Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Roberto Juan Quevedo Quispe

Implementação Numérica para Análise de Fluxo Transiente 3D em Barragens

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. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2008

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Roberto Juan Quevedo Quispe

Implementação Numérica para Análise de Fluxo Transiente 3D em Barragens

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.

Celso Romanel
Orientador, PUC-Rio

Christianne de Lyra Nogueira
UFOP

Anna Paula Lougon Duarte
Petrobrás

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

Rio de Janeiro, 22 de Fevereiro de 2008.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

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

Roberto Juan Quevedo Quispe

Graduou-se em Engenharia Mecânica de Fluidos na especialidade de Hidráulica e Hidrologia pela Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) de Lima, Peru, em 2000.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Ficha Catalográfica

Quevedo Quispe, Roberto Juan

Implementação numérica para análise de fluxo transiente 3D em barragens / Roberto Juan Quevedo Quispe ; orientador: Celso Romanel. – 2008.

109 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. Fluxo transiente. 3. Modelagem 3D. 4. Barragens. 5. Elementos finitos. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Aos meus queridos pais e irmãos.

Agradecimentos

Aos meus queridos pais e irmãos, pelo amor e apoio moral mesmo à distância.

Aos meus queridos tios Juan, Fanny, Victor e Silvia, por sempre terem acreditado em mim.

Ao Professor Celso Romanel, pela orientação e conhecimentos transmitidos durante a elaboração deste trabalho.

Ao Anderson Rezende que muito me ajudou no início deste trabalho, pela paciência e apoio.

Aos meus amigos Julio Macias e Wagner Nahas, pelas inúmeras respostas às minhas questões e pela amizade brindada.

À Priscila Tapajós, por ter me mostrado a cidade maravilhosa do Rio de Janeiro e o encanto de seu povo.

Aos meus amigos Enrrique, Carla e Gladys, por terem compartilhado comigo muitos momentos inesquecíveis.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio, pelo carinho e amizade.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou suporte financeiro a esta pesquisa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Resumo

Quevedo Quispe, Roberto Juan; Romanel, Celso (Orientador). **Implementação Numérica para Análise de Fluxo Transiente 3D em Barragens.** 2008. 109 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação tem por objetivo a implementação de uma ferramenta numérica para avaliação do fluxo transiente 3D saturado-não saturado em barragens de terra e enrocamento, baseado no método dos elementos finitos e no programa GEOFLUX implementado por Machado Jr. (2000) para análise de problemas 2D. Nesta nova versão, foram incluídos elementos triangulares de 3 nós para análises 2D e elementos tetraédricos de 4 nós para análises 3D. Implementam-se também subrotinas que oferecem a possibilidade de variação das condições de contorno com o tempo. A equação de Richards é solucionada considerando a formulação mista e o método iterativo de Picard Modificado para solução do sistema de equações não-lineares. Para a solução do sistema de equações utiliza-se um armazenamento especial para matrizes esparsas associado com o método do gradiente bi-conjugado, tornando o processo muito rápido, mesmo em sistemas de grande porte. Utilizam-se dois modelos para representar as curvas características: o modelo exponencial proposto por Srivastava e Yeh (1991) e o modelo proposto por van Genuchten (1980). O programa computacional desenvolvido (GEOFLUX3D) foi aplicado na análise de fluxo na barragem de enrocamento de Gouhou, China, e na barragem de terra Macusani, Peru. Os resultados numéricos indicam a necessidade de análises numéricas 3D em barragens situadas em vales estreitos, onde os efeitos de geometria nas condições de fluxo são significativos e não podem ser ignorados.

Palavras-chave

Fluxo transiente; modelagem 3D; barragens; elementos finitos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Abstract

Quevedo Quispe, Roberto Juan; Romanel, Celso (advisor). **Numerical Implementation for 3D Analysis of Transient Flow in Dams.** 2008. 109 p. M.Sc. Thesis - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this thesis is to implement a numerical tool for the evaluation of 3D saturated / unsaturated transient flow through earth and rockfill dams with basis on the finite element method and a computer program written by Machado Jr. (2000) for analysis of similar 2D flow problems. In the 3D version, developed in this thesis, four-nodes tetrahedral elements were implement as well as special subroutines that make possible to vary in time the boundary conditions. The Richards' equation is solved through a mixed formulation, for the solution of the non-linear system of equations a Modified Picard's method is employed. A special algorithm is used to store the sparse matrices which, in association with the bi-conjugated gradient method, rend the solver computationally very efficient, even for a large number of equations. Two different models were used to represent the characteristic curves: the exponential curve proposed by Srivastava and Yeh (1991) and the formulation suggested by van Genuchten (1980). The improved computer program, thereafter named GEOFLUX3D, was then applied for flow analysis of the Gouhou rockfill dam (China) and the Macusani earth dam (Peru). Numerical results point out that 3D numerical analyses are necessary for dams situated in narrow valleys, where the influence of the terrain geometry on the flow conditions are quite significant and cannot be just ignored.

Keywords

Transient flow, 3D model, dams, finite elements.

Sumário

1. Introdução 20

2. Fluxo em meios porosos não saturados 23
2.1. Meios porosos saturado e não saturado 23
2.2. Curva característica de sucção 25
2.2.1. Modelo de Srivastava e Yeh (1991) 27
2.2.2. Modelo de van Genuchten (1980) 28
2.3. Curva de condutividade hidráulica 29
2.3.1. Modelo de Srivastava e Yeh (1991) 30
2.3.2. Modelo de van Genuchten (1980) 31
2.4. Equação governante do fluxo em meio poroso não saturado 32
2.5. Solução númerica da equação de Richards pelo MEF 35

3. GEOFLUX3D - Implementação computacional 39
3.1. Consideraçãoes gerais 39
3.2. O programa GEOFLUX3D 40
3.2.1. Macro-comandos 40
3.2.2. Fluxograma básico 42
3.2.3. Comando DATBOUI 44
3.2.4. Comando SEEPAGE 45
3.2.5. Comando CALCOEFS 45
3.3. Discretização no espaço 48
3.3.1. Elemento TRI3 48
3.3.2. Elemento TETR4 48
3.4. Discretização no tempo 49
3.5. Metodo de Picard modificado 50
3.6. Critério de convergência 53
3.7. Matrizes e vetores 55
3.7.1. Matriz $\overline{B}$ 55
3.7.2. Matriz $\overline{H}$ 57

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

3.7.3. Matriz $\overline{F}$ 58
3.7.4. Vetor $\overline{Q}$ 58
3.7.5. Vetor $\overline{Q}'$ 59
3.7.6. Vetor $\overline{F}_\theta$ 59
3.7.7. Matriz de conductividade hidráulica $\overline{K}(\psi)$ 60
3.7.8. Capacidade de retenção específica $C(\psi)$ 61
3.8. Armazenamento de dados e solução do sistema de equações 62

4. Exemplos de verificação 66
4.1. Fluxo transiente unidimensional 66
4.1.1. Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída por um único material 67
4.1.2. Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais 71
4.2. Fluxo transiente bidimensional 75

5. Estudo de casos 79
5.1. Fluxo através da barragem de enrocamento Gouhou (China) com face de concreto 79
5.1.1. Descrição da barragem Gouhou 80
5.1.2. Condições iniciais e de contorno 81
5.1.3. Propriedades dos materiais 82
5.1.4. Modelagem no espaço e no tempo 84
5.1.5. Análise e discussão dos resultados 85
5.2. Fluxo através da barragem de terra Macusani 89
5.2.1. Descrição da barragem Macusani 90
5.2.2. Casos de simulação 91
5.2.3. Propriedades dos materiais 84
5.2.4. Modelagem no espaço e no tempo 85
5.2.5. Análise e discussão dos resultados 95
5.2.5.1. Caso I: Primeiro enchimento do reservatório (K_{dreno} = 4x10^{-5} m/s) 95

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

5.2.5.2. Caso II: Primeiro enchimento do reservatório
(K_{dreno} = 4x10^{-4} m/s) 97
5.2.5.3. Caso III: Rebaixamento rápido do reservatório 99
5.2.6. Comparação de resultados com o programa computacional
Seep3D 100

6. Conclusões e sugestões 103

7. Referências bibliográficas 106

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Lista de figuras

Figura 2.1 – Distribuição de poro-pressão típica em um horizonte de solo 23
Figura 2.2 – Curva característica de retenção típica de um solo Siltoso (Fredlund e Xing, 1994) 26
Figura 2.3 – Forma típica da curva característica de retenção conforme modelo exponencial 27
Figura 2.4 – Forma típica da curva característica de retenção de acordo com o modelo de van Genuchten (1980) 29
Figura 2.5 – Forma típica da curva da função de condutividade hidráulica para o modelo exponencial 30
Figura 2.6 – Forma típica da curva da função de condutividade hidráulica para o modelo de van Genuchten (1980) 31
Figura 2.7 – Volume elementar sujeito a fluxo nas direções x, y e z 32

Figura 3.1 – Fluxograma básico do programa GEOFLUX3D 42
Figura 3.2 – Exemplo de aplicação da variação de condição de contorno primária 44
Figura 3.3 – Exemplo de aplicação da condição de contorno de fluxo livre Seepage 45
Figura 3.4 – Resultados do GEOFLUX3D aplicando condição de contorno SEEPAGE 46
Figura 3.5 – Fluxograma básico do comando CALCOEFS 47
Figura 3.6 – Elemento TRI3 48
Figura 3.7 – Elemento TETR4 49
Figura 3.8 – Malha de elementos finitos simplificada 63
Figura 3.9 – Matriz Posic montada a partir da malha simplificada 64
Figura 3.10 – Matriz MatVal montada a partir da malha simplificada 64

Figura 4.1 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno 67

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Figura 4.2 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material – análise preliminar 68
Figura 4.3 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material – resultados numéricos e analíticos 69
Figura 4.4 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de um único material – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno 70
Figura 4.5 – Drenagem em uma coluna de solo constituída de um único material – resultados numéricos e analíticos 71
Figura 4.6 - Infiltração em uma coluna de solo constituída de dois materiais – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno 72
Figura 4.7 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais – resultados numéricos e analíticos 73
Figura 4.8 - Drenagem de uma coluna de solo constituída de dois materiais – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno 74
Figura 4.9 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais – resultados numéricos e analíticos 75
Figura 4.10 – Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado numa faixa da superfície, com indicação das condições iniciais e de contorno 76
Figura 4.11 – Malha de elementos finitos, utilizada para simulação da infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado em uma faixa da superfície 77
Figura 4.12 - Evolução das cargas de pressão computadas pelo GEOFLUX3D 77
Figura 4.13 - Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado numa faixa da superfície – comparação dos resultados numéricos e analíticos em (a) 36 min; (b) 72 min 78

Figura 5.1 - Localização da barragem Gouhou na China 79
Figura 5.2 - Barragem Gouhou: (a) seção transversal A-A de altura máxima; (b) seção longitudinal B-B vista desde montante 80

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Figura 5.3 - Modelo geométrico 3D e condições de contorno para a simulação de fluxo transiente na barragem Gouhou, China 81
Figura 5.4 - Curvas granulométricas dos materiais empregados nas zonas de enrocamento da barragem Gouhou. 82
Figura 5.5 - Curvas características de retenção para os materiais correspondentes nas zonas de enrocamento 1 e 2. 83
Figura 5.6 - (a) Modelo geométrico 2D da barragem Gouhou, (b) malha de elementos finitos tipo TRIA3 84
Figura 5.7 - (a) Modelo geométrico 3D da barragem Gouhou, (b) malha de elementos finitos tipo TETR4 84
Figura 5.8 - Evolução no tempo da superfície freática na barragem Gouhou 85
Figura 5.9 - Evolução no tempo dos contornos das isóbaras (kPa) na seção transversal máxima da barragem Gouhou 86
Figura 5.10 - Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na seção longitudinal da barragem em x = 111,56m 87
Figura 5.11 - Distribuição de cargas de pressão (m) na barragem Gouhou depois de 0,4 dias 88
Figura 5.12 - Distribuição de cargas totais (m) na barragem Gouhou depois de 0,4 dias 88
Figura 5.13 - Localização da barragem Macusani no Peru 89
Figura 5.14 - Barragem Macusani: (a) Seção transversal A-A de altura máxima; (b) Seção longitudinal. 90
Figura 5.15 - Modelo geométrico simplificado e condições de contorno para análise de fluxo 3D na barragem de terra Macusani, Peru 91
Figura 5.16 - (a) Modelo geométrico 2D da barragem Macusani, (b) malha de elementos finitos tipo TRIA3 94
Figura 5.17 - (a) Modelo geométrico 3D da barragem Macusani, (b) malha de elementos finitos tipo TETR4 94
Figura 5.18 - Evolução da superfície freática na barragem Macusani para o caso I sob diferentes tempos 95
Figura 5.19 - Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na seção transversal em z = 290 m para o caso I 96
Figura 5.20 - Contornos de poro pressão (kPa) na secção de corte em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

z = 290 m para o caso II 97
Figura 5.21 - Distribuição final de cargas de pressão (m) na barragem Macusani depois de 1000 dias (condição de regime permanente) para o caso II 98
Figura 5.22 - Distribuição final das cargas totais (m) na barragem Macusani depois de 1000 dias (condição de regime permanente) para o caso II 98
Figura 5.23 - Evolução da posição da superfície freática com o tempo, após rebaixamento rápido do reservatório 99
Figura 5.24 - Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na superfície de talude de montante após o rebaixamento rápido 100
Figura 5.25 - Comparação das posições das superfícies freáticas na seção máxima A–A, determinadas pelo GEOFLUX3D e pelo programa comercial Seep3D v.1.15, em análises tridimensionais na condição de fluxo em regime permanente para o caso I 101
Figura 5.26 - Comparação das posições das superfícies freáticas na seção máxima A–A, determinadas pelo GEOFLUX3D e pelo programa comercial Seep3D v.1.15, em análises tridimensionais na condição de fluxo em regime permanente para o caso II 101

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Incidência nodal dos elementos da malha simplificada 63
Tabela 3.2 – Montagem da matriz Posic 63

Tabela 4.1 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material - parâmetros do modelo exponencial 67
Tabela 4.2 – Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais - parâmetros do modelo exponencial 73
Tabela 4.3 - Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado a uma faixa da superfície – parâmetros do modelo exponencial. 76

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) nos materiais da barragem Gouhou, China 83
Tabela 5.2 – Função de variação de carga hidráulica na superfície do talude de montante (primeiro enchimento do reservatório) 92
Tabela 5.3 - Função de variação de carga hidráulica na superfície do talude de montante (rebaixamento rápido do reservatório) 92
Tabela 5.4 – Materiais empregados na barragem Macusani e seus respectivos coeficientes de condutividade hidráulica na condição saturada. (CISMID) 93
Tabela 5.5 – Tabela 5.5 - Materiais empregados na barragem Macusani e respectivos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizado para análise sob regime transiente (CISMID) 93
Tabela 5.6 - Comparação de vazões totais calculadas pelos programas GEOFLUX3D e SEEP3D em análises 3D na barragem de terra Macusani 102

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Lista de símbolos

A	Área [L^2]
a_{ij}	Cosseno do ângulo entre a direção principal i e o eixo j do sistema de coordenadas globais [-]
B	Matriz que relaciona o gradiente hidráulico com a carga hidráulica total
$C(\psi)$	Capacidade de retenção específica [L^{-1}]
$\overline{D}$	Matriz de coeficientes
$\overline{e}$	Vetor de componente unitaria na direção da aceleração da gravidade
$\overline{F}$	Matriz de capacidade de retenção ou matriz de massa
$\overline{F}_\theta$	Vetor empregado na formulação de Picard modificado
H	Carga hidráulica total [L]
$\overline{H}$	Matriz de fluxo
J	Matriz Jacobiana
J^{-1}	Inversa da matriz Jacobiana
$\lvert J \rvert$	Determinante da matriz Jacobiana
$\overline{K}, \overline{K}(\psi)$	Matriz de condutividade hidráulica [L^2T^{-1}]
$K_{1S,} K_{2S}, K_{3S}$	Condutividades hidráulicas nas direções principais [L^2T^{-1}]
M_w	Massa de água [M]
m	Iteração anterior
$m+1$	Iteração corrente
Matval	Matriz que armazena os valores das posições não nulas da matriz esparsa $\overline{D}$
N	Matriz das funções de interpolação
N_i	Funções de interpolação
n	Passo do tempo anterior

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

n+1	Passo de tempo corrente
$\overline{n}$	Vetor unitario em direção normal ao contorno de um elemento finito
n_e	Porosidade [-]
ne	Número de nós de uma malha de elementos finitos igual ao número de elementos da matriz esparsa $\overline{D}$
nne	Número de elementos não nulos da matriz esparsa $\overline{D}$
p	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [-]
Posic	Matriz que armazena as posições não nulas da matriz esparsa $\overline{D}$
q	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [-]
Q	Vazão [L^3T^{-1}]
$\overline{Q}$	Vetor de vazões nodais equivalente ao fluxo prescrito [L^3T^{-1}]
$\overline{Q}'$	Vetor de vazões nodais que traduz uma parcela da vazão relativa a efeitos gravitacionais [L^3T^{-1}]
$\overline{R}$	Vetor de Respostas
$R(\psi^*)$	Resíduo do método de Galerkin [L^3T^{-1}]
S	Grau de saturação [-]
t	Tempo [T]
u_{ar}	Pressão do ar [$MT^{-2}L^{-1}$]
u_w	Pressão da água [$MT^{-2}L^{-1}$]
V_w	Volume de água [L^3]
V_e	Volume do elemento [L^3]
x, y, z	Coordenadas globais [L]
y	Carga de elevação [L]
ψ	Carga de pressão [L]
$\overline{\psi}$	Vetor de cargas de pressão [L]
$\overline{\psi}_0$	Vetor de cargas de pressão iniciais [L]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

i	Gradiente hidráulico [-]
$\{q\}$	Vetor de vazões específicas [L^2T^{-1}]
ξ,η,ζ	Coordenadas locais dos elementos [-]
ϕ	Potencial total da água [ML^2T^{-2}]
ϕ_g	Energia potencial gravitacional da água [ML^2T^{-2}]
ϕ_m	Potencial matricial da água [ML^2T^{-2}]
ϕ_o	Potencial osmótico da água [ML^2T^{-2}]
ϕ_p	Potencial de pressão da água [ML^2T^{-2}]
ϕ_t	Potencial térmico da água [ML^2T^{-2}]
θ	Teor de umidade volumétrica [L^3L^{-3}]
$\overline{\theta}$	Vetor de teor de umidade volumétrica [L^3L^{-3}]
θ_r	Teor de umidade volumétrica residual [L^3L^{-3}]
θ_s	Teor de umidade volumétrica saturada em processos de infiltração [L^3L^{-3}]
$\theta_S^{'}$	Teor de umidade volumétrica saturada em processos de drenagem [L^3L^{-3}]
θ_e	Teor de umidade volumétrica relativa [L^3L^{-3}]
ρ_w	Massa específica da água [ML^{-3}]
γ_w	Peso específico da água [$ML^{-1}T^{-2}$]
α	Coeficiente que define o tipo de marcha no tempo [-]
α_{vg}	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980) [L^{-1}]
$\alpha_{\exp}$	Parâmetro do modelo do modelo exponencial (1994) [L^{-1}]
∇H	Vetor gradiente de carga total [L]
$\nabla \psi$	Vetor gradiente de carga de pressão [L]
Δt	Tamanho do passo de tempo [T]
Ω	Domínio do modelo
Ω_e	Domínio do elemento
Γ	Contorno do modelo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA

Γ_e	Contorno do elemento
Γ_1	Contorno com condição de Dirichlet
Γ_2	Contorno com condição de Neumann
δ_{ij}	Delta de Kronecker
$\bar{v}$	Vetor de velocidade superficial de fluxo [LT^{-1}]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611854/CA