

6 Comparação dos métodos analíticos com as simulações numéricas

6.1. Introdução

Conforme os capítulos anteriores, foram confrontados os resultados previstos pelos diferentes métodos de projeto com os medidos para três muros instrumentados, bem documentados. O objetivo deste capítulo é mostrar quais dos métodos (analítico ou numérico) prevêm melhor os resultados para o cálculo de forças de tração máxima em muros de solo reforçado (MSR) com geossintéticos.

6.2. Métodos de projeto

Segundo a revisão bibliográfica, os métodos de projeto para análise de estabilidade interna são divididos em duas categorias: métodos de equilíbrio limite baseados em condições de ruptura e os métodos baseados em condições de trabalho. Devido à quantidade de métodos descritos anteriormente, e para facilitar uma melhor comparação, oito dos métodos disponíveis foram escolhidos para comparação nesta pesquisa e são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Métodos de projeto a confrontar nesta pesquisa.

Tipo de análise		Método
Métodos analíticos	Equilíbrio limite	Steward et al (1977)
		Collin (1986)
		Bonaparte (1987)
		FHWA Simplificado (2001)
	Condições de trabalho	Ehrlich e Mitchell (1994)
		Allen et al. (2003)
Métodos Numéricos	Elementos finitos	Software Plaxis V8.2

6.3. Aplicação dos métodos aos casos reais

6.3.1. Muro 1

A Tabela 6.2 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 6.1 compara a máxima força de tração ($T_{m\acute{a}x}$) prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Tabela 6.2 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para três camadas de reforço instrumentadas – Muro 1.

Camada N°	Elevação	$T_{previsto}/T_{medido}$						
		Steward (1977)	Collin (1986)	Bonaparte (1987)	FHWA (2001)	Ehrlich (1994)	Allen (2003)	MEF
7	0,82H	0,74	1,48	0,47	0,35	2,03	0,44	1,55
4	0,42H	1,47	1,02	1,01	0,71	1,55	0,63	1,71
2	0,09H	1,55	0,68	1,20	0,74	1,27	0,35	1,25
Media		1,25	1,06	0,89	0,60	1,62	0,47	1,50

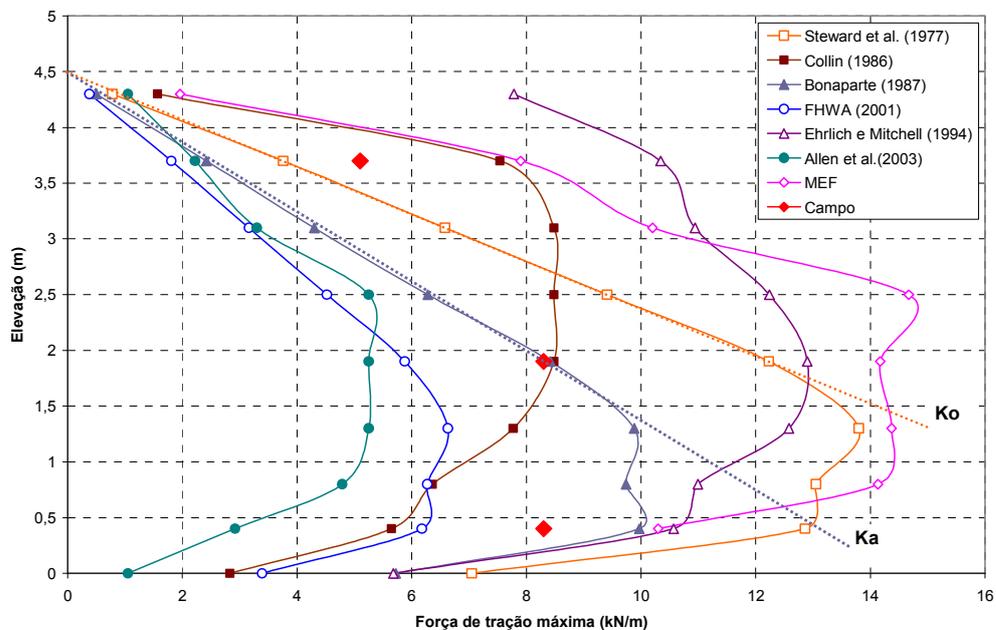


Figura 6.1 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos – Muro 1.

Segundo a Figura 6.1, observa-se que a camada de reforço instrumentada, posicionada perto do topo do muro, encontra-se acima da linha K_o , provavelmente devido ao efeito da compactação.

Conforme a Figura 6.1, observa-se que o método simplificado da FHWA (2001) e o método de Allen et al. (2003), ambos auspiciados pela FHWA, subestimaram em todas as camadas os valores de força de tração máxima. Segundo a Tabela 6.2, os valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$ nestes métodos alcançam valores em torno de 0,60 e 0,47, respectivamente.

Os métodos de Steward (1977) e Bonaparte (1987) utilizam as condições K_o e K_a , respectivamente, para o cálculo das tensões horizontais. Os resultados previstos por estes métodos superestimaram os valores de força de tração máxima para as camadas mais inferiores (abaixo de 2,0m). Entretanto, nas camadas superiores os métodos subestimaram os valores de força de tração, conforme a Tabela 6.2.

O método de Collin (1986) prevê melhor os resultados para as camadas superiores (acima de 1,90m), apesar de ser puramente empírico. Para as camadas mais baixas o método subestimou a força de tração, conforme a Tabela 6.2.

Conforme a Figura 6.1, observa-se que o método de Ehrlich e Mitchell (1994) superestimou os valores de força de tração máxima para todas as camadas. O método de Ehrlich e Mitchell (1994) previu melhores resultados para as camadas inferiores. Nota-se uma tendência do método de superestimar $T_{máx}$ de forma crescente com a altura do muro, conforme a Tabela 6.2.

O MEF superestimou os valores de força de tração máxima para todas as camadas. O MEF prevê melhor os resultados para as camadas superiores e inferiores.

Os métodos de Ehrlich e Mitchell (1994), Allen et al. (2003) e o MEF parecem ter o mesmo formato (trapezoidal), provavelmente porque tomam em conta a rigidez dos reforços, conforme a Figura 6.1.

6.3.2. Muro 2

Similar ao caso anterior, são apresentadas na Tabela 6.3 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 6.2 compara a máxima força de tração prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Tabela 6.3 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 2.

Camada N°	Elevação	$T_{previsto}/T_{medido}$						
		Steward (1977)	Collin (1986)	Bonaparte (1987)	FHWA (2001)	Ehrlich (1994)	Allen (2003)	MEF
8	0,90H	6,55	18,26	4,29	3,29	0,31	1,90	0,19
6	0,75H	15,62	14,54	10,19	7,85	1,08	7,27	0,54
4	0,50H	35,63	19,89	23,26	17,95	1,95	9,05	1,21
2	0,30H	27,09	10,80	17,69	13,63	2,11	5,4	1,03
Media		21,22	15,87	13,86	10,68	1,47	6,13	0,74

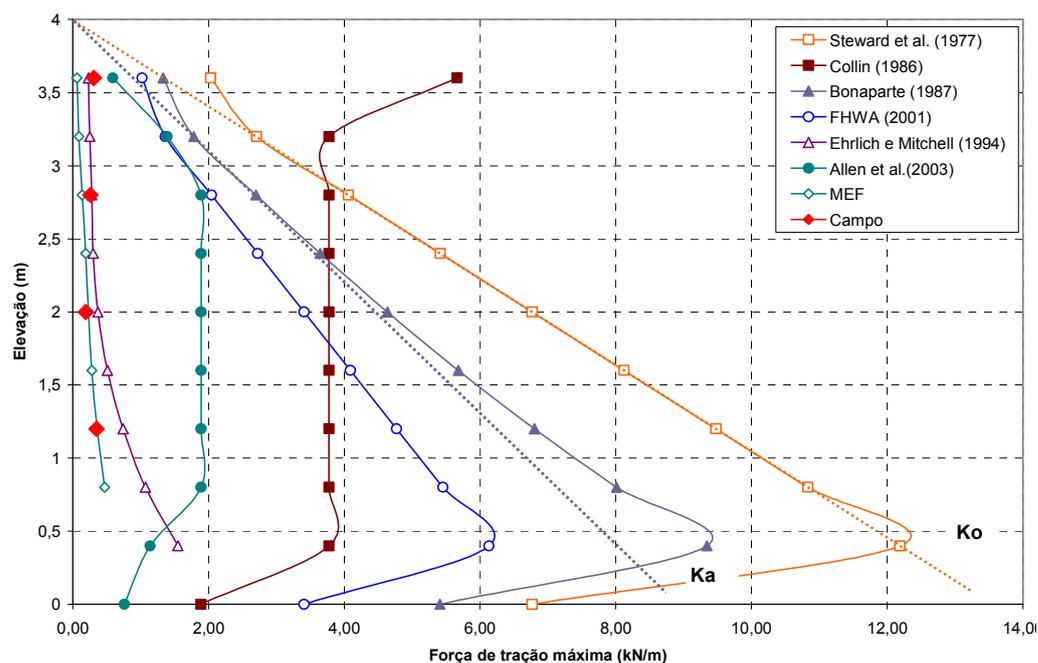


Figura 6.2 – Valores de máxima força de tração medidos (campo) e previstos – Muro 2.

Segundo a Figura 6.2, observa-se que os resultados registrados em campo encontram-se abaixo da linha K_a . Cabe ressaltar que, os reforços do muro 2 não foram carregados, devido à estrutura ser estável mesmo sem reforços, além dos reforços terem baixa rigidez (61kN/m) e terem sido usados equipamentos de

compactação de baixa energia (placa vibratória) com carga estática equivalente 11kN.

Na Figura 6.2, observa-se que os métodos de equilíbrio limite e o método de Allen et al. (2003), superestimaram grosseiramente os valores de força de tração máxima. Estes métodos não consideram o efeito da coesão em seus cálculos.

Os resultados previstos pelos métodos de Ehrlich e Mitchell (1994) e pelo MEF fornecem resultados próximos aos medidos em campo, conforme a Figura 6.2. O método de Ehrlich e Mitchell (1994) apresenta valores médios de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno de 1,50. Este método foi desenvolvido para muros de face vertical, e considera o efeito da coesão em seus cálculos. O MEF prevê resultados menores que os registrados em campo, em torno de 0,75, conforme a Tabela 6.3.

Conforme a Figura 6.2, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) e MEF apresentam formatos parecidos. O modelo numérico simula razoavelmente bem o desenvolvimento das forças de tração nos reforços.

6.3.3. Muro 3

Similar aos casos anteriores, a Tabela 6.4 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. A Figura 6.3 compara a máxima força de tração prevista pelos métodos de projeto com os resultados medidos durante o monitoramento.

Tabela 6.4 – Cálculo de $T_{previsto}/T_{medido}$ para quatro camadas de reforço instrumentadas – Muro 3.

Camada Nº	Elevação	$T_{previsto}/T_{medido}$						
		Steward (1977)	Collin (1986)	Bonaparte (1987)	FHWA (2001)	Ehrlich (1994)	Allen (2003)	MEF
6	0,81H	0,39	0,67	0,26	0,26	1,17	0,17	0,98
5	0,71H	1,17	1,41	0,80	0,78	2,38	0,45	2,46
4	0,57H	1,73	1,38	1,20	1,15	2,40	0,39	2,12
1	0,14H	1,55	0,62	3,70	3,11	2,57	0,18	0,72
Média		1,21	1,02	1,49	1,33	2,13	0,30	1,57

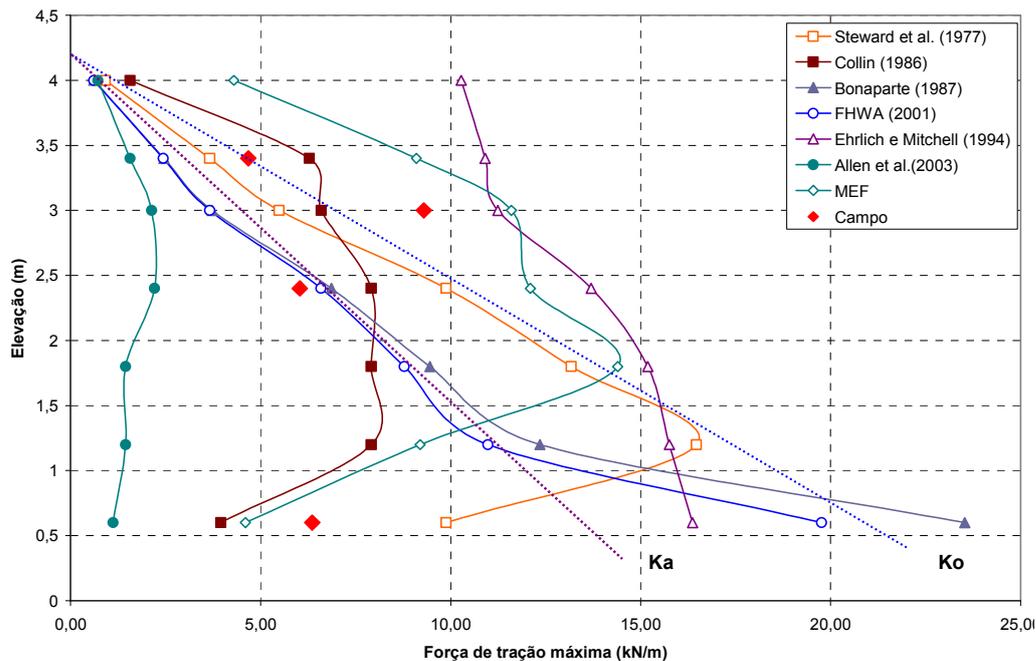


Figura 6.3 – Comparação entre os resultados medidos em campo e os previstos – Muro 3.

Segundo a Figura 6.3 observa-se que as camadas de reforço instrumentadas, posicionadas no topo do muro, encontram-se acima da linha K_o , provavelmente devido ao efeito da compactação, fato que também ocorreu no muro 1.

Na mesma figura pode-se observar que o método de Allen et al. (2003) subestimou os valores de forças de tração máxima em todas as camadas. Conforme a Tabela 6.4, a razão de $T_{previsto}/T_{medido}$ para este método alcança um valor médio de 0,30.

O método de Collin (1986) fornece melhores resultados para as camadas intermediárias, conforme a Figura 6.3. Entretanto, nas camadas superiores (acima de 3,0 m), o método subestimou os valores medidos de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno de 0,67.

Os métodos simplificados da FHWA (2001) e o método de Bonaparte (1987) apresentam valores parecidos, por ser um muro de face vertical. Ambos métodos fornecem resultados acima dos medidos em campo para as camadas intermediárias. Entretanto, os métodos fornecem valores elevados de forças de tração para a camada mais baixa devido ao espaçamento vertical maior. Enquanto para as camadas superiores (acima de 2,5m) os dois métodos subestimaram os valores de forças de tração e para as camadas superiores ambos métodos alcançam valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno de 0,25 (Tabela 6.4).

O método de Steward (1977) baseado em condições de repouso K_o , fornece valores de forças de tração maiores para as camadas inferiores, em relação a medições de campo, enquanto nas camadas superiores o método subestimou os valores de força de tração alcançando valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno a 0,40.

Os métodos de Ehrlich & Mitchell (1994) e MEF superestimaram valores de forças de tração em quase todas as camadas conforme a Figura 6.3. Segundo a Tabela 6.4, o método de Ehrlich e Mitchell (1994) superestimou os valores de força de tração alcançando valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno de 2,10. Enquanto o MEF alcança valores de $T_{previsto}/T_{medido}$ em torno de 1,60.

Para este muro, nenhum dos métodos avaliados apresentou curvas com formato parecido com os pontos de campo, conforme a Figura 6.3.

6.4. Conclusões

Com base nos resultados previstos pelos diferentes métodos de projeto e os resultados medidos em campo, conclui-se:

- Conforme os resultados de campo, observa-se que no caso de compactação pesada, a máxima força de tração mobilizada nas camadas superiores, indica valores superiores aos previstos na condição de repouso K_o .
- Segundo Allen et al. (2003), os métodos de projeto baseados em considerações de equilíbrio limite são excessivamente conservadores. No entanto, em dois dos casos avaliados não foi confirmada esta conclusão.
- Os métodos de Steward (1977) e Bonaparte (1984) baseados em condições de K_o e K_a , respectivamente, prevêm melhor os resultados para as camadas inferiores. Para as camadas superiores os métodos subestimaram os valores de forças de tração, pois não tomam em conta o efeito da compactação. Estes métodos são simples e fácil de executar, porém não consideram alguns parâmetros que afetam o desenvolvimento de forças de tração nos reforços.
- O método de Allen et al. (2003) subestimou os valores de forças de tração em dois dos três casos avaliados (muro 1 e 3). Provavelmente

por que o método não toma em conta o efeito da compactação do solo. Entretanto, o método superestimou os valores de forças de tração para o muro 2, pois foi desenvolvido para aterros sem coesão.

- O método de Ehrlich e Mitchell (1994) prevê resultados acima dos registrados em campo, ou seja, a favor da segurança, para os 3 casos avaliados. O método considera o efeito da compactação e a coesão do solo, mas não considera o efeito da rigidez da face e inclinação do muro. O método precisa de seis parâmetros (c' , ϕ' , J_{ref} , κ , κ_{um} , n).
- Em geral, o modelo numérico consegue obter ordens de grandeza de forças de tração semelhantes às verificadas em campo. A formulação proposta por Ehrlich e Mitchell (1994) para o cálculo da tensão vertical induzida durante a compactação, em conjunto com a modelagem por MEF, fornece resultados coerentes para os três muros. Cabe ressaltar que, em alguns dos muros avaliados, a magnitude da máxima força de tração prevista foi menor que os resultados registrados em campo. O modelo HS usado para a análise pelo MEF precisa de parâmetros de resistência (c' , ϕ' e ψ) além de parâmetros de rigidez (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{oed}^{ref} e m). A dificuldade de obter estes parâmetros pode ser suprida pelas tabelas desenvolvidas por Duncan et al. (1980), para fins de anteprojeto. O MEF consegue obter melhores resultados para os muros 1 e 3, enquanto para o muro 2, a simulação feita subestimou os valores registrados em campo. Em geral, o modelo numérico permite obter forças de tração máxima próximas aos resultados de campo, mesmo no caso do muro 2. A formulação proposta por Ehrlich e Mitchell (1994) para o cálculo da tensão vertical induzida durante a compactação em conjunto com a modelagem por MEF obtém resultados coerentes para os três muros.