

MODELO INTEGRADO DE ESTABILIDADE SUPERFICIAL DE TALUDES NÃO SATURADOS CONSIDERANDO EFEITOS MECÂNICOS E HIDROLÓGICOS DA VEGETAÇÃO

Davi Martins de Aragão*

Estudante de Engenharia Civil – ENC/UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF

Ana Paola do Nascimento Dantas

Aluna do Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF

André Luís Brasil Cavalcante

Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF

RESUMO

Este estudo propõe a formulação de um modelo analítico destinado a avaliar os impactos mecânicos e hidrológicos da vegetação, com foco primordial na segurança, e seu subsequente efeito na estabilidade superficial dos taludes. A análise baseia-se nos parâmetros de um solo do tipo Cambissolo do Distrito Federal, conforme estudado por Wanderley Neto em 2020 e parâmetros do capim vetiver, estudados por Machado (2014), considerando um talude infinito de solo não saturado. Os efeitos hidrológicos do capim vetiver resultaram em um aumento notável da sucção, contribuindo para um significativo aumento do FS ao longo do talude. Os efeitos mecânicos, destacados pela coesão atribuída pelo capim vetiver, levaram a um aumento potencial de até 18 vezes no FS, especialmente na região da zona de raízes. Esses valores superaram consideravelmente os observados em solos não vegetados, apresentando crescimento exponencial e indicando uma relação direta entre a extensão da zona de raízes e a estabilidade, com notáveis incrementos de segurança nessa área específica. Fora dessa região crítica, a presença da vegetação aumentou o FS em até 33% a uma profundidade de 1 metro, comparado a um solo não saturado e sem vegetação. Esses resultados evidenciam a importância dos efeitos hidráulicos da vegetação em toda a extensão do talude e dos efeitos mecânicos principalmente relacionados à profundidade das raízes no solo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Fator de segurança, Capim Vetiver, Modelo analítico, Solo não saturado.

ABSTRACT

This study proposes developing an analytical model to assess vegetation's mechanical and hydrological impacts, with a primary focus on safety and its subsequent effect on the superficial stability of slopes. The analysis is based on parameters from a Cambissolo soil type in the Federal District, as studied by Wanderley Neto in 2020, and parameters of vetiver grass, studied by Machado (2014), considering an infinite slope of unsaturated soil. The hydrological effects of vetiver grass resulted in a noticeable increase in suction, contributing to a significant rise in the FS along the slope. The mechanical effects, highlighted by the cohesion provided by vetiver grass, led to a potential increase of up to 18 times in the FS, especially in the region of the root zone. These values considerably exceeded those observed in unvegetated soils, showing exponential growth and indicating a direct relationship between the extent of the root zone and stability, with notable safety increments in this area. Outside this critical region, vegetation presence increased the FS by up to 33% at a depth of 1 meter compared to unsaturated and unvegetated soil. These results underscore the importance of the hydraulic effects of vegetation across the slope

*Autor correspondente: dvmartins05@gmail.com

and mechanical effects primarily related to root depth in the soil.

KEYWORDS: Slope Stability, Factor of Safety, Vetiver Grass, Analytical Model, Unsaturated Soil.

1. INTRODUÇÃO

A vegetação desempenha um papel crucial na estabilização do solo, desencadeando benefícios significativos, como a redução da poropressão e o aumento da sucção, resultantes da remoção da umidade do solo por meio dos processos de evaporação e transpiração das plantas. Tais fenômenos contribuem de maneira substancial para ampliar a resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, elevam o fator de segurança do talude, como destacado por Lemes (2001).

Feng et al. (2020) enfatizam que os efeitos hidrológicos gerados pela vegetação estão associados à diminuição da poropressão mediante a absorção de água pelas raízes, o que resulta em uma redução na condutividade hidráulica do solo e um incremento na resistência ao cisalhamento. Já os efeitos mecânicos compreendem o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, proporcionado pelo reforço mecânico das raízes, considerado como uma força coesiva adicional ao solo.

O estudo do solo não saturado também encontra barreiras, devido à dificuldade de encontrar parâmetros compatíveis com as variações desse tipo de condição, além de serem de difícil determinação experimental. Nesse sentido, a pesquisa tem o objetivo de contribuir com essa área de estudo da Geotecnia e facilitar a parametrização de componentes de solos não saturados juntamente com variáveis da vegetação.

Dessa forma, este estudo propõe a aplicação de um modelo analítico dos efeitos mecânicos e hidrológicos da vegetação na estabilidade superficial dos taludes, empregando o software Wolfram Mathematica 11.3.

2. METODOLOGIA

A pesquisa continuou a proposta do artigo Modelagem dos Efeitos Mecânicos da Vegetação na Estabilidade Superficial de Taludes (Aragão, Dantas & Cavalcante, 2023). O artigo em questão tratou de analisar os parâmetros de um solo de Cambissolo do Distrito Federal, conforme estudado por Wanderley Neto (2020), além dos parâmetros de vegetação fornecidos por Fiori (2016) para o solo em condição

saturada. Dentro dos intervalos de valores propostos pelo estudo hipotético, o FS pode apresentar um aumento potencial de 23,36% para um talude completamente saturado com vegetação em relação a um talude de mesmas condições sem vegetação. O mesmo tipo de observação foi pretendido no trabalho atual, porém abrangendo os efeitos hidrológicos da vegetação e focado em solos em condição não saturada.

Para facilitar o entendimento da metodologia, um fluxograma detalhado é fornecido na Figura 1, ilustrando todas as etapas:

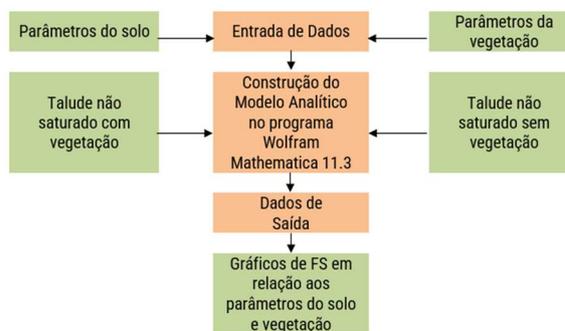


Figura 1. Fluxograma com etapas da pesquisa

Na fase inicial, a abordagem envolveu o desenvolvimento de um modelo analítico utilizando a linguagem de programação Wolfram Mathematica 11.3.

Na segunda fase, foi adotado parâmetros para a implementação na formulação realizada na fase 1, baseados em pesquisas prévias para um tipo de solo típico do Distrito Federal. Foi explorado a curva de retenção de água no solo e a condutividade hidráulica, de acordo com a sucção observada para obtenção do teor de umidade volumétrico.

Adicionalmente, foram incluídas variáveis de vegetação com base nas equações de Feng et al. (2020), restringindo o modelo a uma única espécie vegetal em análise.

A interpretação dos resultados foi facilitada por gráficos, os quais ajudaram a identificar como a vegetação exerce influência sobre o FS.

2.1 Materiais

A análise foi feita para um talude hipotético de superfície plana e superfície de ruptura paralela à superfície do talude, com de inclinação de 40°.

Ademais, é seguido o exemplo de Ng et al. (2015) para a altura do talude de até 5 metros de profundidade, com o nível d'água exatamente abaixo da altura descrita e zona de raízes de 0,5 m de espessura.

2.1.1 Capim Vetiver

Para a análise foi escolhido o capim vetiver, que manifesta seu desenvolvimento ótimo em condições de elevada exposição solar, sendo sensível a sombreamento excessivo (Chaves & Andrade, 2013). Conforme apontado por Troung et al. (2008), apresenta notável resistência a períodos prolongados de seca, inundações e ampla variação térmica, suportando temperaturas que variam entre -15 °C e +55 °C, ideal para o clima local. Além disso, demonstra tolerância a uma faixa de pH no solo de 3,3 a 12,5.

Machado (2014) estudou valores de resistência à tração do capim vetiver e chega aos resultados mostrados na Figura 2, em que é estabelecida a Coesão da Raiz (Cr) em função da profundidade.

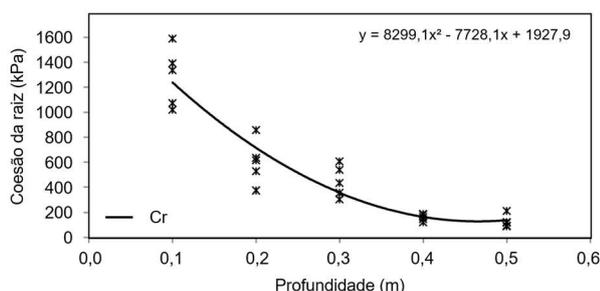


Figura 2. Coesão da Raiz (Cr) pela profundidade do solo de capim vetiver (adaptado de Machado, 2014).

Machado (2014) realizou a coleta de raízes de com a extração de monólitos de dimensões de 0,5 m de largura, 0,5 m de comprimento e 0,5 m de altura, com o intuito de verificar as propriedades de cinco indivíduos do capim vetiver, sem necessariamente atender à profundidade total das raízes desses indivíduos. Por isso, verificou-se e transformou-se a equação da curva da Cr de Machado (2014) em uma função exponencial próxima, onde percebeu-se que em até 1 m de profundidade a coesão das raízes atingiu valores não nulos, conforme a Figura 3. Adotou-se então a curva para raízes de 1 m de profundidade.

Paralelamente, procurou-se uma curva exponencial para representar raízes de 0,5 m, presente na Figura 4, onde considerou-se a Cr máxima proporcional à extensão do sistema radicular.

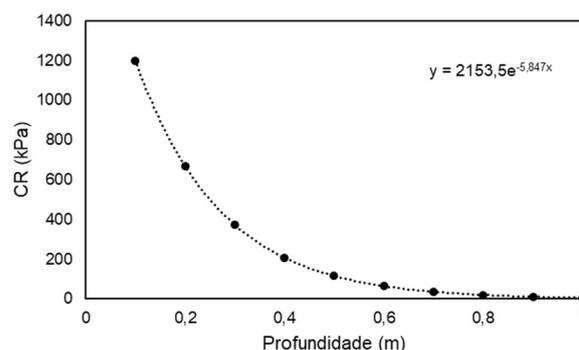


Figura 3. Função exponencial da Coesão da Raiz (Cr) em função da profundidade do solo do capim vetiver para raízes de 1 m (adaptado de Machado, 2014).

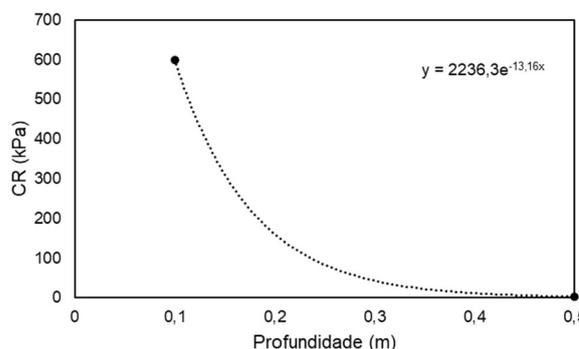


Figura 4. Função exponencial da Coesão da Raiz (Cr) em função da profundidade do solo do capim vetiver para raízes de 0,5 m (adaptado de Machado, 2014).

Teixeira (2018) encontra valores da taxa de transpiração (T) da planta de 8,6 mm/dia durante a época mais quente do ano, e de 4,6 mm/dia, no período de menores temperaturas registradas no monitoramento. Para o presente estudo foi adotada a média de 6,6 mm/dia.

2.1.2 Solo saprolítico

Foi utilizado um solo saprolítico investigado por Wanderley Neto (2020) em ensaios laboratoriais. O solo saprolítico em estudo corresponde a um saprolito fino da ardósia da Unidade A do Grupo Paranoá, localizado na região administrativa do Paranoá.

Apresenta uma textura argilo-arenosa-siltosa, com coloração variando entre cinza claro e bruna-avermelhada, principalmente em camadas menos intemperizadas, localizadas a aproximadamente 100 cm de profundidade (Wanderley Neto, 2020).

O solo é identificado por Cardoso (2002) como SF4 (Saprólito Fino 4). De acordo com o Mapa Pedológico do DF, a amostra pertence à classe Cambissolo, representando 31% da área do DF, conforme indicado pelo Atlas do DF de 2020 da CODEPLAN. Os

Cambissolos são pouco desenvolvidos e associados a relevos mais movimentados, sendo a segunda classe de solo mais prevalente na região, atrás apenas dos Latossolos.

Na Tabela 1, são apresentados os principais parâmetros utilizados para a posterior análise do FS:

Tabela 1. Parâmetros iniciais do solo.

c (kN/m ²)	φ (°)	γ _{nat} (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	γ _w (kN/m ³)
19,5	27,8	20,69	18,41	9,81

Fonte: Wanderley Neto, 2020.

Wanderley Neto (2020) estudou a curva característica (SWRC) do solo em função da umidade gravimétrica (w) com os principais valores da curva apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores relevantes da curva característica.

Sucção (kPa)	Entrada de ar w(%)	Sr (%)	Sucção (kPa)	Residual w(%)	Sr (%)
30	18	100	15000	1	3

Fonte: Wanderley Neto, 2020.

O teor de umidade volumétrica pode ser expresso em termos de umidade gravimétrica como:

$$\theta = w \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1)$$

onde: θ = teor de umidade volumétrica [L³L⁻³];
 w = umidade gravimétrica [L³L⁻³];
 ρ = densidade do solo [ML⁻³];
 ρ_w = densidade da água [ML⁻³].

Cardoso (2002) determinou que a densidade do solo classificado como SF4 é de 2810 kg/m³. É adotada a densidade da água como 1000 kg/m³. Dessa forma o teor de umidade pode ser expresso como θ = 2,81 w.

Um modelo utilizado para calibrar a curva é o proposto por Cavalcante & Zornberg (2017), com um único parâmetro de ajuste hidráulico (δ) proporcional à inclinação inicial e relacionado fisicamente com a distribuição e tamanho dos poros. O teor de umidade volumétrica pode ser descrito em função da sucção total:

$$\theta_w(|\psi|) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(-\delta|\psi|) \quad (2)$$

onde: θ_w(|ψ|) = teor de umidade volumétrica em função da sucção total [L³L⁻³];

θ_r = teor de umidade volumétrica residual [L³L⁻³];
 θ_s = teor de umidade volumétrica saturado [L³L⁻³];
 δ = parâmetro de ajuste hidráulico [M⁻¹L^T²];
 ψ = sucção total [ML⁻¹T⁻²].

Para a curva analisada é utilizada a mesma função mas em termos de umidade gravimétrica. Dessa forma, chega-se na curva de calibração da Figura 5 e no valor 0,0006 kPa-1 para δ, parâmetro de ajuste que melhor se encaixa na curva. Com isso, os valores obtidos de θ_r e θ_s são de respectivamente, 0,05 e 0,45.

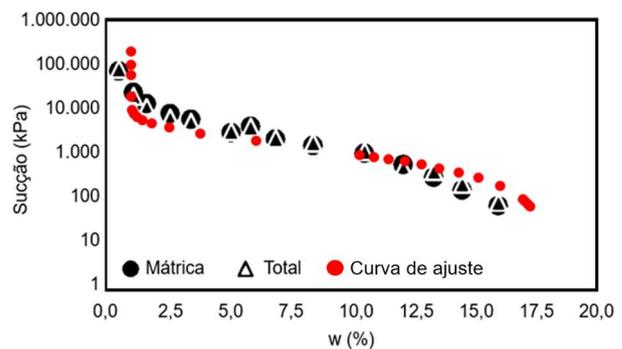


Figura 5. Calibração sobreposta em vermelho (adaptado de Wanderley Neto, 2020).

Para encontrar a condutividade hidráulica do solo utilizou-se o Mapa hidrogeológico dos aquíferos do domínio poroso do DF, conforme Figura 6. Adasa (2018) delineou as características distintivas de cada sistema de aquíferos do DF com base em seus parâmetros específicos. Os sistemas P1 e P2 se destacam por suas notáveis espessuras, aproximadamente 20 metros, e condutividades hidráulicas saturadas com valores superiores a 10⁻⁶ m/s e da ordem de 10⁻⁶ m/s, respectivamente. No sistema P3, a espessura é inferior a 10 metros, enquanto a condutividade apresenta valores inferiores a 10⁻⁶ m/s. Por fim, o sistema P4 exibe as menores espessuras, frequentemente inferiores a 1 metro, e uma condutividade hidráulica extremamente baixa.

De acordo com o mapa, o local de coleta do solo se encontra no sistema P4. Diniz (2019), adota para um ensaio de solo em sistema P3 com condutividade hidráulica igualmente baixa o valor de 1 x 10⁻⁷ m/s. Utilizou-se o mesmo valor para realizar a modelagem.

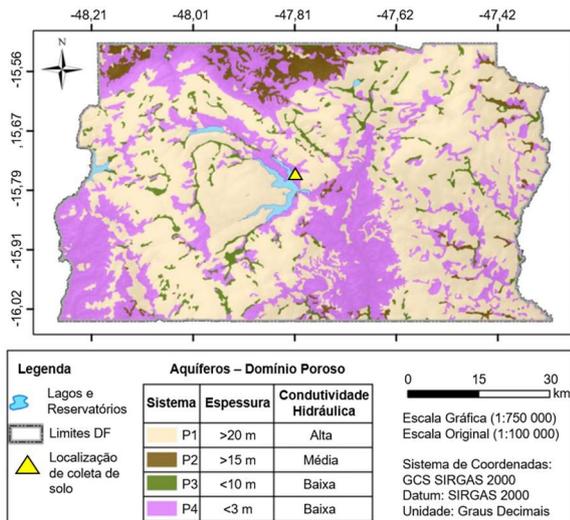


Figura 6. Mapa hidrogeológico dos aquíferos do domínio poroso do Distrito Federal (adaptada de Diniz, 2019).

2.2 Métodos

2.2.1 Análise dos efeitos hidrológicos

A avaliação dos efeitos hidrológicos da vegetação é conduzida conforme Feng et al. (2020), que resumem os efeitos hidrológicos da vegetação como ilustrado na Figura 7, representando um diagrama esquemático de um talude infinito vegetado.

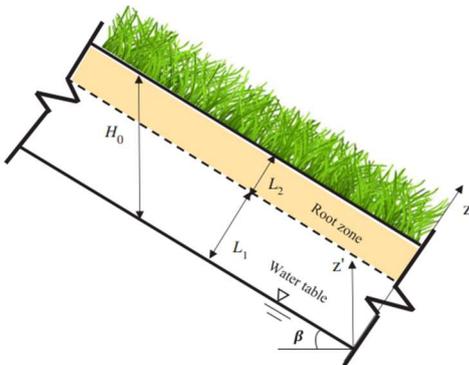


Figura 7. Diagrama esquemático de um talude infinito vegetado (adaptada de Feng et al., 2020).

$$k_z = \begin{cases} A + \frac{1}{k_s \cos^2 i} \frac{T}{L_2} [\exp(-\alpha z^*) - 1] (L^* - L_1^*) \\ A + \frac{1}{k_s \cos^2 i} \frac{T}{L_2} \{ [\exp(-\alpha z^*) - 1] (L^* - z^*) + \exp(-\alpha z^*) [z^* - L_1^* - \alpha^{-1} \exp(\alpha z^*) + \alpha^{-1} \exp(\alpha L_1^*)] \} \end{cases} \quad (5)$$

onde: $A = \exp[\alpha(u_0 - z^*)] + q_0 [\exp(-\alpha z^*) - 1] / k_s$;
 $z^* = z \cos i$ [L];
 $L^* = (L_1 + L_2) \cos i$ [L];
 $L_1^* = L_1 \cos i$ [L];
 q_0 = fluxo superficial inicial no estado estacionário, considerado nulo [LT⁻¹];

A infiltração não saturada de acordo com o balanço de massa de água pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} \cos i - S(z) T_p H(z - L_1) \quad (3)$$

onde: θ_w = teor de umidade volumétrica total [L³L⁻³];
 t = tempo transcorrido [T];
 z = coordenada perpendicular ao talude [L];
 k = condutividade hidráulica do solo [LT⁻¹];
 ψ = sucção [ML⁻¹T⁻²];
 $S(z)$ = função de arquitetura da raiz [L⁻¹];
 T_p = taxa de transpiração [M¹T⁻¹];
 z' = coordenada vertical [L];
 H_0 = distância vertical entre a superfície do talude e a base do talude [L];
 i = ângulo do talude [adimensional].

$H(z - L_1)$ é definido como:

$$H(z - L_1) = \begin{cases} 1, L_1 \leq z \leq (L_1 + L_2) - \text{dentro da zona das raízes} \\ 0, 0 \leq z < L_1 - \text{fora da zona das raízes} \end{cases} \quad (4)$$

onde: L_1 = largura da região fora da zona das raízes [L];

L_2 = largura da região da zona das raízes [L].

A função de arquitetura da raiz $S(z)$ obedece a equação de classificação de raízes de Ng et al. (2015). Para o capim vetiver, que tem sistema radicular fasciculado, $S(z) = 1/L_2$.

Ng et al. (2015) discretizam a equação diferencial anterior em dois tipos de estados: estacionário e transiente, em que apenas o segundo considera o efeito de eventos chuvosos. A equação da condutividade hidráulica não saturada do estado estacionário para raiz do tipo uniforme é expressa como:

α = coeficiente de dessaturação do solo, equivalente a $-\delta$ [M⁻¹LT²];
 u_0 = poropressão exatamente acima do nível d'água, considerada nula [LT⁻¹];
 O primeiro termo da Equação 5 é utilizado para a zona de raízes e o segundo termo para fora da zona de

raízes. Assim, a poropressão u_w pode ser expressa em função de k_z como:

$$u_w = 10 \alpha^{-1} \ln(k_z) \quad (6)$$

Neste processo, foi verificada a variação de poropressão em função da profundidade para um solo sem vegetação e com vegetação, afim de encontrar como a presença da vegetação pode aumentar a sucção presente no solo.

2.2.2 Análise dos efeitos mecânicos

A avaliação dos efeitos mecânicos da vegetação foi conduzida em conformidade com as equações da tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado a partir de Bishop propostas por Cavalcante & Mascarenhas (2021). A coesão aparente das raízes C_r foi extraída pela função do estudo de Machado (2014). A resistência ao cisalhamento do modelo obedeceu a equação proposta:

$$\tau_f = c_r + c' + [(\sigma_n - u_a) + e^{-\delta|u_a - u_w|} (u_a - u_w)] \tan \Phi \quad (7)$$

onde: $(u_a - u_w)$ = sucção mátrica $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 $(\sigma_n - u_a)$ = tensão normal líquida $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 σ_n = tensão normal total $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 u_a = pressão do ar $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 u_w = poropressão $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 c_r = coesão adicional $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 c' = coesão efetiva $[ML^{-1}T^{-2}]$;
 Φ = ângulo de atrito [adimensional];
 δ = parâmetro obtido do ajuste da curva de retenção de água pelo modelo de Cavalcante e Zornberg (2017) $[M^{-1}L^1T^2]$.

A análise utilizou o Fator de Segurança (FS), conforme tópico sobre taludes infinitos com percolação de água paralela à vertente de Fiori (2016), adotando a envoltória de resistência transiente e não saturada de Cavalcante & Mascarenhas (2021). A solução analítica para o FS foi obtida através da equação:

$$F_s = \frac{c_r + c' + \left\{ \left[\gamma_d (H_0 - z') + \gamma_w \int_z^{H_0} \theta_w dz \right] \cos^2 i + e^{-\delta|u_a - u_w|} (-u_w) \right\} \tan \Phi}{\left[\gamma_d (H_0 - z') + \gamma_w \int_z^{H_0} \theta_w dz \right] \sin i \cos i} \quad (8)$$

Considerou-se que a pressão do ar no solo u_a é nula.

3. RESULTADOS

A altura descrita nos gráficos de 0 m a 5 m denota que em 0 m está o nível d'água e em 5 m está a superfície do solo, esquema ilustrado na Figura 8. Os efeitos hidráulicos são percebidos no aumento da sucção no gráfico da Figura 9. A linha cinza tracejada nas Figuras 9, 10, 11 e 13 delimita a zona de raízes entre de 4,50 m e 5 m.

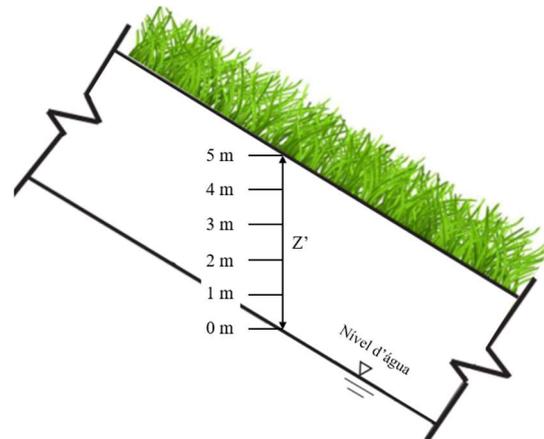


Figura 8. Ilustração da altura vertical z' utilizada nos gráficos.

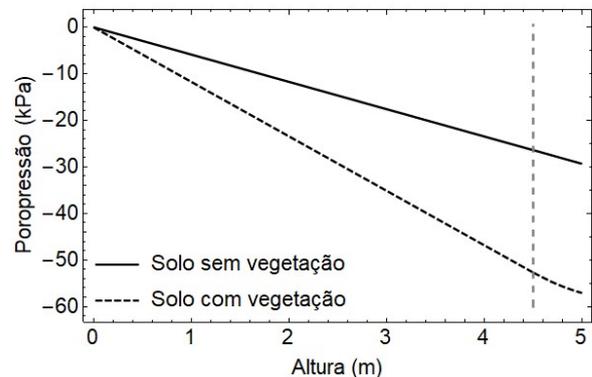


Figura 9. Poropressão em função da altura vertical z' .

Na Tabela 3, são comparados os resultados de poropressão para o solo sem vegetação e o solo com o capim vetiver.

Tabela 3. Poropressão em função da profundidade em pontos relevantes

Altura (m)	Poropressão - solo sem vegetação (kPa)	Poropressão - solo com vegetação (kPa)	Porcentagem de diferença
4,9	-28,8	-56,4	96%
4,5	-26,4	-52,7	100%
4	-23,5	-46,8	100%
3	-17,6	-35,1	100%
2	-11,7	-23,4	100%

Fonte: Autores.

Na Figura 10 e demais figuras deste tópico em que é avaliado o FS, destaca-se em cor vermelha o FS igual a 1, denotando o ponto de ruptura. Em amarelo, evidencia-se um FS de 1,3, indicativo de um nível de segurança considerado baixo, porém aceitável conforme as diretrizes estabelecidas pela Norma Brasileira de Estabilidade de Taludes (NBR 11682/2009). Por outro lado, na coloração verde, observa-se um FS de 1,5, revelando um elevado nível de segurança, conforme as prescrições normativas previstas no mesmo documento de referência. Apresenta-se o FS em função da profundidade para o solo sem vegetação separadamente, com pico de 31,08 a 10 cm da superfície:

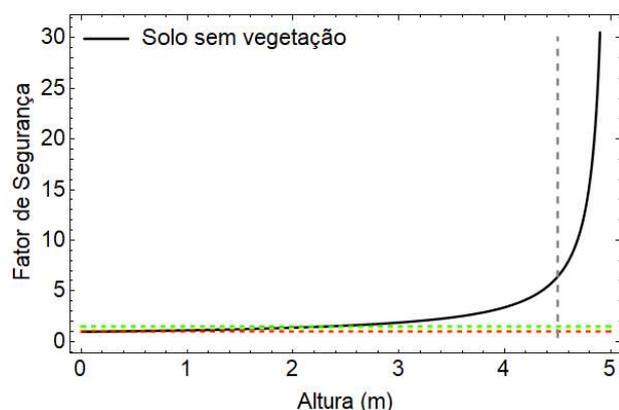


Figura 10. FS em função da altura vertical z' para o solo sem vegetação.

Já para a Figura 11, em que é apresentado o cenário com vegetação, o FS cresce exponencialmente a partir da zona de raízes, chegando ao FS de 569,29 a 10 cm da superfície. Esse fator pode ser explicado pela equação da curva de coesão das raízes de Machado (2014), que indica que a vegetação empregada pode atribuir até 1928 kPa ao solo.

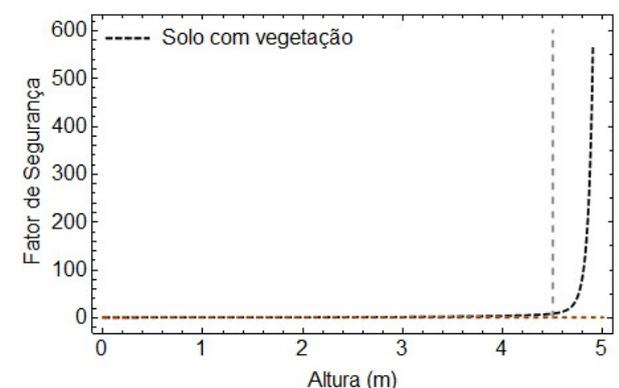


Figura 11. FS em função da altura vertical z' para o solo com vegetação.

A Figura 12 compara os dois cenários antes da zona das raízes, delimitada de 0 a 4,50 m, onde apenas o efeito hidrológico da vegetação é efetivo.

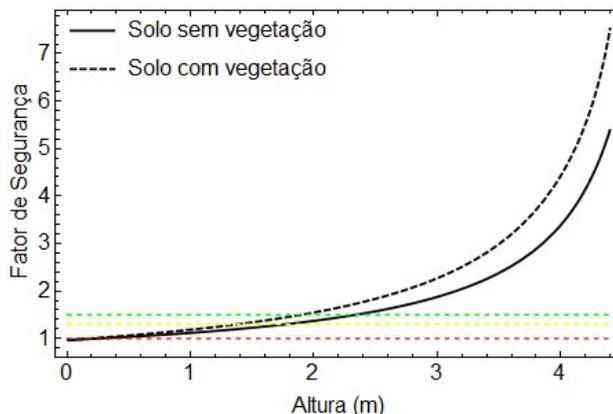


Figura 12. FS em função da altura vertical z' para os dois cenários abaixo da zona de raízes.

Por fim, tem-se a Figura 13, onde estão apresentados os valores de FS para toda a extensão de análise. Nela é perceptível a influência da zona de raízes no aumento exponencial do FS, onde os componentes físicos a favor da segurança seguem o mesmo tipo de crescimento. Na Tabela 4 apresenta-se os principais valores em diferentes faixas de profundidade.

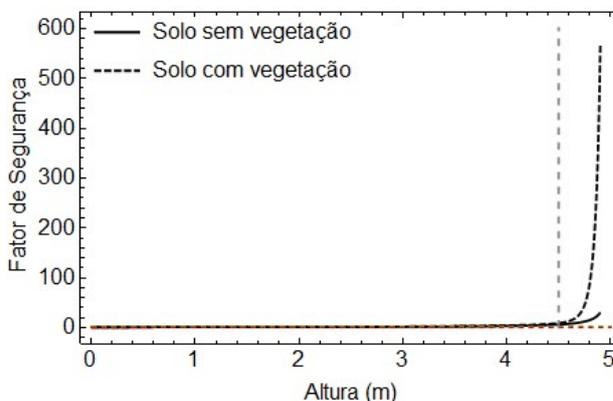


Figura 13. Fator de segurança em função da profundidade para os dois cenários até a superfície.

Tabela 4. FS em função da altura vertical em pontos relevantes.

Altura (m)	FS - solo sem vegetação (kPa)	FS - solo com vegetação (kPa)	Porcentagem de diferença
4,9	31,1	569,3	1731%
4,5	6,5	9,6	47%
4	3,4	4,6	33%
3	1,9	2,3	22%
2	1,4	1,6	13%

Fonte: Autores.

Pelas tabelas desta seção em que se compara a porcentagem de diferença entre os FS e poropressões para solos sem vegetação e com vegetação, percebe-se que a poropressão é 2 vezes maior com a presença de vegetação em todas as faixas de solo e o FS cresce de maneira não linear, atingindo patamares maiores dentro da zona de raízes, sendo até 18 vezes maior em relação ao cenário sem vegetação.

4. CONCLUSÕES

Por meio da análise dos gráficos gerados pelo modelo analítico, torna-se evidente o impacto positivo da vegetação na estabilidade do solo. No contexto dos efeitos hidrológicos do capim vetiver, observou-se um aumento significativo da sucção, alcançando até duas vezes ao longo de todo o talude. Esse fenômeno contribui de maneira benéfica para o aumento do FS.

No que diz respeito aos efeitos mecânicos, a presença do capim vetiver atribui coesão ao solo, resultando em um aumento potencial de até 18 vezes no FS, particularmente na região da zona de raízes. Comparativamente, isso supera significativamente os valores obtidos em solos não vegetados, com um FS chegando a ultrapassar 500, pouco antes da superfície. Isso sugere que a extensão da zona de raízes está diretamente relacionada ao aumento da estabilidade, com incrementos expressivos de segurança nessa área específica. Valores substancialmente elevados também podem estar associados às condições de contorno empregadas na modelagem, tornando-se mais evidentes à medida que a altura vertical se aproxima de 5 metros.

Além dessa região crítica, a presença da vegetação pode elevar o FS em até 33%, a uma profundidade de 1 metro, quando comparado ao FS de um solo não saturado e sem vegetação. Esses resultados indicam que os efeitos hidráulicos da vegetação desempenham um papel crucial ao longo de toda a extensão do talude.

Finalmente, destaca-se a importância de integrar essas descobertas em estratégias práticas de manejo do solo e da vegetação, especialmente em áreas suscetíveis a desastres ambientais. Pesquisas futuras poderiam explorar como o escoamento superficial e a percolação resultantes de eventos chuvosos impactam a estabilidade do solo, levando em consideração as particularidades de cada região, tipo de solo, clima local e outros tipos de vegetação.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 305484/2020-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2009). NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, p. 33.
- ADASA (2018). Avaliação de aquíferos favoráveis para complementação do abastecimento de água no Distrito Federal e locação de regiões atendidas integrado de avaliação de aquíferos favoráveis para ementação do abastecimento de água no Distrito Federal e locação de poços tubulares profundos regiões atendidas e não atendidas pelo sistema Descoberto - Santa Maria / Torto. Relatório Final Integrado. 105 p.
- Aragão, D. M.; Dantas, A. P. N.; Cavalcante, A.L.B. (2023) Modelagem dos Efeitos Mecânicos da Vegetação na Estabilidade Superficial de Taludes. 29º Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Brasília. Brasília. 12 p.
- Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.
- Cavalcante, A.L.B. & Zornberg, J.G. (2017). Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. Int. J. Geomech.
- Chaves, T. A. & Andrade, A. G. (2013). Capim Vetiver (*Vetiveria zizanioides*): Produção de mudas e uso no controle da erosão e na recuperação de áreas degradadas.
- CODEPLAN. (2020). Atlas do Distrito Federal 2020. Brasília, p. 43.
- Diniz, M. S. (2019). Modelagem regional do fluxo de contaminantes inorgânicos sob as condições não saturada e transiente aplicada ao Aterro Controlado do Jôquei Clube de Brasília/DF. Publicação G.DM-333/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126p.
- Feng, S.; Liu, H.W.; Ng, C.W.W. (2020). Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability. Computers and Geotechnics, 2019 Elsevier Ltd. 9 p.
- Fiori, A.P. (2016). Estabilidade de Taludes: Exercícios Práticos. São Paulo: Oficina De Textos. 160 p.
- Lemes, M. R. T. (2001). Revisão dos Efeitos da Vegetação em Taludes. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS, 140 p.

- Machado, L. (2014). Comportamento do capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) como contribuição na estabilização de talude da margem do Rio São Francisco. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão. 55 p.
- Ng, C.W.W., LIU, H.W. & FENG, S. (2015). Analytical solutions for calculating pore water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. *Can Geotech J.* 52:1981–92.
- Teixeira, D. L. (2018). Modelagem da evapotranspiração e da capacidade de extração de nutrientes/poluentes em sistemas alagados construídos – Viçosa, MG, 2018. xiv, 91f.: il. (algumas color.); 29 cm.
- Truong, P.; VAN TAN, T.; P. E. (2008). Sistema de aplicação Vetiver: manual de referência técnica. 2. ed. San Antonio, Texas: The Network International. 116 p.
- Wanderley Neto, R. V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 344/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.