

# Previsão de eventos perigosos de escorregamentos a partir do fator de segurança 3D

Silva, A.F.

USP/EESC, São Carlos, São Paulo, Brasil, [alinefreitassilva@uol.com.br](mailto:alinefreitassilva@uol.com.br)

Zuquette, L.V.

USP/EESC, São Carlos, São Paulo, Brasil, [lazarus1@sc.usp.br](mailto:lazarus1@sc.usp.br)

**Resumo:** Foi desenvolvido um conjunto de procedimentos que permitam a previsão de escorregamentos em escalas maiores que 1:10.000 e estes foram aplicados em oito áreas na cidade de Campos do Jordão (SP). Este trabalho apresenta esta metodologia que é baseada em parâmetros geotécnicos utilizando-se do cálculo de fator de segurança tridimensional sendo combinada com modelo de infiltração e o resultado de sua aplicação em uma dessas áreas. Os resultados obtidos para esta, assim como, para as demais áreas são bastante promissores e refletiram as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de cada área.

**Abstract:** It was developed a set of procedures for landslide forecasting on scales larger than 1:10.000 and these were applied in eight areas in the city of Campos do Jordão (SP). This paper presents a methodology that is based on geotechnical parameters using the calculation of 3D safety factor which is combined with an infiltration model. The outcome of the application of these procedures in one of these areas is shown. The results for this area, as well as for the other areas are very promising and reflected the geological conditions, geotechnical and hydrogeological in each area.

## 1. INTRODUÇÃO

Mais intensamente nos últimos anos, a avaliação do hazard (evento perigoso) e do risco em relação a escorregamentos tem se tornado um assunto de interesse prioritário para ambos geocientistas e engenheiros tanto para atender comunidades locais quanto para áreas maiores em muitos lugares no mundo. Isto porque, escorregamentos rasos são freqüentemente observados em áreas montanhosas após chuvas intensas, resultando em perdas de vidas e danos para o ambiente.

Um evento perigoso (hazard) é a probabilidade de ocorrer um fenômeno potencialmente danoso em uma dada área em um dado período de tempo (VARNES, 1984). Por isso, previsão de eventos perigosos é amplamente utilizado em planejamento urbano, em projetos lineares, tais como, rodovias e

estradas, dutos, e linhas de transmissão. Qualquer sistema de previsão de eventos perigosos para escorregamentos deve responder a três questões chave: (1) a magnitude, (2) a localização e (3) o tempo de recorrência (XIE et al., 2007).

A probabilidade pode ser referente à probabilidade de ocorrência em um dado período, ou à probabilidade gerada devido à incerteza de parâmetros geotécnicos ou de modelos geotécnicos, ou à freqüência, intensidade, e duração de eventos deflagradores (CHOWDHURY e FLENTJE, 2002).

Os métodos para elaboração de cartas de eventos perigosos relativo a escorregamentos podem ser basicamente divididos em dois grandes grupos: qualitativo e quantitativo. Os métodos qualitativos são considerados subjetivos devido a seus resultados serem baseados diretamente no julgamento/na experiência do especialista. Nos métodos

quantitativos são geradas estimativas numéricas sobre a ocorrência dos eventos perigosos. Dentre cada um desses grupos de metodologias diferentes procedimentos e técnicas podem ser utilizados.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Caracterização básica da área e dos materiais inconsolidados

Primeiramente foi realizado um estudo de caracterização básica da área. A partir do mapa topográfico, em escala 1:500, realizam-se as primeiras observações sobre os aspectos fisiográficos. Informações sobre geologia, relevo e aspectos climáticos são consideradas.

A partir do trabalho de Ahrendt (2005) obteve-se as informações referentes a todos os tipos de materiais inconsolidados existentes na área e os perfis típicos encontrados (Unidades de materiais inconsolidados). Informações sobre índices físicos, parâmetros de resistência, condutividade hidráulica saturada, assim como o próprio mapa de materiais inconsolidados da área foram compilados do trabalho de Ahrendt (2005).

### 2.2. Definição da(s) superfície(s) de ruptura potencial(is)

Esta fase é uma das etapas de maior importância para o trabalho, pois define-se a superfície de ruptura potencial que será aplicada a metodologia de avaliação de estabilidade.

Esta definição é realizada em função principalmente dos aspectos geomórficos da área, sendo considerado o tipo de encosta, a declividade e a direção das vertentes, e, além disso, também foi considerado a variabilidade de materiais inconsolidados e tamanho da área.

### 2.3. Análise de dados pluviográficos e probabilidade temporal

Nesta fase será escolhido o(s) evento(s) de chuva(s) que será utilizado como dado de entrada no modelo de infiltração da fase seguinte e a probabilidade de ocorrência de um evento semelhante a este será calculada ao longo do tempo.

No estudo das precipitações ou de outra variável hidrológica, envolvendo a análise estatística de um conjunto de dados ou de um processo estocástico, pode-se dispor de várias distribuições teóricas de probabilidades. A distribuição de probabilidade que melhor se aplica ao problema considerado é a distribuição de Poisson.

A função distribuição de  $T_1$  que no processo de Poisson pode ser considerado como o tempo de recorrência do evento desejado é expressa pela equação a seguir:

$$F_{T_1}(t) = P(T_1 \leq t) = 1 - e^{-vt} \quad (1)$$

Sendo,  $t$  o tempo considerado para o cálculo da probabilidade,  $v$  taxa de ocorrência média,  $e$  a base neperiana. A taxa de ocorrência média é encontrada simplesmente pela relação entre o número de eventos ocorridos pelo tempo considerado.

### 2.4. Modelo de infiltração

A influência da chuva em escorregamentos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos (LIRITANO et al., 1998; GASMO et al., 2000; TSUKAMOTO et al., 2002; AL-HOMOUD et al., 1999; WILKINSON et al., 2002; KIM et al., 2004). Os estudos sobre escorregamentos rasos mostraram que estes são resultados da infiltração da água no perfil de materiais geológicos, assim na previsão de estabilidade de talude devem ser considerados modelos conceituais e físicos que simulem os processos hidrogeológicos e geotécnicos transientes responsáveis pela estabilidade do mesmo.

Existem diversos modelos, dos mais simples aos mais complexos, que são formulados com base nas características hidrológicas e geotécnicas dos materiais geológicos a fim de avaliar o processo de infiltração. Além das informações referentes aos materiais geológicos a intensidade e duração do evento pluviométrico são essenciais para esta avaliação, pois são características importantes que alteram a umidade, e são influenciados pela umidade pretérita e chuvas antecedentes.

A adoção de um modelo de infiltração visa a determinação de umidades volumétricas: a umidade volumétrica média ( $\theta_M$ ) do perfil de solo considerado e a umidade volumétrica de uma profundidade específica ( $\theta(z)$ ) desejada, após um evento chuvoso. Para atender a estes objetivos foi utilizado o programa HYDRUS 1D versão 3.0 (SIMUNEK et al., 2005).

O modelo HYDRUS 1D é um modelo numérico em diferenças finitas, para simulação unidirecional do fluxo de água, calor e múltiplos solutos em meios saturados ou não-saturados. O programa soluciona numericamente as equações de Richards para o fluxo variável da água no solo e equações de advecção e dispersão para calor e transporte de solutos (SIMUNEK et al., 1998). O modelo HYDRUS 1D permite o uso de três diferentes modelos analíticos para estimativa das propriedades hidráulicas  $\theta(h)$  e  $K(h)$  - curva de retenção e curva característica, respectivamente. Dentre os modelos disponíveis pode-se citar: Brooks e Corey (1964); van Genuchten (1980) e Vogel e Cislárová (1988). O modelo utilizado neste trabalho é o de van Genuchten (1980) que é baseado na distribuição estatística de poros de Mualem (1976) a fim de obter uma equação de estimativa em função da condutividade hidráulica não saturada em termos de

retenção de água no solo. As expressões estabelecidas por van Genuchten (1980) são:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h > 0 \\ \theta_s, & h \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

Considerando,

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$m = 1 - 1/n \quad n > 1 \quad (5)$$

Sendo,  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3L^{-3}$ ],  $h$  a sucção [ $M/LT^2$ ],  $\theta_s$  a umidade volumétrica saturada [ $L^3L^{-3}$ ],  $\theta_r$  a umidade volumétrica residual [ $L^3L^{-3}$ ],  $\alpha$  o valor inverso da entrada de ar [ $L^{-1}$ ],  $K$  condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ],  $K_s$  condutividade hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ],  $S_e$  a saturação efetiva [-],  $n$  e  $m$  são parâmetros de forma [-],  $l$  o parâmetro de conectividade entre poros [-]. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $l$  são considerados muitas vezes fatores empíricos relacionados à forma dos solos que afetam a formação das funções hidráulicas.

São requeridos como dados de entrada pelo programa: profundidade do perfil de solo [L]; tempo de simulação [T]; valores de precipitação [L]; umidade volumétrica inicial do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; umidade volumétrica residual do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; umidade volumétrica saturada do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; condutividade hidráulica saturada do solo [ $LT^{-1}$ ], além dos parâmetros de van Genuchten  $\alpha$  [ $L^{-1}$ ],  $n$  [-] e  $l$  [-].

É realizada a simulação considerando um evento de chuva para cada Unidade de material inconsolidado. Além do resultado desejado (o perfil  $z \times \theta$ ) outros resultados também são gerados tais como perfis de: infiltração [L/T] x tempo [T], infiltração acumulada [L] x tempo [T], tensão de sucção [L] x tempo [T], fluxo *run-off* [L/T] x tempo [T], fluxo *run-off* acumulado [L] x tempo [T] e armazenamento de água no solo [L] x tempo [T].

## 2.5. Determinação do peso específico médio

A partir dos dados de umidade volumétrica média,  $\theta_M$ , obtido na etapa anterior, juntamente com informações sobre o peso específico do solo seco ( $\gamma_d$ ) e peso específico da água ( $\gamma_w$ ) de cada material, através de correlações de índices físicos obtêm-se o peso específico médio correspondente, que será utilizado no cálculo do fator de segurança 3-D. As equações de índices físicos utilizadas nesta etapa são:

$$\theta = w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (6)$$

$$w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \quad (7)$$

Sendo,  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3L^{-3}$ ];  $w$  a umidade gravimétrica [ $L^3L^{-3}$ ];  $\gamma_d$  o peso específico do solo seco [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  $\gamma_w$  o peso específico da água [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  $\gamma$  o peso específico do solo [ $ML^{-2}T^{-2}$ ].

## 2.6. Obtenção dos valores de parâmetros de resistência

No cálculo do fator de segurança será utilizado a coesão e o ângulo de atrito da profundidade da superfície de ruptura. Foi realizada uma correlação entre os valores máximo e mínimo destes parâmetros em relação ao grau de saturação ( $S_r$ ) do ponto em questão (a profundidade desejada).

Com o valor da umidade volumétrica da profundidade  $z$  -  $\theta(z)$ , e da porosidade ( $n$ ) do respectivo material inconsolidado, por correlações de índices físicos (eq. 8) obtêm-se o grau de saturação daquele ponto.

$$S_r(\%) = \frac{\theta(z)}{n} \times 100 \quad (8)$$

Foi estabelecida uma relação linear do ângulo de atrito e da coesão com o grau de saturação ( $S_r$ ), da seguinte forma: para um grau de saturação igual a zero foi considerado o valor mínimo de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e o valor máximo de coesão ( $c$ ) do material inconsolidado correspondente (dados compilados de Ahrendt, 2005), condições características de um solo não saturado; para um grau de saturação igual a 100%, foram considerados os valores de ângulo de atrito e coesão na condição saturada,  $\phi_s$  e  $c_s$  respectivamente (dados de Ahrendt, 2005).

A relação linear adotada deve-se a dois aspectos, o primeiro relativo a quantidade de dados existentes e o segundo por ser uma variação que não afeta o valor do  $FS_{3D}$  por faixa de valores.

## 2.7. Definição do tamanho dos grids regulares e caracterização detalhada da área de estudo

Tendo em consideração o tamanho da área, o volume de informações necessárias e a viabilidade de cálculo, para este estudo foi definido que o tamanho dos grids regulares a serem utilizados na análise é de 10m de lado, ou seja, cada grid possui  $100m^2$ .

Para cada grid foi calculado a declividade e a direção de mergulho correspondente e, além disso, foi identificado a(s) Unidade(s) de material(is) inconsolidado(s) que constitui o grid.

## 2.8. Fator de segurança tridimensional

As superfícies de ruptura possuem geometria

tridimensional (3-D), que varia no espaço mesmo em uma distância pequena. Por isso, destaca-se a utilização da análise da estabilidade de talude. Desde o final da década de 1960 diversos modelos de análise 3-D têm sido propostos na literatura geotécnica.

O modelo de análise tridimensional de estabilidade de talude por análise de coluna proposto por Hovland (1977) foi modificado por Xie et al. em diversos trabalhos (2003a,b,c; 2004; 2006a,b,c; 2007). Dentre os aspectos gerais sobre o modelo foram mantidas como no trabalho original de Hovland (1977), pois assume-se que a coluna de solo (representação análoga a fatia na análise 2D) é pequena o suficiente de forma que todas as suas faces podem ser consideradas como linhas retas; o topo da superfície da coluna pode ser irregular, mas isto é considerado relativamente não importante para a análise; e a profundidade da coluna  $z$  é simplesmente calculada como aproximadamente a partir do centro da face inferior (superfície de ruptura). Uma visualização tridimensional de uma coluna de solo é apresentada na Figura 1.

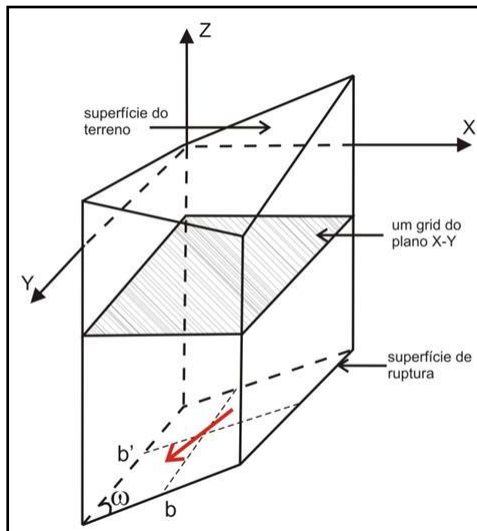


Figura 1 - Visualização 3-D de uma coluna de solo (adaptado de HOVLAND, 1977).

Todas as forças resistentes e cisalhantes devem se referir à possível direção de escorregamento, e não para a direção do eixo-y como é utilizado no modelo original de Hovland (1977). A principal direção de mergulho da área é assumida como sendo a possível direção de mergulho. No caso da superfície de ruptura ser desconhecida, a principal direção de mergulho da unidade de talude será o valor da moda da função de distribuição normal dos valores de direção de mergulho de todos os grids do intervalo considerado, mas se a superfície de ruptura for conhecida, a principal direção de mergulho é calculada baseada na disposição da superfície de ruptura.

A interseção dos eixos cartesianos com o vértice inferior da superfície de ruptura é ilustrada na

Figura 2 e com referência a esta figura as equações seguintes podem ser deduzidas.

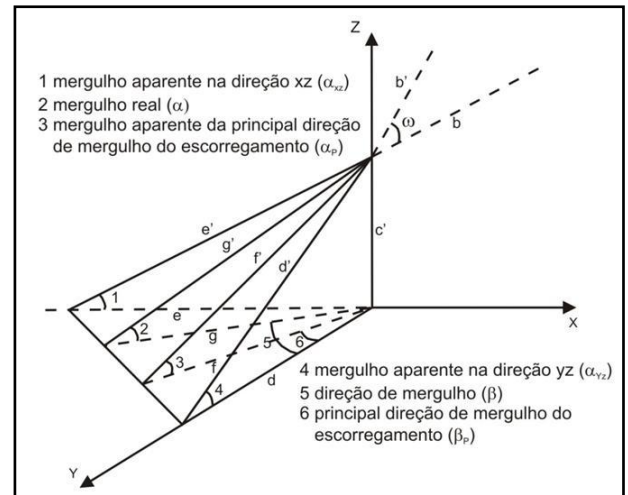


Figura 2 - Visão tridimensional da porção inferior da superfície de ruptura da coluna de solo (XIE, 2003 adaptado de HOVLAND, 1977).

$$A = ab \sin \omega \quad (9)$$

$$c' = g \tan \alpha \quad (10)$$

$$d = \frac{g}{\cos \beta} \quad (11)$$

$$\cos \omega = \sin \alpha_{xz} \sin \alpha_{yz} \quad (12)$$

Subseqüentemente, os mergulhos aparentes dos eixos  $x$  e  $y$  podem ser derivados:

$$\tan \alpha_{xz} = \tan \alpha \sin \beta \quad (13)$$

$$\tan \alpha_{yz} = \tan \alpha \cos \beta \quad (14)$$

Tendo que,

$$b = \frac{\text{tamanho do grid}}{\cos \alpha_{xz}} \quad (15)$$

$$b' = \frac{\text{tamanho do grid}}{\cos \alpha_{yz}} \quad (16)$$

A área da superfície de ruptura de uma coluna grid é,

$$A = \text{tamanho do grid}^2 \left[ \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{xz} \sin^2 \alpha_{yz}}}{\cos \alpha_{xz} \cos \alpha_{yz}} \right] \quad (17)$$

$$FS_{3D} = \frac{\sum_I \sum_J cA + [\gamma_i(Z_{ij} - z_{ij}) + (\gamma_M - \gamma_i)(Z_{ij} - z_{ij})]a^2 \cos \alpha \tan \phi}{\sum_I \sum_J [\gamma_i(Z_{ij} - z_{ij}) + (\gamma_M - \gamma_i)(Z_{ij} - z_{ij})]a^2 \tan \alpha_p} \quad (19)$$

O mergulho aparente da principal direção de mergulho da área de escorregamento pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$\tan \alpha_p = \tan \alpha |\cos(\beta - \beta_p)| \quad (18)$$

Sob essas condições, o modelo para o cálculo do Fator de Segurança 3-D modificado de Xie (2007) que foi utilizado no trabalho é apresentado na equação 19, sendo:  $FS_{3D}$  é o Fator de Segurança 3D,  $c$  a coesão total ( $\text{kN/m}^2$ ),  $A$  a área da superfície de ruptura ( $\text{m}^2$ ),  $Z_{ij}$  a elevação da superfície do terreno (m),  $z_{ij}$  a elevação da superfície de ruptura (m),  $\gamma_M$  o peso específico médio do solo ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\gamma_i$  peso específico inicial do solo ( $\text{kN/m}^3$ ),  $a$  o tamanho do grid (m),  $\alpha$  o ângulo de mergulho da superfície de ruptura ( $^\circ$ ),  $\phi$  o ângulo de atrito total ( $^\circ$ ),  $\alpha_p$  o ângulo de mergulho da principal direção de escorregamento ( $^\circ$ ),  $J, I$  o número de linhas e colunas das células do intervalo da área de ruptura do talude.

### 3. APLICAÇÃO EM CAMPOS DO JORDÃO

Foram selecionadas oito encostas na cidade de Campos do Jordão, SP, para a aplicação da metodologia proposta. Neste trabalho será apresentado os resultados encontrados para duas dessas encostas, denominadas áreas D e G, o trabalho completo pode ser encontrado em Silva (2009).

A área D localiza-se entre as coordenadas E 438.160 e 438.200 e S 7.485.310 e 7.485.350 e a área G entre as coordenadas E 438.210 e 438.290 e S 7.485.180 e 7.485.130. As Figuras 3 e 4 apresentam as cartas de declividade e as figuras 5 e 6 as cartas de direção das vertentes das áreas D e G, respectivamente.

#### 3.1. Materiais inconsolidados

Nas áreas D e G ocorrem sete diferentes tipos de materiais inconsolidados diferenciados de acordo com a sua origem e composição, sendo que cada tipo apresenta características particulares. As informações referentes à descrição dos materiais inconsolidados bem como a distribuição espacial destes foram realizadas por Ahrendt (2005).

Os materiais possuem três origens distintas: residual, aterro e aluvionar. Esta classificação é baseada essencialmente em características texturais, de grau de alteração e de origem dos materiais inconsolidados. Os materiais inconsolidados residuais foram classificados em residuais de

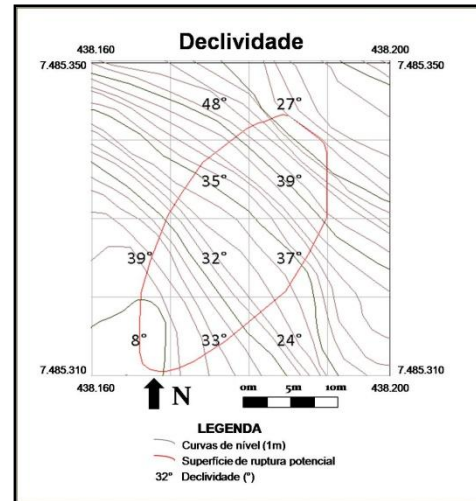


Figura 3 – Carta de declividade da área D.

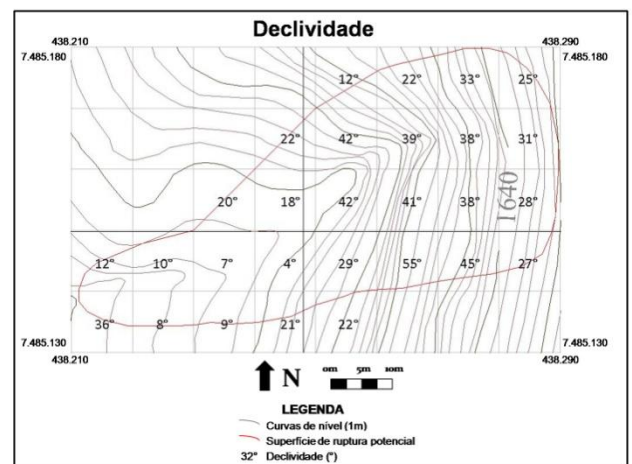


Figura 4 – Carta de declividade da área G.

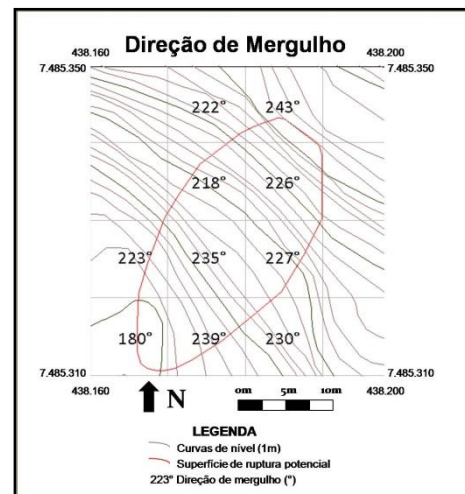


Figura 5 – Carta de direção de mergulho da área D.



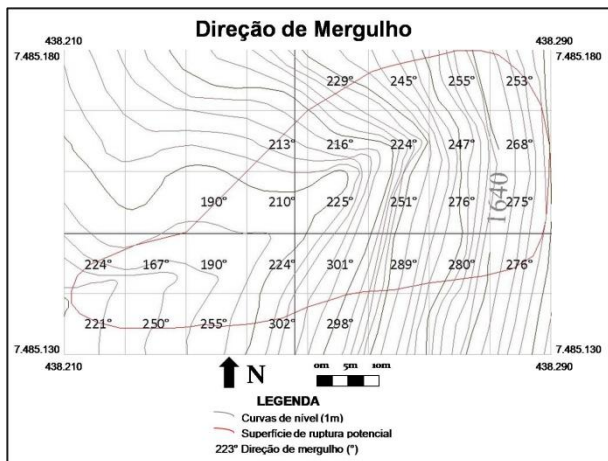


Figura 6 – Carta de direção de mergulho da área G.

alteração (I-R e II-R) e saprólitos (III-S, IV-S e V-S). Foram definidos dois tipos principais de materiais inconsolidados de aterro, denominados de VI-A e VII-A e um tipo de material de origem aluvionar (VIII-T).

A partir da disposição estratigráfica dos materiais inconsolidados, estabeleceu-se perfis típicos que podem ser encontrados na área. Na área D ocorrem três Unidades de materiais inconsolidados (U2, U4 e U10) e na área G ocorrem as Unidades U3, U4 e U5a.

Os dados de índices físicos, parâmetros de resistência e os parâmetros de Van Genuchten referentes a cada material inconsolidado, assim como o mapa de Unidade de materiais inconsolidados foram compilados do trabalho de Ahrendt (2005). Todos os dados que foram referentes a estas unidades e que foram utilizados na pesquisa encontram-se na Tabela 1.

#### 4.1. Dados pluviográficos

A base de dados pluviográficos utilizados no trabalho conta com informações de 1975 a 2001 e possui registros de até 5 min de intervalo. E para este trabalho foram selecionados dois eventos chuvosos para serem simulados no programa HYDRUS. O primeiro de longa duração que ocorreu em 1995, com duração de 27 horas com precipitação total de 149,7mm. O segundo é um evento pluviométrico de grande intensidade com precipitação de 85mm e duração de 20 minutos que ocorreu no ano de 2001.

Calculou-se a probabilidade de ocorrência de um evento semelhante ao de 2001 para 1, 5 e 10 anos, resultando em 4%, 18% e 34%, respectivamente e para o evento de 1995, resultando em 29%, 82% e 97%, respectivamente.

#### 4.2. HYDRUS 1D

Para ambos os eventos de chuva e para cada Unidade de material inconsolidado realizou-se a

simulação no modelo de infiltração HYDRUS-1D para a profundidade de até 5m. As Figuras 7 e 8 apresentam os perfis de umidade volumétrica x profundidade obtidos. Nestes gráficos cada curva ilustra um tempo t em relação ao evento.

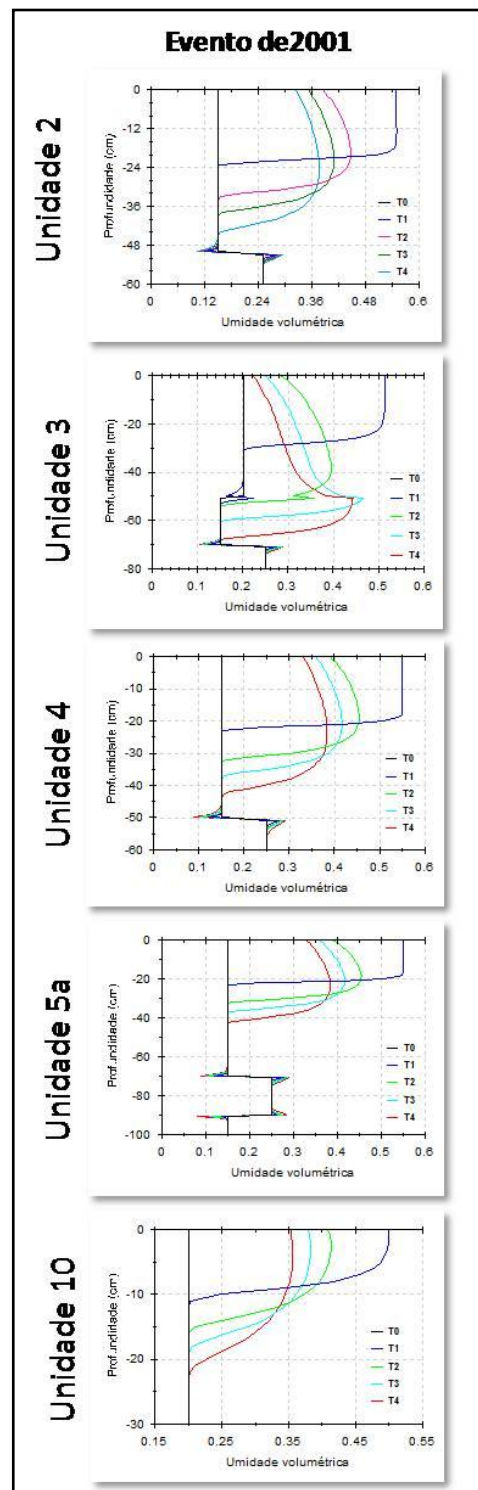


Figura 7 – Perfis de umidade volumétrica x profundidade (cm). A curva T0 apresenta o comportamento do perfil de materiais inconsolidados antes do início do evento chuvoso, e as curvas T1, T2, T3 e T4 nos tempos de 20, 60, 120 e 240 minutos após o início da chuva.

Tabela 1 – Dados de índices físicos, espessura, parâmetros de resistência e parâmetros de Van Genuchten dos materiais inconsolidados existentes nas áreas D e G.

Unidade	Materiais	Espessura (cm)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$n_{Med}$	$\theta_{cc}$	$K_{sat}$ (cm/min)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\phi_s$ (°)	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$
U2	I-R	50	26,71	13,5	0,55	0,15	5,56E-01	9,8	1,68	28,5	29,5	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	100	27,89	14,3	0,485	0,25	2,11E-01	20	0,2	26	30	0,109	0,485	0,034	1,168
	III-S	-	27,51	12,8	0,49	0,3	6,00E-04	30	0,2	30	35	0,075	0,49	0,039	1,194
U3	VII-A	50	28	11,8	0,54	0,2	1,26E+00	10	0,6	26	31	0,0286	0,54	0,13	1,700
	I-R	20	26,71	13,5	0,55	0,15	3,11E-01	10	0,4	26	33	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	100	27,89	14,3	0,485	0,25	2,11E-01	20	0,2	26	30	0,109	0,485	0,034	1,168
	III-S	-	27,51	12,8	0,49	0,3	6,00E-04	30	0,2	30	35	0,075	0,49	0,039	1,194
U4	I-R	50	26,71	13,5	0,55	0,15	4,67E-01	10	0,4	26	33,5	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	50	27,89	14,3	0,485	0,25	5,89E-01	20	0,2	26	30	0,109	0,485	0,034	1,168
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1	6,00E-05	50	0,2	35	40	0,02	0,52	0,138	1,592
U5a	I-R	70	26,71	13,5	0,55	0,15	4,58E-01	10	0,4	26	33	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	20	27,89	14,3	0,485	0,25	5,89E-01	20	0,2	26	30	0,109	0,485	0,034	1,168
	VI-A	-	27,5	11,6	0,55	0,15	6,00E-03	20	0,4	26	31	0,02	0,55	0,138	1,592
U10	VIII-T	100	31,04	11	0,5	0,2	6,00E-02	10	0,4	26	33	0,078	0,50	0,036	1,500

Sendo,  $\gamma_s$  o peso específico dos sólidos (kN/m<sup>3</sup>);  $\gamma_d$  o peso específico aparente seco (kN/m<sup>3</sup>);  $n_{Med}$  a porosidade média;  $\theta_{cc}$  a umidade volumétrica da capacidade de campo do material;  $K_{sat}$  a condutividade hidráulica saturada (cm/min);  $c$  a coesão total (kN/m<sup>2</sup>);  $c_s$  a coesão total na condição saturada (kN/m<sup>2</sup>);  $\phi$  o ângulo de atrito (°); e  $\phi_s$  o ângulo de atrito na condição saturada (°);  $\theta_r$  a umidade volumétrica residual;  $\theta_s$  a umidade volumétrica saturada;  $\alpha$  o valor inverso da entrada de ar (cm<sup>-1</sup>); e  $n$  um parâmetro de forma.

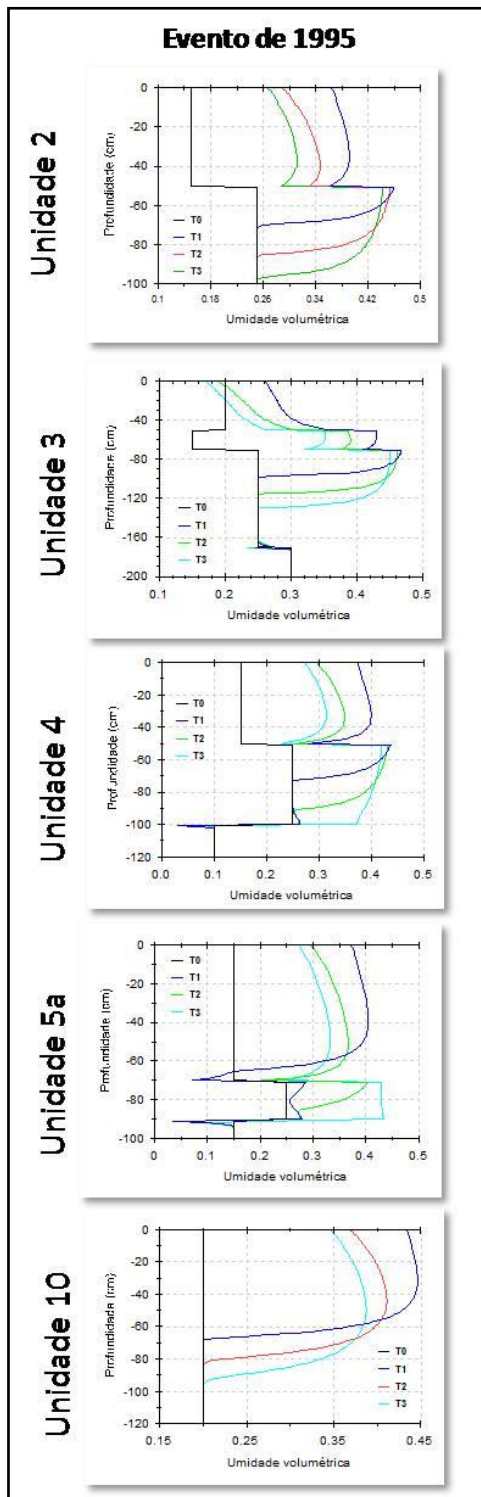


Figura 8 – Perfis de umidade volumétrica x profundidade (cm). A curva T0 apresenta o comportamento do perfil de materiais inconsolidados antes do início do evento chuvoso, e as curvas T1, T2 e T3 nos tempos de 27, 36 e 48 horas após o início da chuva.

#### 4.3. Umidade volumétrica média e parâmetros de resistência

A Tabela 5 apresenta os valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito totais para o tempo de 120 minutos que foram utilizados no cálculo do

$FS_{3D}$  para a chuva de 2001. E a Tabela 6 apresenta os mesmos parâmetros para o tempo de 48 horas que foram utilizados no cálculo do fator de segurança 3D para o evento de 1995.

Tabela 2 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que foram utilizados no cálculo do fator de segurança 3D para o evento de 2001.

Unidade	z (cm)	$\gamma_M$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
2	50	16,672	5,51	29,03
	150	17,033	9,60	28,10
3	50	15,054	1,89	30,32
	70	16,557	5,01	29,64
4	170	17,038	7,74	28,48
	50	16,670	5,00	29,90
5a	150	17,149	9,57	28,11
	70	16,204	5,00	29,64
10	90	16,970	9,64	28,28
	50	13,526	6,15	28,81
	100	13,268	6,15	28,81

Tabela 3 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que foram utilizados no cálculo do fator de segurança 3D para o evento de 1995.

Unidade	z (cm)	$\gamma_M$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
2	50	16,478	3,27	29,30
	150	17,463	8,92	28,24
3	50	13,936	3,88	29,25
	70	16,019	2,12	31,74
4	170	17,439	4,84	29,06
	50	16,488	2,67	31,73
5a	150	17,787	4,80	29,07
	70	16,633	2,52	31,45
10	90	17,677	3,73	29,58
	50	14,730	2,57	31,42
	100	14,480	6,15	28,81

Sendo, em ambas as tabelas, z a profundidade (cm);  $\gamma_M$  o peso específico médio (kN/m<sup>3</sup>), c a coesão total (kN/m<sup>2</sup>) e  $\phi$  o ângulo de atrito (°).

#### 4.4. Fator de Segurança 3D

O  $FS_{3D}$  foi calculado para quatro cenários diferentes, considerando cada evento de chuva. Foram definidos dois planos de ruptura potenciais. O primeiro deles mais superficial representando a primeira descontinuidade geotécnica de cada Unidade de material



inconsolidado, ou seja, o plano de ruptura encontra-se no primeiro contato entre diferentes materiais inconsolidados, da superfície para o interior do perfil. O segundo plano de ruptura foi definido na segunda descontinuidade geotécnica, sendo um pouco mais profunda.

Foi calculado o  $FS_{3D}$  considerando a coesão que foi determinada a partir da umidade volumétrica na profundidade do plano de ruptura considerado (chamado de coesão natural na tabela seguinte), conforme foi apresentado na metodologia deste trabalho. E, além disso, também foi calculado um  $FS_{3D}$  considerando um valor de coesão mínimo (0,1) para os dois tipos de perfis, o mais superficial (SP1) e o mais profundo (SP2).

Para o evento de 2001 o fator de segurança foi calculado para o tempo de 120 minutos e para o evento de 1995 para o tempo de 48 horas.

A Tabela 4 apresenta os valores de fator de segurança 3D obtidos na área D e na área G para as quatro condições testadas.

Tabela 4 –  $FS_{3D}$  das áreas D e G.

Área	Evento de 2001				Evento de 1995			
	Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
	SP1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
<b>D</b>	1,77	1,27	0,79	0,75	1,28	1,20	0,84	0,75
<b>G</b>	1,84	1,86	1,05	1,01	1,75	1,50	1,11	1,09

SP1 – Plano de ruptura potencial mais superficial;

SP2 – Segundo plano de ruptura potencial (mais profundo).

#### 4. ANÁLISES

A delimitação das áreas para o cálculo de  $FS_{3D}$  é uma etapa fundamental no trabalho, pois o tamanho, os aspectos geomórficos e ainda os materiais geológicos envolvidos são características que afetam diretamente o resultado final.

O método se mostrou mais eficaz quando a área delimitada é parte de uma encosta de extensão pequena, como a área D apresentada neste trabalho. Pois quando se escolhe áreas extensas podem ocorrer dois tipos de problemas: a presença de vales dentro da área, o que implica na presença de grids com declividades muito baixas elevando o fator de segurança geral; e, a presença de grids com direção de mergulho (direção de vertente) muito diferente da direção de inclinação geral da encosta, outro fator que também contribui para o aumento do FS geral da área.

As superfícies de ruptura escolhidas são as descontinuidades geotécnicas entre os diferentes tipos de materiais inconsolidados. Através dos gráficos de umidade volumétrica e profundidade é possível observar que aonde ocorrem esses contatos,

especialmente entre materiais com condutividade hidráulica saturada de diferentes ordens de grandeza, há um aumento da umidade volumétrica devido a esta barreira hídrica natural. Em função disso, ocorre a diminuição do parâmetro de coesão total, influenciando na deflagração do movimento gravitacional de massa.

Em relação à frente de umedecimento nos perfis de materiais inconsolidados após os eventos pluviográficos, obtidos pela simulação no programa HYDRUS-1D, a diferença de resultados encontrados foi bastante expressiva devido a diferença nos tipos de chuva selecionados, sendo um de curta duração e alta intensidade e outro de baixa intensidade e longa duração.

Quanto à probabilidade temporal o evento de 2001, representa um evento único em toda a série histórica analisada. A probabilidade de ocorrer um evento com características semelhantes em um ano é bem pequena (4%) e mesmo considerando um intervalo de tempo de 50 anos essa probabilidade chega próxima a 88%. O evento de 1995, por ser mais comum, em um ano tem quase 30% de probabilidade de ocorrer, e em 10 anos esse valor chega próximo a 100%.

Quanto aos valores de  $FS_{3D}$  encontrados para a área D observa-se uma diminuição de aproximadamente 30% entre a primeira superfície de ruptura e a segunda, para a área G essa diferença é de 15%, considerando os valores de coesão encontrados após os eventos chuvosos (coesão natural). Em relação ao resultado encontrado considerando valores de coesão mínima (0,1) comparando com o primeiro cenário (coesão natural) a diminuição foi de aproximadamente 55% para a área D e de 46% para a área G, afirmando, desta forma, a influência do parâmetro de coesão no cálculo de fator de segurança.

#### 5. CONCLUSÕES

O objetivo da utilização de um modelo que simule o processo de infiltração foi obter os valores de umidade volumétrica após os eventos chuvosos, e o programa HYDRUS, mesmo em sua versão unidimensional, atendeu ao objetivo proposto.

Os resultados de FS-3D encontrados foram compatíveis com as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas considerados durante a modelagem.

O cálculo do FS-3D utilizando valor baixo de coesão total (0,1 kN/m<sup>2</sup>) permitiu constatar a influência do parâmetro de coesão na análise de estabilidade de taludes. Porém, observa-se que apesar de sua grande influência este parâmetro, sozinho, não é responsável pela deflagração do processo de movimento gravitacional de massa, pois no estudo de outras áreas (SILVA, 2009) ainda assim o  $FS_{3D}$  não chegou nem próximo de 1,0. Isto se justifica em áreas que possuem grids com

declividade baixa e/ou desvio padrão alto em relação à direção de mergulho das vertentes.

Uma última consideração sobre o trabalho é referente à viabilidade do grupo de procedimentos que apesar de constituir-se de diversos métodos e princípios é viável em termos de usá-lo a partir de informações geradas por mapeamentos geotécnicos em escalas maiores que 1:10.000.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida sem a qual esta pesquisa não poderia ter sido desenvolvida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENDT, A. (2005) Movimentos de massa gravitacionais – Proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. São Carlos. 360 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- AL-HOMOUD, A.S., PRIOR, G., AWAD, A. (1999) Modelling the effect of rainfall on instabilities of slopes along highways. *Environmental Geology*, 37 (4), 317-325.
- BROOKS, R.H., COREY, A.T. (1964) Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE Prod. 72(IR2), 61-88.
- CHOWDHURY, R., FLENTJE, P. (2002) Uncertainties in rainfall-induced landslide hazard. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35, 61-70.
- GASMO, J.M.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.C. (2000) Infiltration effects on stability of a residual soil slope. *Computers and Geotechnics*, 26, p.145-165.
- HOVLAND, H.J. (1977) Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT9, 971-986.
- KIM, J., JEONG, S., PARK, S., SHARMA, J. (2004) Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology* 75, 251-262.
- LIRITANO, G., VERSACE, P., SIRANGELO, B. (1998) Real-time estimation of hazards for landslides triggered by rainfall. *Environmental Geology*, 35 (2-3), 175-183.
- MUALEM, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12 (3), 513-522.
- SILVA, A.F. (2009) Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D : Campos do Jordão-SP. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 353p.
- SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. Th., SEJNA, M. (2005) The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 270 pp.
- SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. Th., GRIBB, M. M., HOPMANS, J.W. (1998) Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes, *Soil & Tillage Research*, 47 (1-2), Special issue "State of the art in soil physics and in soil technology of anthropic soils", 27-36.
- TSUKAMOTO, Y., ISHIHARA, K., NOSAKA, Y. (2002) On the initiation of rainfall induced soil failure. In: Marie, Lisac, Szavits-Nossan (eds) *Geotechnical Hazards*. Balkema, Rotterdam, 883-890.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- VARNES, D.J. (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. – Commission on Landslides of the IAEG. *Natural Hazards*, 3. – UNESCO, Paris, 61p.
- VOGEL, T., CISLEROVÁ, M. (1988) On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media* 3, 1-15.
- WILKINSON, P.L., ANDERSON, M.G., LLOYD, D.M. (2002) An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1285-1297.
- XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G. (2003) Three-dimensional stability evaluation of landslides and a sliding process simulation using a new geographic information systems component. *Environmental Geology*, 43, 503-512.
- XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G. (2004) GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. *Natural Hazards* 33, 265-282.
- XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., WANG, C. (2006) Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 33, 260-274.
- XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., MITANI, Y., WANG, C. (2007) Spatio-temporal estimation of shallow landslide hazard triggered by rainfall using a three-dimensional model. *Environmental Geology*, 52, 1569-1579.