



**Alexandre Conti**

**Desenvolvimento de um modelo matemático transiente  
para previsão de escorregamentos planares em encostas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos  
Co-Orientador: Nelson Ferreira Fernandes

Rio de Janeiro,  
março de 2012



**Alexandre Conti**

**Desenvolvimento de um modelo matemático transiente  
para previsão de escorregamentos planares em encostas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Nelson Ferreira Fernandes**

Co-Orientador

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. George de Paula Bernardes**

Universidade Estadual Paulista / FEG

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de março de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Alexandre Conti**

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2008. Entrou no mestrado de Engenharia Civil na mesma universidade em 2010 e atualmente trabalha como engenheiro geotécnico nos mais diversos projetos que envolvem essa disciplina.

Conti, Alexandre

Desenvolvimento de um modelo matemático transiente para previsão de escorregamentos planares em encostas / Alexandre Conti ; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos, Nelson Ferreira Fernandes. – 2012.

131 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de encostas. 3. Mapeamento de risco geotécnico. 4. Modelo geotécnico determinístico. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Fernandes, Nelson Ferreira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

À todos que me apoiaram nessa conquista!

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha mãe, a meu pai, a minha vó e demais familiares por tudo que fizeram por mim.

A minha super companheira Adriana que sempre esteve do meu lado me dando seu carinho e apoio.

Ao Professor Tácio Campos e Nelson Fernandes, pela valiosa orientação no desenvolvimento dessa dissertação.

Ao Dino Bellugi e a Bianca Vieira, pela ajuda e atenção.

Aos meus amigos, que fazem a minha vida ter mais alegria.

A equipe da Alta Geotecnia, muito parceira e amiga.

Ao Álvaro, figura chave nesse meu início de carreira e pela confiança depositada.

A todos os professores e funcionários da PUC, por todos os conhecimentos transmitidos.

A galera da ambiental e do mestrado, parceiros e amigos.

A PUC-Rio e ao CNPq por ter me concedido essa oportunidade.

## Resumo

Conti, Alexandre; De Campos, Tácio Mauro Pereira. **Desenvolvimento de um modelo matemático transiente para previsão de escorregamentos planares em encostas**. Rio de Janeiro, 2012. 131p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo determinístico transiente de previsão de escorregamentos planares em encostas, para escalas em nível de bacia hidrográfica (1:2000 a 1:5000). No modelo são aplicadas as teorias de Green-Ampt (1934) e de O'Loughlin (1986), essa última utilizada no programa SHALSTAB (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), além da teoria talude infinito 2D e 3D. Também são considerados nas análises a não saturação do solo e os efeitos da vegetação. O evento estudado para aplicação e teste do modelo refere-se ao ocorrido em 1996, nas bacias do Quitite e Papagaio em Jacarepaguá, Zona Oeste do Rio de Janeiro. Além do mapeamento do fator de segurança nas bacias, também são gerados mapas com o escoamento superficial acumulado, e tenta-se correlacionar ambos com as cicatrizes que ocorreram no caso de estudo.

## Palavras-chave

Estabilidade de encostas; mapeamento de risco geotécnico; modelo geotécnico determinístico

## Abstract

Conti, Alexandre; De Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor). **Development of a transient mathematical model for the prediction of planar landslides in natural slopes.** Rio de Janeiro, 2012. 131p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this work is to develop a physically-based transient model for the prediction of planar landslides in natural slopes. The application scale of the model is for a hydrographic basin (1:2000 to 1:5000). The theories of Green-Ampt (1934) and O'Loughlin (1986), the second one used in the SHALSTAB program (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), and the infinite slope 2D and 3D are used in the model. The effect of the unsaturation and the vegetation is also considered in the analysis. The case study for the test of the model is the 1996 event that took place in the Quitite and Papagaio basins, in Jacarepaguá, Zona Oeste of Rio de Janeiro. Besides mapping the safety factor in the basins, maps of the accumulated runoff were also generated. This work also tries to correlate the runoff as another factor that caused the landslides.

## Keywords

Slope stability; geotechnical hazard mapping; Physically-based geotechnical model

# Sumário

1	Introdução	17
2	Revisão bibliográfica	22
2.1.	Classificação dos movimentos de massa	22
2.2.	Causa dos movimentos de massa	25
2.3.	Efeitos da vegetação	28
2.4.	Solos não saturados	32
2.4.1.	Comportamento dos solos não saturados	32
2.4.2.	Infiltração em solos não-saturados	37
2.4.3.	Resistência de solos não-saturados	40
2.4.4.	Solos não-saturados e estabilidade de taludes	42
2.5.	Fluxo em meios saturados	43
2.5.1.	Modelo hidrológico em meios saturados utilizado no SHALSTAB	43
2.6.	Teoria do talude infinito	48
2.6.1.	Modelagem 3D no cálculo do fator de segurança	51
2.7.	Mapeamento de risco	53
2.7.1.	Métodos de inventário	53
2.7.2.	Métodos heurísticos	54
2.7.3.	Métodos estatísticos	54
2.7.4.	Métodos determinísticos	55
2.7.5.	Influência da escala cartográfica de aplicação	55
3	Caracterização da área de estudo	57
4	Desenvolvimento do programa	62
4.1.	Formulações e teorias utilizadas	62
4.1.1.	Frente de saturação e fluxo saturado	63
4.1.2.	<i>Runoff</i>	69
4.1.3.	Equilíbrio limite	70
4.2.	Rotina de cálculo	73

4.2.1. Cálculo da declividade do MDE	75
4.2.2. Cálculo da área de contribuição do MDE	76
5 Resultados e discussões	78
5.1. Aplicação do modelo hidrológico	81
5.2. Aplicação do modelo de susceptibilidade	85
5.2.1. Sucção inicial de 40 kPa	89
5.2.2. Sucção inicial de 20 kPa	97
5.2.3. Sucção inicial de 5 kPa	103
5.2.4. Efeitos da vegetação	110
5.2.5. Efeitos da tridimensionalidade	119
6 Conclusões	123
7 Referências bibliográficas	126

## Lista de figuras

Figura 1 – Deslizamentos em Nova Friburgo. Diversas cicatrizes podem ser observadas nas encostas ao fundo. Foto tirada em fevereiro de 2011.	19
Figura 2 – Meniscos de água entre partículas de solo (LU e LIKOS, 2004).	33
Figura 3 – Curva de retenção de umidade com histerese.	34
Figura 4 – Área útil de fluxo em meios porosos não saturados (Adaptado de REICHARDT e TIMM, 2004 <i>apud</i> MIQUELLETO, 2007).	35
Figura 5 – Curva de condutividade hidráulica em função da carga de sucção. Escala Log-Log.	36
Figura 6 – Variáveis no modelo de Green-Ampt (CHOW, 1988).	38
Figura 7 – Esquema dos elementos topográficos considerados na formulação do SHALSTAB (MONTGOMERY e DIERICH, 1994).	44
Figura 8 – Gradiente hidráulico aproximado entre os pontos 1 e 2 ao longo de uma encosta.	45
Figura 9 – Esquema indicando as dimensões usadas nas fórmulas.	46
Figura 10 – Talude infinito (DUNCAN e WRIGHT, 2005).	49
Figura 11 – Esquema de “Talude Infinito” com considerações dos efeitos das bordas (A) e “Lamela” tridimensional com esquematização dos esforços atuantes (B). (Adaptado de WOLLE, 1988).	52
Figura 12 – Mapas topográficos de Coos Bay em diferentes níveis de detalhamento (pixeis de 30x30m a 2x2m), da United States Geological Survey (USGS) e da Oregon Department of Forestry (ODF) (DIETRICH, BELLUGI e ASUA, 2001).	56
Figura 13 – Bacias do Quitite e Papagaio, delimitação da área de estudo e mapeamento das cicatrizes.	58
Figura 14 – Indicação dos parâmetros geométricos utilizados.	63
Figura 15 – Taxa de infiltração e infiltração acumulada para situação de empoçamento em regime de chuva constante (adaptado de CHOW, 1988).	65

Figura 16 – Rotina de cálculo para frente de infiltração em chuva de intensidade variável, por Green-Ampt.	67
Figura 17 – Balanço de volume em uma unidade de estudo (célula) de área $a$ . A altura de $h$ é fruto da diferença entre o volume que entra e o volume que sai.	69
Figura 18 – (1) Indicação do valor máximo da poropressão na base $h \cdot \cos\beta$ , altura do lençol freático $h$ , e espessura do solo $e$ ; (2) Gráfico de distribuição triangular da poropressão com a profundidade.	72
Figura 19 – Fluxograma de operação do programa.	74
Figura 20 – Esquema do grid 3x3 para cálculo da declividade da célula central $e$ .	75
Figura 21 – Na figura, a seta representa a direção do fluxo, $\alpha_1$ e $\alpha_2$ os ângulos entre a direção de fluxo e as células 3 e 4 respectivamente.	77
Figura 22 – Curva característica adotada no modelo.	80
Figura 23 – Função de permeabilidade utilizada no modelo.	81
Figura 24 – Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 40 kPa.	82
Figura 25 – Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 20 kPa.	83
Figura 26 - Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 5 kPa	84
Figura 27 - Declividade das encostas nas bacias do Quitite e Papagaio.	87
Figura 28 - Área de contribuição em $m^2$ das bacias do Quitite e Papagaio.	88
Figura 29 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 40 kPa.	90
Figura 30 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 40 kPa.	91
Figura 31 - <i>Runoff</i> acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 40 kPa.	92
Figura 32 – Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 40 kPa.	93
Figura 33 – Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção	

inicial de 40 kPa, antes da chuva.	95
Figura 34 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, após a chuva.	96
Figura 35 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 20 kPa.	97
Figura 36 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 20 kPa.	98
Figura 37 - <i>Runoff</i> acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 20 kPa.	99
Figura 38 - Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 20 kPa.	100
Figura 39 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 20 kPa, antes da chuva.	101
Figura 40 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 20 kPa, após a chuva.	102
Figura 41 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 5 kPa.	103
Figura 42 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 5 kPa.	104
Figura 43 - <i>Runoff</i> acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 5 kPa.	105
Figura 44 – Distribuição de poropressão positiva na área de estudo para a condição inicial de 5 kPa, após a chuva.	106
Figura 45 - Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 5 kPa.	107
Figura 46 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 5 kPa, antes da chuva.	108
Figura 47 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 5 kPa, após a chuva.	109
Figura 48 – Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa.	111
Figura 49 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção	

inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, antes da chuva.	113
Figura 50 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, após a chuva.	114
Figura 51 - Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa.	115
Figura 52 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa, antes da chuva.	117
Figura 53 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa, após a chuva.	118
Figura 54 - Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, em modelagem 3D.	120
Figura 55 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 3D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, antes da chuva.	121
Figura 56 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 3D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa após a chuva.	122

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos movimentos de massa. Adaptado de Varnes, 1978 ( <i>apud</i> BRABB, 1991).	23
Tabela 2 – Características dos principais movimentos de encosta na dinâmica ambiental brasileira (Augusto Filho, 1992).	24
Tabela 3 – Fatores deflagradores dos movimentos de encostas (Varnes, 1978 <i>apud</i> Augusto Filho e Virgili, 1998).	26
Tabela 4 – Principais causas dos movimentos de massa. Adaptado de USGS (2004).	27
Tabela 5 – Coesão acrescida ao solo pelas raízes, para variados tipos de vegetação e métodos de obtenção. *=coesão das raízes considerando reforço lateral; **=coesão das raízes considerando reforço na base. Adaptado e modificado de Schmidt et al., 2001.	31
Tabela 6 – Dados de chuva diária acumulada, em mm, cedidos pelo INMET para os meses de janeiro e fevereiro de 1996, nas estações climáticas de Jacarepaguá e Alto da Boa Vista. Em destaque, as chuvas que possivelmente desencadearam os movimentos de massa.	59
Tabela 7 – Parâmetros adotados para o estudo.	79

## Lista de símbolos

$a$	Área de contribuição [L <sup>2</sup> ]
$A$	Área da célula de estudo [L <sup>2</sup> ]
$A_T$	Área da seção transversal de fluxo [L <sup>2</sup> ]
$b$	Largura da célula de estudo [L]
$c$	Coesão do solo [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$c'$	Coesão efetiva do solo [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$c$	Reforço radicular [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$c^*$	Coesão aparente [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$e$	Espessura do solo [L]
$e_{raiz}$	Espessura do solo com reforço radicular [L]
$f$	Taxa de infiltração [LT <sup>-1</sup> ]
$F$	Infiltração acumulada [L]
$F_p$	Infiltração acumulada até o empoçamento [L]
$FS$	Fator de segurança [-]
$g$	Aceleração da gravidade [LT <sup>-2</sup> ]
$h$	Nível piezométrico [L]
$H$	Carga total [L]
$i$	Gradiente hidráulico [-]
$I$	Acumulado de chuva infiltrado após a frente de saturação atingir a interface solo-rocha [L]
$k$	Permeabilidade do solo [LT <sup>-1</sup> ]
$K_r$	Permeabilidade relativa [-]
$K_{sat}$	Permeabilidade saturada [LT <sup>-1</sup> ]
$K_0$	Coeficiente de empuxo no repouso [-]
$l$	Comprimento do plano de ruptura [L]
$m$	Parâmetro de van Genuchten (1980) [-]
$M$	Declividade [-]
$n$	Parâmetro de van Genuchten (1980) [-]
$N$	Força normal [MLT <sup>-2</sup> ]
$q$	Vazão [L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]

$Q$	Precipitação [ $LT^{-1}$ ]
$R$	Acumulado de chuva [L]
$RO$	<i>Runoff</i> [ $L^3$ ]
$s$	Tensão cisalhante máxima admitida [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$S$	Força cisalhante [ $MLT^{-2}$ ]
$t$	Tempo [T]
$t_p$	Tempo para o empoçamento [T]
$T$	Transmissividade do solo [ $L^2T^{-1}$ ]
$u_a$	Pressão de ar [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$U_w$	Pressão de água [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$w$	Índice de umidade de O'Loughlin (1986) [-]
$W$	Força peso [ $MLT^{-2}$ ]
$z$	Espessura vertical do perfil de solo [L]
$z_w$	Profundidade da frente de infiltração [L]
$\alpha$	Parâmetro de van Genuchten (1980) [ $L^{-1}$ ]
$\beta$	Declividade da encosta [-]
$\Delta\theta$	Variação da umidade volumétrica [-]
$\Delta P$	Sobrecarga da vegetação [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$\Delta t$	Intervalo de tempo [T]
$\eta$	Porosidade [-]
$\theta$	Umidade volumétrica [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_e$	Umidade relativa a porosidade efetiva [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_i$	Umidade volumétrica inicial [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_s$	Umidade volumétrica saturada [ $L^3L^{-3}$ ]
$\Theta$	Umidade volumétrica relativa [ $L^3L^{-3}$ ]
$\rho_{sat}$	Massa específica saturada do solo [ $ML^{-3}$ ]
$\rho_w$	Massa específica da água [ $ML^{-3}$ ]
$\sigma$	Tensão total [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$\sigma'$	Tensão efetiva [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$\sigma_b$	Tensão normal na base da lamela [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$\sigma_{lm}$	Tensão normal média nas bordas [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]
$\sigma'_h$	Tensão efetiva horizontal [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$\sigma'_v$	Tensão efetiva vertical [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$\tau$	Tensão cisalhante [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$\tau_b$	Tensão cisalhante na base [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$\tau_l$	Tensão cisalhante nas bordas laterais [MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	Ângulo de atrito do solo [-]
$\varphi'$	Ângulo de atrito efetivo do solo [-]
$\varphi_b$	Parâmetro de resistência não saturada (Fredlund et al., 1978) [-]
$\chi$	Parâmetro de tensão efetiva de Bishop [-]
$\psi$	Sucção [L]
$\psi_a$	Pressão de entrada de ar [L]
$\psi_f$	Sucção na frente de saturação [L]
$\psi_i$	Sucção inicial [L]