

José Anderson do Nascimento Batista

# Modelagem de Escoamento em Aquíferos Longos Baseada no Método de Elementos Analíticos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientação: Prof. Harry Edmar Schulz

Co-orientação: Prof. Edson Cezar Wendland

São Carlos - SP

2006

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B333m Batista, José Anderson do Nascimento  
Modelagem de escoamento em aquíferos longos baseada no  
método de elementos finitos / José Anderson do Nascimento  
Batista. -- São Carlos, 2006.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2006.

Área: Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Harry Edmar Schulz.

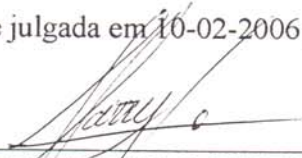
Co-orientador : Prof. Edson Cezar Wendland.

1. Hidráulica Ambiental. 2. Método de elementos  
analíticos. 3. Aquíferos longos. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **JOSÉ ANDERSON DO NASCIMENTO BATISTA**

Tese defendida e julgada em 10-02-2006 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **HARRY EDMAR SCHULZ (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

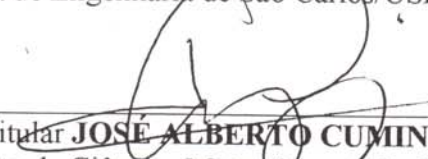
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **FERNANDO MARTINI CATALANO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

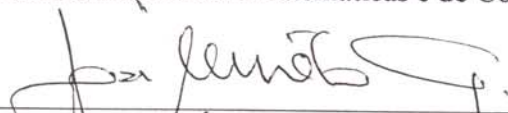
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **ANTONIO MAROZZI RIGHETTO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

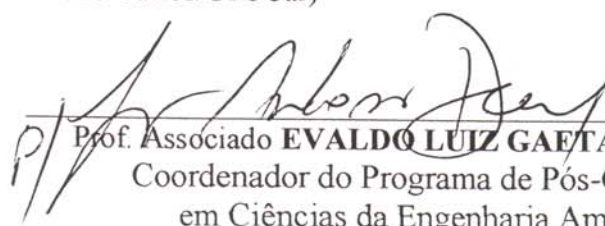
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOSÉ ALBERTO CUMINATO**  
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOSÉ RENATO COURY**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **IVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Ciências da Engenharia Ambiental

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico para  
Sabrina, Filipe e Pedro.

## **Agradecimentos**

Os agradecimentos a seguir são informais, porém, necessários e existem em função dos inúmeros atos igualmente desobrigados realizados em benefício deste trabalho. Esta tese é fruto de muitas conversas, discussões, sugestões, críticas que produziram esclarecimentos, dúvidas e, principalmente, motivação. Logo no início, colegas de classe com quem conversei, ou apenas comentários de amigos a respeito estimularam-me à curiosidade sobre o tema. Com a chegada dos primeiros resultados, as dúvidas levantadas por pessoas interessadas em palestras que fiz e, de outro lado, correspondências que mantive com diversos autores via e-mail foram necessárias para me alertarem para dificuldades. No entanto, ao longo de todo trabalho, o simples fato de expor um problema a um colega muitas vezes permitiu obter colocações ou questões que valeram de preciosos “feedbacks”. Neste sentido, posso dizer que Jorge e Quaresma são as pessoas mais pacientes e solidárias que existem. A caminho do final do trabalho, próximo ao término do prazo, a compreensão do Professor Harry pôs fim a qualquer ansiedade. Tenho também muito a agradecer ao Professor Edson pela confiança que dispensou a mim nos seus projetos de extensão durante o período pós-bolsa. Entretanto, é preciso, ainda, mencionar o fato de que este trabalho não teria sido possível sem a oração de meus pais, minha sogra e minha esposa (Sabrina). Portanto, esta tese é fruto de muita motivação, construída por meio da didática formal, mas, também, da informal e esta regida por Deus. A Ele toda gratidão e louvor.

“Passa diante do povo, e toma contigo alguns anciãos de Israel, leva contigo em mão a vara, com que feriste o rio, e vai. Eis que estarei ali diante de ti sobre a rocha de Horebe; ferirás a rocha, e dela sairá água, e o povo beberá”.

Êxodo 17. 5, 6

“Toma a vara, ajunta o povo, tu e Arão, teu irmão, e, diante dele, falai à rocha, e dará a sua água; assim lhe tirareis água da rocha, e dareis a beber à congregação e aos seus animais”.

Números 20. 8

## **Resumo**

Batista, J. A. N. (2006) Modelagem de Escoamento em Aquíferos Longos Baseada no Método de Elementos Analíticos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP.

O Método de Elementos Analíticos tem se mostrado uma alternativa conveniente para a construção de modelos regionais de escoamento subterrâneo. O Método utiliza soluções elementares analíticas e, portanto, não necessitam de contornos artificiais. Entretanto, a caracterização de fronteiras externas de aquíferos considerados longos (Aquíferos Longos) acarreta dúvidas quanto à presença do efeito de borda na simulação. Assim, neste trabalho, o Método de Elementos Analíticos é estendido para a modelagem de escoamentos em Aquíferos Longos eliminando-se a possibilidade da presença de efeitos de borda. O domínio desses aquíferos é mapeado em um semi-plano utilizando-se a transformação de Schwarz-Christoffel. Dessa forma, elementos de regime estacionário são mapeados juntamente com o domínio para o semi-plano e, portanto, sua formulação é modificada. Os contornos do semi-plano, por sua vez, são representados pelo Método de Imagens. Elementos de escoamento transiente são abordados utilizando-se a formulação de Zaadnoordijk. São realizadas correções algébricas e computacionais na formulação desses elementos. No entanto, o mapeamento de domínio não é extensivo aos elementos transientes. Sua aplicação em Aquíferos Longos é feita de maneira aproximada utilizando-se apenas o Método de Imagens diretamente sobre o aquífero. Em seguida, a extensão proposta para o Método de Elementos Analíticos é analisada em um problema hipotético. Finalmente, é feita uma modelagem para a avaliação de impactos ambientais devidos a um sistema de captação de água localizado em uma porção do Aquífero Barreiras no Estado do Rio Grande do Norte sobre a Lagoa do Bonfim. O modelo é calibrado em regime permanente fornecendo uma estimativa de recarga de 24mm/mês e, então, estima os impactos permanentes do sistema sobre a Lagoa do Bonfim, onde é feita a captação. O impacto do bombeamento reduz aproximadamente 5,36m do nível de água natural da Lagoa. Um cenário de seca é, também, simulado em regime transiente. A partir dos resultados obtidos avalia-se que dois meses de ausência de recarga direta aumentam aproximadamente 0,5m a redução do nível de água da Lagoa do Bonfim.

**Palavras-chaves:** Hidráulica Ambiental, Método de Elementos Analíticos, Aquíferos Longos.

## **Abstract**

Batista, J. A. N. (2006) Elonged Aquifer Flow Modeling Based on Analytic Element Method. Doctoral Thesis. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP.

The Analytic Element Method has shown itself an elegant alternative to regional groundwater flow modeling. The Method applies elementary analytic solutions and, therefore, artificial boundaries are not a necessity. However, frontiers of such considered Elonged Aquifers carries out some questions about “edging effects” in the model results. In this work, the Analytic Element Method is extended to Elonged Aquifer flow completely eliminating any “edging effect”. To do this, such aquifers are mapped into a semi-plan by means of the Schwarz-Christoffel transform. Next, steady flow elements are mapped accordingly to the domain transformation and consequently its formulas are modified suitably. Then, Method of Image gives boundary conditions in semi-plan. Transient flow elements due to Zaadnoordijk are considered. Mistakes in algebraic and computational aspects were corrected. Nevertheless, domain mappings are not performed to transient elements. Appliance of such elements to Elonged Aquifers is performed in an approximated manner with the Method of Image just upon the aquifer. After that, a hypothetical example is performed in order to analyze the new elements, given successful results. Then, a case study is developed in order to assess the impact due to a water supply system in the Barreiras Aquifer, Rio Grande do Norte State, on Bonfim Lake. The model is calibrated, obtaining the recharge rate parameter equal to 24mm/month, and then is used to evaluate water level depletion in Bonfim Lake. Water level changing in Bonfim Lake is given by the steady state flow 5.36m down. Finally, a transient flow model is built in order to obtain water level changes due to recharge absence. According to results, recharge absence during two month long enlarges 0.5m, approximately, water depletion in Bonfim Lake.

**Key-words:** Environmental Flow, Analytic Element Method, Elonged Aquifers



## Lista de Símbolos

<b>A</b>	matriz de coeficientes
<b>A, B</b>	constantes determinadas por condições de contorno
<b>B</b>	vetor de termos independentes
<b>C</b>	contorno de uma superfície de controle; constantes de integração
<b>c</b>	vetor de intensidade do dipolo no espaço
$c_m$	resistência transversal da camada semiconfinante inferior do aquífero $m$
$d$	diâmetro médio dos grãos do meio
<b>D</b>	domínio da solução
<b>D</b>	tensor de proporcionalidade entre a descarga aparente e o campo gravitacional do escoamento
<b>E</b>	campo gravitacional
$e$	índice identificador de espelhos
$el$	índice identificador de elementos
<b>F</b>	função que satisfaz a teoria do potencial
$f, g, F, G$	funções
$g$	aceleração da gravidade no local
$h$	altura da lâmina de água do escoamento
<b>H</b>	espessura do aquífero
<b>h</b>	vetor formado pelos elementos $\phi_m$
$H^*$	espessura de paredes (estruturas horizontais) presentes no aquífero
$H_m$	espessura do aquífero $m$
$i$	índice da linha do elemento do tensor de condutividades do meio poroso
<b>I</b>	integral
$i, j$	índices utilizados na identificação de termos de uma série
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$	versores do sistema cartesiano de coordenadas
$j$	índice da coluna do elemento do tensor de condutividades do meio poroso
<b>K</b>	condutividade hidráulica do meio poroso saturado
<b>K</b>	condutividade hidráulica em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite negativo

$k$	permeabilidade intrínseca do material poroso; índice utilizado em séries
$K^*$	condutividade hidráulica de paredes (estruturas horizontais) presentes no aquífero
$K^+$	condutividade hidráulica em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite positivo
$K_{ij}$	elementos do tensor de condutividades do meio poroso
$K_m$	condutividade hidráulica do aquífero $m$
$\underline{\underline{\mathbf{K}}}$	tensor de condutividades do meio poroso
$L$	comprimento do tubo utilizado no Experimento de Darcy
$L_m$	espessura da camada semiconfinante inferior do aquífero $m$
$m$	índice que identifica o aquífero em um sistema de camadas aquíferas
$n$	número de termos de uma série
$N$	taxa de recarga do aquífero
$n_e$	porosidade efetiva do meio
$N_m$	taxa de recarga do aquífero $m$
$p$	pressão do fluido; polinômio de correção do potencial no infinito
<b>pc</b>	ponto de controle
<b>Q</b>	velocidade aparente do escoamento totalizada na direção vertical
<b>q</b>	velocidade aparente do escoamento, ou seja, a descarga de água por unidade área perpendicular à sua direção
$Q^*$	velocidades aparentes distribuídas ao longo de paredes (estruturas horizontais) presentes no aquífero
$Q^+$	velocidade aparente bidimensional em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite positivo
$Q^-$	velocidade aparente bidimensional em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite positivo
$Q_\xi^+$	componente horizontal da velocidade aparente bidimensional em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite positivo
$Q_\xi^-$	componente horizontal da velocidade aparente bidimensional em posições onde a parte imaginária da coordenada complexa adimensional encontra-se no limite positivo

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

