DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/36

Avaliação do Comportamento de Talude de Solo Estabilizado

Thiago Ramos Mota
Engenheiro Civil, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, thiagoramos1999.tj@gmail.com

Camila de Oliveira
Engenheira Civil, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, camilaoliveiratp@gmail.com

João Pedro Gonçalves Mastronicola
Engenheiro Civil, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, joao_mastronicola@hotmail.com

Fernanda Duarte Silva
Engenheira Civil, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, engduartefernanda@gmail.com

Mariana Júlia de Melo
Engenheira Civil, INTERTECHNE Consultores, Belo Horizonte, Brasil, marianamello.0997@gmail.com

RESUMO: A instabilidade de taludes podem representar um risco significativo, podendo causar deslizamentos que ameaçam vidas e geram alguns danos. Para mitigar esses problemas, engenheiros geotécnicos empregam técnicas de melhoramento de solos, modificando ou substituindo o material para aumentar sua resistência. Esta pesquisa avalia condições de contorno e parâmetros de resistência do solo em taludes estabilizados, usando dados de ensaios de cisalhamento direto submetidos às tensões de 25, 50 e 100 kPa (Carvalho, 2019). O melhoramento foi realizado por meio da mistura do solo-fibra, com três tipos de fibras naturais (sisal, curauá e coco) em teores de 0,5% e 0,75%, e em comprimentos de 25 e 50 mm. As análises numéricas de equilíbrio limite mostraram que, a variação dos parâmetros de resistência, tipo de fibra, presença de água, camadas reforçadas e carregamento externo afetam a estabilidade do talude. A análise realizada com o melhoramento do solo, com aplicação do solo-fibra, com nível d'água presente no talude aumentou o fator de segurança em 22%, enquanto o mesmo solo reforçado sem a presença de nível d'água reduziu em 26%. Taludes sujeitos a carregamentos adicionais apresentaram fatores de segurança menores que 1,5 na primeira camada reforçada. Conclui-se que a presença de água e cargas adicionais requerem atenção especial para garantir a segurança conforme as normas.

PALAVRAS-CHAVE: Taludes, Solo, Resistência, Fibras, Análises.

ABSTRACT: The instability of slopes can represent a significant risk, potentially causing landslides that threaten lives and generate various types of damage. To mitigate these problems, geotechnical engineers employ soil improvement techniques, modifying or replacing the material to increase its strength. This research evaluates boundary conditions and soil strength parameters in stabilized slopes, using data from direct shear tests subjected to stresses of 25, 50, and 100 kPa (Carvalho, 2019). The improvement was carried out through a soil-fiber mixture, with three types of natural fibers (sisal, curauá, and coconut) in contents of 0.5% and 0.75%, and in lengths of 25 and 50 mm. Limit equilibrium numerical analyses showed that variations in strength parameters, fiber type, presence of water, reinforced layers, and external loading affect slope stability. The analysis performed with soil improvement, using the soil-fiber application with a water table present in the slope, increased the safety factor by 22%, while the same reinforced soil without the presence of a water table reduced it by 26%. Slopes subjected to additional loads showed safety factors lower than 1.5 in the first reinforced layer. It is concluded that the presence of water and additional loads require special attention to ensure safety in accordance with standards.

KEYWORDS: Slopes, Soil, Strength, Fibers, Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A instabilidade de encostas é um grande desafio no Brasil, resultando em acidentes e colocando vidas em risco. Durante chuvas intensas, as encostas tornam-se vulneráveis a deslizamentos devido ao aumento da poropressão, diminuindo a resistência ao cisalhamento (Dutra, 2013). A ocupação desordenada e construções em áreas de risco agravam o problema, destacando a necessidade de conscientização e medidas de contenção.

Solos naturais muitas vezes não atendem às exigências de projeto. Engenheiros geotécnicos podem substituir ou modificar o solo para melhorar suas propriedades, criando materiais com resistência e deformabilidade adequadas. Técnicas incluem mudanças na composição mecânica, estabilização físico-química e reforço com geotêxteis, fibras, grelhas e tiras. A inclusão de fibras, por exemplo, melhora o desempenho de solos suscetíveis a fissuras.

Movimentos de massas, conforme Silveira (2008), são processos de transporte de sedimentos, solos ou rochas, impulsionados pela gravidade e influenciados por fatores como águas superficiais e subterrâneas e atividades humanas. Taludes acima do nível freático formam forças de sucção entre as partículas do solo, essenciais para a resistência ao cisalhamento. Chuvas reduzem essa sucção, aumentando o risco de deslizamentos (Cardoso Junior, 2006).

2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa consiste na avaliação paramétrica de condições de contorno e de parâmetros de resistência do solo na estabilidade de taludes compostos por solos estabilizados.

3 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica pela sua contribuição para a segurança, a sustentabilidade e a eficácia de taludes compostos de solo estabilizado a fim de prevenir desastres que podem ter consequências catastróficas, resultando em danos materiais e humanos.

4 METODOLOGIA

Para a metodologia, foi utilizada uma seção hipotética de um talude, contendo três materiais, denominados como solo de fundação, solo reforçado e aterro. Os parâmetros de resistência utilizados para o solo reforçado foram obtidos através de Carvalho (2019), que estudou o comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais de sisal, curauá e coco submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala.

4.1 Caracterização do Solo Arenoso

O solo arenoso foi obtido em estabelecimento comercial, localizado na Região Administrativa do Guará – RA X, Distrito Federal. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados por Carvalho (2019) do solo arenoso utilizado na presente pesquisa.

Tabela 1. Índices Físicos do Solo Arenoso.

Índices Físicos	**Solo Arenoso**
Densidade Real dos Grãos (G_s)	2,68 g/cm³
Índice de Vazios Máximo ($e_{máx}$)	0,894
Índice de Vazios Mínimo (e_{min})	0,586
Índice de Vazios (e_0)	0,74

Coeficiente de Uniformidade (CNU)	2,4
Coeficiente de Curvatura (C_c)	1,06
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,18mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,39mm

4.2 Caracterização das Fibras Vegetais

As fibras de sisal foram adquiridas da APAEB, de Valente, Bahia. As fibras de curauá foram compradas da Pematec Triangel, de Santarém, Pará. As fibras de coco foram fornecidas pela COMLURB e SECONSERVA, do Rio de Janeiro. Carvalho (2019) usou fibras de 25 e 50 mm para preparar as misturas solo-fibra, com base em pesquisas que mostraram mudanças significativas no comportamento dos compósitos nesses comprimentos. Os teores de fibra incorporados no solo foram de 0,5% e 0,75%, conforme a literatura.

4.3 Procedimento de Ensaios e Resultados

Carvalho (2019) utilizou tensões de 25, 50 e 100 kPa para obter a envoltória de resistência do solo arenoso e compósitos solo-fibra, limitadas pelo equipamento. No primeiro grupo, SA, SS, CA e CC representam Solo Arenoso, Solo Arenoso + Sisal, Solo Arenoso + Curauá e Solo Arenoso + Coco. O segundo grupo indica o teor de fibra (0,5% ou 0,75%) e o terceiro grupo, o comprimento da fibra (25 mm ou 50 mm). A Tabela *2* resume os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, destacando os maiores valores de coesão e atrito para a mesma fibra e dosagem, utilizados na avaliação da condição de segurança do talude.

Tabela 2. Parâmetros de resistência dos diferentes tipos de fibras.

Tipo de Solo	Coesão (kPa)	Atrito (φ)
Solo sem reforço (SA)	6	34
Solo + SS_0,5_25	16	35
Solo + SS_0,75_25	18	37
Solo + SS_0,5_50	12	38
Solo + SS_0,75_50	13	41
Solo + CA_0,5_25	14	35
Solo + CA_0,75_25	15	38
Solo + CA_0,5_50	14	36
Solo + CA_0,75_50	16	38
Solo + CC_0,5_25	11	40
Solo + CC_0,75_25	11	42
Solo + CC_0,5_50	14	39
Solo + CC_0,75_50	14	40

4.4 Geometria do Talude Hipotético

A Tabela *3* resume as tentativas de calibração da geometria do talude com a finalidade de chegar a um fator de segurança maior que 1,5, valor limite requerido pela NBR 11.682 (ABNT, 2009), considerando a situação mais crítica.

Tabela 3. Etapas de calibração para estabelecer a geomteria final do talude.

Talude	Base menor (b)	Base maior (B)	Inclinação (H:V)	FS
1ª Tentativa	35 m	40 m	1H:2V	0,72
2ª Tentativa	30 m	40 m	1H:1V	0,83
3ª Tentativa	20 m	40 m	2H:1V	1,53

O talude escolhido, conforme Figura *1*, foi dividido em 10 camadas, cada uma com 1 metro de altura, a fim de otimizar o projeto quanto à adição do solo reforçado com fibra. Ainda, a Figura *1* ilustra a condição de análise com as 3 primeiras camadas iniciais do talude compostas de solo reforçado com fibra e as demais com solo sem reforço. Para todas as análises, foi mantida a mesma linha de nível d'água.

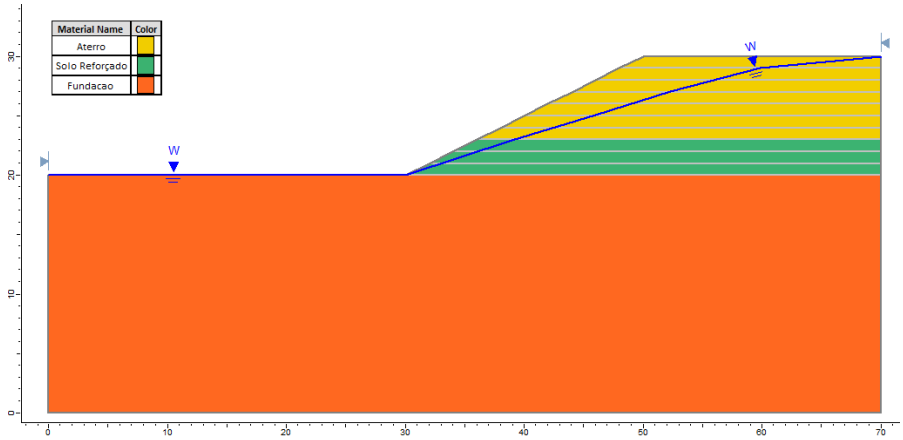


Figura 1. Seção do talude ilustrativa com 3 caamadas iniciais compostas de solo reforçado com fibra vegetal.

Foram realizadas análises de estabilidade para as situações da Tabela *4*, iniciando com adição de solo reforçado somente na primeira camada e o restante com solo sem reforço; em seguida solo reforçado na primeira e segunda camada e as demais sem reforço, e assim sucessivamente, até a última análise que seria com todas as camadas compostas de solo reforçado com fibra.

O programa de análise de equilíbrio limite considerado contemplará 113 análises de estabilidade do talude exposto, sendo as análises detalhadas na Tabela *4*, indicando as variáveis consideradas no estudo.

Tabela 4. Análises de estabilidade indicando as variáveis consideradas no estudo.

Análises	Condição do material do aterro	Quant. de camadas reforçadas	Presença do Nível d'água	Carregamento externo 100kPa
1	Solo sem reforço	Não	Não	Não
2	Solo sem reforço	Não	Sim	Não
3	Solo sem reforço	Não	Sim	Sim
4 a 13	Solo reforçado com fibra Sisal SS_0,75_25	1 a 10	Não	Não
14 a 23	Solo reforçado com fibra Sisal SS_0,75_50	1 a 10	Não	Não
24 a 33	Solo reforçado com fibra Curauá CA_0,75_25	1 a 10	Não	Não
34 a 43	Solo reforçado com fibra Coco CC_0,75_25	1 a 10	Não	Não
44 a 53	Solo reforçado com fibra Coco CC_0,75_50	1 a 10	Não	Não

Análises	Condição do material do aterro	Quant. de camadas reforçadas	Presença do Nível d'água	Carregamento externo 100kPa
54 a 63	Solo reforçado com fibra Sisal SS_0,75_25	1 a 10	Sim	Não
64 a 73	Solo reforçado com fibra Sisal SS_0,75_50	1 a 10	Sim	Não
74 a 83	Solo reforçado com fibra Curauá CA_0,75_25	1 a 10	Sim	Não
84 a 93	Solo reforçado com fibra Coco CC_0,75_25	1 a 10	Sim	Não
94 a 103	Solo reforçado com fibra Coco CC_0,75_50	1 a 10	Sim	Não
104 a 113	Solo reforçado	1 a 10	Sim	Sim

Nas análises para o talude com e sem nível d'água foi determinado dois tipos de ruptura, definidas como A e B. A ruptura A é condicionada apenas pelo solo sem reforço (seção à esquerda da Figura *2*) e a ruptura B condicionada pelo solo sem reforço e reforçado (seção à direita da Figura *2*).

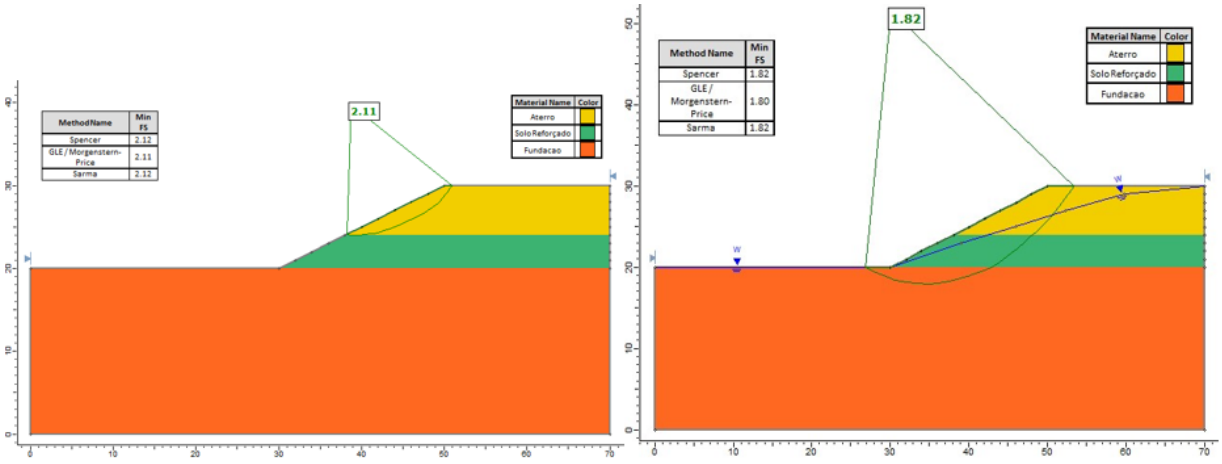


Figura 2. Definição das rupturas A e B.

Além disso, no final, foram realizadas análises com uma carga distribuída hipotética de 100kPa, vertical e para baixo, no talude, com presença de nível d'água (situação mais crítica), para efeito de comparação, conforme Figura *3*. O nível d'água para todas as análises sempre permaneceu o mesmo.

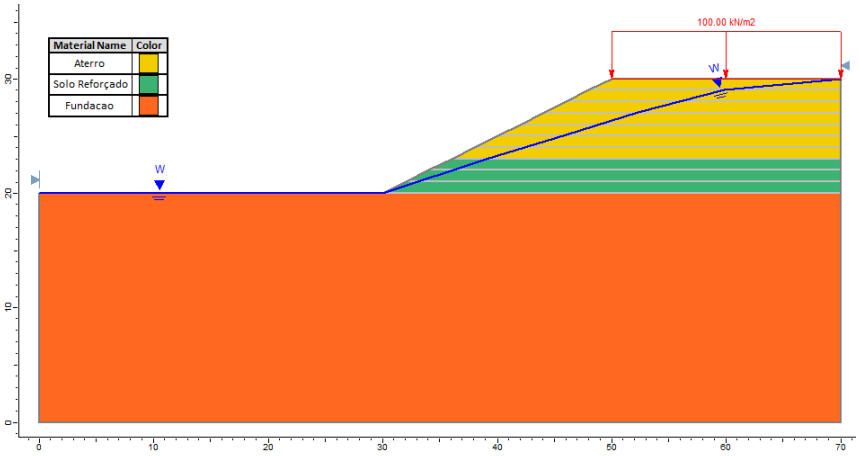


Figura 3. Seção do talude com carregamento distibuído de 100 kPa, com presença de nível d'água.

5 RESULTADOS

5.1 Avaliação do Solo Sem Reforço na Presença ou Não de Água

A análise do talude na condição não reforçada com presença de água resultou em um fator de segurança de 1,53, comparado a 1,87 sem água. Esses valores servem como referência para avaliações comparativas. A presença de água reduziu o fator de segurança em cerca de 20%, confirmando a premissa anterior sobre a geometria do talude e mantendo a estabilidade conforme a norma.

5.2 Influência da Presença de Água na Estrutura Sem Reforço e Reforçada

A Tabela *5* e Tabela *6* apresentam os resultados obtidos considerando a variação da posição das camadas reforçadas, em um modelo sem e com nível d'água.

Tabela 5. Fatores de segurança para os modelos sem nível d'água.

Camadas reforçadas	Solo + SS_0,75_25	Rupt	Solo + SS_0,75_50	Rupt	Solo + CA_0,75_25	Rupt	Solo + CC_0,75_25	Rupt	Solo + CC_0,75_50	Rupt
	FS		FS		FS		FS		FS	
1	1.91	A	1.91	A	1.91	A	1.91	A	1.91	A
2	1.96	A	1.96	A	1.96	A	1.96	A	1.96	A
3	2.03	A	2.03	A	2.03	A	2.02	A	2.02	A
4	2.11	A	2.11	A	2.11	A	2.11	A	2.11	A
5	2.21	A	2.22	A	2.21	A	2.22	A	2.22	A
6	2.37	A	2.37	A	2.37	A	2.37	A	2.37	A
7	2.45	B	2.49	B	2.42	B	2.48	B	2.47	B
8	2.48	B	2.52	B	2.44	B	2.51	B	2.5	B
9	2.50	B	2.54	B	2.47	B	2.53	B	2.52	B
10	2.52	B	2.55	B	2.48	B	2.54	B	2.54	B

Tabela 6. Fatores de segurança para os modelos com nível d'água.

Camadas reforçadas	Solo + SS_0,75_25	Rupt	Solo + SS_0,75_50	Rupt	Solo + CA_0,75_25	Rupt	Solo + CC_0,75_25	Rupt	Solo + CC_0,75_50	Rupt
	FS		FS		FS		FS		FS	
1	1.67	A	1.67	A	1.67	A	1.67	A	1.67	A
2	1.73	B	1.73	B	1.72	B	1.73	B	1.73	B
3	1.77	B	1.77	B	1.75	B	1.77	B	1.77	B
4	1.79	B	1.8	B	1.78	B	1.8	B	1.8	B
5	1.82	B	1.83	B	1.8	B	1.82	B	1.82	B
6	1.84	B	1.85	B	1.82	B	1.84	B	1.84	B
7	1.86	B	1.86	B	1.84	B	1.86	B	1.86	B
8	1.87	B	1.88	B	1.85	B	1.87	B	1.87	B
9	1.88	B	1.88	B	1.86	B	1.88	B	1.88	B
10	1.89	B	1.89	B	1.87	B	1.88	B	1.89	B

Os fatores de segurança são semelhantes para a mesma camada, independentemente de fibra, dosagem, comprimento ou presença de água. Sem água, o reforço nas camadas 1–6 resulta em ruptura do tipo A; a partir da 7ª camada ocorre ruptura do tipo B (Tabela 5.). Segundo a Tabela 6, com apenas a 1ª camada reforçada há ruptura tipo A; quando outras camadas são reforçadas observa-se apenas ruptura tipo B, independentemente do reforço. A Figura 4 mostra a variação do fator de segurança entre condições reforçadas e não reforçadas em função do nível freático.

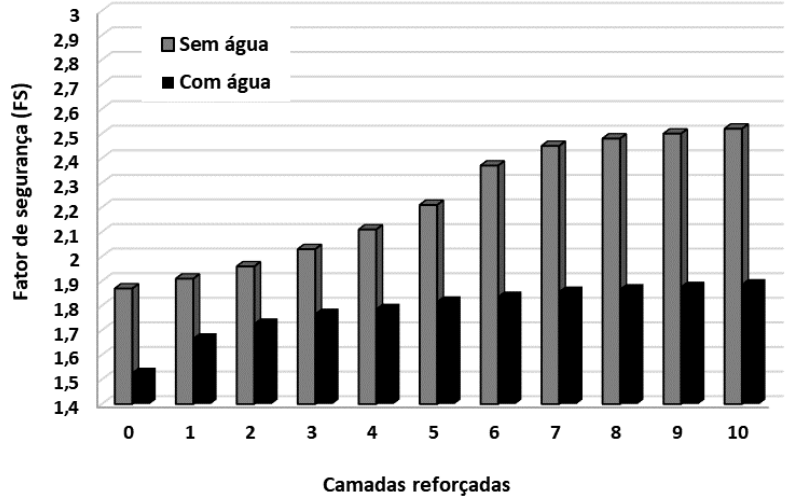


Figura 4. Comparativo dos valores obtidos nas análises com e sem água.

Tendo como referência a análise do talude parcial ou totalmente reforçado sem a presença de água, verificou-se uma redução do fator de segurança de até 26%, dependendo da condição considerada.

5.3 Influência da Variação da Presença em Camada do Solo Reforçado

Pode-se afirmar que a condição reforçada apontou para uma melhoria da condição de estabilidade do talude, aumentando seu valor entre 2 a 35% (
Figura 5), dependendo da presença de água na estrutura e da quantidade de camadas reforçadas consideradas na sua composição.

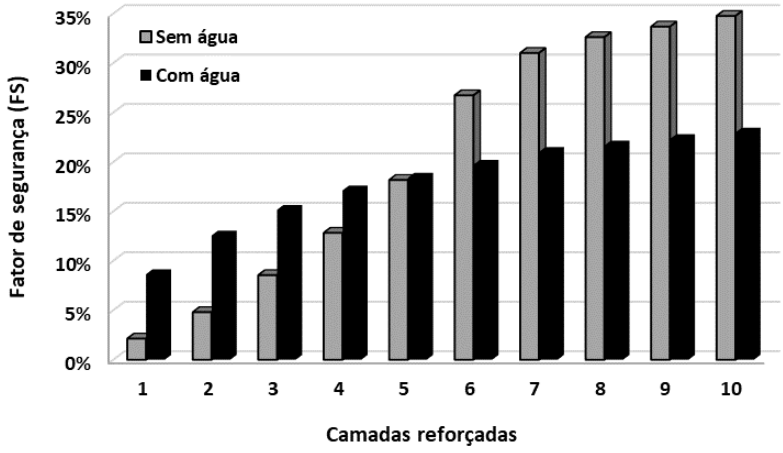


Figura 5. Comparativo dos valores obtidos nas análises com e sem água.

5.4 Influência da variação da presença em camada do solo reforçado

Para as análises em presença de água e carregamento distribuído de 100 kPa, utilizando como modelo o solo reforçado com SS_0,75_50, observou-se tanto ruptura do tipo A quanto B.

Para a primeira camada reforçada, o fator de segurança obtido para ruptura A foi de 1,36 e para ruptura B, 1,47. Considerando como referência o FS de 1,5, conforme Tabela *6*, utilizando o alto nível de segurança contra danos materiais e contra danos a vidas humanas, os valores obtidos foram menores que 1,5, não atendendo à NBR 11.682 (ABNT, 2009). Porém, considerando outras situações, os valores de FS obtidos podem sim atender à norma técnica. A partir da 2ª camada reforçada, os fatores de segurança já foram maiores que estabelecido em norma (1,5).

6 CONCLUSÕES

A análise dos dados permitiu avaliar a metodologia proposta. Independentemente do tipo e comprimento das fibras, os fatores de segurança foram similares para a mesma condição.

Além disso, a combinação de valores de ângulo atrito e coesão considerada ao se comparar os compósitos solo-fibra tiveram pouca influência na avaliação de estabilidade dos cenários analisados, ou seja, os fatores de segurança foram praticamente os mesmos. Reforços no talude com água aumentaram o fator de segurança em 22%; sem água, o aumento foi de até 35%. A presença de água reduziu o fator de segurança em 26%.

Para as análises sem água, a presença de solo reforçado da primeira até a sexta camada garante uma ruptura condicionada pelo solo sem reforço e, a partir da sétima camada reforçada, a ruptura passa a ser condicionada pelo solo sem reforço e reforçado. Ao realizar as análises para o talude com nível d'água, a ruptura condicionada pelo solo sem reforço aparece apenas com a primeira camada reforçada e, a partir da segunda camada reforçada a ruptura já passa a ser condicionada pelo solo sem reforço e reforçado. Isso mostra que a presença de água no talude influencia o tipo de ruptura entre as camadas sem e com reforço.

Ao se comparar o solo reforçado com presença de nível d'água e solo reforçado sem o nível d'água, o fator de segurança reduziu em 26% considerando todo o talude reforçado ao considerar a presença de água.

A presença de nível d'água condiciona a ruptura. Com a presença de nível d'água, a ruptura foi condicionada apenas pelo solo sem reforço somente utilizando a primeira camada reforçada. Sem a presença do nível d'agua, esse tipo de ruptura se estendeu até as 6 primeiras camadas reforçadas.

Para o talude proposto, ao inserir um carregamento de 100kPa, os fatores de segurança foram menores que 1,5, conforme NBR 11.682 (ABNT, 2009), apenas para a primeira camada reforçada. A partir da segunda camada com reforço o fator de segurança já foi maior que estabelecido em norma.

A engenharia geotécnica deve criar novas tecnologias e aprimorar técnicas para promover a segurança. Recomenda-se realizar estudos a longo prazo sobre a degradação das fibras naturais e seu impacto ambiental. Investigar novos materiais compostos que aumentem a durabilidade e resistência, e implementar técnicas de modelagem numérica avançada para simular taludes reforçados sob diferentes condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso Junior, M. S. *Estabilidade de taludes: teoria e prática*. 3. ed. São Paulo: Editora Civil, 2006.

Carvalho, L. M. C. (2019). *Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-324/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

Dutra, V. A. S. *Projeto de Estabilização de Taludes e Estruturas de Contenção englobando Dimensionamento Geotécnico e Estrutural*. 2013. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Silveira, J. B. *Movimentos de massa: causas e efeitos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Geotecnia, 2008.