

Análise numérica de um muro de solo convencional e não convencional reforçado com fitas metálicas

William de Oliveira

Faculdades Integradas de São Carlos, São Carlos, Brasil, williamengcivil@yahoo.com.br

Luiz Paulo Vieira de Araújo Júnior

Faculdades Integradas de Araraquara, Araraquara, Brasil, luizpoljr88@yahoo.com.br

Gabriel Steluti Marques

Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, Brasil, gabrielstmarques@gmail.com

Jefferson Lins da Silva

Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: O uso de muros reforçados vem se destacando no meio geotécnico brasileiro. Esta técnica apresenta algumas vantagens, tais como facilidade de execução, mão de obra reduzida e utilização de equipamentos de pequeno porte. No entanto, para se atingir um bom desempenho de drenagem e resistência, é comum o uso de solo granular como preenchimento, que muitas vezes não possui tamanha disponibilidade quanto os solos de granulometria fina. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar numericamente a viabilidade de se usar um solo não convencional (granulometria fina) em estruturas de muro reforçado com fitas metálicas nervuradas. As estruturas analisadas são constituídas por dois muros de 15 m de altura de solo argiloso e arenoso, reforçado com inclusões inextensíveis de fitas metálicas, projetadas e analisadas com a intenção de recuperar um talude em colapso. Os reforços foram dispostos com espaçamentos de 0,50 m e comprimento de 8,0 m. Foram utilizados dois tipos de solos, o primeiro oriundo do Campus II da USP em São Carlos-SP (solo argiloso), considerado como um solo não convencional para a utilização em muros reforçados e o segundo oriundo da Rodovia SP- 215 (solo arenoso), considerado como convencional. Foram utilizados os módulos *Slope/W* e *Sigma/W* do software *GeoStudio/2012* para a simulação. No *Slope/W* foi verificada a estabilidade do talude e no *Sigma/W* o desenvolvimento das deformações no solo. A metodologia do trabalho consistiu em simular numericamente quatro modelos de muros composto por um tipo de solo convencional e outro não convencional, reforçados com dois tipos de fitas metálicas com dimensões de 60 mm x 4 mm e 40 mm x 4 mm. Os parâmetros dos solos e das fitas foram obtidos na literatura técnica. Os resultados mostraram a possibilidade de se utilizar solos não convencionais em estruturas de muro reforçado. Além disso, foi possível verificar dois tipos de fitas metálicas para reforço de solos considerando a mesma geometria e o mesmo espaçamento. A estabilidade externa, interna e global foram verificadas em cada modelo analisado e também foram avaliadas as tensões desenvolvidas nos dois tipos de solos. No caso da estabilidade externa e interna foi possível verificar o arrancamento ou ruptura das fitas e com a estabilidade global verificou-se a necessidade da existência do muro para arrimar o talude em questão.

PALAVRAS-CHAVE: Terra armada, Simulação numérica, Fitas metálicas, Solo não convencional

1 INTRODUÇÃO

O emprego da técnica de muro de solo reforçado tem se notabilizado, com sucesso em muitas obras de engenharia, entre elas, pode-se citar: construção de encontros de pontes, viadutos ferroviários e rodoviários, retificações de traçado de canais urbanos, estruturas de cais ou rodovias à beira mar e estoque de minérios, muros para nivelamento de terrenos urbanos, contenções de encostas em rodovias e ferrovias (Maparagem, 2011).

Existem diversos tipos de reforços para aplicação na técnica de muro de solo reforçado, dentre eles, destacam-se as fitas metálicas nervuradas. Este trabalho tem por objetivo realizar simulações numéricas por meio do software *GeoStudio/2012* utilizando parâmetros obtidos na literatura e com o emprego de fitas metálicas como reforço em muros de solos convencionais e não convencionais (maiores proporções de partículas finas).

Os reforços inextensíveis encontram-se, geralmente, em forma de tiras ou grelhas, sendo que os mais comuns são os metálicos. Um exemplo de estrutura construída com reforços inextensíveis é a terra armada. Este tipo de estrutura consiste de um maciço de solo reforçado por elementos metálicos lineares, com face rígida construída com painéis de concreto em formato cruciforme, onde são fixadas as inclusões (Patias, 2005).

Segundo Maparagem (2011), os estudos realizados pelo National Highway Institute Office of Bridge Technology (NHI) recomenda que todas as estruturas de terra mecanicamente estabilizadas requerem solo de alta qualidade em termos de durabilidade, drenagem, fácil execução e boa interação com o reforço.

Segundo Patias (2005), as estruturas de solo reforçado tornaram-se uma alternativa eficiente na construção de aterros íngremes e muros de contenção. Isso ocorre principalmente, pelos benefícios econômicos que estas estruturas oferecem quando comparadas às estruturas convencionais.

Outras vantagens do solo reforçado são estética, segurança, técnicas simples de construção e também facilidades das estruturas

adaptarem-se facilmente às condições de campo diferenciadas, podendo apresentar deformações sem que ocorram problemas de instabilidade ou algum dano à segurança da obra (Patias, 2005). A Figura 1 mostra a execução de uma camada num muro de terra armada.



Figura 1. Construção de estrutura de solo reforçado com equipamentos e inclusões inextensíveis (terra armada).
Fonte: www.terraarmada.com.br.

Como material de preenchimento, recomenda-se o uso de material granular por proporcionar uma melhor drenagem, além de boa interação solo-reforço e alta resistência de arrancamento.

Contudo, em regiões onde o acesso a esses materiais é restrito, capaz de tornar inviável o valor final da obra, pode-se recorrer, com cautela, o uso de solos não convencionais. Apesar de não sugerido pelas normas, os estudos do comportamento dos solos excluídos destas especificações, chamados solos não convencionais, estão se tornando cada vez mais frequente no meio geotécnico. Por estas razões serão comparados neste trabalho, os resultados e análises do comportamento de um muro reforçado utilizando um solo convencional e um não convencional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O muro utilizado para a simulação numérica teve como modelo geométrico uma estrutura de contenção localizada ao lado da rodovia Régis Bittencourt, onde foi restaurado um talude que sofreu ruptura.

O muro de contenção em terra armada possui 15 m de altura, 8 m de comprimento de fitas

metálicas e 0,50 m de espessura das camadas conforme mostra a Figura 2.

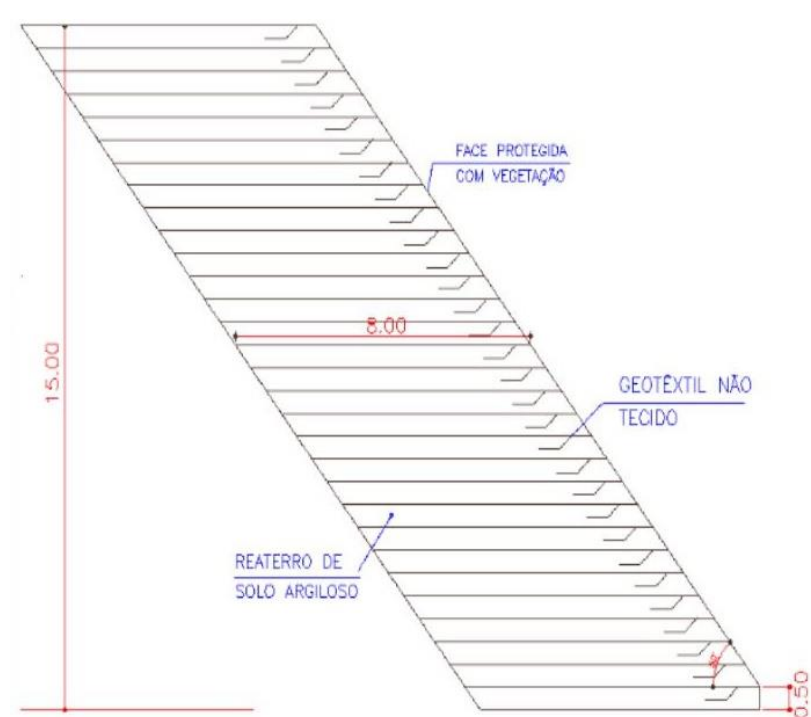


Figura 2. Muro em corte (medidas em metros). Fonte: Patias (2005).

Sendo a permeabilidade um dos requisitos para construção de solos aterrados, a baixa drenagem pode permitir o acúmulo de água, gerando assim, pressões neutras. A presença de água no interior dos muros de contenção, devido às partículas de argila (menores que 2µm) aumentam a taxa de corrosão dos reforços metálicos e provocam deslocamentos pós-construção, conforme afirma Zornberg e Mitchell (1994). Ainda de acordo com estes autores, na ocasião em que o solo é submetido a um carregamento vertical, ocorrem deformações de compressão e deformações laterais. Entretanto, o solo aterrado com reforço, dificulta estes movimentos laterais devido a redução da deformabilidade do sistema.

2.1 Parâmetros dos solos

Foram utilizados os parâmetros da literatura técnica obtidos por Maparagem (2011) com dois solos, sendo o solo 1 composto de 62% de areia, 32% argila e 6% de silte. O solo 2, não convencional, contém uma grande porcentagem

de finos, constituído de 15% de areia, 51% de silte e 35% de argila.

Segundo Aguiar (2005) recomenda-se o uso de material granular que obedeça aos critérios da norma ABNT NBR ISO 9286:2014. Além disso, recomenda-se que o grau de compactação para a execução do aterro seja no mínimo de 95% da densidade aparente seca máxima, obtido no ensaio de compactação com energia Proctor Normal. Essas mesmas recomendações são dadas para as estruturas de contenção com inclusões em fitas metálicas.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos e mecânicos dos solos 1 e 2 obtidos por Maparagem (2011), além da característica do solo natural do talude em questão.

Tabela 1. Caracterizações dos materiais utilizados.					
Solos	ν	E (kPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo 1	0,33	1400	18,60	28,00	31,70
Solo 2	0,33	25000	14,90	44,60	29,11
Natural	0,33	70000	21,00	5	25

2.2 Propriedades das fitas metálicas

As fitas tiras metálicas devem atender aos critérios da ABNT NBR ISO 7480:2007 e da ABNT NBR ISO 6892-1:2013, que define as características quanto à tração. Já a compactação das diversas camadas de solo deve obedecer aos procedimentos recomendados pela ABNT NBR ISO 7182:1988.

Em estruturas de terra armada, as fitas metálicas lineares podem ser nervuradas ou lisas. As inclusões utilizadas como reforço foram fitas metálicas nervuradas, que têm por finalidade aumentar a interação solo/inclusão e proporcionar maior resistência à tração no solo. Para a realização das simulações foram utilizadas fitas metálicas conforme a Figura 3. Os parâmetros de módulo de rigidez e de resistência à tração adotados estão apresentados na Tabela 2, a seguir.



Figura 3. Fita metálica nervurada (Maparagem, 2011).

Tabela 2. Propriedades das fitas metálicas.

Fita Metálica	Módulo de Rigidez (KPa)	Resistência à Tração (KN)
40 mm	10.000	260,90
60 mm	30.000	391,35

Os reforços utilizados possuem 4 mm de espessura e 40 ou 60 mm de largura, conforme ensaiado por Maparagem (2011) em laboratório. Os comprimentos são definidos de acordo com a necessidade em projeto e, neste caso em específico, os comprimentos foram de 8 m.

3. ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Slope/W

A análise de estabilidade da seção crítica foi realizada através do módulo Slope/W utilizando o método de Morgenstern-Price, com superfície crítica de ruptura circular.

Foram realizadas as verificações de segurança quanto à escorregamento, tombamento, capacidade de carga e ruptura global do talude, averiguando-se a influência das modificações dos parâmetros, como por exemplo, resistência e características mecânicas dos materiais.

Conforme a Figura 4, foi possível analisar a estabilidade global do talude, que tem como objetivo a verificação do tombamento, deslizamento e recalque do solo aterrado.

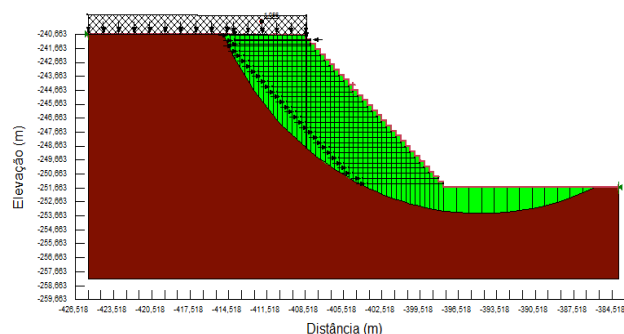


Figura 4. Análise de Estabilidade Global.

A Figura 5 ilustra um exemplo de superfície de ruptura mista. Através desta análise, obteve-se os comprimentos necessários para evitar que a zona ativa venha a mobilizar as fitas metálicas. Sendo assim, as zonas resistentes estão voltadas para a direção interna do muro, o que previne os movimentos na direção da face do talude.

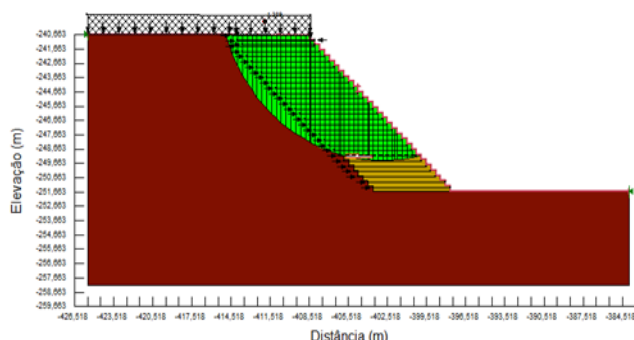


Figura 5. Análise de Estabilidade Mista.

A Figura 6 ilustra um exemplo de análise da superfície de ruptura interna. Nesta situação, realiza-se uma análise local de forma isolada em cada fita metálica, verificando-se a tendência de arrancamento.

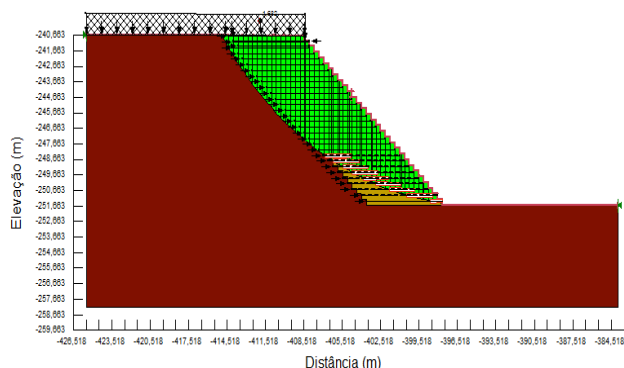


Figura 6. Análise de Estabilidade Interna.

3.2 Sigma/W

Através do Sigma/W foi possível analisar as deformações nas fitas metálicas nervuradas, o deslocamento de face, as deformações verticais e as tensões geradas no solo de fundação, pelo método dos elementos finitos, que dividiu o sistema analisado em malhas.

Os parâmetros utilizados para a análise estão descritos na Tabela 1. Foi atribuída uma sobrecarga de 20 kPa para os quatros muros simulados, além da realização de um refinamento da malha próximo ao contato do material de reforço com o solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estabilidade

Através do software Slope/W, obteve-se os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4. Após a análise da estabilidade do sistema obtiveram-se os fatores de segurança do talude, que representam a relação entre os esforços resistentes e os atuantes. Fatores de Segurança (FS) menores que um (1,0) indicam situação de instabilidade, enquanto que FS superiores a um (1,0) sugerem um talude estável. A análise de estabilidade foi realizada levando-se em conta os valores mínimos recomendados pela ABNT NBR ISO 11682:2009.

Tabela 3. Fatores de segurança solo 1

Fator de Segurança	40 mm	60 mm
Global	1,02	1,14
Mista	1,02	1,03
Interna	1,33	1,44

Tabela 4. Fatores de segurança solo 2 não convencional

Fator de Segurança	40 mm	60 mm
Global	1,06	1,17
Mista	1,39	1,55
Interna	1,68	1,89

Os fatores de segurança do solo 2 apresentaram melhores resultados tanto para a fita de 40 mm quanto para a fita de 60 mm em todas as superfícies de ruptura. Assim, o solo 2 que apesar de não possuir recomendação normativa, se mostrou mais estável, apresentando um fator de segurança médio 25% maior que o solo 1, considerando todas as situações de ruptura e tipos de fitas.

4.2 Esforços internos

Conforme a Figura 7 foram analisadas, com auxílio do módulo Sigma/W, os deslocamentos de face dos quatros muros de contenção. Constatou-se que no solo 1, com fita metálica nervurada de 40 e 60 mm, ocorreram deslocamentos de 4,8 e 2,0 cm, respectivamente. Para o solo 2, ambas as fitas de 40 e 60 mm deslocaram-se 6 mm.

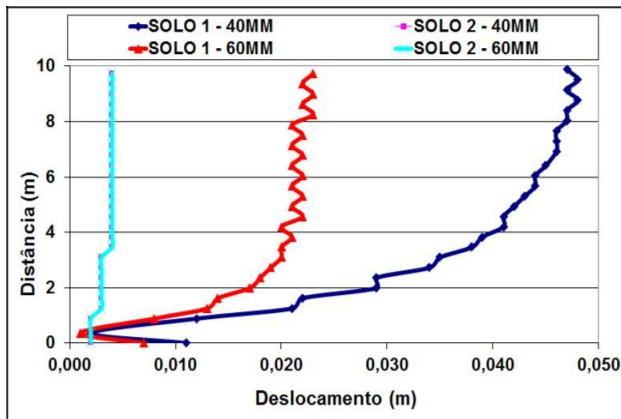


Figura 7. Deslocamento de face do muro

Os resultados na Figura 8 apresentaram as simulações numéricas de tensões e deformações obtidas nos quatro muros. O solo 1 obteve uma força axial máxima de 13,42 kN para fitas metálicas de 60 mm e 7,80 kN para fitas metálicas de 40 mm. Em relação ao solo 2, as forças aplicadas no muro nas fitas de 60 mm e 40 mm não apresentaram valores significativos comparados com o solo 1, apresentando valores de 1,5 kN para a fita de 60 mm e 0,5 kN para a fita de 40 mm, que se mantiveram constantes.

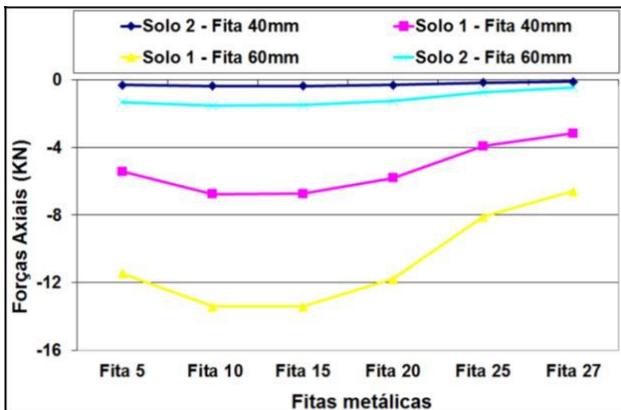


Figura 8. Força axial vs. fitas metálicas

A Figura 9 ilustra os deslocamentos horizontais nos quatro muros simulados, visto que as fitas metálicas nervuradas obtiveram os seguintes deslocamentos máximos: solo 1, fita metálica de 40 mm, com deslocamento de 2 cm; solo 1, fita metálica 60 mm, com deslocamento de 5 cm; solo 2, fita metálica de 40 mm, com deslocamento de 4 cm; e solo 2, fita metálica de 60 mm, com deslocamento de 7 cm. Através desses dados percebeu-se que o solo 2, com fita

metálica de 60 mm, foi o que apresentou maior valor de deslocamento, dentre os quatros modelos.

Além disso, conforme as simulações numéricas realizadas no módulo Sigma/W, o solo 1 com fita metálica de 40 mm, e o solo 2 com fita metálica de 40 mm e 60 mm apresentaram tensões na fundação com valores próximos a 21,44 kPa. Apenas o muro preenchido com o solo 1 e fita metálica de 60 mm, apresentou tensão máxima de 20 kPa.

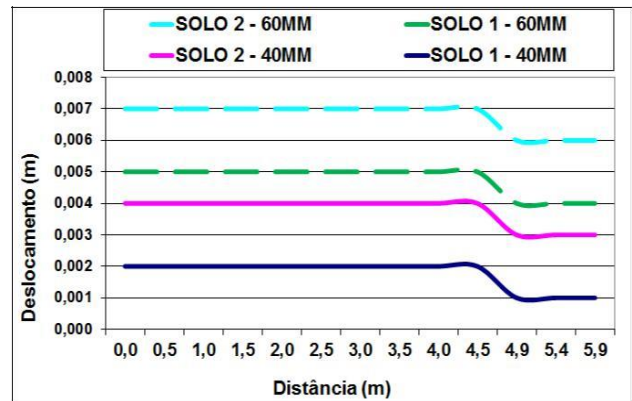


Figura 9. Deslocamentos horizontais

5. CONCLUSÃO

De modo geral, foi possível observar com as análises numéricas realizadas com o auxílio do programa GeoStudio/2012 que:

- ✓ Nas análises através do módulo Slope/W os fatores de segurança na superfície de ruptura global foram muito semelhantes. Já nas superfícies de ruptura interna e mista, o solo 2 apresentou maiores valores de fatores de segurança;
- ✓ Nas verificações de deslocamento da face do muro, o solo 1 apresentou melhores resultados que o solo 2. Além disso, a fita de 40 mm, como esperado, mostrou-se mais suscetível aos deslocamentos;
- ✓ Os resultados das forças axiais em função das fitas metálicas de 60 e 40 mm, comprovam uma deformabilidade maior do solo 1 em relação ao solo 2 (não convencional);
- ✓ Nas verificações dos deslocamentos horizontais, os valores obtidos revelam que a fita de 40 mm do solo 1 apresentou o menor

deslocamento em relação às demais fitas metálicas. A fita metálica de 60 mm do solo 2 apresentou o maior deslocamento;

✓ Apesar dos resultados numéricos apresentarem condições mais favoráveis para a aplicação do solo 2 (não convencional) em muro reforçado com fitas metálicas, há outros parâmetros que podem influenciar na resistência a longo prazo do maciço. Tais parâmetros como a permeabilidade e componentes que possam corroer a fita metálica devem ser considerados no projeto e estudados em conjunto.

A partir das análises apresentadas, conclui-se que as simulações realizadas com o auxílio do software Geostudio/2012 apresentaram resultados interessantes, mesmo considerando que os resultados são de uma simulação de modelo numérico representando uma situação hipotética, que podem apresentar resultados divergentes de uma situação real com outras dimensões. No entanto, os valores obtidos são de grande valia para efeito comparativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9286 – Grãos abrasivos e material bruto - Análise química do carbetto de sílcio. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 7480 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892 - Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 7182 - Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 11682 – Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- MAPARAGEM, A.S. (2011). Avaliação da Interação Solo Fitas Metálicas e Poliméricas Para Soluções em Terra em Solos Não Convencionais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- PATIAS, Josiele. (2005). Avaliação do uso de solos não Convencionais em estruturas de solo reforçado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- ZORNBERG, J.G.; MITCHELL, J.K. (1994). Reinforced soil structures poorly draining backfills. Part 1: Reinforcement interaction and functions. Geosynthetics International, v.1, n.2, p.103-147.