



Marcelo Miqueletto

**Desenvolvimento de procedimentos numéricos para
análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias
de drenagem**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Rio de Janeiro, agosto de 2007



Marcelo Miquetto

**Desenvolvimento de procedimentos numéricos para
análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias
de drenagem**

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.

Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Presidente
PUC-Rio

Tácio Mauro Pereira de Campos
PUC-Rio

Nelson Ferreira Fernandes
UFRJ

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2007

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

Marcelo Miqueletto

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná. Durante a graduação desenvolveu trabalhos de iniciação científica e estagiou na área de geotecnia. Atualmente trabalha como engenheiro geotécnico em projetos de aproveitamentos hidrelétricos.

Miqueletto, Marcelo

Desenvolvimento de procedimentos numéricos para análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias de drenagem / Marcelo Miqueletto ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2007.

152 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Fluxo saturado-não saturado. 3. Estabilidade de encostas. 4. Elementos finitos. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia civil. III. Título.

CDD: 624

A meu pai.

Agradecimentos

A meu pai, Primo, pelo amor e pelo exemplo de perseverança.

A minha madrinha e amiga, Malu, pelo amor e apoio.

Ao Professor Vargas, pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos durante a elaboração deste trabalho.

Ao André Muller que deu início a este trabalho e que muito ajudou no decorrer de sua elaboração.

Aos colegas e amigos da sala 317, em especial ao Julio, pelas inúmeras discussões e sugestões técnicas e filosóficas.

Aos habitantes permanentes e transientes da Frederico Eyer 121-C, em especial aos amigos João, Pedro e Thaís.

Aos amigos da PUC-Rio, pela amizade e convivência.

Aos amigos de Curitiba, sempre presentes e me apoiando em pensamento.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

À PUC-Rio, à Capes e à FAPERJ pelo suporte a esta pesquisa, muito obrigado.

Resumo

Marcelo Miqueletto. **Desenvolvimento de procedimentos numéricos para análise de infiltração e estabilidade taludes em bacias de drenagem.** Rio de Janeiro, 2007. 152p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta numérica para avaliação do fluxo saturado-não saturado em encostas de grandes dimensões, com aplicação na análise de estabilidade dessas áreas. Emprega-se o método dos elementos finitos na solução da equação de Richards, considerando a carga de pressão como variável primária e utilizando formulação adequada para minimização dos problemas de conservação de massa, freqüentemente, associados a esse fato. O modelo constitutivo utilizado para a curva característica e função de condutividade hidráulica é o proposto por Van Genuchten (1980). Para solução da não-linearidade, emprega-se um método quasi-Newton (BFGS). Com o objetivo de minimizar os requisitos de memória computacional, utiliza-se esquema de armazenamento de matriz esparsa, associado ao método de gradiente bi-conjugado, na solução do sistema de equações. Paralelamente, é apresentado algoritmo de geração de malha tridimensional de elementos finitos, a partir de uma malha superficial de triângulos, representativa da topografia. Análises numéricas são executadas com a finalidade de validação do código gerado, comparando-se os resultados obtidos com aqueles gerados por outros programas já consagrados na literatura técnica. É proposta metodologia para geração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos, empregando-se o método do talude infinito, associado à estrutura da malha de elementos finitos e aos resultados do problema de fluxo, incorporando-se, assim, o efeito do estado de não saturação na resistência do material.

Palavras-chave

Fluxo saturado-não saturado, Estabilidade de encostas, Elementos Finitos

Abstract

Marcelo Miquetto. **Development of numerical procedures for the analysis of infiltration and slope stability in catchment basins.** Rio de Janeiro, 2007. 152p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this work is to develop a numerical tool for the analysis of saturated-unsaturated flow in large scale natural slopes, applied to the study of the stability of these areas. The finite element method is applied to solve the Richard's equation, taking into account the pressure head as the primary variable and using an adequate formulation to minimize the mass conservation issues. The constitutive model used to the characteristic curve and hydraulic constitutive function is the one presented by van Genuchten (1980). A quasi-Newton method (BFGS) is applied for the solution of the non-linearity. A sparse matrix storage scheme, with the objective of reducing the computational memory requirements, is associated to the bi-conjugated gradient method for the solution of the system of equations. An algorithm of finite elements mesh is presented, which generates the 3D mesh from a triangle superficial mesh representing the relief. Numerical analyses are performed in order to validate the code, by comparing the results with those generated by others widely known codes presented in the technical literature. A methodology for the generation of susceptibility maps to shallow translational landslides is delineated, which employs the infinite slope method to the finite elements mesh structure and the flow problem results, considering the effect of the unsaturated state in the material strength.

Keywords

Saturated-unsaturated flow, Slope stability, Finite element

Sumário

1	Introdução	20
2	Solos não saturados	23
2.1.	Fluxo em solos não saturados	23
2.1.1.	Potencial da água no solo	23
2.1.2.	Curva Característica	25
2.1.3.	Lei de Darcy-Buckingham	29
2.1.4.	Condutividade Hidráulica	32
2.1.5.	Equação Richards	35
2.2.	Resistência de solos não saturados	40
2.3.	Influência do fluxo em meios não-saturados na estabilidade de taludes	45
3	Implementações numéricas	48
3.1.	Solução Numérica da Equação de Richards	48
3.1.1.	Formulação de Elementos Finitos	49
3.1.2.	Discretização no tempo	56
3.1.3.	Diagonalização da matriz de massa	57
3.1.4.	Tratamento da Capacidade de Retenção Específica	59
3.1.5.	Solução da não-linearidade	61
3.1.6.	Estimativa inicial do vetor de cargas de pressões nodais	67
3.1.7.	Passo de tempo dinâmico	68
3.1.8.	Critérios de convergência	70
3.1.9.	Balanço de massa	72
3.1.10.	Solução do sistema de equações	73
3.1.11.	Gerador de malha	75
3.2.	Análise de estabilidade	77
3.3.	Implementação computacional	82
4	Exemplos de validação	85
4.1.	Exemplos unidimensionais	85
4.1.1.	Fluxo unidimensional - Condição de contorno de Dirichlet.	85

4.1.2. Fluxo unidimensional - Condição de contorno de Neumann e heterogeneidade do material.	92
4.2. Exemplos bidimensionais	98
4.2.1. Fluxo bidimensional – condição de contorno de Dirichlet.	98
4.2.2. Fluxo bidimensional – condição de contorno de Dirichlet – bulbo de infiltração.	102
4.2.3. Fluxo bidimensional – condição atmosférica (C.C. de Neumann e Dirichlet variáveis) - Talude.	106
4.3. Exemplos tridimensionais	115
4.3.1. Fluxo tridimensional - condição de contorno de Dirichlet.	115
5 . Exemplo de aplicação	123
5.1. Área de estudo	124
5.2. Propriedades dos materiais e parâmetros de análise	126
5.3. Resultados	131
6 Conclusões	142
7 Referências bibliográficas	145
8 Apêndices	151
8.1. Modo de armazenamento de matriz esparsa indexado por linha	151

Lista de figuras

Figura 1 - Curva característica	26
Figura 2 - Menisco de água no solo (Adaptado de Lu e Likos, 2004).	27
Figura 3 - Histerese	28
Figura 4 – Área útil de fluxo em meios porosos não saturados (Adaptado de Reichardt e Timm, 2004).	33
Figura 5 - Função de condutividade hidráulica.	34
Figura 6 - Volume elementar de solo.	36
Figura 7 – Envoltória tridimensional de resistência para solos não saturados (adaptado de Lu e Likos, 2004).	43
Figura 8 – Não linearidade de ϕ^b (Adaptado de Lu e Likos, 2004).	44
Figura 9 – Elementos Finitos utilizados. (a) Elemento trilinear de 8 nós. (b) Elemento trilinear de 6 nós.	52
Figura 10 – Malha tridimensional de elementos finitos paralelepípedicos de 8 nós.	76
Figura 11 – Construção das linhas de nós, abaixo do nó de superfície.	77
Figura 12 – Diagrama de forças para o elemento 3D.	78
Figura 13 – Coluna de elementos 3D criada pelo gerador de malha.	80
Figura 14 – Sequência de análise de estabilidade.	81
Figura 15 – Mapa de fator de segurança.	82
Figura 16 – Fluxograma.	84
Figura 17 – Curva característica.	87
Figura 18 – Curva de condutividade hidráulica.	88
Figura 19 – Carga de pressão em ponto situado a 15cm de profundidade.	89
Figura 20 – Volume acumulado.	90
Figura 21– Perfis de infiltração.	91
Figura 22 – Carga de pressão em ponto situado a 15cm de profundidade – opção 1.	93
Figura 23 – Carga de pressão em ponto situado a 45cm de profundidade – opção 1.	93
Figura 24 - Perfis de infiltração - opção 1.	94

Figura 25 – Carga de pressão em ponto situado a 15cm de profundidade – opção 2.	95
Figura 26 - Carga de pressão em ponto situado a 45cm de profundidade – opção 2.	95
Figura 27 - Perfis de infiltração - opção 2.	96
Figura 28 – Curva característica.	98
Figura 29 – Função de condutividade hidráulica.	99
Figura 30 – Malha de elementos finitos.	100
Figura 31 – Evolução da carga de pressão no tempo para o nó 33.	101
Figura 32 - Evolução da carga de pressão no tempo para o nó 51.	101
Figura 33 – Malha de elementos finitos.	103
Figura 34 – Evolução da carga de pressão no tempo para o nó 61.	104
Figura 35 - Evolução da carga de pressão no tempo para o nó 70.	104
Figura 36 – Bulbo de infiltração.	105
Figura 37 – Geometria simplificada para talude e malha de elementos finitos – RA=10.	106
Figura 38 – Malha de elementos finitos - RA=50.	108
Figura 39 – Evolução da carga de pressão para o nó A.	110
Figura 40 - Evolução da carga de pressão para o nó B.	110
Figura 41 - Evolução da carga de pressão para o nó C.	111
Figura 42 - Evolução da carga de pressão para o nó D.	111
Figura 43 - Evolução da carga de pressão para o nó E.	112
Figura 44 - Evolução da carga de pressão para o nó F.	112
Figura 45 - Evolução da carga de pressão para o nó G.	113
Figura 46 - Evolução da carga de pressão para o nó H.	113
Figura 47 – Malha de elementos finitos para as geometrias de taludes côncava (a e b) e convexa (c e d).	116
Figura 48 – Evolução da carga de pressão para o nó 872, na geometria côncava.	118
Figura 49 - Evolução da carga de pressão para o nó 3781, na geometria côncava.	118
Figura 50 - Evolução da carga de pressão para o nó 2332, na geometria côncava.	119

Figura 51 - Evolução da carga de pressão para o nó 1365, na geometria côncava.	119
Figura 52 – Evolução da carga de pressão para o nó 872, na geometria convexa.	120
Figura 53 – Evolução da carga de pressão para o nó 3781, na geometria convexa.	120
Figura 54 – Evolução da carga de pressão para o nó 2332, na geometria convexa.	121
Figura 55 – Evolução da carga de pressão para o nó 1365, na geometria convexa.	121
Figura 56 – Área de estudo. (Fonte: Fernandes et al., 2001)	125
Figura 57 – Mapa de cicatrizes dos escorregamentos. (Fonte: Gomes, 2006)	126
Figura 58 – Curva característica adotada.	127
Figura 59 – Curva de condutividade hidráulica adotada.	127
Figura 60 – Precipitação diária para os 22 dias de simulação.	128
Figura 61 – Malha utilizada na análise.	130
Figura 62 – Mapa de distribuição de fator de segurança para o instante inicial.	133
Figura 63 - Mapa de cargas de pressão para o instante inicial.	133
Figura 64 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=180h (7,5 dias).	134
Figura 65 - Mapa de cargas de pressão para T=180h (7,5 dias).	134
Figura 66 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=288h (12dias).	135
Figura 67 - Mapa de cargas de pressão para T=288h (12dias).	135
Figura 68 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=480h (20dias).	136
Figura 69 - Mapa de cargas de pressão para T=480h (20dias).	136
Figura 70 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=480h (20dias) - planta.	137
Figura 71 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 16160. Carga inicial de -0,5m.	138
Figura 72 - Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 10277. Carga inicial de -0,5m.	138
Figura 73 - Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 13257. Carga inicial de -0,5m.	139

Figura 74 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 16160. Carga inicial de -5m.	140
Figura 75 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 10277. Carga inicial de -5m.	140
Figura 76 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 13257. Carga inicial de -5m.	141

Lista de tabelas

Tabela 1 - Pontos de Gauss para elemento trilinear de 8 nós.....	55
Tabela 2 - Pontos de Gauss para elemento trilinear de 6 nós.....	55
Tabela 3 – Valores de infiltração imposta.....	108
Tabela 4 – Tempos de análise.....	117
Tabela 5 – Precipitação diária para os 22 dias de simulação.....	128

Lista de símbolos

A	Área [L^2]
$C(h)$	Capacidade de retenção específica [L^{-1}]
C_s	Compressibilidade do esqueleto sólido [$M^{-1}T^2L$]
C_w	Compressibilidade da água [$M^{-1}T^2L$]
c'	Coesão efetiva [$MT^{-2}L^{-1}$]
c^*	Coesão aparente [$MT^{-2}L^{-1}$]
c''	Coesão associada ao efeito da sucção [$MT^{-2}L^{-1}$]
$\{f(h)\}$	Função resíduo de iterações sucessivas [L^3T^{-1}]
$\{f\}$	Matriz Jacobiana ou matriz de iteração [L^2T^{-1}]
F_R	Força resistente [MLT^{-2}]
F_S	Força solicitante [MLT^{-2}]
FS	Fator de segurança [-]
g	Aceleração da gravidade [LT^{-2}]
G	Densidade das partículas sólidas [-]
$\{G\}$	Vetor associado aos gradientes de carga de elevação nodais [L^3T^{-1}]
h	Carga de pressão [L]
$\hat{h}(x, y, z, t)$	Carga de pressão no interior do elemento finito [L]
$h^0(x_i)$	Valores de carga de pressão iniciais [L]
\bar{h}	Valores de carga de pressão imposta [L]
H	Carga hidráulica total [L]
$[H]$	Matriz de condutividade [L^2T^{-1}]
i	Gradiente hidráulico [-]
$[I]$	Matriz identidade [-]
I_{acum}	Volume acumulado de fluido que entrou ou saiu do sistema [L^3]
$[J]$	Matriz Jacobiana dos elementos [L]

$ J $	Jacobiano [L^3]
k	Coefficiente de permeabilidade intrínseca [L^2]
$K, K(\theta), K(h)$	Condutividade hidráulica [LT^{-1}]
$[K], [K(\theta)], [K(h)], K_{ij}$	Tensor de condutividade hidráulica [LT^{-1}]
K_s	Condutividade hidráulica saturada [LT^{-1}]
$[K_s]$	Tensor de condutividade hidráulica saturada [LT^{-1}]
l	Parâmetro de conectividade de poros de Mualen (1976) [-]
m	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [-]
MB	Erro do balanço de massa [-]
n	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [-]
N_i	Funções de interpolação [-]
q	Vazão específica [L^2T^{-1}]
$\{q\}$	Vetor de vazões específicas [L^2T^{-1}]
P	Peso total do bloco na análise de estabilidade [MLT^{-2}]
Q	Vazão [L^3T^{-1}]
$\{Q\}$	Vetor de vazões nodais [L^3T^{-1}]
r, s, t	Coordenadas locais dos elementos [-]
RA	Razão de aspecto [-]
Re	Número de Reynolds [-]
R	Resíduo do método de Galerkin [L^3T^{-1}]
s	Tensão tangencial solicitante [$MT^{-2}L^{-1}$]
S	Grau de saturação [-]
S_s	Armazenamento específico [L^{-1}]
$[S]$	Matriz de massa [L^2]
t	Tempo [T]
u_a	Pressão do ar [$MT^{-2}L^{-1}$]
u_w	Pressão da água [$MT^{-2}L^{-1}$]
$\{v\}$	Vetor do método BFGS [-]
V	Volume total [L^3]
V_w	Volume de água [L^3]

V_v	Volume de vazios [L^3]
V_s	Volume de sólidos [L^3]
V^e	Volume do elemento [L^3]
$\{w\}$	Vetor do método BFGS [-]
W_i	Pesos de ponderação na integração de Gauss [-]
x_i	Coordenadas globais [L]
z	Carga de elevação [L]
α	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [L^{-1}]
β	Escalar multiplicador da busca linear no método BFGS [-]
χ	Parâmetro de tensão efetiva de Bishop [-]
δ_{ij}	Delta de Kronecker
$\{\delta\}$	Vetor de incremento de carga de pressão nodal entre iterações no método BFGS [L]
Δt	Tamanho do passo de tempo [T]
ε^2	Erro de truncamento da série de Taylor
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo [-]
ϕ^b	Parâmetro de resistência não saturada (Fredlung et al., 1978) [-]
γ_s	Peso específico das partículas sólidas [$ML^{-1}T^{-2}$]
γ_w	Peso específico da água [$ML^{-1}T^{-2}$]
$\{\gamma\}$	Vetor de incremento de vazão desequilibrada nodal entre iterações no método BFGS [L^3T^{-1}]
Γ	Contorno do modelo
Γ_D	Contorno com condição de Dirichlet
Γ_N	Contorno com condição de Neumann
φ	Ângulo de máxima declividade do elemento no cálculo de estabilidade [-]
μ	Viscosidade dinâmica da água [$ML^{-1}T^{-1}$]
ν	Viscosidade cinemática da água [L^2T^{-1}]
θ	Unidade volumétrica [L^3L^{-3}]

θ_r	Unidade volumétrica residual [L^3L^{-3}]
θ_s	Unidade volumétrica de saturação [L^3L^{-3}]
Θ	Unidade volumétrica relativa [L^3L^{-3}]
ρ	Massa específica [ML^{-3}]
ρ_w	Massa específica da água [ML^{-3}]
σ	Tensão total [$MT^{-2}L^{-1}$]
σ'	Tensão efetiva de Terzaghi [$MT^{-2}L^{-1}$]
τ	Resistência ao cisalhamento [$MT^{-2}L^{-1}$]
ξ	Porosidade [-]
ψ	Potencial total da água [ML^2T^{-2}]
ψ_g	Potencial gravitacional da água [ML^2T^{-2}]
ψ_m	Potencial matricial da água [ML^2T^{-2}]
ψ_o	Potencial osmótico da água [ML^2T^{-2}]
ψ_p	Potencial de pressão da água [ML^2T^{-2}]
ψ_t	Potencial térmico da água [ML^2T^{-2}]
Ω	Domínio do modelo
$\{\nabla H\}$	Vetor gradiente de carga total [L]
$\{\nabla h\}$	Vetor gradiente de carga de pressão [L]

A rapadura é doce, mas não é mole não.

Sabedoria popular