

## FORMULAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA CONSIDERANDO A PRESENÇA DE VEGETAÇÃO

*Gean Paulo Michel*<sup>1\*</sup> & *Masato Kobiyama*<sup>2</sup> & *Roberto Fabris Goerl*<sup>3</sup>

**Resumo** – Os escorregamentos são desastres hidrológicos que constantemente geram prejuízos à sociedade. A susceptibilidade de uma encosta a escorregamentos pode ser afetada pela presença de vegetação, entretanto, este efeito normalmente é desconsiderado na análise de estabilidade. O presente trabalho teve por objetivo adicionar parâmetros relacionados aos efeitos mecânicos oriundos da presença de vegetação à equação do Fator de Segurança ( $FS$ ). Os parâmetros inseridos foram coesão das raízes ( $c_r$ ), sobrecarga das árvores ( $S_w$ ), e tensão gerada pelo vento ( $V_e$ ). Considerando as características hipotéticas estabelecidas para a encosta, o  $FS$  mostrou grande sensibilidade a  $c_r$ . A sensibilidade a  $S_w$  foi moderada e a  $V_e$  foi pequena. A sensibilidade de  $FS$  aos parâmetros inseridos diminui com o aumento da profundidade do solo da encosta.

**Palavras-Chave** – Escorregamentos, Fator de Segurança, Vegetação

## SAFETY FACTOR FORMULATION WITH VEGETATION-RELATED PARAMETERS

**Abstract** – The landslides are hydrological disasters that constantly cause damages to the society. Although the slope susceptibility to landslides can be affected by the vegetation, this effect is usually neglected in slope stability analysis. The present work aims to insert parameters related to the mechanical effects of the vegetation into Safety Factor ( $FS$ ) formulation. The inserted parameters were root cohesion ( $c_r$ ), tree surcharge ( $S_w$ ) and wind load ( $V_e$ ). The sensitivity analysis of  $FS$  indicated the strong influence of  $c_r$ , moderate influence of  $S_w$ , and small influence of  $V_e$ . The sensitivity of  $FS$  to the inserted parameters decreases with the increase of the soil thickness.

**Keywords** – Landslides, Safety Factor, Vegetation

### 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, nos últimos anos, os escorregamentos de terra vitimaram centenas de pessoas. A identificação e o mapeamento de áreas susceptíveis a estes desastres hidrológicos são procedimentos importantes no gerenciamento tanto de desastres naturais quanto de bacias hidrográficas. Tais procedimentos podem ser realizados de diversas maneiras, entre as quais, encontra-se o uso dos modelos computacionais.

Os modelos comumente utilizados para essa finalidade são SHALSTAB (Dietrich & Montgomery, 1998), SINMAP (Pack *et al.*, 1998), e TRIGRS (Baum *et al.*, 2002), os quais baseiam-se no acoplamento da formulação de estabilidade de encosta infinita a uma formulação hidrológica. As formulações que demonstram a estabilidade de encostas infinitas geralmente são expressas em termos de Fator de Segurança ( $FS$ ). Em geral, na formulação do  $FS$ , a presença de vegetação é desconsiderada. Entretanto, nos locais onde o clima é quente e úmido, como em boa parte do território brasileiro, esta presença deveria não deveria ser negligenciada. A influência da vegetação

<sup>1</sup> Bolsista CNPq, Doutorando do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) geanpmichel@gmail.com

<sup>2</sup> Bolsista CNPq, Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) masato.kobiyama@ufrgs.br

<sup>3</sup> Bolsista Reuni, Doutorando do Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPR) roberto.fabris@gmail.com

pode ser positiva ou negativa para a estabilidade das encostas, dependendo das condições da encosta e da própria vegetação. Segundo Greenway (1987), a vegetação pode gerar dois tipos de efeitos em relação à estabilidade das encostas: mecânicos e hidrológicos.

Dentre os efeitos mecânicos destacam-se a coesão originada pelas raízes, a sobrecarga originada pelo peso da vegetação e a tensão cisalhante gerada pela incidência do vento na copa das árvores. Dentre os hidrológicos, são mais relevantes a interceptação da chuva pela copa das árvores, aumento da evapotranspiração e aumento da capacidade de infiltração.

Os efeitos mecânicos da vegetação podem ser inseridos na formulação que descreve a estabilidade de encostas infinitas (representada pelo  $FS$ ). Os efeitos hidrológicos não são considerados diretamente pelo  $FS$ , por isso, geralmente, são contemplados por uma formulação hidrológica a parte. Assim, o objetivo do presente trabalho foi construir uma nova formulação de  $FS$  considerando os efeitos mecânicos gerados pela presença da vegetação e discutir seus efeitos na estabilidade por meio de análise de sensibilidade.

## 2. TEORIA

### 2.1. Fator de segurança sem vegetação

O  $FS$  é definido como a soma das forças resistentes sobre a soma das forças cisalhantes em uma encosta. Desta maneira, quando as forças que promovem a estabilidade são exatamente iguais às forças que promovem a instabilidade, o  $FS$  é igual a um; quando o  $FS$  é menor que um, a encosta está em condição de falha; e quando  $FS$  é maior que um, a encosta está estável. Por isso,  $FS$  é um parâmetro muito utilizado para avaliar a probabilidade de ocorrência de falhas em encostas.

Devido aos diferentes tipos de escorregamentos, o  $FS$  pode assumir diversos equacionamentos. Para análise de escorregamentos translacionais, emprega-se o conceito de estabilidade de encostas infinitas (Selby, 1993). Neste conceito considera-se uma possível superfície de ruptura. A profundidade desta superfície é considerada relativamente pequena comparada ao comprimento da encosta  $e$ , por isso, o conceito é chamado de encosta infinita. Há também o pressuposto de que a superfície do lençol freático é paralela à superfície de ruptura e à superfície do solo. Esta superfície de ruptura muitas vezes forma-se em locais onde a água encontra dificuldade para infiltrar verticalmente devido a um alto contraste na condutividade hidráulica. Desta maneira há fluxo lateral, e nestas condições a suposição de fluxo paralelo à superfície torna-se razoável. A Fig. 1 mostra um esquema do modelo de encosta infinita.

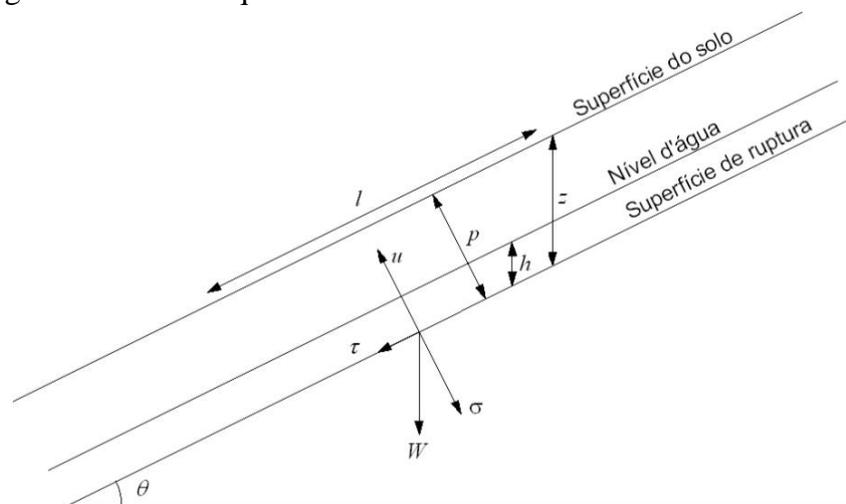


Figura 1 – Representação do Modelo de Encosta Infinita

A formulação do modelo de estabilidade de encosta infinita baseia-se na lei de Mohr-Coulomb em uma abordagem bidimensional, onde, no momento da ruptura de uma encosta, o peso do solo torna-se igual a resultante das forças estabilizadoras:

$$\tau = C + (\sigma - u) \cdot \tan\phi \quad (1)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante no momento da ruptura [ $\text{N/m}^2$ ];  $C$  é a coesão total [ $\text{N/m}^2$ ];  $\sigma$  é a tensão normal [ $\text{N/m}^2$ ];  $u$  é a poro-pressão [ $\text{N/m}^2$ ]; e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo [ $^\circ$ ].

O peso do solo por unidade de largura pode ser expresso por:

$$W = g \cdot l \cdot \rho_s \cdot p \quad (2)$$

onde  $l$  é o comprimento da encosta [ $\text{m}$ ];  $\rho_s$  é a densidade do solo úmido [ $\text{kg/m}^3$ ];  $g$  é a aceleração gravitacional [ $\text{m/s}^2$ ]; e  $p$  é a espessura do solo [ $\text{m}$ ].

A profundidade vertical do solo ( $z$ ) pode ser representada da seguinte maneira:

$$z = \frac{p}{\cos\theta} \quad (3)$$

onde  $\theta$  é a declividade da encosta [graus].

A componente do peso paralela à encosta representa  $\tau$ , enquanto que a componente do peso perpendicular à encosta representa  $\sigma$ . Tensões são expressas em força por unidade de área, portanto, ao decompor os vetores do peso, pressupõem-se uma análise bidimensional de talude infinito, onde é considerada uma largura unitária para a massa de solo estendendo-se por toda extensão ( $l$ ) da encosta analisada. Desta maneira, ao dividir as componentes da força peso por  $l$ , obtém-se a tensão cisalhante e a tensão normal por unidade de largura.

$$\tau = \frac{W \cdot \sin\theta}{l} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{W \cdot \cos\theta}{l} \quad (5)$$

Substituindo as Eqs. (2) e (3) nas Eqs. (4) e (5) obtém-se.

$$\tau = g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \quad (6)$$

$$\sigma = g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \cos^2\theta \quad (7)$$

A poro-pressão ( $u$ ) é caracterizada pela pressão a que a água situada no interior dos poros do solo está submetida, e atua no sentido de aliviar a tensão normal da encosta. Esta variável pode ser expressa de diversas maneiras e sua formulação depende da complexidade com a qual os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia serão abordados. A pressão dos poros pode ser expressa por:

$$u = g \cdot \rho_w \cdot h \cdot \cos^2\theta \quad (8)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água [ $\text{kg/m}^3$ ] e  $h$  é a altura da coluna d'água dentro da camada de solo [ $\text{m}$ ].

Selby (1993) substituiu as Eqs. (6), (7) e (8) na Eq. (1) aplicando-a a modelos de estabilidade de encosta infinita:

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = C + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - g \cdot \rho_w \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\phi \quad (9)$$

Considerando que a expressão à esquerda da igualdade na Eq. (9) representa as forças cisalhantes e a expressão apresentada à direita representa as forças estabilizantes, a razão entre as duas expressões gera o  $FS$ .

$$FS = \frac{C + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - g \cdot \rho_w \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\phi}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \quad (10)$$

A Eq. (10) é a formulação para o fator de segurança de uma encosta infinita através de uma abordagem bidimensional. Nela são desconsiderados os efeitos gerados pelas laterais do bloco de solo a ser desestabilizado. Esta aproximação é válida para blocos de solo com larguras superiores a 10 m (Hammond *et al.*, 1992). Em rupturas mais estreitas que 10 m, a análise bidimensional pode

ser considerada conservadora, pois prediz fatores de segurança menores do que os reais ou aqueles calculados através de uma análise tridimensional.

## 2.2. Fator de segurança com vegetação

Os efeitos mecânicos gerados pela presença da vegetação na estabilidade das encostas podem ser inseridos na equação utilizada para cálculo do  $FS$  para encostas infinitas. A coesão gerada pela presença das raízes no solo pode ser adicionada a coesão do solo, aumentando dessa maneira o valor total do termo de coesão.

$$C = c_s + c_r \quad (11)$$

onde  $c_s$  é a coesão do solo e  $c_r$  é a coesão gerada pela presença das raízes. O efeito mecânico das raízes consiste no aumento da resistência pela ligação das fibras das raízes com o solo, gerando a chamada coesão das raízes ( $c_r$ ). O  $\phi$  permanece inalterado neste processo (Fig. 2). Neste caso, o reforço originado pela presença das raízes ( $\Delta S$ ) é igual a  $c_r$ , já que  $\phi$  é igual nas parcelas de solo com e sem presença de raízes.

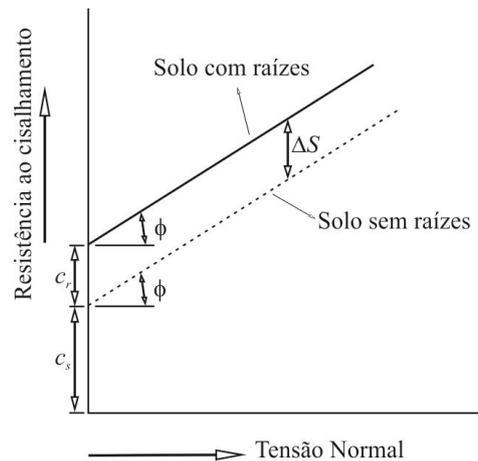


Figura 2 – Efeito do reforço do solo originado pelas raízes (Adaptado de Coppin e Richards, 1990)

Diferentemente de  $c_s$ , que apresenta um comportamento não muito variável ao longo de solos homogêneos,  $c_r$  varia diretamente com a variação da Razão de Área de Raízes ( $RAR$ ). A  $RAR$  é o quociente entre a área ocupada pelas raízes ( $A_r$ ) e a área do solo ( $A$ ). A resistência ao cisalhamento cresce com o aumento da concentração de raízes presentes no solo (Wu *et al.*, 1979). A  $RAR$  proporciona uma medida da concentração das raízes e, como consequência, é fortemente influenciada pelo solo local, características climáticas, manejo e uso do solo e principalmente pelas espécies vegetais. Em geral, a  $RAR$  decresce com o aumento da profundidade do solo e da distância em relação ao tronco da árvore (Greenway, 1987; Bischetti *et al.*, 2005).

Diversos autores comentaram que a  $RAR$  pode atingir valores próximos de 1% (Bischetti, 2005; Abernethy e Rutherford, 2001). De Baets *et al.* (2008) relataram que a  $RAR$  é mais importante, até mesmo, que a resistência à tração individual de cada raiz para o aumento da resistência do solo ao cisalhamento.

Estudos pioneiros indicavam que a contribuição de  $c_r$  para a estabilidade das encostas situa-se em torno de 5 kPa (Wu *et al.*, 1979; Waldron, 1977). Atualmente, estima-se que, em determinados locais,  $c_r$  pode alcançar valores muito mais significativos (próximos de 100 kPa e em alguns casos ultrapassando 300 kPa) sob determinadas circunstâncias (Bischetti *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2012; De Baets *et al.*, 2008).

Considerando que a  $RAR$  geralmente sofre um decaimento com o aumento da profundidade e que a presença significativa das raízes pode ser encontrada até uma profundidade de 3 metros, o

presente trabalho adotou uma taxa de decaimento linear da *RAR* com o aumento da profundidade. Desta maneira, próximo à superfície a *RAR* é máxima. Ao aproximar-se de 3 metros de profundidade a *RAR* tende a ser nula. Portanto, em razão do decréscimo da *RAR*, há a redução em igual proporção da coesão originada pela presença das raízes. A partir de 3 m de profundidade  $c_r$  passou a ser desconsiderada.

Hammond *et al.* (1992) relataram que em uma situação real, a superfície de ruptura de um escorregamento estende-se até a superfície do solo, passando provavelmente por uma zona de raízes. Desta maneira, mesmo em superfícies de ruptura que se estabelecem abaixo da zona de raízes ainda há certa contribuição de  $c_r$  para a elevação do *FS*. Em se tratando de modelagem de estabilidade de encostas, os mesmos autores relataram que para superfícies de ruptura maiores que aproximadamente 10 metros, onde a resistência basal é muito mais significativa que a lateral, análises tridimensionais e bidimensionais equivalem-se.

A presença da vegetação nas encostas gera uma sobrecarga devido ao seu peso ( $S_w$ ). Esta sobrecarga tem uma componente paralela à encosta, a qual favorece o cisalhamento do solo, e uma componente perpendicular à encosta, a qual favorece sua estabilização. Em geral considera-se o peso das árvores distribuído uniformemente sobre a encosta. Bishop e Stevens (1964) estimaram uma tensão média aplicada pelo peso das árvores em toda a extensão da encosta. O valor encontrado aproximava-se de 2,5 kPa. Wu *et al.* (1979), através de medições e contagens em campo, obtiveram um valor médio de 5,2 kPa para  $S_w$ .

A  $S_w$  pode exercer influência positiva ou negativa a uma encosta. O efeito depende de  $\phi$  e  $\theta$ . Selby (1993) comentou que a tensão cisalhante atuante em uma encosta pode ser expressa por  $S_w \sin\theta$  e a tensão normal por  $S_w \cos\theta$ . A resistência gerada pelo atrito entre as camadas do solo pode ser expressa por  $S_w \cos\theta \tan\phi$ . Portanto, quando  $\theta$  for maior que  $\phi$  o efeito é prejudicial. Caso contrário o efeito é benéfico.

A incidência do vento na copa das árvores gera uma tensão cisalhante no solo ( $V_e$ ). Hsi e Nath (1970) realizaram estudos para quantificação desta tensão. Para correntes de ar movimentando-se paralelamente a uma superfície plana, a tensão cisalhante por unidade de área da copa transmitida para o solo devido à pressão exercida pelo vento ( $t_v$ ) pode ser descrita por:

$$t_v = 0,5 \cdot \rho_a \cdot U^2 \cdot C_D \quad (12)$$

onde  $\rho_a$  é densidade do ar (1,22 kg/m<sup>3</sup> a 20°C e 1013 mb);  $U$  é a velocidade do vento [m/s] e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto. Hsi e Nath (1970) demonstraram que embora o perfil de velocidade do vento que incide diretamente na copa das árvores nas bordas de uma floresta seja variável, em meio a uma floresta este perfil torna-se praticamente uniforme. O coeficiente de arrasto foi definido por Hsi e Nath (1970) a partir da medição da tensão cisalhante causada na superfície do solo pela incidência do vento na copa das árvores do modelo reduzido de floresta. Desta maneira,  $C_D$  tem grande variabilidade nas bordas da floresta, indo de valores próximos a 0,2 até valores bem menores, próximos de 0,002. Em meio à floresta, os valores de  $C_D$  estabilizam-se em um intervalo entre 0,01 e 0,02.

Considerando uma corrente de ar soprando paralela a uma superfície inclinada, a tensão gerada pelo vento na superfície do solo pode ser expressa por:

$$t_v = 0,5 \cdot \rho_a \cdot U^2 \cdot C_D \cdot \cos^2 \theta \quad (13)$$

A tensão cisalhante total ( $V_e$ ) transmitida para uma encosta infinita é:

$$V_e = t_v \cdot A_c \quad (14)$$

onde  $A_c$  é a área da copa das árvores. Em uma análise de encosta infinita,  $A_c$  pode ser expressa pela altura das árvores ( $h_a$ ) multiplicada pela unidade, já que este tipo de análise baseia-se no pressuposto de largura unitária.

Considerando que  $h_a = 20$  m e  $C_D = 0,1$  (próximo do maior valor estimado por Hsi e Nath, 1970), o valor máximo de  $V_e$  alcança 1,1 kPa para uma velocidade de vento de 30 m/s. Escorregamentos de terra são fenômenos que quase sempre ocorrem em locais de declividade acentuada. Considerando a Eq. (13), pode-se dizer que, nestes locais, a declividade faz com que a influência do vento seja atenuada.

Para inserção dos parâmetros relacionados à vegetação no  $FS$ , a componente paralela à encosta de  $S_w$  e  $V_e$  foram adicionadas às tensões cisalhantes da encosta. Portanto a Eq. (6) torna-se:

$$\tau = g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta + S_w \cdot \sin\theta + V_e \quad (15)$$

A componente perpendicular à encosta de  $S_w$  deve ser adicionada às tensões normais da encosta. Assim, a Eq. (7) torna-se:

$$\sigma = g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \cos^2\theta + S_w \cdot \cos\theta \quad (16)$$

Utilizando as Eqs. (15) e (16), a Eq. (10) pode ser reescrita:

$$FS = \frac{c_s + c_r + (g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \cos^2\theta - g \cdot \rho_w \cdot h \cdot \cos^2\theta + S_w \cos\theta) \cdot \tan\phi}{g \cdot \rho_s \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + S_w \cdot \sin\theta + V_e} \quad (17)$$

Os efeitos hidrológicos da presença da vegetação afetam indiretamente o  $FS$  através da variação da altura da coluna d'água ( $h$ ). Por esse motivo, estes efeitos não foram contemplados pela Eq. (17).

### 3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A sensibilidade da Eq. (17) à variação dos parâmetros foi conduzida segundo metodologia estabelecida por Hammond *et al.* (1992) e posteriormente aplicada por Borga *et al.* (2002). Este tipo de análise pode ser de grande utilidade na identificação das variáveis mais importantes e então servir de guia para coleta de dados em campo.

Esta metodologia baseia-se no estabelecimento de valores médios para os parâmetros de entrada, chamados valores centrais ( $X_{central}$ ) e, posteriormente, na variação de cada parâmetro individualmente, enquanto todos os outros permanecem constantes. A variação dos parâmetros de entrada também gera variação no  $FS$  ( $\Delta FS$ ). Desta maneira, pode-se estabelecer uma hierarquização de sensibilidade do  $FS$  à variação dos parâmetros de entrada. Assim, a variação do  $FS$  e dos parâmetros de entrada podem ser estabelecidas segundo as Eqs. (18) e (19), respectivamente.

$$\Delta FS = \frac{FS_X - FS_{X_{central}}}{FS_{X_{central}}} \times 100 \quad (18)$$

$$\Delta X = \frac{X - X_{central}}{X_{central}} \times 100 \quad (19)$$

onde  $X$  é o valor alterado do parâmetro de entrada;  $FS_{X_{central}}$  é o  $FS$  obtido com os valores centrais dos parâmetros; e  $FS_X$  é o  $FS$  obtido após variação do parâmetro em análise.

Os valores utilizados para os parâmetros da formulação do  $FS$  foram determinados a partir de valores da bibliografia (Coppin e Richards, 1990; Wu *et al.*, 1979). Os valores centrais, mínimos e máximos utilizados para avaliação da sensibilidade do  $FS$  estão na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do  $FS$ .

Parâmetro	Valor Central	$\Delta$
$c_s$ (kPa)	12	$\pm 100\%$
$\phi$ ( $^\circ$ )	30	$\pm 70\%$
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1750	$\pm 20\%$
$z$ (m)	1; 2; 5; 10	$\pm 100\%$
$h/z$ (%)	50	$\pm 100\%$

Parâmetro	Valor Central	$\Delta$
$c_r$ (kPa)	10	$\pm 100\%$
$S_w$ (kPa)	2,6	$\pm 100\%$
$V_e$ (kPa)	0,5	$\pm 100\%$
$\theta$ ( $^\circ$ )	25	-50; +100%

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 mostra a análise de sensibilidade do  $FS$  à variação dos parâmetros para a profundidade de 1 e 5 m. Observa-se que o aumento da resistência do solo ( $c_s$  e  $\phi$ ) e da contribuição das raízes ( $c_r$ ) eleva os valores do  $FS$ . Em contrapartida, o aumento de  $\theta$ ,  $z$ ,  $h/z$ ,  $S_w$  e  $V_e$ , reduzem os valores do  $FS$ . Em relação aos parâmetros relacionados à vegetação, há grande sensibilidade de  $FS$  à  $c_r$  ( $\pm 40\%$  em  $z = 1$  m). A sensibilidade de  $FS$  à  $S_w$  e  $V_e$  é menor ( $\pm 10\%$  e  $\pm 5\%$ , respectivamente, em  $z = 1$  m). Em profundidades mais elevadas, a sensibilidade de  $FS$  aos parâmetros relacionados à vegetação diminui, sendo que, a 5 m de profundidade, a influência de  $c_r$  já não existe e  $S_w$  e  $V_e$  são praticamente nulas.

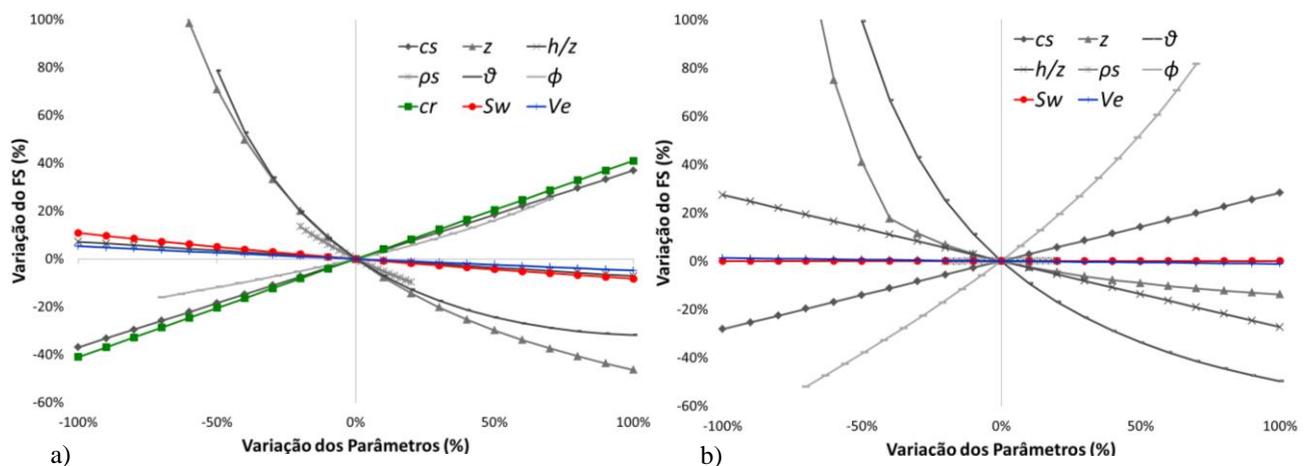


Figura 3 – Análise de Sensibilidade do FS (Valor central de  $z$  igual a 1 m (a) e 5 m (b))

O  $FS$  é extremamente dependente de  $\theta$  nas duas condições simuladas. Sendo assim, a correta estimativa da declividade é de grande relevância. Os termos relacionados à coesão afetam o  $FS$  de maneira mais acentuada em solos rasos que em solos espessos. De maneira recíproca, o  $FS$  é mais afetado pela variação de  $\phi$  em solos mais espessos. Esta condição se estabelece por que a resistência devido ao atrito entre as partículas (relacionada a  $\phi$ ) eleva-se com o aumento da tensão normal à encosta aplicada pelo peso do solo. Desta maneira, encostas com baixa declividade também contribuem para o aumento da resistência devido ao atrito.

Devido à dependência linear entre  $c_r$  e  $z$  adotada pelo presente trabalho, a sensibilidade do  $FS$  à variação de  $z$  demonstrou ser muito mais acentuada do que a apresentada por Hammond *et al.* (1992) e Borga *et al.* (2002). Esta sensibilidade é ainda mais pronunciada em solos rasos, onde há maior presença de raízes. Em solos com profundidades maiores que 3 m (profundidade limite na qual foi computada a ação das raízes) a variação de  $FS$  devido a  $z$  segue dois comportamentos distintos. O primeiro comportamento mostra uma grande sensibilidade do  $FS$  e isto ocorre até que  $z$  aproxime-se da profundidade limite. A partir da profundidade limite é observado um padrão de variação de  $FS$  muito mais ameno.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os escorregamentos cada vez mais vêm causando desastres no Brasil e no mundo. A vegetação pode exercer influência relevante sobre a estabilidade das encostas modificando sua susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos. A análise de sensibilidade do equacionamento proposto para o  $FS$  demonstrou que  $c_r$  pode influenciar fortemente, de maneira positiva, no

resultado das análises de estabilidade. A influência deste parâmetro decai com o aumento de  $z$ . Por isso, ao considerar a atuação das raízes no reforço da encosta, observar a profundidade do solo na qual poderá se formar a superfície ruptura é de extrema importância. A sensibilidade do  $FS$  ao parâmetro  $S_w$  foi moderada em condições de solos pouco espessos, onde influencia negativamente o  $FS$ . O aumento de  $z$  gera atenuação da sensibilidade de  $FS$  à  $S_w$ . Em geral, o efeito de  $S_w$  somente será adverso nos casos onde  $\theta$  é maior que  $\phi$ . O  $FS$  mostrou-se pouco sensível ao parâmetro  $V_e$ , além disso, a presença deste efeito está vinculada a uma série de condições como velocidade e direção do vento, e características da cobertura vegetal. Por isso, sua consideração não é de grande relevância no processo de análise de suscetibilidade a escorregamentos.

## REFERÊNCIAS

- ABERNETHY, B.; RUTHERFURD, I. D. (2001) The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15(1), pp. 63-79.
- BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. (2002) *TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid based regional slope-stability analysis*. USGS open-file report 02-424.
- BISCHETTI, G.; CHIARADIA, E. A.; EPIS, T.; MORLOTTI, E. (2009) Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324(1-2), pp. 71-89.
- BISCHETTI, G.; CHIARADIA, E. A.; SIMONATO, T.; SPEZIALI, B.; VITALI, B.; VULLO, P.; ZOCCO, A. (2005). Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278(1-2), pp. 11-22.
- BORGA, M.; FONTANA, G. D.; GREGORETTI, C.; MARCHI, L. (2002) Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes*, 16(14), pp. 2833-2851.
- COPPIN, N.J.; RICHARDS, I.G. (1990) *Use of Vegetation in Civil Engineering*. C.I.R.I.A. Burrells, London.
- DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; DE BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. (2008) Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305(1-2), pp. 207-226.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. (1998) *SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, 29p.
- GREENWAY, D. R. (1987) Vegetation and Slope Stability. In: Anderson M. F. and K. S. Richards (Eds.) *Slope Stability*. Wiley and Sons, New York.
- HAMMOND, C.; et al. (1992) *Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0*. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- HSI, G.; NATH, J. H. (1970) Wind drag within simulated forest canopies. *Journal of Applied Meteorology*, 9, pp. 592-602.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. (1998) *Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00*. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C. Canada (www.tclbc.com).
- SELBY, M. J. (1993) *Hillslope materials and processes*. Oxford [etc.]: Oxford university press.
- WALDRON, L. J. (1977) The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5), pp. 843-849.
- WU, T. H.; MCKINNELL III, W. P.; SWANSTON, D. N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 16, n. 1, p. 19-33.