

Aplicação do Hyrcan na Análise de Estabilidade de Taludes com o Uso do Capim Vetiver

Ludmila de Oliveira Santos
Discente, IFNMG, Pirapora, Brasil, lidos1@aluno.ifnmg.edu.br

Fernanda Izabele Nascimento dos Santos
Discente, IFNMG, Pirapora, Brasil, finds@aluno.ifnmg.edu.br

Breno Alcântara Silva
Docente, IFNMG, Pirapora, Brasil, breno.silva@ifnmg.edu.br

Áureo da Silva Santos
Docente, IFNMG, Pirapora, Brasil, aureo.santos@ifnmg.edu.br

Marcos Alves da Silva
Docente, IFNMG, Pirapora, Brasil, marcos.silva@ifnmg.edu.br

RESUMO: Os desastres condicionados por fenômenos naturais, fazem parte do cotidiano das grandes cidades brasileiras, podendo ser de diversas origens, tais como: inundações, incêndios florestais, movimentos de massa. Os movimentos de massa estão entre os principais agentes para ocorrência de desastres geológicos, resultando, na maioria das vezes, em vítimas fatais e vítimas desabrigadas. Por isso, é importante a adoção de medidas que venham a prevenir que esses eventos ocorram, e entre as técnicas existentes, a bioengenharia está sendo bastante utilizada. Essa pesquisa tem como objetivo analisar a influência do capim vetiver, uma técnica de bioengenharia, no aumento da estabilidade de taludes aos movimentos de massa. Devido ao tamanho das raízes dessa gramínea e a resistência à tração que elas possuem, o seu comportamento mecânico assemelha-se, em menor escala, ao solo grampeado, trabalhando de forma passiva. Para analisar esse comportamento, foram considerados taludes com tipos de solo e geometrias variados, com a aplicação do vetiver na função de solo grampeado. As análises foram feitas no software HYRCAN. Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação do vetiver na estabilização de taludes é uma solução promissora.

PALAVRAS-CHAVE: Desastres, Bioengenharia, Capim Vetiver, Estabilidade, Hyrcan.

ABSTRACT: Disasters triggered by natural phenomena are part of the daily life of large Brazilian cities, and can stem from various sources, such as: floods, forest fires, and mass movements. Slope movements are among the main factors contributing to geological disasters, often resulting in fatalities and displaced victims. Therefore, adopting measures to prevent these events from occurring is important, and among the existing techniques, bioengineering is being widely employed. This research aims to analyze the influence of vetiver grass, a bioengineering technique, on increasing the stability of slopes against slope movements. Due to the size of the roots of this grass and the tensile strength they possess, its mechanical behavior resembles, on a smaller scale, anchored soil, working passively. To analyze this behavior, slopes with various types of soil and geometries were considered, with the application of vetiver in the function of anchored soil. The analyses were conducted using the HYRCAN software. The results obtained demonstrated that the application of vetiver in slope stabilization is a promising solution.

KEYWORDS: Disasters, Bioengineering, Vetiver Grass, Stability, Hyrcan.

1 INTRODUÇÃO

O deslocamento de solo, rochas e vegetação ao longo de um talude devido à ação da gravidade é conhecido como movimento de massa. Além da influência direta da gravidade, esses movimentos são afetados por uma variedade de fatores ambientais, incluindo características geológicas, a topografia do terreno, a composição e a estrutura do solo, bem como aspectos climáticos, hidrológicos e a presença de cobertura vegetal. (Brasil, 2018).

Para Barbosa (2019) e Caputo (2015) os taludes podem ser definidos como qualquer superfície inclinada, podendo ser naturais ou artificiais, podendo ser compostos de rochas, solo residual e solo coluvionar. Estes, podem ser subdivididos em: talude de corte (formados pela retirada de material), de aterro (formados pela deposição de materiais) e construídos (originado a partir de cortes e aterros). Esses taludes são compostos pelos seguintes elementos: crista ou coroamento, corpo do talude, ângulo de inclinação e pé do talude. Caputo (2015), salienta ainda que um dos fatos que ressalta a importância de estudar e investigar a estabilidade de taludes são os grandes acidentes ocorridos em todas as partes do mundo em diversas épocas, causando diversos prejuízos.

Como solução para a estabilização de taludes, pode ser destacado as obras com contenção e sem contenção. Dentre as técnicas sem contenção, destaca-se a bioengenharia. Uma das espécies de gramíneas mais utilizadas em obras geotécnicas como técnica de bioengenharia para estabilização de taludes, é o capim Vetiver. Além da reposição da cobertura vegetal, essa gramínea apresenta pode proporcionar aumento da resistência ao cisalhamento do maciço devido à profundidade e resistência das suas raízes. A bioengenharia apresenta vantagens como: a economia, sustentabilidade, redução de impactos gerados por obras de contenções e movimentos de massa, e principalmente, a segurança (Truong, Van e Pinnars, 2008).

Diante disso, esse trabalho tem como objetivo analisar a influência do capim Vetiver no aumento da estabilidade de taludes. Para isso, foi utilizado o *software* livre HYRCAN2 para realização das análises de estabilidade através de LEMs (*Limit Equilibrium Method*¹), mais especificamente, pelos métodos de Bishop simplificado e Morgenstern-Price, ambos disponíveis no programa, entre outros (Mikola, 2023). As análises foram feitas de forma bidimensional, utilizando de taludes com geometrias hipotéticas, definidas pelos autores. Para caracterização dos parâmetros dos solos do maciço, foi utilizado um boletim de sondagem SPT real feito na crista de um talude, e as propriedades físicas das raízes do Vetiver foram encontradas no Manual Técnico de Referência do Vetiver (Truong, Van e Pinnars, 2008).

2 METODOLOGIA

O estudo foi dividido em três etapas, sendo que a primeira consistiu na criação de taludes com geometrias variadas para análise da estabilidade e definição dos parâmetros dos solos. A segunda etapa consistiu no estudo das propriedades do capim Vetiver, como: profundidade alcançada pelas raízes, resistência das raízes à tração, diâmetro usual das raízes e tensão de cisalhamento resistente. A terceira e última etapa consistiu na análise da estabilidade desses taludes com e sem a presença do Vetiver utilizando dois métodos de equilíbrio limite. A modelagem do capim Vetiver foi realizada considerando a sua aplicação em grupo através do Sistema Vetiver (SV), levando em conta, em menor escala, que esse sistema se assemelha ao solo grampeado.

2.1 Caracterização geométrica e física dos taludes

Foram elaborados cinco taludes com geometria variadas, com desníveis de cinco e dez metros, com e sem bermas horizontais. As geometrias utilizadas se assemelham às encontradas em projetos rodoviários, locais onde a bioengenharia é bastante utilizada no mundo todo (Kim *et. al.*, 2022).

Os materiais (solos) dos taludes hipotéticos foram alterados no próprio Hyrcan, utilizando o comando de “propriedades” disponível na interface do programa. Posteriormente, foi realizado o processo de definição

¹ Métodos de Equilíbrio Limite

de materiais, no qual é possível criar até vinte materiais distintos. Estes podem ser diferenciados por cores, e podem ter os seus parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, peso específico seco e saturado) alterados, assim como o critério de ruptura utilizado, que neste trabalho foi adotado o critério de Mohr-Coulomb. Os limites dos materiais no talude foram desenhados, utilizando o comando "atribuir propriedades" para inserir o material no talude hipotético.

Para definição dos parâmetros do solo, foram utilizados os resultados obtidos de uma sondagem SPT com limite de furo de 10 m realizada na cidade de Teófilo Otoni - MG. Com base nessa sondagem (Figura 1), foram utilizados dois solos, sendo eles: solo argiloso pouco siltoso (até 2 m de profundidade) e solo siltoso pouco argiloso, com o N_{spt} médio respectivamente de 19 e 42. Ambos os solos podem ser considerados como coesivos-fricionais (Vaz, Fiori e da Silveira, 2018).

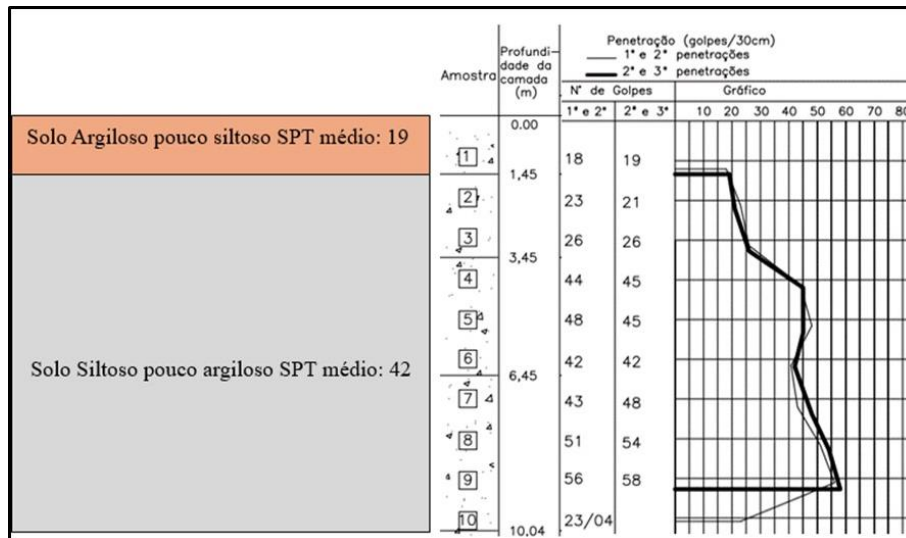


Figura 1. Boletim de sondagem utilizado no estudo

Com os valores do N_{spt} definidos, foram calculados os parâmetros dos solos. Para a coesão, foi utilizada a Equação 1 de Teixeira e Godoy de 1996 (Almeida e Oliveira, 2018), para o cálculo do ângulo de atrito e pesos específicos, foi utilizada a tabela 1 encontrada no livro Fundações e Contensões de Edifícios (Joppert Jr, 2007). A Tabela 1 apresenta um recorte da tabela dos autores.

$$c = 10 \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros do Solo

Tipo de Solo	Faixa N_{SPT}	Módulo de Elasticidade (kN/m ²)	Peso Específico		Ângulo de Atrito (φ°)	Coesão Efetiva (kN/m ²)
			Natural (kN/m ³)	Saturado (kN/m ³)		
Argila siltosa pouco arenosa	0-2	1.000	17	18	20	8
	3-5	1.000 – 2.500	18	19	23	15
	6-10	2.500 – 5.000	19	19	24	20
	11-19	5.000 – 10.000	19	19	24	30
	20-30	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$	20	20	25	40
	≥ 30	$1 \cdot 10^5 - 15 \cdot 10^4$	20	20	25	50
Silte arenoso pouco argiloso	5-8	8.000	18	19	25	15
	9-18	10.000	19	20	26	20
	19-41	150.000	20	20	27	30
	≥ 41	200.000	21	21	28	50

Utilizando as informações apresentadas anteriormente, foram encontrados os parâmetros desses dois solos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros Geotécnicos dos solos utilizados

	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso Específico (kN/m ³)
Solo 1 (Argilo pouco silteoso)	190	24	19
Solo 2 (Silte pouco argiloso)	420	28	21

Nos taludes 01, 02, 03 e 05, foi aplicada uma carga distribuída de 20 kPa nas bermas, indicando uma possível sobrecarga de ocupação, em atendimento a NBR 11682 (ABNT, 2009).

2.2 Capim Vetiver

O capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* Roberty L) é uma espécie de gramínea utilizada como técnica de bioengenharia, que apresenta diversas vantagens para estabilidade de taludes, como por exemplo, o controle de erosão, a melhoria da qualidade dos solo, conservação da umidade, crescimento rápido das raízes, profundidade alcançada pelas raízes. Além do exposto, a notável extensão do seu robusto e volumoso sistema de raízes, com profundidade que supera os 3 m, se conecta profundamente ao solo, o que, simultaneamente, dificulta sua remoção em meio ao escoamento superficial.

Quando plantados em fileiras simples, é formado o Sistema Vetiver, e esse arraigado sistema radicular faz com que o Vetiver se torne muito tolerante à seca e altamente adequado para estabilização de encostas de solos rasos (Truong, Van e Pinnars, 2008; Wang *et. al.*, 2020). A Figura 2 apresenta o capim Vetiver (Figura 2A) e o SV (Figura 2B).

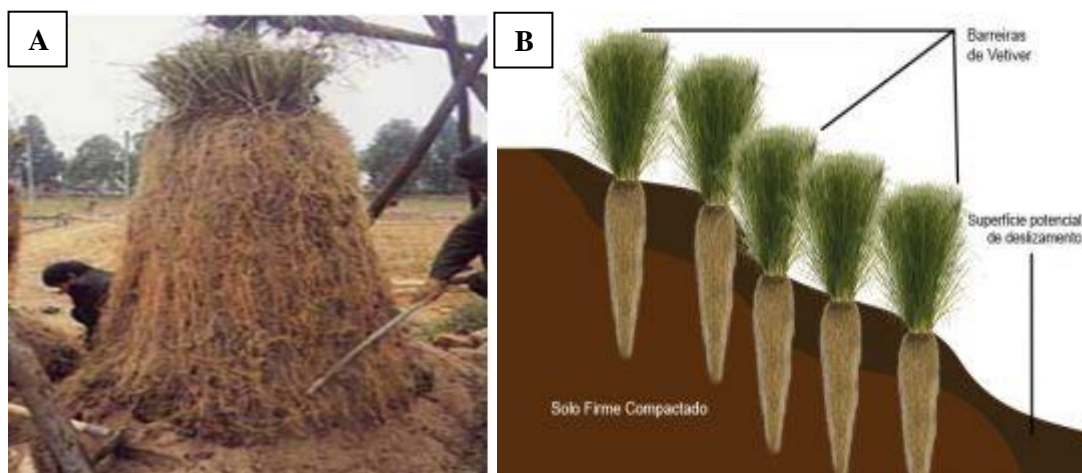


Figura 2A. Capim Vetiver e Figura 2B. Sistema Vetiver

Já é conhecido na literatura que ocorre o aumento de resistência ao cisalhamento do solo com a aplicação do Vetiver. Hengchaovanich e Nilaweera (1996) realizaram um ensaio em uma amostra indeformada de solo cultivado com capim Vetiver e constataram que a resistência ao cisalhamento aumentou em 90% com dois anos de plantio (Barbosa e Lima, 2013). Esses mesmos autores também constataram que a resistência à tração do Vetiver aumenta com a diminuição do diâmetro das raízes, sendo que o Vetiver apresenta uma tensão resistente à tração de 75 MPa para diâmetros entre 0.7 e 0.8 mm. Esse aumento da resistência ao cisalhamento acontece devido ao incremento da coesão aparente com a aplicação das raízes ao longo do tempo de plantio, como pode ser visualizado na Figura 3, que é um dos resultados encontrados no trabalho de Barbosa e Lima (2013).

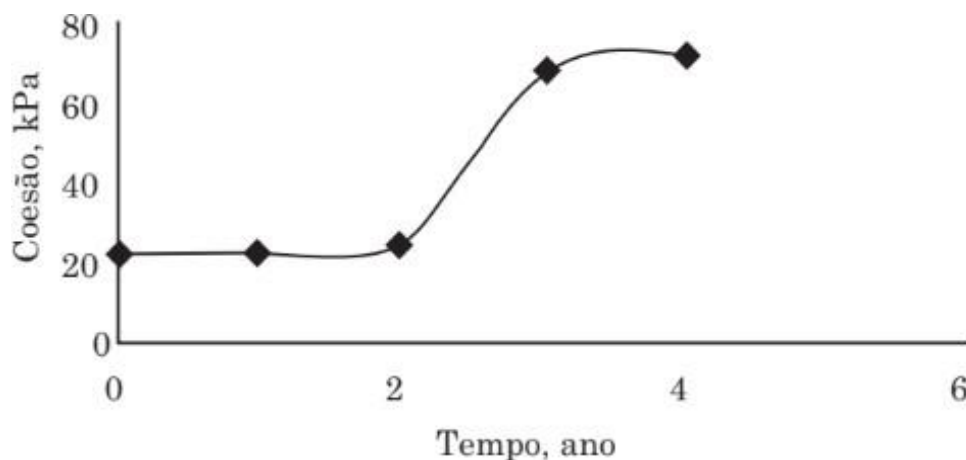


Figura 3. Variação do intercepto de coesão ao longo do tempo de plantio do capim Vetiver

É importante ressaltar que este trabalho não busca analisar o aumento da coesão com a aplicação do Vetiver, e sim a sua atuação como solo grampeado, através da resistência à tração das raízes.

Neste estudo, será avaliado o aumento da resistência ao cisalhamento através da obtenção do fator de segurança (FS) dos taludes, que é a razão entre a resistência mobilizável e a resistência mobilizada no maciço. Para isso, foi adotada uma tensão de resistência ao cisalhamento do solo com Vetiver de 75 MPa, para um diâmetro de 0.7 mm. Isso resultou em uma força de tração de 0.029 kN por raiz. A profundidade adotada foi de 3 m, a distância entre as fileiras do SV foi de 50 cm e de 30 cm entre as plantas, com inclinação perpendicular ao terreno.

2.3 Análise de Estabilidade

A estabilidade de taludes é medida matematicamente através do fator de segurança, o qual deve se manter superior a 1 (um), para garantir a segurança contra deslizamentos. A NBR 11682, na sua tabela 3, exige um FS mínimo de 1.5 quando o nível de segurança contra danos materiais, ambientais e contra danos a vidas humanas for considerado alto. Portanto, é crucial empregar técnicas de estabilização para garantir que esse FS não diminua, mitigando assim os riscos de desastres (Silva, 2011).

Para analisar a estabilidade dos taludes, foram utilizados dois métodos de equilíbrio limite, sendo eles: Bishop simplificado e Morgenstern-Price. Esses métodos fazem parte dos métodos das fatias, onde uma massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, onde são aplicadas as condições de equilíbrio (equações de equilíbrio da estática) a cada uma das fatias de forma isolada (Silva, 2011).

Bishop é um dos métodos mais utilizados na prática e é recomendado para projetos simples, sendo considerado não rigoroso, e podendo ser aplicado para superfícies de ruptura circulares (escorregamento circular) e não circulares (escorregamento planar). Já Morgenstern-Price é considerado rigoroso e pode ser usado para superfícies de ruptura quaisquer, preferencialmente adotado para solos homogêneos em taludes com inclinação superior a 27° (Silva, 2011; Gerscovich, 2012; Barbosa e Lima, 2011).

A modelagem dos taludes foi feita no programa livre HYRCAN, um software de análise de estabilidade de taludes desenvolvido por Roozbeh Geraili Mikola em 2020. Neste programa, o SV foi aplicado nos taludes assemelhando-se ao solo grampeado verde, porque as raízes do Vetiver também irão trabalhar de forma passiva, e podem ser entendidas como grampos no solo, com as limitações de profundidade e resistência já mencionadas.

As raízes do Vetiver foram modeladas como suporte no HYRCAN, com as características de grampos, com os parâmetros já mencionados. O programa pede a força resistente de arrancamento das raízes por metro, a qual foi calculada conforme o solo grampeado usando a força de tração já citada e o comprimento de ancoragem igual a profundidade adotada, ou seja, 3 m.

3 RESULTADOS

As análises de estabilidade foram realizadas no programa HYRCAN utilizando os métodos de Bishop e Morgenstern-Price, sendo que a superfície de ruptura adotada foi calculada pelo próprio programa através de iterações sucessivas, através do método das fatias. A superfície de ruptura calculada é aquela que apresenta o menor FS. O Vetiver foi inserido no programa seguindo os parâmetros de solo grampeado (soil nail). As Figuras 4 a 13 apresentam os taludes utilizados, com e sem Vetiver, com as cotas em metros. Os materiais 1 e 2 representam os solos 1 e 2, respectivamente, os quais já foram citados.

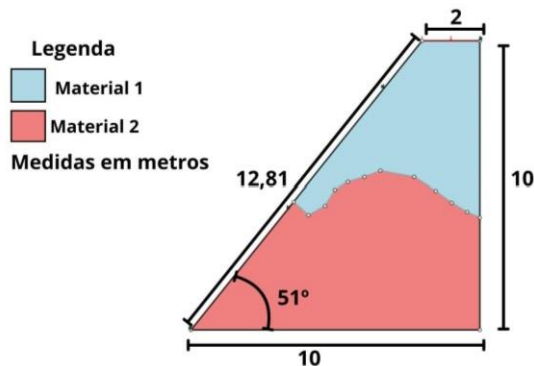


Figura 4. Talude 01 sem capim vetiver

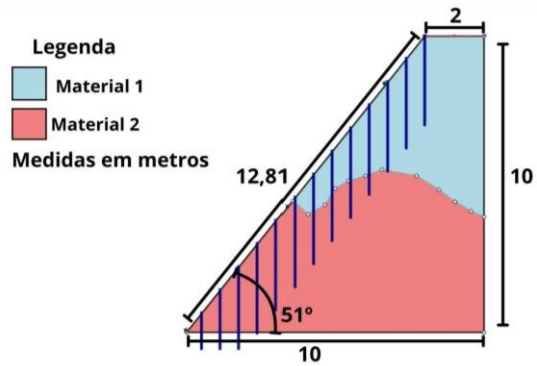


Figura 5. Talude 01 com capim vetiver

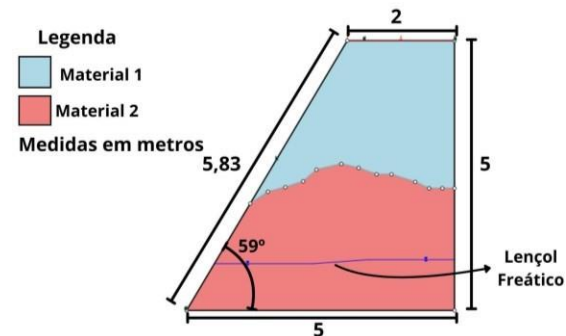


Figura 06. Talude 7 sem capim vetiver

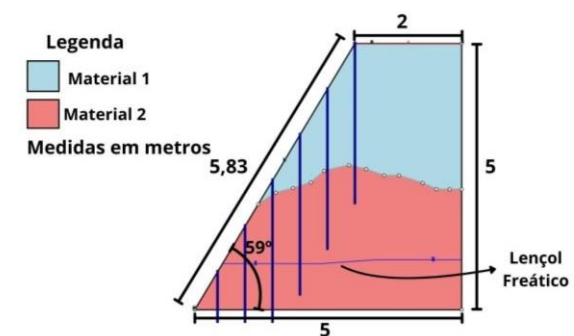


Figura 7. Talude 02 com capim vetiver

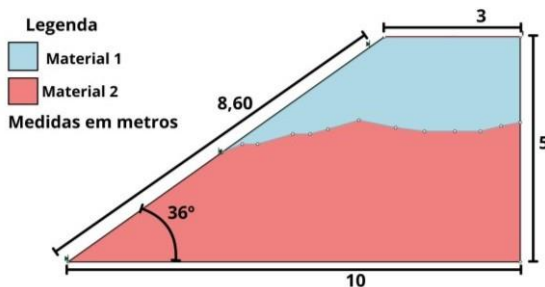


Figura 8. Talude 03 sem capim vetiver

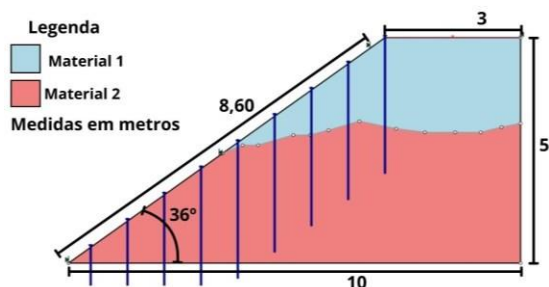


Figura 9. Talude 03 com capim vetiver

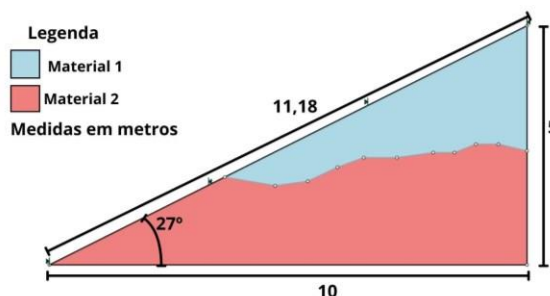


Figura 10. Talude 04 sem capim vetiver

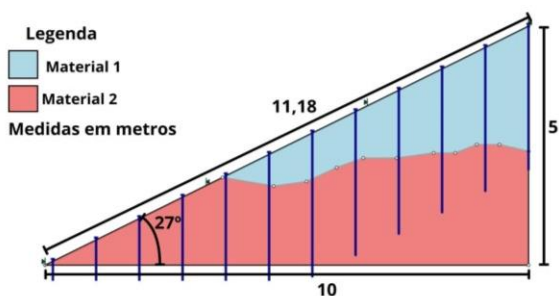


Figura 11. Talude 04 com capim vetiver

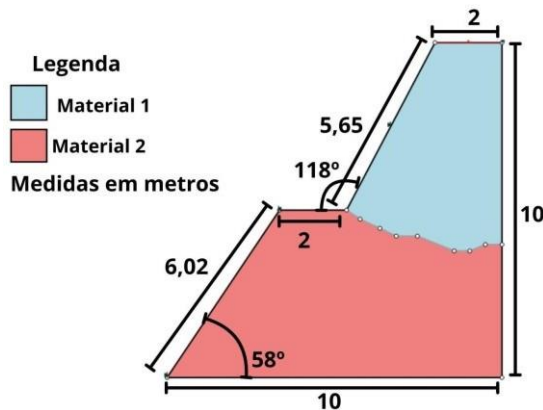


Figura 12. Talude 05 sem capim vetiver

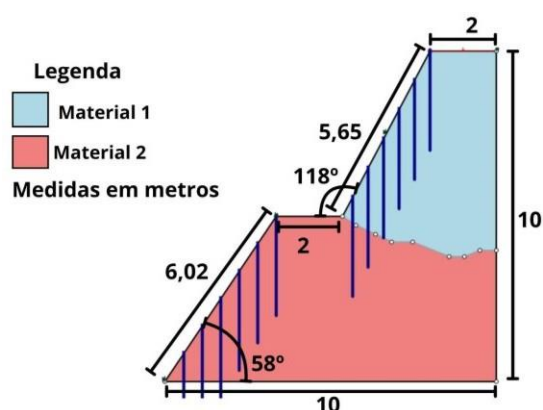


Figura 13. Talude 05 com capim vetiver

Pelo fato de se ter utilizado uma sondagem real, e que essa sondagem apresentou solos com elevada resistência, os fatores de segurança calculados para os taludes sem o Vetiver foram bem elevados, conforme apresentado na Tabela 3, o que já comprova a estabilidade do talude onde a sondagem foi feita. As análises com o Vetiver não apresentaram aumentos significativos nos FS, inclusive, tendo reduzido o FS no método de Morgenstern-Price.

A baixa força de tração utilizada no programa, juntamente com o comprimento do grampo, pode explicar o motivo do Vetiver não ter aumentado muito o FS no método de Bishop. Já pelo método de Morgenstern-Price, as raízes poderiam até ter atrapalhado no equilíbrio das fatias.

Tabela 3. Fatores de Segurança

Taludes	Sem Capim Vetiver		Com Capim Vetiver	
	Método Bishop simplificado	Método Morgenstern-Price	Método Bishop simplificado	Método Morgenstern-Price
Talude 01	13,627	14,171	13,629	14,144
Talude 02	14,630	14,624	14,632	14,594
Talude 03	21,781	21,760	21,783	21,749
Talude 04	39,016	39,004	39,022	38,803
Talude 05	13,653	13,861	13,467	13,853

4 CONCLUSÃO

O trabalho buscou comparar os fatores de segurança de taludes sem e com a presença do capim vetiver, que nas análises foram representados por grampos. O fato dos fatores de segurança não terem aumentado significativamente com a presença dos grampos não significa a ineficácia do sistema vetiver no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, pelo contrário. Como já citado, a presença das raízes do Vetiver aumenta a coesão aparente do solo com o tempo, e é esse aumento que faz com que a tensão resistente de cisalhamento também aumente, conforme a equação de Mohr-Coulomb. A coesão verdadeira dos dois solos utilizados não foi alterada, por isso, a parcela significativa da resistência proporcionada pelo Vetiver não foi levada em consideração.

O capim Vetiver é uma espécie já bastante atuante na bioengenharia e a sua principal característica é a redução da erosão dos solos. Contudo, além disso, ela também garante um aumento na estabilidade de taludes. Por fim, cabe ressaltar a importância do software HYRCAN na análise de taludes, sendo um programa livre que pode contribuir ainda mais para a Geotecnia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. A., Oliveira, R. M. M. (2018). Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano - COBRAMSEG*. Salvador -BA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, João Pedro Noletto. *Alternativas para estabilização preventiva de um talude em zona urbana na cidade de Palmas, Tocantins*. 2019. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.
- Barbosa, M. C. R., Lima, H. M. (2013) Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(1). p.113-120. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832013000100012>
- Brasil (2018). *Manual Técnico para Redução de Riscos de Desastres Aplicado ao Planejamento Urbano: movimentos de massa*. Ministério das Cidades. Brasília.
- Caputo, H. P., Caputo, A. N. (2015) *Mecânica dos Solos e suas aplicações: Mecânica das Rochas, Fundações e Obras de Terra*. São Paulo, SP: LTC.
- Gerscovich, K. H. (2012) *Estabilidade de Taludes*. Rio de Janeiro, RJ: Oficina de Textos.
- Hengchaovanich, D., Nilaweera, N. (1996). An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER*, 1., Bangkok, CD ROM.
- Joppert Jr, Ivan. (2007) *Fundações e Contensões de Edifícios*. São Paulo, SP: Pini.
- Kim, K., Riley, S., Fischer, E., Khan, S. (2022) Greening Roadway Infrastructure with Vetiver Grass to Support Transportation Resilience. *CivilEng* 2022, 3, p.147-164. <https://doi.org/10.3390/civileng3010010>.
- Mikola, Roozbeh Geraili. *HYRCAN: a comprehensive limit equilibrium software package for 2d slope stability analysis*. California: University Of California Berkeley Institute Of Governmental Studies, 2023. 9 p. Disponível em: <https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/126685/preprint_pdf/12fcf6809bb942101b3046b9b16055a3.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- Silva, B. A. (2022) *Uso do Capim Vetiver como interveniente na prevenção de desastres por movimentos de massa*. 57 f. TCC (Especialização) – Especialização em Gestão Pública em Proteção e Defesa Civil, Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022.
- Silva, João Paulo Moreira da. *Uso do Capim Vetiver como interveniente na prevenção de desastres por movimentos de massa*. 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62106/1/000149997.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2024.
- Vaz, A. P. de M. e S., Fiori, A. P., da Silveira, C. T. (2018) Métodos de obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão: Comparação entre o ensaio de cisalhamento direto e cálculo baseado no SPT. *Boletim Paranaense de Geociências*, 74(1), p.1-10. <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v74i1.38906>.
- Truong, P., Van, T. T., Pinnars, E. (2008) *Vetiver system applications: Technical reference manual*. 2 ed. Vietnam: The Vetiver Network International, 127 p.
- Wang G-y, Huang Y-g, Li R-f, Chang J-m, Fu J-l (2020) Influence of vetiver root on strength of expansive soil-experimental study. *PLoS ONE*, 15(12): e0244818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244818>.