4.1. Forças de tração no reforço	94
3.5. Conclusões	95
4 Comparação dos métodos de projeto com resultados de campo	97
4.1. Introdução	97
4.2. Métodos de projeto adotados	97
4.2.1. Dados de entrada	98
4.3. Descrição dos casos reais avaliados	98
4.4. Condições de comparação	100
4.5. Aplicação dos métodos ao Muro 1	101

4.5.1. Dados de entrada	101
4.5.2. Métodos de equilíbrio limite	101
4.5.3. Métodos baseados nas condições de trabalho	106
4.6. Aplicação dos métodos ao Muro 2	108
4.6.1. Dados de entrada	108
4.6.2. Métodos de equilíbrio limite	109
4.6.3. Métodos baseados nas condições de trabalho	113
4.7. Aplicação dos métodos ao Muro 3	115
4.7.1. Dados de entrada	115
4.7.2. Métodos de equilíbrio limite	116
4.7.3. Métodos baseados nas condições de trabalho	120
4.8. Conclusões	122
5 Simulação numérica dos muros reforçados	124
5.1. Introdução	124
5.2. Características gerais da simulação	124
5.2.1. Programa utilizado	124
5.2.2. Tipos de elementos finitos utilizados	125
5.2.3. Modelos e propriedades dos materiais	125
5.2.3.1. Modelo Elástico	125
5.2.3.2. Modelo Mohr – Coulomb	126
5.2.3.3. Modelo <i>Hardening Soil</i>	126
5.2.4. Elementos de reforço	130
5.3. Técnicas usadas para a simulação numérica	130
5.3.1. Geração do modelo	130
5.3.2. Condições de contorno	131
5.3.3. Efeitos de compactação	131
5.3.4. Sistema de face	131
5.3.5. Simulação da construção do muro	132
5.4. Resultados da simulação numérica	133
5.4.1. Dados de entrada	133
5.4.2. Resultados do Muro 1	135
5.4.3. Resultados do Muro 2	138

5.4.4. Resultados do Muro 3	140
5.5. Conclusões	142
6 Comparação dos métodos analíticos com as simulações numéricas	144
6.1. Introdução	144
6.2. Métodos de projeto	144
6.3. Aplicação dos métodos aos casos reais	145
6.3.1. Muro 1	145
6.3.2. Muro 2	146
6.3.3. Muro 3	148
6.4. Conclusões	150
7 Considerações finais	152
7.1. Conclusões	152
7.2. Sugestões	154
Referências bibliográficas	155

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Geossintéticos comumente usados em obras geotécnicas: a) geotêxteis, b) geogrelhas, c) geocompostos e d) geomembranas.	28
Figura 2.2 – Utilização de geossintéticos em obras geotécnicas.	31
Figura 2.3 – Geotêxteis tecidos (a e b) e não tecidos (c e d).	33
Figura 2.4 – Tipos de geogrelhas. (a) extrudada bidirecional, (b) extrudada unidirecional, (c) soldada, (d) tecida, (e) soldada a laser.	33
Figura 2.5 – Classificação de muros e taludes reforçados de acordo à Norma Europeia PREN 14475.	35
Figura 2.8 – Modos de ruptura na análise de estabilidade externa (Bonaparte et al.,1987).	38
Figura 2.9 – Mecanismo de interação: a) atrito; b) resistência passiva (Jewell, 1996).	38
Figura 2.10 – Modos de ruptura interna idealizados por Jones (1996).	38
Figura 2.11 – Definição da zona ativa e resistente e mecanismo de transferência de tensões (Lee, 2000).	39
Figura 2.12 – Procedimento de análise <i>Tieback</i> (Bonaparte et al. 1987).	42
Figura 2.13 – Distribuição da tensão lateral de solo considerada pelos diferentes métodos de projeto <i>Tieback</i> (Claybourn e Wu,1993).	44
Figura 2.14 – Análise de estabilidade considerando que a tensão no reforço não altera a resistência do solo (Bonaparte et al., 1987).	46
Figura 2.15 – Análise de estabilidade considerando que a tensão no reforço incrementa a resistência do solo (Bonaparte et al., 1987).	46
Figura 2.16 – Ábaco para a determinação do coeficiente de força do método de Schmertmann et al. (1987).	49
Figura 2.17 – Reorientação das forças de tração no reforço (Oliveira, 2000).	49
Figura 2.18 – Forças atuantes na cunha de ruptura e o polígono de forças (Leshchinsky e Perry, 1989).	50
Figura 2.19 – Determinação da extensão da superfície de ruptura (Leshchinsky e Perry, 1989).	50
Figura 2.20 – Ábaco para o cálculo do coeficiente de pressão de terra $K_{req}$ ,	

(Jewell, 1991).	51
Figura 2.21 – Cálculo de $D_{\text{max}}$ com a profundidade normalizada para MSR com geossintéticos (Allen e Bathurst., 2001a).	54
Figura 2.22 – Mecanismo de equilíbrio interno (Ehrlich e Mitchell., 1994).	55
Figura 2.23 – Trajetória de tensões do modelo (Ehrlich e Mitchell,1994).	56
Figura 2.24 – Ábacos para taludes de 90° e coesão nula (Dantas e Ehrlich, 2000).	60
Figura 2.25 – Lugar geométrico dos pontos de tração máxima (Dantas e Ehrlich, 2000).	61
Figura 2.26 – Propriedades dos materiais envolvidas no desenvolvimento dos modelos analíticos (adaptado de Lee, 2000).	62
Figura 2.27 – Efeito da rigidez do reforço (Adib, 1988).	65
Figura 2.29 – Ilustração esquemática sobre o estado de tensões e deformações em um elemento hipotético de solo reforçado (Dantas, 2004).	69
Figura 2.30 – Acréscimo de tensão no solo devido à operação de compactação (Dantas, 2004).	70
Figura 2.31 – Influência da compactação do solo na tração atuante nos reforços, para estruturas com face rígida e diferentes índices de rigidez relativa (Loiola, 2001).	71
Figura 2.32 – Evolução de $T_{\text{max}}$ ao longo do reforço (Saramago, 2002).	72
Figura 2.33 – Diagrama ilustrativo para o caso em que $T_{TR} > T_A > (T_R + T_{W,\text{max}})$ (Tatsuoka, 1993).	73
Figura 3.2 – Detalhe da seção transversal típica da MSR com geogrelha (Becker, 2006).	78
Figura 3.3 – Vista em planta das duas seções instrumentadas (Becker, 2006).	79
Figura 3.4 – Posicionamento dos <i>tell-tales</i> nas geogrelhas, com distâncias referenciadas à face do muro (Becker, 2006).	80
Figura 3.5 – Disposição dos <i>tell-tales</i> na geogrelha e vista da estrutura de suporte do equipamento de leitura na face do muro reforçado (Becker, 2006).	81
Figura 3.6 – Detalhes da caixa sueca (Becker, 2006).	81
Figura 3.7 – Marco topográfico instalado na face do muro, entre duas camadas de sacaria (Becker 2006).	82
Figura 3.8 – Seção transversal instrumentada com <i>tell-tales</i> , marcos	

superficiais e caixas suecas (Becker 2006).	82
Figura 3.9 – Recalques na base do muro de solo reforçado para a seção E20+15 (Becker, 2006).	83
Figura 3.10 – Instrumentação do protótipo (Benjamin, 2006).	86
Figura 3.11 – Esquema de uma manta instrumentada com <i>tell tales</i> (Benjamin, 2006).	87
Figura 3.12 – Sistema para acompanhar o deslocamento da face (Benjamin, 2006).	87
Figura 3.13 – Medição dos deslocamentos da face utilizando equipamentos de topografia (Benjamin, 2006).	87
Figura 3.14 – Curvas de deformação para o protótipo 8 ao final da construção (Benjamin 2006).	89
Figura 3.15 – Superfícies de força de tração máxima dos reforços para várias idades (Benjamin, 2006).	90
Figura 3.16 – Deslocamentos da face do protótipo 8 medidos diretamente pelos <i>tell- tales</i> (Benjamin, 2006).	91
Figura 3.17 – Posicionamento dos instrumentos vista em corte (Riccio e Ehrlich, 2007).	93
Figura 3.18 – Posicionamento dos instrumentos vista em planta da camada numero 3 (Riccio e Ehrlich, 2007).	94
Figura 3.19 – Distribuição de carga ao longo dos reforços instrumentados, ao final da construção (Riccio e Ehrlich, 2007).	95
Figura 4.1 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>tieback</i> ) – Muro 1.	103
Figura 4.2 – Muro 1 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>slope stability</i> ) – Muro 1.	105
Figura 4.3 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho) – Muro 1.	107
Figura 4.4 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>tieback</i> ) – Muro 2.	110
Figura 4.5 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>slope stability</i> ) – Muro 2.	112
Figura 4.6 – Análises de estabilidade de talude de muro 2 sob condições	

estáticas sem reforço. ( <i>Slide 5.0</i> ).	113
Figura 4.7 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho) – Muro 2.	115
Figura 4.8 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>tieback</i> ) – Muro 3.	118
Figura 4.9 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – <i>slope stability</i> ) – Muro 3.	120
Figura 4.10 – Muro 3 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho).	122
Figura 5.1 – Relação hiperbólica tensão – deformação para ensaios triaxiais CU (Brinkgreve, 2004).	127
Figura 5.2 – Determinação do valor de $E_{oed}^{ref}$ em ensaios de adensamento (Brinkgreve, 2004).	128
Figura 5.3 – Simulação por etapas do processo construtivo dos muros.	132
Figura 5.4 – Detalhe da geometria do muro 1.	134
Figura 5.5 – Detalhe da geometria do muro 2	135
Figura 5.6 – Detalhes da geometria do muro 3.	135
Figura 5.7 – Detalhe da deformada ao final da construção de muro 1.	136
Figura 5.8 – Comparação entre as forças de tração previstas e medidas para o muro 1.	137
Figura 5.9 – Detalhe da deformada de muro 2 ao final da construção	138
Figura 5.10 – Comparação entre as forças de tração previstas e medidas para o muro 2.	139
Figura 5.11 – Detalhe da deformada do muro 3 ao final da construção.	140
Figura 5.12 – Comparação entre as forças de tração previstas e medidas para o muro 3.	141
Figura 6.1 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos – Muro 1.	145
Figura 6.2 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos – Muro 2.	147
Figura 6.3 – Comparação entre os resultados medidos em campo e os previstos – Muro 3.	149

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens dos principais polímeros.	27
Tabela 2.2 – Principais funções dos geossintéticos (Bueno, 2003).	29
Tabela 2.3 – Tipos de geossintéticos e suas principais funções (Bueno, 2003).	30
Tabela 2.4 - Métodos de análise <i>tieback</i> para o projeto de MSR com geossintéticos.	42
Tabela 2.5 – Métodos de análise de equilíbrio limite - <i>slope stability</i> .	47
Tabela 2.6 – Características das análises numéricas citadas na literatura (Becker, 2006).	64
Tabela 2.7 – Especificações de materiais de aterro para MSR com geossintéticos (Elias et al., 2001).	67
Tabela 3.1 – Resumo das características dos muros instrumentados.	76
Tabela 3.2 – Propriedades médias de solo empregado (Becker, 2006).	78
Tabela 3.3 – Propriedades das geogrelhas (Becker, 2006).	79
Tabela 3.4 – Instrumentos empregados no monitoramento do muro de solo reforçado (Becker, 2006).	82
Tabela 3.5 – Forças de tração máxima medidas em campo para o muro 1.	84
Tabela 3.6 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento (Benjamin, 2006).	85
Tabela 3.7 – Características dos geotêxteis (Benjamin, 2006).	85
Tabela 3.8 – Forças de tração máxima medidas em campo para o muro 2.	90
Tabela 3.9 – Curvas granulométricas dos solos (Riccio e Ehrlich, 2007).	92
Tabela 3.10 – Resultados dos ensaios de caracterização (Riccio e Ehrlich, 2007).	92
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios triaxiais (Riccio e Ehrlich, 2007).	92
Tabela 3.12 – Propriedades nominais das geogrelhas (HUESKER, 1999).	92
Tabela 3.13 – Forças de tração máxima medidas em campo para o muro 3.	95
Tabela 4.1 – Resumo dos métodos de projeto para o dimensionamento de MSR com geossintéticos adotados para análise.	98
Tabela 4.2 – Resumo dos MSR com geossintéticos.	99
Tabela 4.3 – Resumo dos dados de entrada para o muro 1.	101

Tabela 4.4 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>tieback</i> ) – Muro 1.	102
Tabela 4.5 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para as três camadas de reforço instrumentadas ( <i>tieback</i> ) – Muro 1.	102
Tabela 4.6 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>slope stability</i> ) – Muro 1.	104
Tabela 4.7 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para as três camadas de reforço instrumentadas ( <i>slope stability</i> ) – Muro 1.	105
Tabela 4.8 – Métodos baseados nas condições de trabalho.- Muro 1.	106
Tabela 4.9 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para três camadas de reforço instrumentadas (nas condições de trabalho) – Muro 1.	107
Tabela 4.10 – Resumo dos dados de entrada para o muro 2.	108
Tabela 4.11 – Máxima força de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>tieback</i> ) – Muro 2.	109
Tabela 4.12 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para as camadas de reforço instrumentadas ( <i>tieback</i> ) – Muro 2.	109
Tabela 4.13 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>slope stability</i> ) – Muro2.	111
Tabela 4.14 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas ( <i>slope stability</i> ) – Muro 2.	112
Tabela 4.15 – Máximas forças de tração segundo os métodos baseados nas condições de trabalho – Muro2.	114
Tabela 4.16 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas (nas condições de trabalho) – Muro 2.	114
Tabela 4.17 – Resumo dos dados de entrada para o muro 3.	116
Tabela 4.18 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>tieback</i> ) – Muro 3.	117
Tabela 4.19 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas ( <i>tieback</i> ) – Muro 3.	117
Tabela 4.20 – Máxima força de tração segundo os métodos de equilíbrio limite ( <i>slope stability</i> ) – Muro 3.	119

Tabela 4.21 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.	119
Tabela 4.22 – Máximas forças de tração segundo os métodos baseados nas condições de trabalho – Muro 3.	121
Tabela 4.23 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.	121
Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo <i>Hardening Soil</i> .	129
Tabela 5.2 – Parâmetros de entrada para a simulação numérica do muro 1.	133
Tabela 5.3 – Parâmetros de entrada para a simulação numérica do muro 2.	133
Tabela 5.4 – Parâmetros de entrada para a simulação numérica do muro 3.	133
Tabela 5.5 – Parâmetros de entrada do reforço para os muros avaliados	134
Tabela 5.6 – Forças de tração máximas em diferentes camadas obtidas pelo MEF para o muro 1.	136
Tabela 5.7 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ em três camadas de reforço instrumentadas – Muro 1.	136
Tabela 5.8 – Forças de tração máximas em diferentes camadas obtidas pelo modelo numérico para o muro 2.	138
Tabela 5.9 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ em três camadas de reforço instrumentadas – Muro 2.	139
Tabela 5.10 – Forças de tração máxima em diferentes camadas obtidos pelo MEF para o muro 3.	140
Tabela 5.11 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ em três camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.	141
Tabela 6.1 – Métodos de projeto a confrontar nesta pesquisa.	144
Tabela 6.2 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para três camadas de reforço instrumentadas – Muro 1.	145
Tabela 6.3 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 2.	147
Tabela 6.4 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.	148

## Lista de Símbolos

### Romanos

$a$	Constante adimensional em função da rigidez fornecido pelo método de Allen et al. (2003)
$A_r$	Área de seção transversal do reforço
$c$	Coesão do solo
$c'$	Coesão efetiva do solo
$d$	Constante fornecido pelo método de Allen et al. (2003)
$D_{t_{\max}}$	Fator de distribuição para estimar $T_{\max}$ no método de Allen et al. (2003)
$e$	Excentricidade
$E$	Módulo de Young
$E_r$	Módulo de elasticidade do reforço
$E_{oed}$	Rigidez tangente para deformações volumétricas
$E_{oed}^{ref}$	Rigidez tangente para uma tensão vertical de referência obtida em um ensaio odométrico
$E_{ur}$	Rigidez secante para trajetórias de descarregamento e recarregamento
$E_{ur}^{ref}$	Rigidez secante para trajetórias de descarregamento e recarregamento para uma tensão de confinamento de referência
$E_{50}$	Rigidez secante correspondente à metade da tensão desviadora de ruptura
$E_{50}^{ref}$	Rigidez secante correspondente à metade da tensão desviadora de ruptura para uma tensão de confinamento de referência
$H$	Altura do muro
$J$	Módulo de deformabilidade de uma camada de reforço
$J_{ave}$	Módulo de deformabilidade médio de todas as camadas de reforço em toda a seção do muro
$K$	Coefficiente de empuxo no método de Schmertmann et al. (1987)

$K_a$	Coefficiente de empuxo ativo
$K_{aa}$	Coefficiente de empuxo ativo equivalente
$K_{abh}$	Componente horizontal da pressão ativa de terra
$K_{avh}$	Componente vertical da pressão ativa de terra
$K_{ar}$	Coefficiente de empuxo traz do muro
$K_c$	Coefficiente de empuxo de equilíbrio no carregamento
$K_o$	Coefficiente de empuxo no repouso
$K_o^{nc}$	Coefficiente de empuxo no repouso para solos normalmente consolidados
$K_{req}$	Constante de empuxo fornecido pelo método de Jewell (1991)
$K_r$	Coefficiente do empuxo de equilíbrio no descarregamento
$K_{rE}$	Coefficiente de empuxo no método de Elias et al. (2001)
$K_{\Delta 2}$	Coefficiente de decréscimo do empuxo lateral para o descarregamento sob condição $K_o$
$L$	Comprimento do rolo
$L_e$	Comprimento inserido na zona resistente
$L_r$	Comprimento inserido na zona ativa
$L_R$	Comprimento do reforço
$m$	Função de potência
$M$	Módulo de deformabilidade do compósito
$N_\gamma$	Fator de capacidade de carga
$n$	Módulo expoente de Duncan et al (1980)
$P_a$	Pressão atmosférica
$q$	Sobrecarga
$\bar{q}$	Tensão desviadora

$Q$	Força vertical máxima de operação
$R_f$	Parâmetro do modelo hiperbólico de Duncan et al. (1980)
$S$	Altura de sobrecarga
$S_{global}$	Rigidez global dos reforços
$S_h$	Espaçamento horizontal
$S_i$	Índice de rigidez relativa solo – reforço
$S_{local}$	Rigidez local do reforço
$S_v$	Espaçamento vertical
$t_j$	Força de tração solicitante no reforço j
$T$	Força horizontal total necessária à estabilização do talude reforçado.
$T_A$	Resistência ao arrancamento no trecho da zona ativa
$T_R$	Resistência ao arrancamento no trecho da zona resistente
$T_{max}$	Força de tração máxima
$T_{medido}$	Força de tração medida em campo
$T_{previsto}$	Força de tração prevista pelo método de projeto
$T_{projeto}$	Força de tração de projeto no reforço
$T_{reforço}$	Força de tração no reforço
$T_{rup}$	Força de tração máxima na ruptura
$T_{TR}$	Resistência à tração do reforço
$T_w$	Força de tração no reforço mobilizada pela conexão com a face
$u$	Poropressão
$y$	Altura de elevação a partir da base do muro
$y_j$	Altura de elevação do reforço j

- $z$  Profundidade abaixo do topo do muro
- $z_e$  Profundidade do lugar geométrico dos pontos de tração máxima.

## Gregos

- $\alpha$  Coeficiente de descarregamento de Duncan e Seed (1986)
- $\beta$  Ângulo de talude no método de Jewell (1991)
- $\varepsilon_a$  Deformação axial
- $\Phi_{local}$  Fator de rigidez local
- $\Phi_{fb}$  Fator de inclinação da face
- $\Phi_{fs}$  Fator de rigidez da face
- $\phi$  Ângulo de atrito do solo
- $\Delta\sigma_v$  Acréscimos de tensão vertical de pico induzida pela compactação
- $\Delta\sigma_h$  Acréscimos de tensão horizontal de pico induzida pela compactação
- $\Delta\sigma_{h,r}$  Acréscimos de tensão horizontal residual induzida pela compactação
- $\gamma$  Peso específico do solo
- $\gamma_{rz}$  Peso específico traz do muro
- $\varphi$  Inclinação da reta tangente à superfície de ruptura
- $\kappa_s$  Rigidez cortante
- $\kappa_n$  Rigidez normal
- $k$  Parâmetro adimensional do módulo de Young para carregamento
- $k_{ur}$  Parâmetro adimensional do módulo de Young para descarregamento e recarregamento
- $\nu$  Coeficiente de Poisson
- $\nu_o$  Coeficiente de Poisson durante o carregamento

$\nu_{un}$	Coeficiente de Poisson durante o descarregamento
$\theta$	Inclinação da superfície de ruptura
$\sigma_{ave}$	Tensão horizontal média do solo
$\sigma_h$	Tensão horizontal
$\sigma_v$	Tensão vertical
$\sigma'_{ref}$	Tensão de referencia para a rigidez
$\sigma_z$	Tensão vertical no solo à profundidade z
$\sigma_{zc,i}$	Máxima tensão vertical induzida pela compactação
$\sigma_{xp,i}$	Tensão horizontal induzida pela compactação
$\sigma'_{zc}$	Tensão horizontal de equilíbrio no carregamento
$\sigma'_{xr}$	Tensão horizontal de equilíbrio no descarregamento
$\omega$	Inclinação do talude no método de Ehrlich e Mitchell (1994)
$\psi$	Ângulo de dilatância
$\zeta$	Ângulo de orientação do reforço sobre a superfície de ruptura