



**Jackeline Rosemery Castañeda Huertas**

## **Modelagem Numérica de Fluxo 3D em Meios Porosos**

### **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  
Outubro de 2006



**Jackeline Rosemery Castañeda Huertas**

## **Modelagem Numérica de Fluxo 3D em Meios Porosos**

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

**Anna Paula Lougon Duarte**

PUC - Rio

**Janaina Veiga Carvalho**

Universidade Severino Sombra

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de outubro de 2006

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

### **Jackeline Rosemary Castañeda Huertas**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO), de Trujillo – Peru, em 1999, tendo exercido a profissão de engenheira civil na cidade de Iquitos – Peru até 2003. Ingressou em 2004 no curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa geomecânica computacional.

#### Ficha Catalográfica

Huertas, Jackeline Rosemary Castañeda

Modelagem Numérica de Fluxo 3D em Meios Porosos / Jackeline Rosemary Castañeda Huertas, orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

v., 128 f: :il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Fluxo em solos. 3. Modelagem tridimensional. 4. Barragem de terra. 5. Rebaixamento do lençol freático. 6. Elementos finitos. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus amados pais,  
Henry Alejandro e Lydia Norma.

## **Agradecimentos**

A Deus, pelo dom da vida.

Ao professor Celso Romanel pela impecável e sempre presente orientação.

Aos membros da Banca Examinadora, Anna Paula Lougon Duarte, Janaina Veiga Carvalho e Celso Romanel, pelas valiosas contribuições buscando o aperfeiçoamento deste trabalho.

Um agradecimento especial à dona Vane Serra Pedroso, pela acolhida e apoio incondicional.

Aos professores e alunos do curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Às prezadas amigas do Departamento de Engenharia Civil, Rita de Cássia do Nascimento Leite e Maria de Fátima de Castro Dinoá.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou minha permanência no curso.

## Resumo

Huertas, Jackeline Rosemary Castañeda; Romanel, Celso. **Modelagem Numérica de Fluxo 3D em Meios Porosos**. Rio de Janeiro, 2006. 128p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Simulações numéricas tendem a simplificar o comportamento de problemas reais, na maioria das vezes pela adoção de um modelo 2D para descrição da resposta hidráulico-mecânica de barragens de terra, escavações, fundações, etc., com base na maior facilidade da construção geométrica de malhas, rapidez de processamento, simplicidade na introdução das condições de contorno, menor dificuldade na obtenção dos parâmetros de engenharia, etc. Entretanto, para certos fenômenos como o fluxo através de barragem em vales estreitos ou no rebaixamento do lençol freático para execução de escavações para construção de fundações, os efeitos tridimensionais podem afetar consideravelmente os resultados obtidos com uma solução simplificada, seja em termos de vazão, cargas, gradientes hidráulicos ou fatores de segurança. Esta dissertação tem como objetivo principal analisar problemas de fluxo, na condição transiente e/ou permanente, considerando solos saturados e parcialmente saturados, em simulações 2D e 3D pelo método dos elementos finitos buscando destacar as principais diferenças entre as respostas obtidas, ressaltando as principais vantagens e dificuldades da realização de uma simulação 3D em relação a uma análise simplificada 2D. Os exemplos numéricos abordados neste trabalho se referem à barragem de terra Macusani, no Peru, à escavação realizada para construção das estruturas da Pequena Central Elétrica Canoa Quebrada – MT e ao rebaixamento do lençol freático para construção das fundações do shopping Brooklin na cidade de São Paulo - SP.

## Palavras – chave

Fluxo em solos, modelagem tridimensional, barragem de terra, rebaixamento do lençol freático, elementos finitos.

## Abstract

Huertas, Jackeline Rosemary Castañeda; Romanel, Celso (advisor). **Numerical Modeling of 3D Flow in Porous Media**. Rio de Janeiro, 2006. 128p. MSc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Numerical simulations tend to simplify the behavior of real problems, mainly through the choice of 2D models to describe the hydromechanical responses of earth dams, excavations, foundations, etc., partly because it is easier to construct geometrical meshes, it is simpler to impose the required boundary conditions, the computer calculations are done more rapidly and the estimation of the engineering parameters, either through field or laboratory tests, are less difficulty than it would be if the problem was treated as a complete 3D case. However, for certain phenomena such as the flow of water through dams situated in narrow valleys or the water drawdown in excavations for construction of building foundations, 3D effects can considerably affect the results when compared to a simplified 2D solution, either in terms of quantity of flow, hydraulic heads and gradients, security factors, etc. The main goal of this dissertation is the analysis of flow problems, both in transient and permanent conditions, considering fully saturated or partially saturated soils, employing 2D and 3D numerical models based on the finite element method in order to highlight the main differences between the computed answers, emphasizing the advantages and difficulties of both approaches. The numerical examples studied in this work are the earth dam Macusani, situated in Peru, the excavation carried out for the construction of the structures in the small hydroelectric plant Canoa Quebrada – MT, and groundwater drawdown for the execution of the foundations of the Brooklin shopping mall, in the city of São Paulo – SP.

## Keywords

Flow in soils, tridimensional model, earth dams, groundwater drawdown, finite elements.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. Introdução   | 22 |
| 2. Fluxo de água através de meios porosos                             | 24 |
| 2.1. Equações governantes   | 24 |
| 2.2. Soluções da equação bidimensional de Laplace                     | 27 |
| 2.2.1. Método analítico   | 27 |
| 2.2.2. Modelos físicos  | 28 |
| 2.2.2.1. Modelos de areia   | 28 |
| 2.2.2.2. Modelos de placas (Hele-Shaw)                                | 29 |
| 2.2.2.3. Modelos elétricos  | 30 |
| 2.2.3. Método dos fragmentos  | 33 |
| 2.2.4. Redes de fluxo   | 36 |
| 2.2.5. Método das diferenças finitas                                  | 39 |
| 2.2.6. Método da caminhada aleatória (método de Monte Carlo)          | 43 |
| 2.2.7. Método dos elementos finitos                                   | 44 |
| 2.3. Solução numérica da equação tridimensional de Richard            | 49 |
| 2.4. Fluxo em meios não-saturados                                     | 51 |
| 2.4.1. Determinação indireta da função de condutividade hidráulica    | 53 |
| 2.4.1.1. Método de Fredlund, Xing e Huang (1994)                      | 55 |
| 2.4.1.2. Método de van Genuchten (1980)                               | 57 |
| 2.4.2. Determinação indireta da função do teor de umidade volumétrico | 58 |
| 2.4.2.1. Método de Fredlund e Xing (1994)                             | 58 |
| 2.4.2.2. Método de van Genuchten (1980)                               | 60 |
| 3. Rebaixamento temporário do lençol freático                         | 61 |
| 3.1. Introdução   | 61 |
| 3.2. Bombeamento direto (esgotamento de vala)                         | 61 |
| 3.3. Rebaixamento com ponteiros filtrantes ( <i>well-points</i> )     | 62 |
| 3.4. Rebaixamento com poços profundos                                 | 63 |
| 3.4.1. Rebaixamento com injetores                                     | 64 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.4.2. Rebaixamento com bombas submersas                   | 66  |
| 3.5. Dimensionamento de um sistema de rebaixamento         | 67  |
| 3.5.1. Fluxo em vala com uma linha de poços                | 67  |
| 3.5.1.1. Vala penetrante                                   | 68  |
| 3.5.1.2. Vala parcialmente penetrante                      | 70  |
| 3.5.2. Fluxo em vala com duas linhas de poços              | 71  |
| 3.5.3. Fluxo radial em poços                               | 73  |
| 3.5.4. Grupo de poços                                      | 76  |
| <br>   |     |
| 4. Fluxo na barragem de terra de Macusani – Peru           | 78  |
| 4.1. Introdução  | 78  |
| 4.2. Descrição da barragem Macusani                        | 78  |
| 4.3. Modelagem do fluxo na condição 3D                     | 81  |
| 4.3.1. Primeiro enchimento do reservatório                 | 84  |
| 4.3.2. Rebaixamento rápido do reservatório                 | 89  |
| 4.4. Análise do fluxo na condição 2D                       | 90  |
| 4.4.1. Primeiro enchimento do reservatório                 | 90  |
| 4.4.2. Rebaixamento rápido                                 | 93  |
| 4.5. Comparação de resultados                              | 94  |
| <br>   |     |
| 5. Rebaixamento do lençol freático                         | 97  |
| 5.1. Introdução  | 97  |
| 5.2. Pequena Central Hidrelétrica Canoa Quebrada           | 97  |
| 5.2.1. Rebaixamento do lençol freático                     | 99  |
| 5.2.2. Análise considerando método analítico               | 100 |
| 5.2.3. Análise numérica de fluxo permanente tridimensional | 102 |
| 5.2.4. Análise numérica de fluxo permanente bidimensional  | 108 |
| 5.2.4.1. Análise 2D axissimétrica                          | 108 |
| 5.2.4.2. Análise 2D plana                                  | 110 |
| 5.3. Shopping Brooklin – São Paulo                         | 115 |
| 5.3.1. Descrição geral da obra                             | 115 |
| 5.3.2. Análise numérica de fluxo permanente 3D             | 116 |
| 5.3.3. Solução analítica                                   | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.3.1. Fluxo em vala com duas linhas de poços | 121 |
| 5.3.3.2. Fluxo radial em um poço equivalente    | 123 |
| 6. Conclusões e Sugestões                       | 124 |
| Referências Bibliográficas                      | 127 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Volume de material poroso submetido a fluxo de água no regime laminar (Marino e Luthin, 1982)   | 24 |
| Figura 2.2 - Modelo vertical de placas paralelas   | 29 |
| Figura 2.3 - Modelo de cuba eletrolítica   | 32 |
| Figura 2.4 - Região de fluxo dividida em 4 fragmentos (Harr, 1977)   | 33 |
| Figura 2.5 - Rede de fluxo no caso de bombeamento do lençol freático (Urbano, 1999)  | 37 |
| Figura 2.6 - Fluxo através da interface de solos com diferentes permeabilidades. (Scott, 1968)   | 39 |
| Figura 2.7 - Convenção para numeração no método das diferenças finitas (Scott, 1968)   | 40 |
| Figura 2.8 - Solos de diferentes permeabilidades pelo método das diferenças finitas (Scott, 1968)  | 41 |
| Figura 2.9 - Representação gráfica para os casos: (a) nó interior, (b) contorno impermeável, (c) cortina impermeável (Harr, 1977)  | 42 |
| Figura 2.10 - Método da caminhada aleatória (a) e condições de contorno impermeáveis (b, c)  | 44 |
| Figura 2.11 - Representação esquemática da função de condutividade hidráulica (Gioda e Desireri, 1988)   | 46 |
| Figura 2.12 - Variação abrupta do coeficiente de permeabilidade com a carga de pressão para representação da interface solo seco – solo saturado (Bathe e Khoshgoftar, 1979) | 47 |
| Figura 2.13 - Variação do coeficiente de redução de permeabilidade $k^r$ com a razão entre cargas de sucção - escalas logarítmica e aritmética (Plaxis v.8)                  | 48 |
| Figura 2.14 - Função de condutividade hidráulica (Fredlund e Rahardio, 1993)   | 54 |
| Figura 2.15 - Função do teor de umidade volumétrico (Fredlund e Rahardio, 1993)  | 54 |
| Figura 2.16 - Esquematização da trajetória de fluxo desde a saturação até atingir o teor de umidade residual. (Krahn, 2004)  | 54 |
| Figura 2.17 - Funções do teor de umidade volumétrico para areia fina, silte e argila (Ho, 1979)  | 55 |
| Figura 2.18 - Curva de adsorção e dessorção para um solo de silte (Fredlund, Xing e Huang, 1994)   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 - Bombeamento direto na drenagem de uma escavação (Scott e Schoustra, 1968)   | 62 |
| Figura 3.2 - Disposição das ponteiros no sistema de rebaixamento (Urbano, 1999)  | 63 |
| Figura 3.3 - Rebaixamento com três estágios de ponteiros (Urbano, 1999)  | 63 |
| Figura 3.4 - Sistema de Rebaixamento com injetores de tubos paralelos (Urbano, 1999)   | 64 |
| Figura 3.5 - (a) Detalhe dos injetores, (b) Vista do sistema de poços profundos (Urbano, 1999)   | 65 |
| Figura 3.6 - Esquema de um poço profundo com bomba submersa (Scott e Schoustra, 1968)  | 66 |
| Figura 3.7 - Fluxo bidimensional para vala (Urbano, 1999)  | 68 |
| Figura 3.8 - Fluxo em vala penetrante (Urbano, 1999)   | 69 |
| Figura 3.9 - Fluxo em vala parcialmente penetrante (Urbano, 1999)  | 71 |
| Figura 3.10 - Fluxo de aquífero artesiano em duas valas (Urbano, 1999)   | 72 |
| Figura 3.11 - Fluxo de aquífero gravitacional em duas valas (Urbano, 1999)   | 72 |
| Figura 3.12 - Fluxo de aquífero artesiano em poço circular penetrante (Urbano 1999)  | 73 |
| Figura 3.13 - Fluxo de aquífero gravitacional em poço circular penetrante (Urbano 1999)  | 74 |
| Figura 3.14 - Superposição de poços em aquífero gravitacional (Velloso, 1977)  | 75 |
| Figura 3.15 - Superposição de poços em aquífero gravitacional (Urbano 1999)  | 77 |
| Figura 4.1 - Localização da barragem de Macusani – Peru  | 79 |
| Figura 4.2 - (a) turfa de origem vulcânica (b) afloramentos rochosos na região da barragem Macusani, na altitude 4400m acima do nível do mar | 79 |
| Figura 4.3 - Características do solo de fundação da barragem Macusani  | 80 |
| Figura 4.4 - Seção transversal 3 nas análises 2D de fluxo da barragem Macusani   | 80 |
| Figura 4.5 - Curvas características de sucção assumidas para os materiais da barragem Macusani com base no programa Seep/W                   | 82 |
| Figura 4.6 - Funções de condutividade hidráulica calculadas pelo   | 83 |

|   |    |
|---|----|
| método de Fredlund e al. (1994) para os materiais da barragem Macusani  |    |
| Figura 4.7 - Malha de blocos na análise 3D da barragem Macusani   | 84 |
| Figura 4.8 - Malha de elementos finitos na análise 3D da barragem Macusani  | 84 |
| Figura 4.9 - Posição inicial do lençol freático antes do primeiro enchimento do reservatório da barragem Macusani   | 86 |
| Figura 4.10 - Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente                                      | 86 |
| Figura 4.11 - Posição da superfície freática no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente   | 87 |
| Figura 4.12 - Distribuição das cargas de pressão no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente   | 87 |
| Figura 4.13 - Distribuição das cargas hidráulicas totais no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente   | 87 |
| Figura 4.14 - Distribuição das velocidades no pé da barragem Macusani no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente  | 88 |
| Figura 4.15 - Distribuição dos gradientes hidráulicos no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente  | 88 |
| Figura 4.16 - Esquematização da linha freática para o rebaixamento rápido do lençol freático ( $t=\text{dia}$ )   | 89 |
| Figura 4.17 - Distribuição das cargas totais na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante) para o rebaixamento à montante da barragem e na condição de fluxo permanente dentro do corpo da barragem | 90 |
| Figura 4.18 - Geometria, materiais e malha de elementos finitos da seção 3 da barragem Macusani   | 91 |
| Figura 4.19 - Posição inicial da linha freática e linhas de iguais cargas de pressão  | 91 |
| Figura 4.20 - Posição da linha freática na seção 3 durante as etapas de primeiro enchimento do reservatório e em condição de fluxo permanente   | 91 |
| Figura 4.21 - Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente                                      | 92 |
| Figura 4.22 - Distribuição das cargas hidráulicas totais obtidas na   | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente   |     |
| Figura 4.23 - Distribuição das cargas de pressão obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente   | 92  |
| Figura 4.24 - Distribuição das velocidades de fluxo obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente  | 93  |
| Figura 4.25 - Distribuição dos gradientes hidráulicos obtidos na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente  | 93  |
| Figura 4.26 - Posição da linha freática antes do rebaixamento do lençol freático e depois de aplicado o rebaixamento ( $t=1$ dia)  | 93  |
| Figura 4.27 - Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, no caso de rebaixamento rápido do reservatório, para o tempo $t=1$ dia e no estado permanente               | 94  |
| Figura 4.28 - Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3 e 4 (análise 3D) e na seção 3 (análise 2D) considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ | 95  |
| Figura 4.29 - Posição das linhas freáticas na seção 3 determinadas pelas análises 2D e 3D, considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$                | 95  |
| Figura 4.30 - Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3, 4 obtidas nas análises 3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) e na análise 2D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ )      | 96  |
| Figura 4.31 - Comparação das posições das linhas freáticas na seção 3, obtidas em análises 2D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) e 3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ )             | 96  |
| Figura 5.1 - (a) Localização da PCH Canoa Quebrada (Gomes, 2006), (b) Arranjo geral da hidrelétrica (Corrêa, 2006)   | 98  |
| Figura 5.2 - Área do rebaixamento para implantação das estruturas da PCH Canoa Quebrada  | 99  |
| Figura 5.3 - Perfil geológico-geotécnico ao longo do eixo da casa de força da PCH Canoa Quebrada (Corrêa, 2006)  | 101 |
| Figura 5.4 - Configuração final do sistema de rebaixamento na área das estruturas da PCH Canoa Quebrada (Corrêa, 2006)   | 101 |
| Figura 5.5 - Malha de elementos finitos para a PCH Canoa Quebrada  | 102 |
| Figura 5.6 - Modelo com os diferentes tipos de solos na região da PCH Canoa Quebrada   | 102 |
| Figura 5.7 - Funções de condutividade utilizadas para os diferentes  | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| tipos de solo da PCH Canoa Quebrada   |     |
| Figura 5.8 - Posição natural da superfície freática na elevação 340m  | 104 |
| Figura 5.9 – Distribuição espacial das cargas hidráulicas após o rebaixamento                                 | 105 |
| Figura 5.10 - Distribuição espacial das cargas de pressão após o rebaixamento                                 | 105 |
| Figura 5.11 - Distribuição espacial das velocidades de fluxo após o rebaixamento                              | 106 |
| Figura 5.12 - Nova posição da superfície freática com imposição de bombeamento nos 74 poços do sistema        | 106 |
| Figura 5.13 - Localização da seção 2 no domínio tridimensional  | 107 |
| Figura 5.14 - Localização da linha freática na seção 2  | 107 |
| Figura 5.15 - Malha de elementos finitos e solos considerados na análise axissimétrica                        | 108 |
| Figura 5.16 - Distribuição das cargas hidráulicas (equipotenciais) e linhas de fluxo na análise axissimétrica | 109 |
| Figura 5.17 - Distribuição das cargas de pressão e nova posição da linha freática na análise axissimétrica    | 109 |
| Figura 5.18 - Distribuição das velocidades de fluxo na análise axissimétrica                                  | 109 |
| Figura 5.19 - Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise axissimétrica                                | 110 |
| Figura 5.20 - Malha de elementos finitos na análise de fluxo plana com perfil de solo I                       | 110 |
| Figura 5.21 - Malha de elementos finitos na análise de fluxo plana com perfil de solo II                      | 111 |
| Figura 5.22 - Distribuição das cargas hidráulicas e linhas de fluxo com perfil I                              | 112 |
| Figura 5.23 - Distribuição das cargas de pressão e posição da linha freática                                  | 112 |
| Figura 5.24 - Distribuição das velocidades de fluxo na análise plana com perfil I                             | 112 |
| Figura 5.25 - Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise plana com perfil I                           | 113 |
| Figura 5.26 - Distribuição das cargas hidráulicas e linhas de fluxo com perfil II                             | 113 |
| Figura 5.27 - Distribuição das cargas de pressão e posição da linha freática com perfil II                    | 113 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.28 - Distribuição das velocidades de fluxo na análise plana com perfil II  | 114 |
| Figura 5.29 - Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise plana com perfil II  | 114 |
| Figura 5.30 - Comparação das posições das linhas freáticas na seção 2 - figura 5.13 - obtidas em análises 2D (perfis de solo I e II) e 3D                 | 114 |
| Figura 5.31 - Área de rebaixamento (46m x 16m) para construção do <i>shopping</i> Brooklin - São Paulo  | 115 |
| Figura 5.32 - Sistema de rebaixamento com ponteiras no shopping Brooklin – São Paulo  | 116 |
| Figura 5.33 – Malha de elementos finitos constituída por um único material - Seep3D   | 117 |
| Figura 5.34 - Função de condutividade hidráulica não-saturada empregada na análise 3D do rebaixamento do lençol freático no shopping Brooklin - São Paulo | 118 |
| Figura 5.35 - Distribuição das cargas de pressão antes do rebaixamento  | 118 |
| Figura 5.36 - Configuração do sistema de rebaixamento utilizado na análise 3D   | 119 |
| Figura 5.37 - Posição da superfície freática após rebaixamento de 3,5m no shopping Brooklin – São Paulo   | 119 |
| Figura 5.38 - Distribuição das velocidades de fluxo após rebaixamento   | 120 |
| Figura 5.39 - Distribuição das cargas hidráulicas, velocidades e gradientes ao longo do eixo X obtidas pela análise 3D                                    | 120 |
| Figura 5.40 - Distribuição das cargas hidráulicas, velocidades e gradientes ao longo do eixo X obtidas pela análise 3D                                    | 121 |
| Figura 5.41 - Dimensionamento do sistema de rebaixamento, aquífero gravitacional para fluxo em vala parcialmente penetrante para duas linhas de poços     | 122 |
| Figura 5.42 - Esquematização da área do aquífero gravitacional estudado   | 123 |



## Lista de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Fragmentos para fluxo confinado (Harr, 1962)  | 34  |
| Tabela 2.1 (cont.) - Fragmentos para fluxo confinado (Harr, 1962)  | 35  |
| Tabela 2.1 (cont) - Fragmentos para fluxo não-confinado (Harr, 1977)   | 35  |
| Tabela 2.2 - Integrais completas elípticas de primeiro tipo (Harr, 1962)   | 36  |
| Tabela 3.1 - Valores de $E_A/D$ para fluxo artesianos em vala parcialmente penetrante (Urbano, 1999)   | 70  |
| Tabela 3.2 Coeficientes de permeabilidade para solos arenosos em aquíferos (Velloso, 1977)   | 75  |
| Tabela 4.1 - Valores dos coeficientes de permeabilidade saturados para análise de fluxo da barragem Macusani                                       | 81  |
| Tabela 4.2 - Função para variação da carga hidráulica com o tempo no talude de montante (primeiro enchimento do reservatório) da barragem Macusani | 85  |
| Tabela 4.3 - Função empregada para o rebaixamento rápido do reservatório da barragem Macusani  | 89  |
| Tabela 4.4 - Vazão total e por metro de comprimento de barragem calculadas nas análises 2D e 3D  | 96  |
| Tabela 5.1 -- Coeficientes de permeabilidade saturados para as análises de fluxo pelo método dos elementos finitos (3D e 2D)                       | 103 |
| Tabela 5.2 - Valores das vazões e erros relativos nas análises de rebaixamento considerando modelos bi e tridimensionais                           | 115 |
| Tabela 6.1 - Valores das vazões e erros relativos nas análises de rebaixamento considerando modelos bi e tridimensionais                           | 125 |
| Tabela 6.2 - Valores calculados dos rebaixamentos do lençol freático   | 125 |

## Lista de Símbolos

|                      |  |
|----------------------|--|
| $\Delta V$           | Volume de material poroso (Marino e Luthin)  |
| $q_x, q_y, q_z$      | Fluxo por unidade de área na direção $x, y, z$ respectivamente, por unidade de tempo $t$ |
| $\rho$               | Massa específica d'água  |
| $\gamma$             | Peso específico d'água   |
| $u$                  | Poropressão  |
| $h$                  | Carga hidráulica   |
| $h_p = u/\gamma$     | Carga de pressão   |
| $\theta$             | Teor de umidade volumétrica  |
| $k_x, k_y, k_z$      | Coeficientes de condutividade hidráulica nas direções $x, y, z$ respectivamente          |
| $k$                  | Coeficiente de condutividade hidráulica em meios porosos isitrópicos                     |
| $k_m$                | Coeficiente de permeabilidade médio (Navier-Stokes)                                      |
| $\mu$                | Viscosidade dinâmica do fluido   |
| $b$                  | Largura entre placas paralelas (Hele-Shaw e Hay)   |
| $I_x, I_y, I_z$      | Intensidades de corrente elétrica por unidade de área                                    |
| $R_x, R_y, R_z$      | Resistividades elétricas   |
| $\Delta h_i$         | Perda de carga no fragmento $i$  |
| $\Delta_i$           | Fator de forma do fragmento $i$  |
| $Q$                  | Vazão no maciço de solo  |
| $n_d$                | Número de quedas equipotenciais da rede de fluxo   |
| $n_f$                | Número de canais de fluxo da rede de fluxo   |
| $\int$               | Fator de de forma da rede de fluxo   |
| $\bar{k}$            | Coeficiente de permeabilidade isitrópico equivalente                                     |
| $\alpha_1, \alpha_2$ | Ângulos que a linha de fluxo forma com a normal à interface                              |
| $\Delta y$           | Tamanho vertical do elemento da malha do método de diferenças finitas                    |
| $\Delta x$           | Tamanho horizontal do elemento da malha do método de diferenças finitas                  |

|                |  |
|----------------|--|
| $p_i$          | Probabilidade da partícula de atingir o ponto $i$ , do método de Monte Carlo     |
| $N_1$          | Número de caminhadas para atingir o contorno de montante                         |
| $N_2$          | Número de caminhadas para atingir o contorno de jusante                          |
| $[K]$          | Matriz de fluxo global   |
| $[B]$          | Matriz que relaciona gradientes com cargas hidráulicas                           |
| $[C]$          | Matriz das condutividades hidráulicas  |
| $\{\Delta r\}$ | Vetor global das cargas hidráulicas nodais                                       |
| $[N]$          | Matriz das funções de interpolação   |
| $\{R\}$        | Vetor das cargas hidráulicas nodais prescritas nos contornos                     |
| $\{F\}$        | Vetor das cargas hidráulicas balanceadas   |
| $k^r$          | Coeficiente de redução da permeabilidade para a região não saturada (Plaxis v.8) |
| $\sigma$       | Tensão total   |
| $u_a$          | Pressão do ar no poro  |
| $u_w$          | Pressão d'água no poro   |
| $m_w$          | Inclinação da curva que representa a função do teor de umidade volumétrico       |
| $\Delta t$     | Incremento de tempo  |
| $\omega$       | Fator de algoritmo de integração no tempo  |
| $k(\psi)$      | Coeficiente de permeabilidade na sucção  |
| $k_s$          | Coeficiente de permeabilidade na condição saturada                               |
| $\theta_s$     | Teor de umidade volumétrico na condição saturada                                 |
| $N$            | Número de intervalos de integração ao longo da curva característica de sucção    |
| $e$            | Constante 2,71828  |
| $i$            | Número de intervalo de integração  |
| $j$            | Intervalo de integração correspondente à sucção $\psi$                           |
| $\psi$         | sucção   |

|            |   |
|------------|---|
| $a, n, m$  | Parâmetros de ajuste da curva característica de sucção do método de Fredlund, Xing e Huang (1994) |
| $C(\psi)$  | Função de correção da sucção do método de Fredlund, Xing e Huang (1994)                           |
| $C_r$      | Constante relacionada com a sucção mátrica no teor de umidade volumétrico residual                |
| $\theta_r$ | teor de umidade volumétrico residual  |
| $A$        | Área de fluxo por unidade de comprimento  |
| $D$        | Unidade de comprimento da vala  |
| $H$        | Altura da linha piezométrica  |
| $h_e$      | Carga de elevação   |
| $L$        | Distância da vala ao reservatório   |
| $i$        | Gradiente hidráulico pela hipótese de Dupuit  |
| $E_A$      | Distância horizontal desde o centro da vala ou poço até o início da escavação                     |
| $W$        | Profundidade do poço no meio permeável  |
| $h_D$      | Altura máxima da linha piezométrica na região da vala   |
| $h_e$      | Altura mínima da linha piezométrica no eixo da vala em aquífero artesianos                        |
| $h_0$      | Altura mínima da linha piezométrica no eixo da vala em aquífero gravitacional                     |
| $r$        | Coordenada radial em fluxo radial em poços  |
| $r_p$      | Raio equivalente do poço em fluxo radial em poços   |
| $R$        | Raio de influenciado poço em fluxo radial em poços  |
| $\pi$      | Constante PI  |
| $h_w$      | Altura mínima da linha piezométrica no eixo do poço em aquífero artesianos                        |
| $Q$        | Vazão máxima para aquíferos (Velloso)   |
| $S_L$      | Área da superfície lateral do poço (Velloso)  |
| $Q_p$      | Vazão do poço   |
| $n$        | Número de poços do grupo de poços   |
| $r_w$      | Raio de cada poço do grupo de poços   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| CISMID             | Centro de Investigações Sísmicas y Mitigación de Desastres |
| SUCS               | Sistema Unificado de Classificação dos Solos               |
| GP                 | Pedregulho uniforme (SUCS)                                 |
| GM                 | Pedregulho siltoso (SUCS)                                  |
| GW                 | Pedregulho bem graduado (SUCS)                             |
| GC                 | Pedregulho argiloso (SUCS)                                 |
| GP-GM              | Pedregulho uniforme com fração fina predominante silte     |
| $k_{\text{dreno}}$ | Coeficiente de condutividade hidráulico do dreno           |
| 2D                 | bidimensional  |
| 3D                 | tridimensional   |
| q                  | Vazão por metro de unidade                                 |
| MT                 | Mato Grosso  |
| PCH                | Pequena Central Hidrolétrica                               |
| MW                 | Mega Watts   |
| SPT                | Standard Penetration Test                                  |