

Estudo da Aplicação de Geogrelha em Muro Reforçado: análise de caso

Carlos Alberto Ortiz Hadlich - Instituto Mauá de Tecnologia

Engenheiro Civil formado pelo Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

Felipe Montanarini Tavano - Instituto Mauá de Tecnologia

Formado pelo Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, é Engenheiro civil da empresa PHE Engenharia de Projetos Hidráulicos e Elétricos LTDA.

Luís Henrique Diniz Kaimoto - Instituto Mauá de Tecnologia

Formado pelo Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, é Engenheiro Civil da empresa Cepollina Engenheiros Consultores Ltda.

Matheus Tomé Sá César de Camargo - Instituto Mauá de Tecnologia

Formado pelo Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, é Engenheiro Civil da Projex Engenharia e Construções LTDA.

Fernando Luiz Lavoie – Instituto Mauá de Tecnologia

Engenheiro Civil e Mestre em Geotecnia pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Atualmente atua como Engenheiro Técnico Comercial na Ober S.A. Indústria e Comércio, fornecendo apoio em obras ambientais e de infraestrutura. É Professor Convidado do Instituto Mauá de Tecnologia, no qual leciona a disciplina de Mecânica dos Solos e Obras de Terra do Curso de Engenharia Civil.

José Orlando Avesani Neto - Geosoluções

Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Geotecnia pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Trabalhou na Seção de Geotecnia do IPT por 5 anos. Atualmente é Gerente Técnico da empresa Geo Soluções-Strata Systems e Professor Doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP).

1 INTRODUÇÃO

O conceito de associar elementos de reforço a obras civis vem sendo utilizado desde o começo da humanidade. Pode-se apontar como exemplos as estradas persas e romanas, até mesmo a famosa Muralha da China. Seguindo mais adiante, já num contexto moderno, a década de 1960 ficou caracterizada pelo surgimento das chamadas estruturas de contenção de solo reforçado, mais conhecidas por terra armada (Peralta, 2007).

De acordo com Jewell (1992, *apud* Peralta, 2007), “a construção do sistema de terra armada consistia de tiras metálicas, solo granular e face de painéis. A técnica demonstrou ser econômica e atraiu o interesse tanto comercial como acadêmico”. De acordo com Peralta (2007), com o rápido desenvolvimento da indústria petroquímica e o aproveitamento do conceito de solo reforçado, a indústria têxtil iniciou a produção de diferentes materiais sintéticos, esses caracterizados por sua elevada resistência à tração.

Com o avanço dos estudos na engenharia de solos, os geossintéticos começaram a desempenhar diversos papéis nas obras civis como controle de erosão, separação de camadas de solo, filtração, drenagem, contenção de líquidos, gases ou vapores e de reforço de solo.

Como apontado por Elias *et al.* (2001), também podemos ressaltar o uso crescente dos geossintéticos em taludes e muros de solo reforçado, tendo sua primeira experiência estabelecida em 1981, com geogrelhas, nos Estados Unidos. “Atualmente, a utilização de

inclusões de geossintéticos em taludes e muros de solo reforçado tem crescido acentuadamente, principalmente por representar uma alternativa, em geral, econômica e de fácil execução.” (Elias *et al.*, 2001)

2 CARACTERÍSTICAS DA OBRA

2.1 Introdução

A obra localiza-se num terreno com relevo extremamente acidentado, na região metropolitana da Cidade de São Paulo. Devido ao relevo, o projeto de terraplenagem teve de considerar diversas contenções, para o melhor aproveitamento do espaço útil do terreno. Houve a necessidade da execução de 7 (sete) contenções: 5 (cinco) em situação de aterro com solo reforçado com geossintéticos e 2 (duas) em situação de corte com solo grampeado. O estudo de caso refere-se a um muro com até 12,0 m de altura reforçado com geogrelha (Figura 1). Foi utilizado um espaçamento vertical de 60 cm entre camadas de geogrelha, sendo o comprimento total do reforço de 20,0 m (Figura 2). Dispositivos de drenagem no tardo do muro foram utilizados: geocomposto drenante com trincheira drenante. Também foi empregado elemento filtrante (geotêxtil não tecido) na face do muro, construída com blocos de concreto preenchidos com brita.

Figura 1. Face do Muro de Solo Reforçado com Geogrelha.

Figura 2. Instalação de uma das Camadas de Geogrelha.

2.2 Parâmetros Utilizados

Para a análise do problema, o muro foi dividido em 4 seções. Os parâmetros do solo utilizado na construção, bem como as características do muro podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros Geométricos e do Solo para as Diferentes Seções do Muro.

| Seção Muro | H(m) | Sobrecarga (kPa) | γ_n (kN/m ³) | c (kPa) | ϕ (°) |
|------------|------|------------------|---------------------------------|---------|------------|
| Seção 1 | 12,0 | 60 | 18 | 10 | 30 |
| Seção 2 | 10,0 | 60 | 18 | 10 | 30 |
| Seção 3 | 7,4 | 60 | 18 | 10 | 30 |
| Seção 4 | 2,4 | 60 | 18 | 10 | 30 |

3 METODOLOGIA UTILIZADA NO DIMENSIONAMENTO DO MURO

3.1 Estabilidade Externa

Para a verificação da estabilidade externa do conjunto formado pelo solo reforçado, foi considerado o comportamento semelhante ao de um muro de gravidade. Com isso foram

verificadas as estabilidades devidas ao deslizamento, tombamento, capacidade de carga e ruptura global.

O empuxo aplicado pelo solo não reforçado sobre a massa reforçada foi determinado pelas teorias clássicas de Rankine.

3.2 Estabilidade Interna

Para a verificação da estabilidade interna do maciço reforçado com geogrelha, foi utilizado o método de Mitchell & Villet (1987). Foi embutida neste modelo de cálculo a parcela de coesão.

Para cálculos nesse método, pressupõe-se que o solo atinja o estado de plastificação de Rankine. Isso permite adotar uma superfície de ruptura plana e com ângulo formado com a horizontal de $45^\circ + \phi/2$. Nesta hipótese também é admitido que o empuxo cresça linearmente com a profundidade. A Figura 3 mostra o diagrama de empuxo de um maciço reforçado com geotêxtil.

Figura 3 – Maciço reforçado com Geotêxtil e seu Diagrama de Empuxo (Pedroso, 2000).

Neste método são feitas as verificações da ruptura e do arrancamento do reforço.

4 PARAMETRIZAÇÃO

O dimensionamento foi feito utilizando-se as alturas obtidas das seções que representam o muro, descritas na Tabela 1. Para cada seção do muro, foi realizada uma parametrização, avaliando o solo da obra: um solo granular, um solo siltoso e um solo argiloso. Os valores dos parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros Utilizados no Dimensionamento do Muro.

| Tipo de Solo | γ_n (kN/m ³) | c (kPa) | ϕ (°) |
|--------------|------------------------------------|------------|---------------|
| Obra | 18 | 10 | 30 |
| Areia | 20 | 0 | 35 |
| Silte | 18 | 15 | 30 |
| Argila | 17 | 25 | 25 |

Os fatores de redução parciais para a obtenção da resistência à tração de projeto da inclusão foram obtidos do catálogo do fabricante da geogrelha de PET (poliéster), em que:

$f_{cr}=1,50$, fator de redução parcial para fluência em tração;

$f_{mr}=1,10$, fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;

$f_{cl}=1,05$, fator de redução parcial para degradação ambiental;

$f_m = 1,0$, fator de redução parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético.

5 RESULTADOS

5.1 Introdução

Para o dimensionamento das seções do muro em estudo, foram mantidos constantes os valores do espaçamento vertical entre inclusões (60 cm) e também do comprimento das inclusões, variando-se somente as resistências das geogrelhas de PET (poliéster) ao longo da altura do muro.

5.2 Seção 1 - Muro de 12,0 m

Os resultados do dimensionamento da seção do muro de 12,0 m são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do Dimensionamento da Seção do Muro de 12,0 m.

| Tipo de Solo/ Resultados | Obra | Areia | Silte | Argila |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $L_{rd}(m)$ | 7,11 | 5,81 | 6,54 | 8,41 |
| $L_{rt}(m)$ | 6,75 | 6,75 | 6,38 | 6,59 |
| $L_{rrf}(m)$ | 6,50 | 6,45 | 6,05 | 6,30 |
| $T_{adm}(kN/m)$ | 83,63 | 84,51 | 77,63 | 78,27 |
| $L_{emax}(m)$ | 0,42 | 0,58 | 0,34 | 0,34 |
| $L_{maxa}(m)$ | 7,58 | 6,93 | 7,58 | 8,26 |
| $L_{total}(m)$ | 7,58 | 6,93 | 7,58 | 8,41 |
| L/H | 0,63 | 0,58 | 0,63 | 0,70 |

Em que

$L_{rd}(m)$: Comprimento requerido da geogrelha no dimensionamento externo de deslizamento;

$L_{rt}(m)$: Comprimento requerido da geogrelha no dimensionamento externo de tombamento;

$L_{rrf}(m)$: Comprimento requerido da geogrelha no dimensionamento externo de ruptura da fundação, ou o mínimo de 2/3 da base comprimida;

$T_{adm}(kN/m)$: Tensão admissível máxima na geogrelha;

$L_{emax}(m)$: Comprimento ancorado máximo do reforço no dimensionamento interno de arrancamento;

$L_{maxa}(m)$: Comprimento na zona ativa somado à ancoragem calculada ou à ancoragem mínima no dimensionamento interno de arrancamento;

$L_{total}(m)$: Comprimento adotado, sendo o maior entre todos os comprimentos calculados nos dimensionamentos externo e interno;

L/H: Relação entre o comprimento do reforço e a altura do maciço.

5.3 Seção 2 - Muro de 10,0 m

Os resultados do dimensionamento da seção do muro de 10,0 m são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do Dimensionamento da Seção do Muro de 10,0 m.

| Tipo de Solo/ Resultados | Obra | Areia | Silte | Argila |
|-----------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| $L_{rd}(m)$ | 6,35 | 5,16 | 5,64 | 7,22 |
| $L_{rt}(m)$ | 5,82 | 5,86 | 5,50 | 5,73 |
| $L_{rrf}(m)$ | 5,60 | 5,60 | 5,30 | 5,50 |
| $T_{adm}(kN/m)$ | 71,16 | 73,24 | 65,16 | 63,92 |
| $L_{emax}(m)$ | 0,34 | 0,55 | 0,27 | 0,28 |
| $L_{maxa}(m)$ | 6,54 | 6,0 | 6,54 | 7,12 |
| $L_{total}(m)$ | 6,54 | 6,0 | 6,54 | 7,22 |
| L/H | 0,65 | 0,60 | 0,65 | 0,72 |

5.4 Seção 3 - Muro de 7,4 m

Os resultados do dimensionamento da seção do muro de 7,4 m são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados do Dimensionamento da Seção do Muro de 7,4 m.

| Tipo de Solo/ Resultados | Obra | Areia | Silte | Argila |
|-----------------------------|------|-------|-------|--------|
| $L_{rd}(m)$ | 5,16 | 4,32 | 4,53 | 5,88 |
| $L_{rt}(m)$ | 4,62 | 4,68 | 4,38 | 4,69 |
| $L_{rrf}(m)$ | 4,40 | 4,50 | 4,20 | 4,50 |

| | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $T_{adm}(kN/m)$ | 52,85 | 58,59 | 48,94 | 45,28 |
| $L_{emax}(m)$ | 0,36 | 0,52 | 0,30 | 0,30 |
| $L_{maxa}(m)$ | 5,16 | 4,75 | 5,16 | 5,59 |
| $L_{total}(m)$ | 5,16 | 4,75 | 5,16 | 5,88 |
| L/H | 0,70 | 0,64 | 0,70 | 0,80 |

5.5 Seção 4 - Muro de 2,4 m

Os resultados do dimensionamento da seção do muro de 2,4 m são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do Dimensionamento da Seção do Muro de 2,4 m.

| Tipo de Solo/ Resultados | Obra | Areia | Silte | Argila |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $L_{rd}(m)$ | 3,25 | 2,71 | 3,21 | 5,12 |
| $L_{rt}(m)$ | 2,31 | 2,22 | 2,31 | 2,62 |
| $L_{rrf}(m)$ | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,50 |
| $T_{adm}(kN/m)$ | 23,76 | 30,42 | 20,79 | 25,31 |
| $L_{emax}(m)$ | 0,42 | 0,58 | 0,34 | 0,33 |
| $L_{maxa}(m)$ | 2,04 | 1,94 | 2,04 | 2,15 |
| $L_{total}(m)$ | 3,25 | 2,71 | 3,21 | 5,12 |
| L/H | 1,35 | 1,13 | 1,34 | 2,13 |

5.6 Análise dos Resultados

5.6.1 Estabilidades Externa e Interna

Os comprimentos efetivamente utilizados no dimensionamento do estudo de caso foram os calculados a partir da verificação da estabilidade a ruptura global. Isso ocorreu devido à geometria da seção do muro, que se encontra sobre um talude de elevado desnível (situação de greide). Por causa disso, é necessário aumentar a extensão da geogrelha para que a estrutura seja estabilizada e não ocorra nenhuma superfície de ruptura com fator de segurança a ruptura global inferior a 1,50. A Figura 4 ilustra a análise de estabilidade global realizada para a seção do muro de 12,0 m com o solo da obra, que apresentou comprimento necessário da geogrelha de 22,1 m. As Figuras 5, 6 e 7 ilustram, respectivamente, as análises de estabilidade global realizadas para as seções do muro de 10,0 m, 7,4 m e 2,4 m para o solo

da obra. Para as seções do muro de 10,0 m, 7,4 m e 2,4 m, os comprimentos necessários da geogrelha considerando o solo da obra foram, respectivamente, 17,6 m, 14,4 m e 9,2 m.

Figura 4 – Ilustração da Análise de Estabilidade Global Realizada para a Seção do Muro de 12,0 m com o Solo da Obra.

Figura 5 – Ilustração da Análise de Estabilidade Global Realizada para a Seção do Muro de 10,0 m com o Solo da Obra.

Figura 6 – Ilustração da Análise de Estabilidade Global Realizada para a Seção do Muro de 7,4 m com o Solo da Obra.

Figura 7 – Ilustração da Análise de Estabilidade Global Realizada para a Seção do Muro de 2,4 m com o Solo da Obra.

Realizando-se as análises das verificações de segurança ao deslizamento, tombamento, ruptura do solo de fundação e de ruptura e arrancamento do reforço isoladas da verificação a ruptura global, verificou-se que, no caso do solo da obra, os maiores comprimentos calculados para as seções dos muros com alturas de 12,0 m, 10,0 m e 7,40 m possuíram uma relação de L/H próximas a 0,70, que é a relação considerada ideal, de acordo com Rowe & Ho (1998). Esta relação garante maior eficiência quanto aos deslocamentos horizontais, às forças de tração mobilizadas nas inclusões e apresentam boa economia de reforço. Para a seção do muro de 2,40 m, o comprimento necessário foi maior que a altura do solo reforçado.

5.6.2 Parametrização

Com os resultados da parametrização, ficou evidente que o peso do solo sobre o reforço apresentou um aumento na eficiência da ancoragem da geogrelha. As contenções mais altas, apesar do acréscimo de empuxo, mostraram sempre menor relação entre o comprimento do reforço e a altura do muro (L/H). Nos resultados da seção do muro de 2,40 m de altura, a eficiência foi muito baixa; os comprimentos necessários foram maiores que a altura do solo reforçado.

O parâmetro do solo que mais impactou a eficiência do comprimento do reforço foi o ângulo de atrito. Os resultados do solo arenoso, que possui o mais alto ângulo de atrito entre os tipos de solo avaliados, mostram que, nos arrimos de 12,0 m a 7,40 m, os comprimentos calculados situaram-se entre 58% e 64% da altura.

As seções do muro com o solo argiloso consumiram maior quantidade de geogrelha, quando comparadas às seções avaliadas com os demais tipos de solo. Os comprimentos das geogrelhas nos arrimos de 12,0 m a 7,40 m ficaram entre 70% a 80% da altura. Devido ao baixo ângulo de atrito nesse tipo de solo, o comprimento da inclusão foi determinado pela verificação da segurança ao deslizamento. Apesar de terem consumido maiores quantidades de materiais, as solicitações de tração foram menores, devido à parcela de coesão do solo argiloso, exigindo geogrelhas com menores resistências. Os comprimentos de ancoragem, determinados a partir do cálculo da verificação da segurança ao arrancamento, foram inferiores ao comprimento mínimo. Para que eles fossem maiores que o mínimo, a sobrecarga necessitaria ser mais elevada.

Nas seções do muro avaliadas com o solo siltoso, ficou evidente o comportamento intermediário entre a areia e a argila.

6 CONCLUSÃO

A metodologia de cálculo utilizada no dimensionamento do muro estava coerente, e as inclusões com geogrelhas feitas em solos arenosos são mais eficientes que em argilas. Além disso, o peso da estrutura também interfere de forma significativa nos resultados. Por fim, o uso da coesão presente em solos finos conduz a uma otimização da resistência necessária para os reforços.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Empresa GeoSoluções pelos dados fornecidos para este estudo de caso. Por meio do conhecimento e facilidades propiciadas, o estudo ganhou maior consistência, proporcionando ao grupo a oportunidade de explorar, de formas diversas, o tema aqui abordado.

REFERÊNCIAS

ELIAS, V.; CHRISTOPHER, B.R. e BERG, R.R. (2001) *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Design and Construction Guidelines*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 394 p.

MITCHEL, V. e VILLET, W. (1987) *Reinforcement of earth slopes and embankments*. National Cooperative Highway Research Program Report n.290, 162 p.

PEDROSO, E.O. (2000) *Estruturas de contenção reforçadas com geossintéticos* Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 74 p.

PERALTA, F.N.G. (2007) *Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, PUC Rio, 162 p.

ROWE, R. e HO, S. (1998) . Canadian Geotechnical Journal, vol. 35. p. 312-327.

Revista: Fundações & Obras Geotécnicas

Publicado em: agosto/2015