

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João Paulo Castagnoli

**Uma Implementação Numérica do Acoplamento Água
Superficial - Água Subterrânea**

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 Júnior

Rio de Janeiro

Abril de 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João Paulo Castagnoli

**Uma Implementação Numérica do Acoplamento Água
Superficial - Água Subterrânea**

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

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC/RIO

Tácio Mauro Pereira Campos

PUC/RIO

Antonio Roberto Barboza de Oliveira

PUC/RIO

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Científico Tecnológico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de abril de 2007

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

João Paulo Castagnoli

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), em março de 2005. Ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Puc-Rio em março de 2005, etuando na área de Geotecnia Ambental.

Ficha Catalográfica

Castagnoli, João Paulo

Uma implementação numérica do acoplamento
água superficial - água subterrânea / João Paulo
Castagnoli ; Eurípedes do Amaral Vargas Júnior. – 2007.
121 f. : il. (col.) ; 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. Elementos finitos. 3. Fluxo superficial. 4. Fluxo subterrâneo. 5. Acoplamento numérico. I. Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus queridos pais,
pelo amor e apoio.

Agradecimentos

Ao professor Eurípedes do Amaral Vargas Júnior, pela orientação recebida ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus queridos pais, pelo incentivo, apoio, carinho ao longo deste trabalho que só foi possível por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre ao meu lado.

A todos os amigos conquistados durante esse período na PUC-Rio, que me acompanharam nas horas acadêmicas e principalmente nas horas não acadêmicas.

Ao Cnpq, CAPES e Puc-Rio pelo apoio financeiro.

Aos professores e funcionários da PUC-Rio.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Resumo

Castagnoli, João Paulo; Vargas, Eurípedes do Amaral Júnior. **Uma Implementação Numérica do Acoplamento Água Superficial - Água Subterrânea**. Rio de Janeiro, 2007. 121p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A relação entre os processos hidrológicos de escoamento superficial e subterrâneo apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal. Podendo ser representado de forma qualitativa como parte sequencial do ciclo hidrológico, estes processos, demonstram sua grande dependência e importância nos estudos de balanços hídricos. Visando uma representação quantitativa, este trabalho faz o acoplamento, entre os modelos numéricos de escoamento superficial e de fluxo em meios porosos. Para o meio poroso adotou-se o modelo numérico SWMS_3D (Simunek et al, 1995), o qual resolve a equação de Richards, para fluxo em meios porosos saturados e não saturados nas três dimensões. Na simulação da dinâmica superficial, foram desenvolvidos dois modelos derivados das equações de Saint-Venant: o modelo da Onda Cinemática e o modelo de Difusão. Para a solução numérica foi empregado o método dos elementos finitos através da formulação de Galerkin, adotando uma malha tridimensional de elementos tetraédricos, formando uma sub-malha de elementos triangulares na superfície. O modelo de escoamento superficial emprega a malha triangular e interage com o programa SWMS_3D modificado (que utiliza a malha de tetraédros) através das imposições das condições de contorno transientes. Este, responderá com uma parcela de fluxo correspondente à recarga ou descarga no contorno a cada passo de tempo. Com isso, o modelo gerado é capaz de quantificar espacialmente e temporalmente as cargas de pressão em todos os pontos do domínio de estudo.

Palavras-chave

Elementos Finitos; Fluxo Superficial; Fluxo Subterrâneo, Acoplamento numérico.

Abstract

Castagnoli, João Paulo; Vargas, Eurípedes do Amaral Júnior. **Numerical Implementation of Acoppling Surface Water - Groundwater**. Rio de Janeiro, 2007. 121p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

While analyzing the interaction between the hydrological processes of surface and groundwater flow, it is seen that there is a big difference in its interaction in the space and time. These processes can be represented in a qualitative form as part of the hydrological cycle, demonstrating its dependences and importance in the hydrological balance. This work does the numerical coupling of the surface and groundwater flow. This work adopted the SWMS_3D numerical model (Simunek et. al., 1995), which resolves the Richards equation for saturated and non saturated porous media flow in 3D. In order to simulate the superficial dynamic flow, two models from Saint-Vennat equation were developed, these models are: the cinematic wave model and the diffusion model. These two models consider the average outflow in sections in a 2D scenario. For the numerical solution the finite element method was adopted through the Galerkin formulation. Adopting a 3D domain mesh of tetrahedral elements, seen from above, in 2D, we can see a triangular element mesh. The superficial flow model uses the triangular mesh and iterates with the SWMS_3D modified software, which uses the tetrahedral elements mesh. This was done by changes in the boundary conditions to the models. The SWMS_3D will answer with a flow portion corresponding to a sink or source action in the surface, in each time step. Finally the generated model is able to quantify in space and in time the pressure head in the study domain.

Keywords

Finite Elements; Surface Flow; Groundwater Flow, Numerical Coupling.

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Escopo	19
1.2. Objetivo	20
2 Formulação Matemática	21
2.1. Fluxo Superficial	21
2.1.1. Equação da continuidade	21
2.1.2. Equação da quantidade de movimento	23
2.1.3. Modelo bidimensional de onda cinemática	29
2.1.4. Solução analítica do modelo cinemático 1D	30
2.1.5. Modelo bidimensional de difusão	35
2.2. Equação de fluxo em meios porosos	37
2.2.1. Propriedades hidráulicas de solos não saturados	40
3 Análise numérica do fluxo superficial e subterrâneo	42
3.1. Modelo numérico da onda cinemática	43
3.1.1. Modelo numérico unidimensional da onda cinemática	43
3.1.2. Modelo numérico bidimensional da onda cinemática	49
3.2. Modelo numérico de difusão	54
3.2.1. Modelo numérico unidimensional de Difusão	55
3.2.2. Modelo numérico bidimensional de Difusão	58
3.3. Análise numérica do fluxo em meios porosos	59
3.3.1. Condição de contorno atmosférica	62
4 Acoplamento entre água superficial – água subterrânea	64
4.1. Conceitos gerais da interação água superficial – subterrânea	64
4.1.1. Interação entre escoamentos em rios e solo	65
4.1.2. Interação entre escoamentos superficiais lentos e solo	66
4.1.3. Infiltração	68
4.2. Descrição da implementação numérica de acoplamento	72
4.3. Módulo de interação	75
4.3.1. Acoplamento temporal	79

4.4. Geração das malhas dos modelos	82
5 Exemplos	84
5.1. Análise de sensibilidade do modelo Analítico	84
5.1.1. Variação do coeficiente de Manning	85
5.1.2. Variação do comprimento do plano	86
5.1.3. Variação da declividade do plano	87
5.1.4. Variação da intensidade da chuva	88
5.1.5. Variação do período de precipitação.	89
5.2. Validação dos modelos numéricos de escoamento superficial	90
5.2.1. Validação do modelo cinemático	91
5.2.2. Validação do modelo de difusão	93
5.3. Validação da implementação numérica de acoplamento	95
5.3.1. Dados utilizados	95
5.3.2. Resultados Obtidos	96
5.4. Exemplo 1 – Escoamento superficial com infiltração constante	105
5.5. Exemplo 2 – Drenagem superficial	106
5.6. Exemplo 3 – Interação entre fluxo superficial imposto e solo não saturado utilizando o modelo cinemático	108
5.7. Exemplo 4 - Interação entre fluxo superficial imposto e solo não saturado, com evento de runoff, utilizando modelo de difusão	111
6 Conclusão e sugestões	113
6.1. Sugestões	115
7 Referências	116

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Volume de controle para balanço de massa.	22
Figura 2.2 – Perfil da altura da lâmina d'água ao longo de um plano de comprimento L.	32
Figura 2.3 - Hidrogramas típicos de saída para três situações relacionando o tempo de precipitação D com o tempo de concentração t_c .	34
Figura 2.4 - Curva A - curva que representa a relação umidade volumétrica versus carga de pressão. Curva B - curva que representa a relação permeabilidade não saturada versus carga de pressão (fonte Simunek et al., 1995).	40
Figura 3.1 – fluxo sobre plano de largura unitária.	45
Figura 3.2 – Elemento unidimensional.	45
Figura 3.3 – Elemento triangular de três nós isoparamétrico.	50
Figura 4.1 - Representação dos processos hidrológicos abordados, para uma fatia de solo em uma bacia hidrográfica. (Fonte USDA, 1995)	64
Figura 4.2 - Fluxo entre rio e lençol freático conectados. (A) Sentido de fluxo solo – superfície. (B) Sentido de fluxo superfície – solo. (C) Rios desconectados são separados do nível freático através de uma zona não saturada (fonte USGS 1998).	66
Figura 4.3 - Interações entre lago – solo e pântanos – solo.	67
Figura 4.4 – Água subterrânea e superficial interagindo através do relevo, na direção das montanhas para o oceano. Descrição do modelo conceitual: M – Montanhas; K – Karst, G – Glacial; R – rio de vale pequeno; V – rio de vale largo; C – costa oceânica. (fonte USGS, 1998)	68
Figura 4.5 - Perfil de umidade e suas características, após algum tempo de iniciada a infiltração (Fonte Prevedello, 1996, modificada).	69
Figura 4.6 – Perfis de grau de saturação em relação ao tempo de empocamento.	71
Figura 4.7 – Velocidade de infiltração e infiltração acumulada dada um valor constante de precipitação.	72
Figura 4.8 – Fluxograma de interação entre os módulos principais.	74
Figura 4.9 – fluxograma de ações da rotina SHIFT.	77
Figura 4.10 – Diferenças de cargas entre os modelos BRANCH' e MODFLOW (Fonte USGS, 1996).	80

Figura 4.11 – Sincronia temporal entre os modelos superficial e subterrâneo.	81
Figura 4.12 - Extração da malha superficial.	82
Figura 4.13 – Correspondência nodal na superfície de escoamento do domínio.	83
Figura 5.1 – Hidrogramas no exutor para diferentes coeficientes de Manning.	85
Figura 5.2 - Hidrogramas no exutor para diferentes comprimentos de planos.	87
Figura 5.3 - Hidrogramas no exutor para diferentes declives de planos	88
Figura 5.4 - Hidrogramas no exutor para diferentes precipitações incidentes.	89
Figura 5.5 - Hidrogramas no exutor para diferentes períodos de precipitações.	90
Figura 5.6 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemáticos e analítico $t_c < t_p$.	91
Figura 5.7 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemático e analítico $t_c = t_p$.	92
Figura 5.8 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemático e analítico $t_c > t_p$.	92
Figura 5.9 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c < t_p$.	93
Figura 5.10 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c = t_p$.	94
Figura 5.11 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c > t_p$.	95
Figura 5.12 - Carga de pressão no centro da superfície superior do cilindro.	97
Figura 5.13 – Carga de pressão na superfície superior do cilindro.	98
Figura 5.14 – Carga de pressão no centro da superfície superior do cilindro.	99
Figura 5.15 – Velocidade de infiltração e de precipitação no centro da superfície superior do cilindro.	100
Figura 5.16 - Velocidade de infiltração e de precipitação no centro da superfície superior do cilindro.	101
Figura 5.17 – Gráfico de volume de água ao longo do tempo, utilizando os seguintes parâmetros: $K_s = 0.000772\text{cm/s}$, $K_k = 0.000695\text{cm/s}$, $S_s = 0.0001\text{cm}^{-1}$	102
Figura 5.18 – Gráfico de volume de água ao longo do tempo, utilizando os seguintes parâmetros: $K_s = 0.0000772\text{cm/s}$, $K_k = 0.0000695\text{cm/s}$, $S_s = 0.0001\text{cm}^{-1}$	102
Figura 5.19 – Gráfico do erro relativo entre o volume no modelo numérico e o volume analítico.	103
Figura 5.20 – Seqüência nos tempos 1100, 2700 e 4300 s para o perfil de infiltração.	105
Figura 5.21 – Exemplo 1: Relevo adotado para simulação de escoamento	

superficial cinemático.	105
Figura 5.22 – Exemplo 1: Resultados de carga de pressão no tempo 4h.	106
Figura 5.23 – Mapa dos declives superficiais calculados pelo programa superficial cinemático.	107
Figura 5.24 – Seqüência temporal do rebaixamento do nível da água no solo, pelo efeito da drenagem superficial.	108
Figura 5.25 – Nó de atribuição de condição de contorno de montante.	109
Figura 5.26 - Seqüência temporal da formação lençol freático, através da interação “rio” – solo.	110
Figura 5.27 – Seqüência de resultados entre formação do lençol freático, “runoff” e drenagem do solo.	112

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Softwares que retratam as fases de escoamento superficial e subterrâneo de modo acoplado.	19
Tabela 5.1 – Parâmetros do coeficiente de Manning utilizados e tempos de concentração.	85
Tabela 5.3 – Declividade dos planos e tempos de concentração.	87
Tabela 5.4 - Precipitações adotadas - tempos de concentração.	88
Tabela 5.5 – Períodos de precipitações.	89
Tabela 5.6 – Parâmetros hidrológicos.	96

Lista de Símbolos

Caracteres Romanos

A	Área da seção [L ²]
b	Largura de seção [L]
c	Celeridade da onda cinemática [L/T]
F _b	Força de corpo [N]
g _n	Aceleração da gravidade a direção n [L/T]
h	Carga de pressão [L]
H	Carga de total [L]
i	Velocidade de infiltração [L/T]
K_d	Coefficiente de difusão do modelo de difusão [L ² /T]
$K(\theta)$	Permeabilidade do meio poroso em função da umidade volumétrica na direção do fluxo [L/T]
K_s	Permeabilidade do solo na saturação [L/T]
K_r	Condutividade hidráulica relativa [-]
k	Constante adimensional [-]
m	Expoente da equação de Manning [-]
n	Coefficiente de Manning [T/L ^{1/3}]
P	Perímetro molhado
Q	Descarga por unidade de largura [L ² /T]
Q _n	Vazão superficial por unidade de largura na direção n, ou densidade de fluxo em meios porosos [L ² /T]
r	Velocidade de chuva [L/T]
R	Raio hidráulico [L]
S ₀	Declividade topográfica [-]

S_f	Declividade da linha de energia total para escoamento de superfície livre [-]
S_v	Fluxo extraído pela vegetação no solo [T^{-1}]
S_r	Declividade resultante na direção normal ao contorno do domínio [-]
S	Grau de saturação [-]
S_{ek}	Grau de saturação correspondente a variável θ_k [-]
\vec{V}	Campo de velocidades do escoamento superficial [L/T]
u	Componente da velocidade na direção x [L/T]
V	Volume [L^3]
V_D	Velocidade de Darcy
v	Componente da velocidade na direção y [L/T]
w	Componente da velocidade na direção z [L/T]

Caracteres Gregos

ξ	Porosidade [-]
γ	Peso específico [N/L^3]
θ	Umidade volumétrica do solo
θ_r	Umidade volumétrica residual [-]
θ_s	Umidade volumétrica saturada do solo [-]
θ_a	Umidade volumétrica residual do modelo de Mualem
θ_m	Umidade volumétrica de saturação de Mualem
ρ	Massa específica do fluido [M/L^3]
σ_{xx}	Tensão normal [N/L^2]
τ_{ij}	Tensão cisalhante [N/L^2]