4 Comparação dos métodos de projeto com resultados de campo

4.1. Introdução

Para a análise de estabilidade interna de muros de solo reforçado (MSR) com geossintéticos, a carga de tração no reforço é um valor importante para o cálculo da resistência à tração, espaçamento e comprimento dos reforços.

No capítulo anterior, foram descritos os resultados da instrumentação sob condições de serviço de três casos reais de MSR com geossintéticos bem documentados. O objetivo desta pesquisa é comparar os resultados de campo com os valores de tração máxima nos reforços obtidos com os métodos de projeto mais utilizados.

4.2. Métodos de projeto adotados

Conforme foi explicado anteriormente, os métodos de projeto para análise de estabilidade interna são divididos em duas categorias: métodos de equilíbrio limite, baseados em condições de ruptura, e métodos analíticos baseados condições de serviço. Por sua vez, o método de equilíbrio limite divide-se em dois grupos, que podem ser denominados métodos *tieback* (ancoragem) e métodos *slope stability* (estabilidade de taludes). Os métodos *tieback* podem ser considerados como métodos de tensões que se baseiam em considerações de tensões horizontais. Os métodos *slope stability* empregam aproximações comuns às análises de estabilidade de taludes, com o equilíbrio de forças ao longo de uma superfície de ruptura conhecida. Todos estes métodos foram apresentados no Capítulo dois. Nesta pesquisa são reunidos os métodos, amplamente utilizados pelos projetistas para o dimensionamento de MSR com geossintéticos (Tabela 4.1).

Tipo de análise		Método
		Steward et al. (1977)
Equilíbrio Limite	TieBack	Broms (1978)
	(equilíbrio de	Murray (1980)
	forças	Collin (1986)
	horizontais)	Bonaparte (1987)
		Elias et al. (2001)
	Slope Stability	Schmertmann (1987)
	(equilíbrio de	Leshchinsky e Perry (1989)
	forças e	Leshchinsky e Boedeker (1989)
	momentos)	Jewell (1991)
Condições de serviço		Ehrlich e Mitchell (1994)
		Allen et al. (2003)

Tabela 4.1 – Resumo dos métodos de projeto para o dimensionamento de MSR com geossintéticos adotados para análise.

4.2.1. Dados de entrada

Cada método de projeto requer diversos dados de entrada para poder calcular a força de tração em cada reforço, sendo três os grupos de parâmetros importantes:

- a. Geometria: inclui a altura, espaçamento e comprimento dos reforços, inclinação da face e sobrecargas do muro;
- b. Propriedades do solo: incluem o material do aterro e o solo da retroterra;
- c. Propriedades do reforço: incluem a resistência à tração e a resistência da interface solo – reforço.

4.3. Descrição dos casos reais avaliados

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram escolhidos três muros reais descritos na literatura e apresentados detalhadamente no Capítulo 3. A Tabela 4.2 apresenta uma breve descrição destes três muros. O primeiro é um MSR com geogrelhas com face de sacos de terra vegetal, compactado com um rolo compactador Dynapac CA25, com largura de 2,10m e carga estática equivalente de 160 kN. Detalhes deste muro são apresentados por Becker (2006).

O segundo caso é um muro instrumentado, reforçado com geotêxteis, com face auto-envelopada e compactado com uma placa vibratória de marca Wacker, modelo BPS 1135 W com largura de 0,35m e carga estática equivalente a 11 kN. Detalhes deste muro são apresentados por Benjamin (2006) como parte de uma pesquisa de oito protótipos de muros de solo reforçado com geotêxteis.

O último caso consiste de um MSR com geogrelhas de face vertical com blocos de concreto. A compactação foi realizada com um rolo compactador Dynapac CA 25, com largura de 2,10m e operando em alta freqüência com carga estática equivalente de 380 kN. Detalhes de este muro são apresentados em Riccio e Ehrlich (2007).

Caso	Autores	Características de dimensionamento	
		Altura: 4,5m	
		Inclinação da face: 1(H) : 5(V)	
Muro 1	Becker (2006).	Reforço: Geogrelha	
		Espaçamento: Variável 0,4 a 0,6m	
		Comprimento: 4,2m	
Muro 2		Altura: 4m	
		Inclinação da face: 1(H) : 5(V)	
	Benjamin (2006).	Reforço: Geotêxtil	
		Espaçamento: 0,4m	
		Comprimento: 3m	
		Altura: 4,2m	
		Inclinação da face: Vertical	
Muro 3	Riccio e Ehrlich (2007).	Reforço: Geogrelha	
		Espaçamento: Variável 0,4 a 0,6m	
		Comprimento: 4m	

Tabela 4.2 – Resumo dos MSR com geossintéticos.

4.4.Condições de comparação

Conforme indicado na revisão bibliográfica, as condições reais dos muros reforçados são discordantes, pelo que são necessários alguns ajustes, conforme indicado a seguir:

- O método de Schmertmann et al. (1987) foi desenvolvido para taludes inclinados até 80° e ângulos de atrito até 35°, sendo necessário extrapolar para valores acima destes limites;
- Nos métodos de Steward (1977), Collin (1986) e Murray (1980), supõe-se que a camada de reforço mais baixa está no nível da fundação, para os cálculos da máxima força de tração no reforço.
- Nenhum dos métodos, à exceção do método de Ehrlich e Mitchell (1994), considera a coesão no cálculo da força de tração. Portanto, o valor da coesão foi desprezado para os demais cálculos;
- Os métodos de Leshchinsky e Boedeker (1989) e Leshchinsky e Perry (1989) e Broms (1978) foram desenvolvidos para muros reforçados com espaçamento vertical constante. Nestes casos, considerou-se o espaçamento médio dos reforços;
- Para os casos onde o solo de aterro varia considera-se um valor constante para o ângulo de atrito, coesão e peso específico para os cálculos;
- Nenhum dos métodos de projeto, à exceção do método de Ehrlich e Mitchell (1994), considera carga devido ao efeito da compactação;
- 7. O espaçamento vertical, para o calculo da área tributaria é dado pela distância entre o centro de duas camadas adjacentes. Para a primeira camada de reforço, o espaçamento vertical é a distância entre a base do muro e o centro da primeira camada. Para a última camada de reforço, o espaçamento vertical é a distância entre o topo do muro e o centro da camada superior.
- A maioria dos métodos foi desenvolvida para muros de face vertical, à exceção dos métodos da FHWA (2001), Schmertmann (1987), Leshchinky e Boedeker (1989) e Allen et al. (2003).

4.5. Aplicação dos métodos ao Muro 1

4.5.1. Dados de entrada

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados necessários para o cálculo da força de tração pelos diferentes métodos.

Parâmetro	Característica	Valor
Geometria	Altura	4,5m
	Espaçamento entre reforços	Variável 0,4m a 0,6m
	Inclinação da face	1(H):5(V)
	Comprimento do reforço	4,2m
	Sobrecarga	Não
Propriedades do	Ângulo de atrito	34,2 °
solo	Coesão	10,0 kN/m ²
	Peso específico	17,9 kN/m ³
Reforço	Geogrelhas de PVA	55 kN/m (T _{rup}) e
		35kN/m (T _{rup})
		759 kN/m (Rigidez) e
		1210 kN/m (Rigidez)

Tabela 4.3 – Resumo dos dados de entrada para o muro 1.

4.5.2. Métodos de equilíbrio limite

Conforme citado anteriormente, os métodos de equilíbrio limite são divididos em dois grupos: métodos "*tieback*" e métodos "*slope stability*". A Tabela 4.4 apresenta para o muro 1, as forças de tração máxima distribuídas em diferentes camadas previstas pelos métodos de *tieback*. A Tabela 4.5 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para três das nove camadas de reforço, localizadas a 0,40, 1,90 e 3,70m de elevação. A Figura 4.1 compara a máxima força de tração

prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Camada	Elevação		Máxima força de tração (kN/m)					
N ⁰	(m)	Steward	Broms	Murray	Collin	Bonaparte	FHWA	
IN	(111)	(1977)	(1978)	(1980)	(1986)	(1987)	(2001)	
1	4.30	0,78	8,07	0,50	1,57	0,50	0,38	
2	3.70	3,76	8,07	2,41	7,54	2,42	1,81	
3	3.10	6,58	8,07	4,22	8,48	4,30	3,16	
4	2.5	9,41	8,07	6,02	8,48	6,28	4,52	
5	1.90	12,23	8,07	7,83	8,48	8,42	5,88	
6	1.30	13,80	8,07	8,83	7,77	9,88	6,63	
7	0.80	13,05	8,07	8,36	6,36	9,74	6,27	
8	0.40	12,86	8,07	8,23	5,65	9,97	6,18	
9	0.00	7,05	8,07	4,52	2,83	5,72	3,39	

Tabela 4.4 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*tieback*) – Muro 1.

Tabela 4.5 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para as três camadas de reforço instrumentadas (*tieback*) – Muro 1.

Elevação	$T_{previsto}/T_{medido}$						
	Steward	Broms	Murray	Collin	Bonaparte	FHWA	
	(1977)	(1978)	(1980)	(1986)	(1987)	(2001)	
0,82H	0,74	1,58	0,47	1,48	0,47	0,35	
0,42H	1,47	0,97	0,94	1,02	1,01	0,71	
0,09H	1,55	0,97	0,99	0,68	1,20	0,74	
Valor Médio	1,25	1,17	0,80	1,06	0,89	0,60	



Figura 4.1 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *tieback*) – Muro 1.

Segundo a Tabela 4.5, observa-se que três dos seis métodos apresentam valores médios de $T_{previsto}/T_{medido} > 1$.

Conforme a Figura 4.1 e a Tabela 4.5, os métodos de Steward (1977) e de Bonaparte (1987) prevêem melhor os resultados para as camadas inferiores. Nas camadas superiores prevalece o efeito da compactação e os métodos não levam em conta tal efeito. Os métodos consideram que as tensões nos reforços estão relacionadas com as tensões geostáticas. Steward (1977) considera a condição de repouso K_o para o cálculo das tensões horizontais. Bonaparte (1987) considera a condição ativa K_a para o cálculo da tensão horizontal, porém leva em conta a tensão horizontal induzida pelo empuxo do retro-aterro.

Os métodos de Broms (1978) e de Collin (1986) prevêem os resultados, acima dos registrados em campo para as camadas superiores , ou seja, a favor da segurança. O método de Broms (1978) é independente da profundidade, mas dependente da altura final e do peso específico para o cálculo do esforço horizontal. O método de Collin (1986) só depende da altura do muro.

Os métodos de Murray (1980) e da FHWA (2001) apresentam valores de $T_{previsto}/T_{medido} < 1$ em diferentes elevações, ou seja, mostraram-se contra a segurança, neste caso do muro 1. Provavelmente, isto se deve ao fato que ambos

consideram a condição ativa para o cálculo das tensões horizontais. Alem disto, o método do FHWA (2001) leva em conta a inclinação da face, reduzindo ainda mais o valor de K_a.

Observando a Figura 4.1, percebe-se que os métodos de Steward e de Murray não seguem perfeitamente as condições K_o e K_a , respectivamente. Ambos se afastam K_o e K_a devido ao espaçamento variável.

Segundo Allen et al. (2003), todos os métodos citados deveriam superestimar largamente as tensões no reforço. Neste caso não acontece o previsto, provavelmente porque nenhum dos métodos considera o efeito da compactação, além de desprezarem a coesão.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de forças de tração distribuídas em diferentes camadas obtidas pelos métodos de equilíbrio limite – *slope* stability. A Tabela 4.7 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em três das nove camadas de reforço instrumentadas. Na Figura 4.2 comparam-se, os resultados previstos com os medidos durante o monitoramento.

		Máxima força de tração (kN/m)							
			Leshch	ninky e	Leshcł				
Camada	Elevação	G 1 (Boed	leker	Pe	rry	T 11		
Nº	(m)	Schmertmann	(19	89)	(19	89)	Jewell		
		(1987)	Reforço	Reforço	Reforço	Reforço	(1991)		
			Horiz.	Inclin.	Horiz.	Inclin.			
1	4,30	0,42	0,18	0,17	0,24	0,23	0,37		
2	3,70	2,00	1,16	1,08	1,59	1,47	1,77		
3	3,10	3,51	2,15	2,00	2,94	2,71	3,09		
4	2,50	5,01	3,13	2,91	4,28	3,95	4,42		
5	1,90	6,51	4,12	3,83	5,63	5,20	5,75		
6	1,30	7,34	5,10	4,74	6,98	6,44	6,48		
7	0,80	6,95	6,09	5,66	8,32	7,68	6,13		
8	0,40	6,84	7,07	6,58	9,67	8,92	6,04		
9	0,00	3,76	8,06	7,49	11,02	10,17	3,32		

Tabela 4.6 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*slope stability*) – Muro 1.

 $T_{previsto}/T_{medido}$ Leshchinky e Leshchinky e Elevação Boedeker Perry Schmertmann Jewell Normalizada (1989)(1989)(1987)(1991)Reforço Reforço Reforço Reforço Horiz. Inclin. Horiz. Inclin. 0,82H 0,39 0,23 0,29 0,21 0,31 0,35 0,42H 0,78 0,50 0,46 0,68 0,63 0,69 0,09H 0,82 0,85 0,79 1,17 1,07 0,73 0,49 Valor Médio 0,66 0,53 0,72 0,66 0,59



Tabela 4.7 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para as três camadas de reforço instrumentadas (*slope stability*) – Muro 1.

Figura 4.2 – Muro 1 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *slope stability*) – Muro 1.

Força de tração máxima (kN/m)

10

12

14

16

2

Cabe ressaltar que os métodos de Leshchinsky e Boedeker (1989) e Leshchinsky e Perry (1989) consideram duas possibilidades para a orientação da força de tração nos reforços: paralela ao reforço (horizontal) ou inclinada (tangente à superfície de ruptura).

O método de Leshchinsky e Perry (1989) prevê melhor os resultados para as camadas inferiores, provavelmente devido ao fato de ter sido desenvolvido para muros de face vertical. O método de Leshchinsky e Boedeker (1989) fornece resultados $T_{previsto}/T_{medido} < 1$ em todas as camadas, provavelmente por ter sido desenvolvido para muros de face inclinada e superfície de ruptura espiral logarítmica, sem consideração do esforço de compactação.

Os métodos de Schmertmann (1987) e Jewell (1991) apresentam resultados de $T_{previsto}/T_{medido} < 1$ em todas as camadas. Ambos admitem que a inclinação da face causa uma redução no valor de K_a.

Similar aos métodos *tieback*, estes métodos deveriam superestimar as tensões no reforço. Entretanto, isto não acontece, provavelmente devido ao fato de que os métodos tipo *slope stability* desconsideram o efeito da compactação e a coesão do solo. Neste caso do muro 1, a energia de compactação é muito elevada.

4.5.3. Métodos baseados nas condições de trabalho

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores de forças de tração máxima previstos pelos métodos. A Tabela 4.9 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em três das nove camadas de reforço instrumentadas. Na Figura 4.3 os resultados previstos são comparados com os resultados de campo observados durante o monitoramento.

Camada		Máxima força de tração (kN/m)			
N ^o	Elevação (m)	Allen et al.	Ehrlich e Mitchell		
		(2003)	(1994)		
1	4,30	1,05	7,78		
2	3,70	2,22	10,34		
3	3,10	3,30	10,94		
4	2,50	5,25	12,24		
5	1,90	5,25	12,90		
6	1,30	5.25	12,58		
7	0,80	4,79	10,99		
8	0,40	2,92	10,57		
9	0,00	1,05	5,68		

Tabela 4.8 – Métodos baseados nas condições de trabalho.- Muro 1.

Observando a Figura 4.3, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) prevê melhor os resultados, a favor da segurança, neste caso. A Tabela 4.9 apresenta resultados de $T_{previsto}/T_{medido} > 1$ em todas as camadas.

Tabela 4.9 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para três camadas de reforço instrumentadas (nas condições de trabalho) – Muro 1.

	$T_{\it previsto}/T_{\it medido}$			
Elevação Normalizada	Allen et al.	Ehrlich e Mitchell		
	(2003)	(1994)		
0,82H	0,44	2,03		
0,42H	0,63	1,55		
0,09H	0,35	1,27		
Valor Médio	0,47	1,62		



Figura 4.3 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho) – Muro 1.

O método de Allen et al. (2003) apresenta resultados de $T_{previsto}/T_{medido} <1$ em todas as camadas, ou seja, foram contra a segurança neste caso. Conforme mostra a Figura 4.3, o formato da curva de campo é parecido com o da curva de Allen et al. (2003). Isto pode ser devido ao fato de ter sido desenvolvido a partir de medidas de tensão e deformação de muros monitorados em escala real, porém compactados com equipamentos de baixa energia. Segundo a Figura 4.3, as maiores tensões previstas pelo método de Ehrlich e Mitchell (1994) situam-se nas camadas intermediárias, onde os reforços apresentam maior rigidez e espaçamento.

Conforme o método de Ehrlich e Mitchell (1994), a tensão σ_{zc} é a máxima tensão vertical da história do solo, sendo definida partir da comparação da tensão vertical induzida pela compactação ($\sigma_{zc,i}$) com a tensão geostática (σ_z). Em todas as camadas, a tensão vertical induzida pela compactação foi maior que a tensão geostática, prevalecendo o efeito da compactação no comportamento tensão – deformação. Isto deve-se à alta energia transmitida ao solo pelo equipamento de compactação.

4.6. Aplicação dos métodos ao Muro 2

4.6.1. Dados de entrada

Na Tabela 4.10 são apresentados os do muro 2 necessários para o cálculo da força de tração pelos diferentes métodos.

Parâmetro	Característica	Valor	
Geometria	Altura	4,0m	
	Espaçamento entre reforços	0,4m constante	
	Inclinação da face	1(H):5(V)	
	Comprimento do reforço	3,0 m	
	Sobrecarga	Não	
Propriedades do	Ângulo de atrito interno	32,0°	
solo	Coesão	$16,0 \text{ kN/m}^2$	
	Peso específico	18,0 kN/m ³	
Reforço	Geotêxtil tecido	13,9 kN/m (T _{rup})	
	(Polipropileno)	61,5 kN/m (Rigidez)	

4.6.2. Métodos de equilíbrio limite

A Tabela 4.11 apresenta as forças de tração distribuídas em diferentes camadas previstas pelos métodos *tieback* para o muro 2. A Tabela 4.12, apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das dez camadas de reforço, localizadas a 1,2, 2,0, 2,8 e 3,6m de elevação. A Figura 4.5 compara a máxima força de tração prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Tabela 4.11 – Máxima força de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*tieback*) – Muro 2.

Camada	Elevação (m)	Máxima força de tração (kN/m)					
Método		Steward (1977)	Broms (1978)	Murray (1980)	Collin (1986)	Bonaparte (1987)	FHWA (2001)
1	3,60	2,03	5,75	1,33	5,66	1,33	1,02
2	3,20	2,71	5,75	1,77	3,78	1,77	1,36
3	2,80	4,06	5,75	2,65	3,78	2,65	2,04
4	2,40	5,42	5,75	3,54	3,78	3,54	2,73
5	2,00	6,77	5,75	4,42	3,78	4,42	3,41
6	1,60	8,12	5,75	5,31	3,78	5,31	4,09
7	1,20	9,48	5,75	6,19	3,78	6,19	4,77
8	0,80	10,83	5,75	7,08	3,78	7,08	5,45
9	0,40	12,18	5,75	7,96	3,78	7,96	6,13
10	0,00	6,77	5,75	4,42	1,89	4,42	3,41

Tabela 4.12 – Valores de $T_{\it previsto}/T_{\it medido}$ para as camadas de reforço instrumentadas

(*tieback*) – Muro 2.

Elevação Normalizada	$T_{previsto}/T_{medido}$					
Mátada	Steward	Broms	Murray	Collin	Bonaparte	FHWA
Metodo	(1977)	(1978)	(1980)	(1986)	(1987)	(2001)
0,90H	6,55	18,55	4,29	18,26	4,29	3,29
0,75H	15,62	22,12	10,19	14,54	10,19	7,85
0,50H	35,63	30,26	23,26	19,89	23,26	17,95
0,30H	27,09	16,43	17,69	10,80	17,69	13,63
Valor Médio	21,22	21,84	13,86	15,87	13,86	10,68



Figura 4.4 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *tieback)* – Muro 2.

Segundo a Tabela 4.12 observa-se que todos os métodos apresentam valores médios de $T_{previsto}/T_{medido} > 1$.

O método de Steward (1977) superestimou as forças de tração. Conforme a Tabela 4.12, observa-se que para o reforço posicionado a 2,00m de elevação, o valor previsto superou em 35 vezes os resultados medidos em campo. O método de Steward (1977) considera a condição de repouso K_o para o cálculo da força de tração.

Segundo a Tabela 4.12, os valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$ são menores para o método simplificado da FHWA(2001) em comparação com outros métodos. Além disto, o método considera a condição ativa (K_a) para o cálculo das forças de tração e leva em conta a inclinação da face, reduzindo ainda mais o valor de K_a (Figura 4.4).

Todos os métodos apresentam concordância um pouco melhor com os resultados de campo, para z>0,75H, exceto Broms (1978) e Collin (1986) que são empíricos. Por outro lado, apesar de superestimarem grosseiramente os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$, Broms (1978) e Collin (1986) apresentam curvas de elevação vs. forças de tração máxima com formato mais parecido com o de campo que os outros métodos.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos de forças de tração máxima distribuídas em diferentes camadas pelos métodos de s*lope stability*. A Tabela

4.14 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das dez camadas de reforço. Na Figura 4.6 comparam-se os resultados previstos com os medidos durante o monitoramento.

Cabe ressaltar que os métodos de Leshchinsky e Boedeker (1989) e Leshchinsky e Perry (1989), consideram duas possibilidades para a orientação da força de tração nos reforços: paralela ao reforço (horizontal) ou inclinada (tangente à superfície de ruptura).

Tabela 4.13 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*slope stability*) – Muro2.

		Máxima força de tração (kN/m)					
			Leshch	ninky e	Leshcł	ninky e	
Camada Elevação		Boed	leker	Perry		× 11	
Nº	(m)	Schmertmann (1087)	(19	89)	(1989) Jev (19		Jewell (1991)
		(1967)	Reforço.	Reforço.	Reforço.	Reforço.	(1))1)
			Horiz.	Inclin.	Horiz.	Inclin.	
1	3,60	1,14	0,63	0,59	0,80	0,73	0,99
2	3,20	1,52	1,27	1,18	1,60	1,47	1,32
3	2,80	2,28	1,90	1,77	2,40	2,20	1,98
4	2,40	3,03	2,53	2,36	3,20	2,93	2,64
5	2,00	3,79	3,17	2,95	4,01	3,67	3,30
6	1,60	4,55	3,80	3,54	4,81	4,40	3,96
7	1,20	5,31	4,44	4,13	5,61	5,13	4,62
8	0,80	6,07	5,07	4,72	6,41	5,86	5,28
9	0,40	6,83	5,70	5,31	7,21	6,60	5,93
10	0,00	3,60	6,34	5,90	8,01	7,33	3,13

Similar aos métodos *tieback*, os resultados obtidos pelos métodos *slope* stability fornecem valores de $T_{previsto}/T_{medido} > 1$, superestimando os valores de tração máxima.

Conforme a Figura 4.6 todos os métodos previram resultados abaixo da linha de condição ativa K_a.

O método de Leshchinsky e Perry (1989) superestima aproximadamente 12,2 vezes os valores medidos em campo. O método em sua hipótese assume uma superfície de ruptura linear de Rankine e não considera a inclinação da face do muro.

Tabela 4.14 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas (*slope stability*) – Muro 2.

	$T_{previsto}/T_{medido}$					
		Leshcł	Leshchinky e		Leshchinky e	
Elevação		Boed	leker	Pe	erry	- 11
Normalizada	Schmertmann (1987)	(19	89)	(1989)		Jewell (1991)
		Reforço	Reforço	Reforço	Reforço.	(1))1)
		Horiz.	Inclin.	Horiz.	Inclin.	
0,90H	3,68	2,03	1,90	2,58	2,35	3,19
0,75H	8,77	7,31	6,81	9,23	8,46	7,62
0,50H	19,95	16,68	15,53	21,11	19,32	17,37
0,30H	15,17	12,69	11,68	16,03	14,66	13,20
Valor Médio	11,89	9,68	9,01	12,24	11,20	10,35



Figura 4.5 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *slope stability*) – Muro 2.

O método de Leshchinsky e Boedeker (1989) foi o que menos superestimou os valores medidos em campo. Provavelmente, porque em sua hipótese ele assume uma superfície espiral logarítmica e considera a inclinação da face do muro.

Em conclusão, os métodos de equilíbrio limite superestimam largamente as tensões no reforço, neste caso do muro 2. As maiores deformações registradas foram iguais a 0,60%. Provavelmente os reforços não foram carregados por três razões:

- A primeira é que o muro é estável sem reforço, com um fator de segurança (FS) de 1,50 conforme foi avaliado é apresentado na Figura 4.7;
- Segundo é que o reforço apresenta uma rigidez muito baixa de 61,5 kN/m;
- Por último é que o muro foi compactado com um equipamento de baixa energia, placa vibratória, com carga estática equivalente de 11 kN.

Portanto, a mobilização da resistência ao cisalhamento do solo basta para garantir a estabilidade da estrutura. Como a rigidez dos reforços é muito baixa, as deformações necessárias para mobilizar a resistência do solo (que são pequenas) praticamente não provocam carga nos reforços.



Figura 4.6 – Análises de estabilidade de talude de muro 2 sob condições estáticas sem reforço. (*Slide* 5.0).

4.6.3. Métodos baseados nas condições de trabalho

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos métodos baseados sob condições de trabalho. A Tabela 4.16 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das dez camadas de reforço. Na Figura 4.8 compara-se a máxima força de tração

prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Conforme a Figura 4.8 observa-se que o método de Allen et al. (2003) superestimou os resultados medidos em campo, devido ao método não consideram a coesão do solo. Segundo a Tabela 4.16, valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$ indicam que o método de Allen et al (2003) superestimou em torno de seis vezes os resultados medidos em campo.

Tabela 4.15 – Máximas forças de tração segundo os métodos baseados nas condições de trabalho – Muro2.

		Máxima força de tração (kN/m)			
Camada	Elevação (m)	Allen et al. (2003)	Ehrlich e Mitchell (1994)		
1	3,60	0,59	0,23		
2	3,20	1,39	0,25		
3	2,80	1,89	0,28		
4	2,40	1,89	0,30		
5	2,00	1,89	0,37		
6	1,60	1,89	0,51		
7	1,20	1,89	0,74		
8	0,80	1,89	1,07		
9	0,40	1,14	1,55		
10	0,00	0,76			

Tabela 4.16 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas (nas condições de trabalho) – Muro 2.

Elevação Normalizada	T_p	$_{revisto}/T_{medido}$
Método	Allen et al. (2003)	Ehrlich e Mitchell (1994)
0,90Н	1,90	0,31
0,75H	7,27	1,08
0,50H	9,05	1,95
0,30H	5,40	2,11
Valor Médio	6,13	1,47



Figura 4.7 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho) – Muro 2.

O método de Ehrlich e Mitchell (1994) toma em conta o efeito da coesão do solo, mas foi desenvolvido para muros de face verticais. Entretanto, os resultados previstos têm ordens de grandeza similar aos registrados em campo.

O método de Allen et al. (2003) fornece resultados iguais para as camadas intermediárias, pelo fato de que o método assume uma distribuição trapezoidal para o cálculo de tensão horizontal.

Pode-se concluir que o método de Ehrlich e Mitchell (1994) previu corretamente as forças de tração, a pesar da estrutura ser estável.

4.7. Aplicação dos métodos ao Muro 3

4.7.1. Dados de entrada

Na Tabela 4.17 são apresentados os dados deste muro necessários para o cálculo da força de tração pelos diferentes métodos. Considerando que o material de aterro teve dois solos diferentes, foram escolhidos valores de γ , c e ϕ para o solo mais predominante.

Parâmetro	Característica	Valor
Geometria	Altura	4,20m
	Espaçamento entre reforços	variável 0,4m a 0,6m
	Inclinação da face	Vertical
	Comprimento do reforço	3 m
	Sobrecarga	Não
Propriedades do	Ângulo de atrito interno	30 °
solo	Coesão	15,0 kN/m ²
	Peso específico	18,3 kN/m ³
Reforço	Geogrelha de PVA	55 kN/m (T _{rup}) e
		35kN/m (T _{rup})
		700 kN/m (Rigidez) e
		1100 kN/m (Rigidez

Tabela 4.17 – Resumo dos dados de entrada para o muro 3.

4.7.2. Métodos de equilíbrio limite

Conforme citado anteriormente, os métodos de equilíbrio limite são divididos em dois grupos: métodos *Tieback* e métodos *Slope Stability*. A Tabela 4.18 apresenta, para o muro 3, as forças de tração máxima distribuídas em diferentes camadas previstas pelos métodos de *Tieback*. A Tabela 4.19 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das sete camadas de reforço, localizadas a 0,6, 2,4, 3,0 e 3,4m de elevação. Na Figura 4.8 compara-se a máxima força de tração prevista pelos métodos de projeto *Tieback* com os resultados medidos durante o monitoramento.

Conforme a Figura 4.8 observa-se que, em geral, para as camadas inferiores (elevações menores que 2,5m), os resultados dos métodos foram superiores aos medidos em campo.

Segundo a Figura 4.8, o método de Broms (1978) superestimou os valores medidos em campo a favor da segurança. Conforme a Tabela 4.19, Broms (1978) apresentou os maiores valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$, em torno de 1,8 vezes os valores medidos em campo. O método é independente da profundidade e só depende da altura e do peso específico.

Camada N ^o	Elevação (m)	Máxima força de tração (kN/m)					
Má	todo	Steward	Broms	Murray	Collin	Bonaparte	FHWA
IVIC	1000	(1977)	(1978)	(1980)	(1986)	(1987)	(2001)
1	4,00	0,92	9,99	0,61	1,57	0,61	0,61
2	3,40	3,66	9,99	2,44	6,28	2,46	2,44
3	3,00	5,49	9,99	3,66	6,59	3,73	3,66
4	2,40	9,88	9,99	6,59	7,91	6,86	6,59
5	1,80	13,18	9,99	8,78	7,91	9,46	8,78
6	1,20	16,47	9,99	10,98	7,91	12,35	10,98
7	0,60	9,88	9,99	6,59	3.96	23,53	19,76

Tabela 4.18 – Máximas forças de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*tieback*) – Muro 3.

Tabela 4.19 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas (*tieback*) – Muro 3.

Elevação Normalizada	$T_{\it previsto}/T_{\it medido}$					
Mátada	Steward	Broms	Murray	Collin	Bonaparte	FHWA
Metodo	(1977)	(1978)	(1980)	(1986)	(1987)	(2001)
0,81H	0,39	1,07	0,26	0,67	0,26	0,26
0,71H	1,17	2,13	0,78	1,41	0,80	0,78
0,57H	1,73	1,75	1,15	1,38	1,20	1,15
0,14H	1,55	2,36	1,04	0,62	3,70	3,11
Valor Médio	1,21	1,83	0,81	1,02	1,49	1,33



Figura 4.8 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *tieback*) – Muro 3.

O método de Murray (1980) é o único que apresenta valores menores que os medidos em campo para as camadas superiores, acima de 3,0m de elevação. Ele considera a condição ativa para o cálculo das pressões horizontais.

Os métodos de Murray (1980), Bonaparte (1987) e FHWA (2001) supõem a condição ativa K_a para o cálculo da tensão horizontal. O método de Murray (1980) segue a linha K_a acima de 1,20m de elevação, abaixo disto, afasta-se devido a redução do espaçamento. O método simplificado da FHWA (2001) fornece resultados similares aos obtidos por Murray (1980), só diferindo na camada inferior porque o método considera a camada de reforço mais baixa como o nível de fundação. Para a camada mais baixa, os métodos de Bonaparte e FHWA se afastam da condição K_a devido, ao espaçamento vertical ser maior para esta camada, segundo as condições de comparação citadas no item 4.4.

A Tabela 4.20 apresenta os resultados de forças de tração máxima distribuídas em diferentes camadas pelos métodos *slope stability*. A Tabela 4.21 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das dez camadas de reforço localizadas a 0,6m, 2,4m, 3,0m e 3,4m de elevação. Na Figura 4.9 compara-se os resultados previstos com os medidos durante o monitoramento

Cabe ressaltar que os métodos de Leshchinsky e Boedeker (1989) e Leshchinsky e Perry (1989) consideram duas possibilidades para a orientação da força de tração nos reforços: paralela ao reforço (horizontal) ou inclinada (tangente à superfície de ruptura).

Tabela 4.20 – Máxima força de tração segundo os métodos de equilíbrio limite (*slope stability*) – Muro 3.

		Máxima força de tração (kN/m)						
			Leshchinky e		Leshchinky e			
Camada	Floveño	Sahmartmann	Boed	leker	Pe	rry	T 11	
Calllaua	Lievaçaŭ	(1027)	(19	89)	(19	89)	Jewell (1001)	
		(1987)	Reforço	Reforço	Reforço	Reforço	(1991)	
			Horiz.	Inclin.	Horiz.	Horiz.		
1	4,00	0,54	0,86	0,75	0,86	0,71	0,60	
2	3,40	2,16	3,42	3,04	3,38	2,87	2,42	
3	3,00	3,24	5,13	4,57	5,07	4,30	3,62	
4	2,40	5,83	7,70	6,85	7,61	6,46	6,52	
5	1,80	7,77	10,27	9,13	10,15	8,61	8,70	
6	1,20	9,72	12,84	11,41	12,68	10,76	10,87	
7	0,60	17,49	15,40	13,70	15,22	12,91	19,57	

Tabela 4.21 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.

	$T_{previsto}/T_{medido}$					
		Leshcł	ninky e	Leshchinky e		
Elevação	Calum artine artic	Boed	leker	Perry		T 11
Normalizada	(1987)	(19	89)	(19	89)	Jewell
		Reforço	Reforço	Reforço	Reforço	(1991)
		Horiz.	Inclin.	Horiz.	Inclin.	
0,81H	0,23	0,37	0,33	0,36	0,31	0,20
0,72H	0,69	1,09	0,97	1,07	0,91	0,77
0,57H	1,02	1,35	1,20	1,33	1,13	1,14
0,15H	1,83	2,42	2,15	2,39	2,03	2,05
Valor Médio	0,94	1,31	1,16	1,29	1,10	1,06



Figura 4.9 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos (equilíbrio limite – *slope stability*) – Muro 3.

Conforme a Figura 4.9 observa-se que, em geral, para as camadas inferiores (elevações menores a 3,00m) os resultados dos métodos foram superiores aos medidos em campo.

Segundo a Tabela 4.21 valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$ foram maiores para os métodos de Leshchinsky e Boedeker (1989) e Leshchinsky e Perry (1989). Ambos assumem diferentes hipóteses, mas os resultados são similares pelo fato que avaliam um muro de face vertical. Os valores calculados estão em torno de 1,25 vezes os medidos em campo.

Segundo a Figura 4.9, nas camadas superiores (acima de 3,00m) os métodos subestimam os resultados de campo. Provavelmente, os resultados de campo registrados nas camadas superiores foram maiores devido ao efeito de compactação, cuja energia é muito elevada neste caso do muro 3.

Cabe ressaltar que, no caso do muro 3, os dois tipos de métodos de equilíbrio limite apresentaram resultados próximos dos medidos, ao contrário do afirmado por Allen et al. (2003), conforme as Tabelas 4.20 e 4.21.

4.7.3. Métodos baseados nas condições de trabalho

Na Tabela 4.22 são apresentados os valores de força de tração máxima distribuídas em diferentes camadas previstos pelos métodos baseados sob

condições de serviço. A Tabela 4.23 apresenta os valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro das dez camadas de reforço localizadas a 0,6, 2,4, 3,0 e 3,4m de elevação. Na Figura 4.10 compara-se a máxima força de tração prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Segundo a Figura 4.11, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) estimou valores acima dos resultados de campo, ou seja a favor da segurança neste caso. Conforme a Tabela 4.23, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) superestimou em torno de 2,1 vezes os resultados de campo. Neste caso, o método estimou em todas as camadas que a máxima tensão vertical é dada pela compactação (134,64 kN/m²). Segundo a Figura 4.11, as maiores forças de tração previstas pelo método situam-se nas camadas onde são maiores a rigidez e espaçamento do reforço. Tabela 4.22 – Máximas forças de tração segundo os métodos baseados nas condições de trabalho – Muro 3.

	Elevação	Forças de tração máxima (kN/m)			
Camada	(m)	Allen et al.	Ehrlich e Mitchell		
	(111)	(2003)	(1994)		
1	4,00	0,54	10,28		
2	3,40	1,18	10,91		
3	3,00	1,60	11,24		
4	2,40	1,65	13,70		
5	1,80	2,60	15,19		
6	1,20	2,60	15,76		
7	0,60	2,01	16,37		

Tabela 4.23 – Valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.

Elevação Normalizada	$T_{previsto}/T_{medido}$		
Método	Allen et al. (2003)	Ehrlich e Mitchell (1994)	
0,81H	0,13	1,17	
0,72H	0,34	2,38	
0,57H	0,29	2,40	
0,15H	0,32	2,57	
Valor Médio	0,27	2,13	

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521511/CA



Figura 4.10 – Muro 3 – Valores de força de tração máxima medidos (campo) e previstos (nas condições de trabalho).

Conforme a Tabela 4.24, o método de Allen et al. (2003) subestimou em torno de 0,27 vezes os resultados medidos em campo, neste caso. Provavelmente devido ao fato de que o método não considerar o efeito da compactação.

4.8. Conclusões

Com base nos resultados medidos em campo e nos resultados previstos pelos métodos de projeto dos muros avaliados, algumas conclusões podem ser ressaltadas.

As maiores forças de tração registrados para os muros 1 e 3 foram de 8kN/m a 9kN/m, provavelmente devido a duas razões:

- Os muros 1 e 3 utilizam como reforço geogrelhas de alta rigidez. No caso do muro 1, utiliza-se reforços com rigidez de 759kN/m e 1210kN/m. No muro 3 utiliza-se reforços com rigidez de 700kN/m e 1100kN/m.
- Os muros 1 e 3 foram compactados com equipamentos de alta energia (rolo compactador), com carga estática equivalente de 160kN e 380 kN, respectivamente.

Nem sempre os métodos de equilíbrio limite superestimaram os valores de força de tração registrados em campo. Para as camadas superiores, os métodos de equilíbrio limite subestimam os valores medidos em campo, possivelmente por desprezarem o efeito da compactação.

Em relação aos métodos baseados em condições de trabalho, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) fornece resultados acima dos medidos em campo, ou seja, a favor da segurança. Não acontece o mesmo para o método de Allen et al. (2003), o qual subestima as tensões no reforço em todas as camadas.

No caso do muro 2, as máximas forças de tração medidas em campo foram menores que 0,40kN/m, provavelmente os reforços não foram carregados por três razões:

- O muro é estável sem reforço, com um fator de segurança (FS) de 1,50. Os parâmetros de resistência do solo são: c=16kN/m² e φ= 32°;
- O reforço apresenta uma rigidez muito baixa de 61,5 kN/m;
- O muro foi compactado com um equipamento de baixa energia, com carga estática equivalente de 11 kN.

Entretanto, os métodos de equilíbrio limite superestimam largamente os valores de força de tração registrados em campo. No caso de métodos baseados sob condições de trabalho, o método de Allen et al. (2003) superestimou os valores de força de tração registrados em campo. Porém, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) forneceu resultados mais próximos aos registrados em campo.

Segundo Allen et al. (2003), os métodos de projeto baseados em considerações de equilíbrio limite demonstraram ser excessivamente conservadores. No entanto, em dois dos casos avaliados não foi confirmada esta conclusão.

O método de Ehrlich e Mitchell (1994) fornece melhores resultados em todos os casos avaliados.

O resultado de campo sugere que a magnitude da força de tração nos reforços depende da resistência ao cisalhamento mobilizada dentro do aterro, rigidez do sistema reforçado e o método de construção (compactação).