



**Marlene Susy Tapia Morales**

**Estudo Numérico e Experimental de  
Problemas de Fluxo Saturado – Não  
Saturado em solos**

**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: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2008



**Marlene Susy Tapia Morales**

**Estudo Numérico e Experimental de Problemas  
de Fluxo Saturado – Não Saturado em solos**

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

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

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Tácio Mauro Pereira Campos**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Nelson Ferreira Fernandes**

Universidade Federal de Rio de Janeiro – IG-UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2008

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

### **Marlene Susy Tapia Morales**

Graduou-se em Engenharia Civil da UNSAAC (Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco), em 2002. Ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em agosto de 2005, atuando na área de Geotecnia Ambiental. Atualmente cursa no programa de doutorado oferecido pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Morales, Marlene Susy Tapia

Estudo numérico e experimental de problemas de fluxo saturado – não saturado em solos / Marlene Susy Tapia Morales ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2008.

125 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Solos não saturados. 3. Fluxo saturado. 4. Fluxo não saturado. 5. Ensaio de campo. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

**Para minha família: Javier,  
Sabina, Rosa, July e Thalia.**

## Agradecimentos

À CAPES e pelo apoio financeiro e à PUC-Rio que me deu a oportunidade de fazer o mestrado.

Ao Professor Eurípedes do Amaral Vargas Júnior, pela orientação, conhecimentos transmitidos, atenção, apoio e paciência.

À Raquel pela sua paciência extrema e sua ajuda incondicional. Sem você, este trabalho não teria sido possível mesmo.

À Wagner, que sempre me auxiliou na elaboração desta dissertação.

À minha família, Pai, Mãe, Irmãs; pelo apoio imenso nas mais difíceis situações e decisões, e por constituírem sempre a referência fundamental da minha vida....vocês moram no meu coração!

Ao Paul, por acreditar em mim mais do que eu mesma, por facilitar as coisas e me acompanhar nesta jornada.

À Presvitero e Joana pela sua amizade, apoio e incentivo para poder terminar esta dissertação.

À Elizabet por ter confiado em mim.

Aos amigos que fiz neste mestrado Freddy, Roberto, Jocielia, Alessandra, Johan, Erick, Gladys, Kathia, Priscila, Julio. Por todas as horas que juntos estudamos e buscamos partilhar nossas experiências.

## Resumo

Morales, Marlene Susy Tapia; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. **Estudo Numérico e Experimental de Problemas de Fluxo Saturado - Não Saturado em solos** Rio de Janeiro, 2008. 125p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo de fluxo saturado – não saturado em solos exige o conhecimento das funções de relação, como a curva característica ( $\theta$  x  $h$ ) e a curva de condutividade hidráulica ( $K$  x  $h$ ). Para determinar estas relações o presente trabalho utiliza o modelo de van Genuchten- Mualem, o qual está implementado numa ferramenta numérica que permite a utilização da retroanálise como método para determinação dos parâmetros do modelo. O principal objetivo deste trabalho é a avaliação de um método que permita a estimativa dos parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem, a partir de dados coletados em campo ou laboratório para, então, realizar-se a análise de fluxo saturado - não saturado e a estimativa dos parâmetros de van Genuchten-Mualem. Finalmente, as condições de fluxo saturado – não saturado em duas encostas foram simuladas, em duas e três dimensões, a fim de verificar a variação de fluxo nestes casos.

## Palavras-chave

Solos não saturados, fluxo saturado, fluxo não saturado, ensaios de campo.

## Abstract

Morales, Marlene Susy Tapia; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. **Numerical and Experimental Study on Saturated and Non-saturated Soil Problems.** Rio de Janeiro, 2008. 125p. Msc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The study of saturated and non saturated flow in soils requires the knowledge of relation functions, as water retention curve ( $\theta$  vs.  $h$ ) and hydraulic conductivity curve ( $K$  vs.  $h$ ). In order to determine these relations, this research uses van Genuchten-Mualem's model, which is implemented on a numerical based method. This tool allows the inverse solution as a method to determine the parameters of the model. The main objective of this research is the evaluation of a method which allows the estimative of the required parameters by the chosen model, determined based on field or laboratory data, so then, based on these parameters, saturated and non-saturated flow analysis were carried out and the estimative of parameters of van Genuchten-Mualem's model. Finally, saturated and non-saturated simulations were made on two slopes. These simulations were followed by 2D and 3D models, in order to verify the flow variation on these cases.

## Keywords

Non-saturated soil, saturated flow, non-saturated flow, field test

# Sumário

1. Introdução	19
2. Fluxo em Meios Saturado e Não Saturados	22
2.1. Equação de Fluxo	22
2.2. Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturadas	25
2.2.1. Curva Característica	26
2.2.2. Curva de Condutividade Hidráulica	29
2.3. Solução Numérica da Equação de Fluxo	31
3. Estimativa de Parâmetros	35
3.1. Introdução	35
3.2. Métodos de Estimativa de Parâmetros	37
3.3. Métodos de Solução do Problema Inverso	37
3.4. Ensaios Modelados Utilizando a Estimativa de Parâmetros	40
3.4.1. Ensaios de Campo	40
3.4.1.1. Ensaio de Infiltração Monitorado (E.I.M.)	41
3.4.2. Ensaios de Laboratório	44
3.4.2.1. Ensaio de Laboratório Proposto por Marinho (2006)	45
4. Locais de Estudos e Resultados de Ensaios	47
4.1. Ensaios no Campo Experimental II da PUC-Rio	47
4.2. Ensaio em Perfil de Solo de Duque de Caxias	50
4.3. Ensaios em solos da Vista Chinesa	53
4.4. Ensaios em Solos do Túnel Rebouças	57
4.5. Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas	59
5. Estimativa de Parâmetros e Análise Direta	63



5.1. Introdução	63
5.2. Estimativa de Parâmetros	63
5.2.1. Condições de Contorno e Parâmetros Iniciais	64
5.2.2. Resultados da Estimativa de Parâmetros	67
5.2.2.1. Resultados no Campo Experimental II PUC-Rio	67
5.2.2.2. Resultados Para o Perfil de Solo de Duque de Caxias	69
5.2.2.3. Resultados Para os Solos do Túnel Rebouças	72
5.2.2.4. Resultados na Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas	74
5.3. Análise Direta	76
5.3.1. Análise Direta da Encosta da Vista Chinesa	76
5.3.2. Análise Direta da Encosta do Túnel Rebouças	82
6. Conclusões e Sugestões	93
Referências Bibliográficas	95
Apêndice A	
Apêndice B	
B.1. Ensaios com Tensiômetro	
B.2. Ensaios com Permeâmetro de Guelph	

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Análise granulométrica do solo do C.E.II (Soares, 2005).	49
Tabela 4.2 - Análise granulométrica do solo de Duque de Caxias (Nunes, 2002).	51
Tabela 4.3 - Análise granulométrica dos solos da Vista Chinesa (Soares, 1999).	54
Tabela 4.4 - Parâmetros do modelo de van Genuchten dos solos da Vista Chinesa (Vargas, 2008).	55
Tabela 4.5 - Resultado dos ensaios de condutividade hidráulica in-situ para a Vista Chinesa (Soares, 1999)	55
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios em laboratório da condutividade hidráulica para a Vista Chinesa (Soares, 1999).	55
Tabela 4.7 - Valores de precipitação, evapotranspiração e interceptação da água da chuva da Vista Chinesa fevereiro de 1988 (Vargas, 2008).	56
Tabela 4.8 - Resumo da análise granulométrica dos solos no túnel Rebouças.	57
Tabela 4.9 - Resultado dos ensaios utilizado o permeâmetro de Guelph no solo do túnel Rebouças	58
Tabela 4.10 - Análise granulométrica da Pilha estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Saliba, 2007).	60
Tabela 5.1 - Parâmetros iniciais do Campo Experimental II PUC-Rio.	65
Tabela 5.2 - Parâmetros iniciais para o solo de Duque de Caxias (Velloso, 2006).	65
Tabela 5.3 - Parâmetros do Caulim (solo 2).	66
Tabela 5.4 - Condições iniciais para os ensaios de laboratório.	66

Tabela 5.5 - Parâmetros de iniciais para o solo do túnel Rebouças.	66
Tabela 5.6 - Parâmetros iniciais para os solos da pilha estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas.	67
Tabela 5.7 - Parâmetros estimados do Campo Experimental II.	68
Tabela 5.8 - Coeficientes de correlação do Campo Experimental II.	68
Tabela 5.9 - Parâmetros estimados para o solo de Duque de Caxias, E.I.M.	70
Tabela 5.10 - Coeficientes de correlação de Duque de Caxias, E.I.M.	70
Tabela 5.11 - Parâmetros estimados para o solo de Duque de Caxias, ensaio de laboratório.	70
Tabela 5.12 - Coeficientes de correlação para o solo Duque de Caxias, ensaio de laboratório.	71
Tabela 5.13 - Parâmetros estimados para o solo túnel Rebouças.	72
Tabela 5.14 - Coeficientes de correlação para o solo túnel Rebouças.	72
Tabela 5.15 - Parâmetros estimados para a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.	74
Tabela 5.16 - Coeficientes de correlação para o a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.	74
Tabela 5.17 - Condições iniciais da encosta da Vista chinesa.	77
Tabela 5.18 - Valores da condutividade hidráulica saturada da encosta do túnel Rebouças.	82

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Cubo elementar sujeito a um fluxo nas direções x, y e z.	22
Figura 2.2 - Elemento de solo não saturado (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).	25
Figura 2.3 - Figura 2.3 - Menisco de água no solo (adaptado de Lu e Likos, 2004).	26
Figura 2.4 - Curva Característica	27
Figura 2.5 - Curvas de Retenção de água para diferentes solo e condições (adaptado, Reichardt e Timm, 2004).	27
Figura 2.6 - Histerese (adaptado, Reichardt e Timm, 2004).	28
Figura 2.7 - Diminuição da área útil para o fluxo de água. (adaptado, Reichardt e Timm, 2004).	30
Figura 2.8 - Condutividade hidráulica não Saturada (adaptado, Velloso, 2000).	31
Figura 3.1 - Diagrama do problema direto e problema inverso (Velloso, 2000).	36
Figura 3.2 - Comparação entre os valores observados nos ensaios e os estimados no ensaio de piezocone (adaptado de Gribb et al., 2006).	41
Figura 3.3 - Esquema do Ensaio de Infiltração Monitorado (Velloso, 2006).	42
Figura 3.4 - Permeâmetro de Guelph.	42
Figura 3.5 - Colocação do tensiômetro.	43
Figura 3.6 - Vista do ensaio de infiltração monitorada (E.I.M.).	44
Figura 3.7 - Ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006).	46
Figura 4.1 - Localização do Campo Experimental II (Soares, 2005).	47
Figura 4.2 - Descrição Morfológica do Perfil (Daylac, 1994).	48
Figura 4.3 - Resumo da curvas características do Campo Experimental II (Soares , 2005 e DEC/PUC-Rio, 2004).	49

Figura 4.4 - Resultados do E.I.M. no solo do Campo Experimental II da PUC-Rio.	50
Figura 4.5 - Solo de Duque de Caxias (Nunes, 2002).	50
Figura 4.6 - Curvas características do solo de Duque de Caxias.	51
Figura 4.7 - Resultados do E.I.M. para o solo de Duque de Caxias (Barros, 2004).	52
Figura 4.8 - Resultados do ensaio de laboratório proposto por Marnho (2006).	52
Figura 4.9 - Mapa de localização da Vista Chinesa (Soares, 1999).	53
Figura 4.10 - Curva característica para os solos da vista Chinesa (Vargas, 2008).	54
Figura 4.11 - Precipitação e precipitação acumulada fevereiro 1988 da Vista Chinesa (Vargas 2008).	56
Figura 4.12 - Resultados do E.I.M. para os solos no túnel Rebouças	58
Figura 4.13 - Precipitação média mensal durante o 2007, Estação Tijuca	58
Figura 4.14 - Precipitação média mensal durante o 2007, Estação Laranjeiras.	59
Figura 4.15 - Vista aérea da região em estudo, identificando alguns aspectos importantes registrados durante a caracterização da área (Saliba, 2007).	61
Figura 4.16 - Resultado do E.I.M. da Pilha de estéril PDE-05 (Saliba, 2007).	62
Figura 5.1 - Condições de contorno do ensaio de infiltração monitorada, (a) esquema geral. (b) esquema axi-simétrico (modificado de Velloso, 2000).	64
Figura 5.2 - Condição de Contorno para o ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006).	65
Figura 5.3 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo, medidas no E.I.M. e retroanalisadas, para o solo do Campo Experimental II.	68
Figura 5.4 - Curvas características calculadas das retroanálises e estudos anteriores para o solo do Campo Experimental	

II.	69
Figura 5.5 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidos no E.I.M. e retroanalizadas para o solo de Duque de Caxias.	70
Figura 5.6 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidas e retroanalizadas, para o solo de Duque de Caxias (ensaio de laboratório proposto).	71
Figura 5.7 - Curvas características para os parâmetros estimados com o ensaio de laboratório proposto e estudos anteriores para o solo de Duque de Caxias.	72
Figura 5.8 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidas no E.I.M. e retroanalizadas para os solos do túnel Rebouças.	73
Figura 5.9 - Curvas características para os parâmetros estimados dos solos do túnel Rebouças.	73
Figura 5.10 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidos no E.I.M. e retroanalizadas para a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.	75
Figura 5.11 - Curvas características para os parâmetros estimados da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.	75
Figura 5.12 - Perfil geométrico da Vista Chinesa (adaptado de Soares, 1999).	76
Figura 5.13 - Condições de contorno do talude da Vista Chinesa.	77
Figura 5.14 - Simulação da Vista Chinesa 2D, sem considerar a região saturada.	78
Figura 5.15 - Simulação Vista Chinesa 2D considerando uma região saturada.	79
Figura 5.16 - Carga de pressão x tempo calculados para a simulação 2D, e a precipitação utilizada nas análises da Vista Chinesa.	80
Figura 5.17 - Simulação tridimensional entre os dias 18 e 22 considerando a região saturada da Vista Chinesa.	81
Figura 5.18 - Carga de pressão x tempo e precipitação empregada	

nas análises da simulação 3D da Vista Chinesa.	82
Figura 5.19 - Perfil considerado na encosta do túnel Rebouças.	83
Figura 5.20 - Condições de contorno assumidas para a análise do talude no túnel Rebouças.	84
Figura 5.21 - Resultado da análise bidimensional da etapa 1 no túnel Rebouças.	85
Figura 5.22 - Resultado da análise bidimensional da etapa 2 precipitações médias e o vazamento.	86
Figura 5.23 - Resultado da análise bidimensional durante da etapa 3 do túnel Rebouças.	87
Figura 5.24 - Carga de pressão x tempo ponto na base do talude na interface solo- rocha no túnel Rebouças (2D).	88
Figura 5.25 - Carga de pressão x tempo ponto no meio do talude na interface solo- rocha no túnel Rebouças (2D).	88
Figura 5.26 - Carga de pressão x tempo ponto no médio do material 2 e a variação da precipitação meio do túnel Rebouças (2D).	88
Figura 5.27 - Resultado da análise tridimensional da etapa 1 no túnel Rebouças.	89
Figura 5.28 - Resultado da análise tridimensional da etapa 2, no túnel Rebouças.	90
Figura 5.29 - Resultado da análise tridimensional da etapa 3 no túnel Rebouças.	91
Figura 5.30 - Carga de pressão x tempo num ponto da base do talude para a simulação tridimensional no túnel Rebouças.	92
Figura 5.31 - Carga de pressão x tempo num ponto no meio do talude para a simulação tridimensional no túnel Rebouças.	92
Figura A1.1 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo da Observação 1 do Campo Experimental II PUC-Rio.	102
Figura A1.2 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo da Obsevação 2 do Campo Experimental II.	103

Figura A1.3 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo da Observação 1 do Duque de Caxias.	104
Figura A1.4 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo do Material 1 do Rebouças.	105
Figura A1.5 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo Material 2 do Rebouças.	106
Figura A1.6 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo EnTen_01 da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas.	107
Figura A1.7 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo EnTen_02 da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas.	108
Figura A1.8- Malha de elementos finitos para o ensaio de campo EnTen_05 da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas.	109
Figura A1.9- Malha de elementos finitos para o ensaio de campo EnTen_08 da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas.	110
Figura A1.10 - Malha de elementos finitos para o ensaio de campo EnTen_09 da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas.	111
Figura A1.11 - Malha de elementos finitos para o ensaio de laboratório proposto por Marinho de Duque de Caxias.	112
Figura A1.12 - Malha de elementos finitos para a simulação da Vista chinesa 2D.	113
Figura A1.13 - Malha de elementos finitos para a simulação da Vista chinesa 3D.	114
Figura A1.14 - Malha de elementos finitos para a simulação do Rebouças 2D.	115
Figura A1.15 - Malha de elementos finitos para a simulação do Rebouças 3D.	116



## Lista de símbolos

$C(h)$	Capacidade de retenção específica.
$dx$	Largura do elemento infinitesimal.
$dy$	Altura do elemento infinitesimal.
$d^k$	Direção de busca.
$\bar{e}$	Vetor na direção da aceleração.
$F$	Função objetivo.
$\bar{F}$	Matriz de capacidade de retenção.
$g$	Gradiente da função objetivo.
$h$	Carga de pressão
$h_e$	Carga de elevação
$h_t$	Carga total
$\bar{H}$	Matriz do elemento de fluxo
$i$	Gradiente hidráulica
$k_s$	Condutividade hidráulica saturada
$k$	Condutividade hidráulica
$\bar{K}$	Matriz da condutividade hidráulica
$L_n$	Comprimento do segmento do contorno
$m$	Número de medidas
$M_w$	Massa da água armazenada.
$n$	Coeficiente da curva característica.
$n_e$	Porosidade.
$n_p$	Número de parâmetros a estimar.
$N$	Função de interpolação.
$p$	Vetor de parâmetros.
$p^*$	Vetor das informações prévias.
$p_0$	Vetor de estimativa inicial dos parâmetros.
$\bar{Q}$	Vetor de vazão nodal.

$\bar{Q}$	Vetor de vazão nodal relacionado aos efeitos gravitacionais.
$r_i$	Resíduos.
$S$	Grau de saturação.
$t$	Tempo.
$\bar{v}$	Vetor de velocidade.
$x$	Vetor de coordenadas espaciais ( $x_i$ ; $i = 1, 2$ ).
$y$	Variáveis dependentes calculadas pelo modelo.
$y^*$	Variáveis dependentes medidas no ensaio.
$\tilde{y}$	Valor verdadeiro da variável independente.

### Símbolos gregos

$\theta$	Teor de umidade volumétrico.
$\theta_r$	Teor de umidade residual .
$\theta_s$	Teor de umidade na saturação.
$\alpha$	Coeficiente da curva característica.
$\alpha^k$	Tamanho do passo.
$\phi$	Função de interpolação.
$\Omega$	Domínio do fluxo.
$\Omega_e$	Domínio do elemento e.
$\rho_w$	Massa específica da água.
$\rho$	Coeficiente de correlação.
$\Gamma_D$	Segmento do contorno do domínio de fluxo onde a condição de contorno do tipo Dirichlet é especificada.
$\Gamma_e$	Segmento de contorno do elemento e.
$\Gamma_N$	Segmento do contorno do domínio de fluxo onde a condição de contorno do tipo Neumann é especificada.
$\Delta t$	Incremento de tempo.
$\Delta p^k$	Variação do vetor de parâmetros.
$\sigma_n$	Fluxo prescrito no contorno $\Gamma_N$ .