



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

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Jackeline Rosemary 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 dados apresentados. A obra a ser produzida, a
o aca do taba o se a oza ão da p re s dade, do
a o re do o nãdo .

Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

Graduação em Engenharia de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), de 1998 a 2003, tendo exercido a função de estagiária na cidade de São Paulo em 2003. Em 2004, no curso de Mestrado em Engenharia de Arquitetura e Urbanismo, na área de Engenharia de Arquitetura, na área de Engenharia de Arquitetura, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Engenharia de Arquitetura.

Ficha Catalográfica

Huertas, Jackeline Rosemery Castañeda

Modelagem Numérica de Fluxo 3D em Meios Porosos / Jackeline Rosemery 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 ~~res~~ ^{res} a ados a s,
~~Ben y A~~ and o ~~re~~ Lyd a ~~Mo~~ a.

Agradecimentos

Aos meus pais, pai e mãe.

Ao professor doutor Alexandre de Almeida e ao professor doutor João.

Aos membros da Banca Examinadora, Anna Paula Lourenço, Mariana Vieira da Silva e ao professor doutor Alexandre, pelas sugestões e comentários durante a defesa da tese.

À minha mãe, dona Maria da Conceição, pela compreensão e apoio durante o processo.

Aos professores doutores do curso de Mestrado em Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

Às amigas do trabalho de Engenharia, Rita de Cássia do Nascimento Leite e Mariana de Araújo.

À coordenação de Defesa da Tese de Pessoa de Mestrado (DTS) pela concessão da bolsa de estudos durante o período de trabalho.

Abstract

Wang, Y. and Rose, R. (2004). **Numerical Modeling of 3D Flow in Porous Media**. *Journal of Applied Numerical Analysis*, 28. MSc. Thesis, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Minas Gerais, Brazil.

The present work is a numerical study of the flow of a fluid through a porous medium. The porous medium is modeled by a set of interconnected pores, which are represented by a set of nodes and edges. The flow is simulated using a finite element method. The results show that the flow is highly dependent on the geometry of the porous medium and the properties of the fluid. The study is based on a set of numerical experiments, which are described in detail in the text. The results are compared with analytical solutions and experimental data. The study shows that the numerical model is able to accurately simulate the flow in porous media. The results are presented in a series of plots and tables. The study is a contribution to the understanding of the flow in porous media and has practical applications in the fields of petroleum engineering, geophysics, and environmental science.

Keywords

Flow in porous media, numerical modeling, finite element method, porous media, flow simulation.

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 ponteiras 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
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
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 Khoshgoftaar, 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 ($t=$ 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=1dia)	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=1dia 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 - Esquemática 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 artesiano 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

ΔV	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
ρ	Massa específica d'água
γ	Peso específico d'água
u	Poropressão
h	Carga hidráulica
$h_p = u/\gamma$	Carga de pressão
θ	Teor de umidade volumétrica
k_x, k_y, k_z	Coefficientes de condutividade hidráulica nas direções x, y, z respectivamente
k	Coefficiente de condutividade hidráulica em meios porosos isitrópicos
k_m	Coefficiente de permeabilidade médio (Navier-Stokes)
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
b	Largura entre placas paralelas (Hele-Shaw e Ray)
I_x, I_y, I_z	Intensidades de corrente por unidade de área
R_x, R_y, R_z	Resistências hidráulicas

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
$[]$	Matriz das condutividades hidráulicas
$\{\Delta\}$	Vetor global das cargas hidráulicas nodais
$[N]$	Matriz das funções de interpolação
$\{R\}$	Vetor das cargas hidráulicas nodais prescritas nos contornos
$\{r\}$	Vetor das cargas hidráulicas balanceadas
k^r	Coeficiente de redução da permeabilidade para a região não saturada (Plaxis v.8)
σ	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
Δt	Incremento de tempo
ω	Fator de algoritmo de integração no tempo
$k(\psi)$	Coeficiente de permeabilidade na sucção
k_s	Coeficiente de permeabilidade na condição saturada
θ_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 ψ
ψ	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
θ_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
π	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_{dreno}	Coefficiente 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

1 Introdução

O objetivo principal desta obra é apresentar o conteúdo das disciplinas de Engenharia de Materiais, abordando os aspectos fundamentais da ciência dos materiais, bem como a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos. A obra é destinada aos estudantes de Engenharia de Materiais, bem como a profissionais da área que desejam atualizar seus conhecimentos. O conteúdo é dividido em capítulos que abordam desde os conceitos básicos até as aplicações avançadas da engenharia de materiais.

Na primeira parte, são abordados os fundamentos da ciência dos materiais, incluindo a estrutura atômica, as propriedades mecânicas e físicas dos materiais, e os processos de fabricação. A segunda parte trata das aplicações práticas da engenharia de materiais, com ênfase na seleção de materiais para diferentes condições de uso e na análise de falhas.

Na terceira parte, são discutidas as tendências atuais da engenharia de materiais, incluindo o desenvolvimento de novos materiais, a nanotecnologia e a sustentabilidade. A obra conclui com uma revisão dos conceitos abordados e uma perspectiva sobre o futuro da engenharia de materiais.

Esta obra é baseada em fontes confiáveis e foi cuidadosamente revisada para garantir a qualidade do conteúdo. Esperamos que esta obra seja útil para os estudantes e profissionais da área de Engenharia de Materiais.

Na primeira edição, foram abordados os aspectos fundamentais da ciência dos materiais, bem como a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos. A obra é destinada aos estudantes de Engenharia de Materiais, bem como a profissionais da área que desejam atualizar seus conhecimentos.

Na segunda edição, foram adicionados novos capítulos que abordam as tendências atuais da engenharia de materiais, incluindo o desenvolvimento de novos materiais, a nanotecnologia e a sustentabilidade.

2 Fluxo de água através de meios porosos

2.1. Equações governantes

Considere o elemento de volume $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ de um material poroso, com faces laterais aos planos xy , yz e xz , representado na Figura 2.1, sob a condição de fluxo de água que, considerando a não compressibilidade do fluido, sob a hipótese de

Se q_x é o fluxo unitário de área na direção x , o elemento de volume, então a ação da pressão p a faces da face B e B' é $p \Delta y \Delta z$ e a faces da face A e A' é $(p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x) \Delta y \Delta z$, considerando a direção de fluxo

$\frac{\partial p}{\partial x}$ ao longo do elemento Δx e se a face B e B' da face A e A' do elemento de volume.

A ação da pressão na direção x no elemento de volume é dada por

$$\Delta p_x = p_{B'} - p_B = (p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x) \Delta y \Delta z - p \Delta y \Delta z = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.1)$$

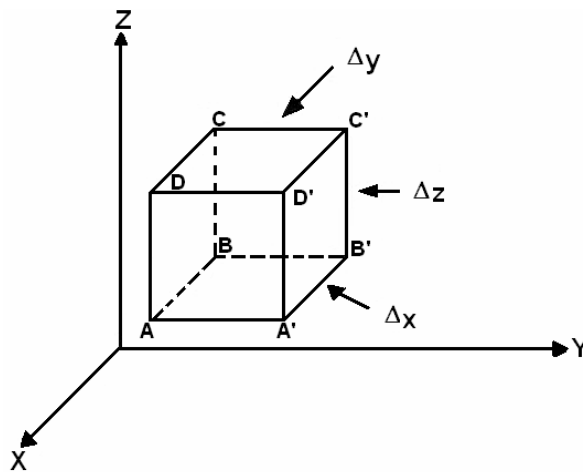


Figura 2.1 – Volume de material poroso submetido a fluxo de água no regime laminar (Marino e Luthin, 1982)

A relação (2.1) para cada massa específica da água representa a massa da água no elemento de volume diferencial $\Delta x \Delta y \Delta z$,

$$\Delta M_{\text{el}}^x = \frac{\rho_x}{x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

Adotando-se o mesmo procedimento de análise para as componentes de fluxo nas direções y e z , obtêm-se respectivamente

$$\Delta M_{\text{el}}^y = \frac{\rho q_y}{y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

$$\Delta M_{\text{el}}^z = \frac{\rho q_z}{z} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.4)$$

A massa da água no elemento de volume diferencial do elemento de fluxo combinado nas direções x , y , z é portanto

$$\Delta M_{\text{el}} = \left[\frac{\rho q_x}{x} + \frac{\rho q_y}{y} + \frac{\rho q_z}{z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.5)$$

Portanto, a vazão através do elemento diferencial, a vazão do elemento de água na unidade de tempo. Se consideramos o elemento de água o elemento de volume diferencial do elemento de água (elemento de água), o taxa de vazão da massa da água na unidade de tempo pode ser expressa por

$$\Delta M_{\text{el}} = \frac{\rho \theta}{x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.6)$$

As equações (2.5) e (2.6) para as vazões podem ser equadas, resultando

$$\left[\frac{\rho q_x}{x} + \frac{\rho q_y}{y} + \frac{\rho q_z}{z} \right] = \frac{\rho \theta}{t} \quad (2.7)$$

onde \vec{r} é a posição do ponto $P(x, y, z)$ em relação à origem O do sistema de eixos cartesianos $Oxyz$. Assim, a expressão para o potencial gravitacional V em um ponto P devido a uma distribuição contínua de massa ρ é dada por

$$\begin{aligned} V &= -G \int \frac{\rho \, dV'}{r} \\ &= -G \int \frac{\rho \, dV'}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde \vec{r} é a distância entre o elemento de massa $dM = \rho \, dV'$ e o ponto P . A expressão para o potencial gravitacional V em um ponto P devido a uma distribuição contínua de massa ρ é dada por

$$\Delta V = -4\pi G \rho \quad (2.9)$$

obtido se a equação de Poisson é aplicada à equação (2.8). Para o caso de uma distribuição contínua de massa ρ , a equação de Poisson é dada por

$$\Delta V = -4\pi G \rho \quad (2.10)$$

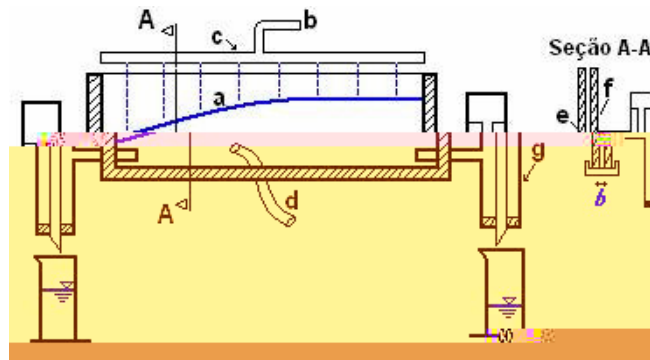
No caso de uma distribuição contínua de massa ρ , a equação de Poisson é dada por

$$\Delta V = -4\pi G \rho \quad (2.11)$$

Para os casos onde $\rho = 0$, a equação de Poisson se reduz à equação de Laplace

$$\Delta V = 0 \quad (2.12)$$

2.2.2.2. Modelos de placas (Hele-Shaw)



a) força aplicada; b) distância entre as placas; c) fluido; d) placa inferior; e) placa superior; f) força aplicada; g) distância lateral; h) distância lateral do excesso de fluido.

Figura 2.2 – Modelo vertical de placas paralelas

Desde o início do movimento de um fluido viscoso entre duas placas paralelas, a análise das condições de escoamento de um fluido viscoso entre duas placas paralelas de espessura \$b\$ (Figura 2.2). A partir das equações de Navier-Stokes, considerando o escoamento de um fluido viscoso entre as placas paralelas, pode-se obter

$$x = \frac{b^2 \gamma}{2\mu} \frac{1}{x} \left(z + \frac{b}{2} \right) \quad z = \frac{b^2 \gamma}{2\mu} \frac{1}{z} \left(z + \frac{b}{2} \right) \quad (2.4)$$

onde considerando a velocidade \$u\$ e os coeficientes de proporcionalidade \$k = b^2 \gamma / 2\mu\$

$$x = \frac{1}{x} \left(z + \frac{b}{2} \right) \quad z = \frac{1}{z} \left(z + \frac{b}{2} \right) \quad (2.5)$$

onde \$\gamma\$ e \$\mu\$ são constantes físicas que dependem da natureza do fluido, respectivamente. Os coeficientes de proporcionalidade \$k\$ podem ser determinados a partir das características do fluido (\$\gamma, \mu\$) e da distância \$b\$ entre as placas.

O modelo de escoamento de placas paralelas é baseado na suposição de que o escoamento é laminar e a velocidade de escoamento é constante.

2.2.3. Método dos fragmentos

Este método analítico é aplicado, de maneira a cálcular os coeficientes de distribuição do fluxo (ϕ) pelo método dos fragmentos. A base básica do método é dividir as seções transversais da seção de fluxo, onde se analisadas as várias seções, dividindo a seção do objeto em fragmentos (como os 4 fragmentos da figura 2.4).

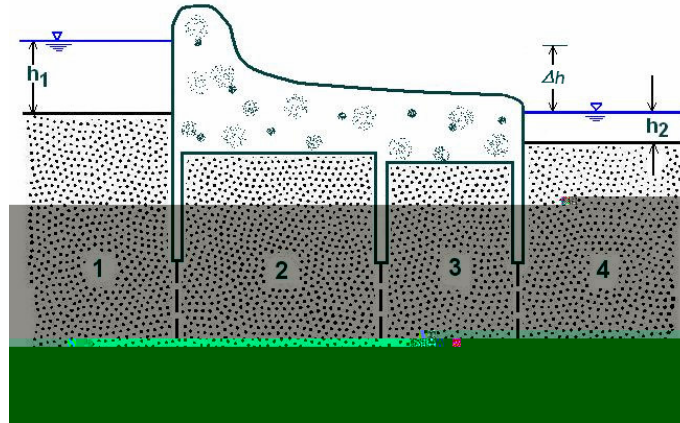


Figura 2.4 – Região de fluxo dividida em 4 fragmentos (Harr, 1977)

onde a vazão no fragmento i é dada por

$$Q_i = \phi_i \Delta h \quad (2.7)$$

onde Δh é a diferença de carga e ϕ_i é a fração do fluxo no fragmento i .

Como a vazão de seções a jusante dos fragmentos, então

$$Q = \phi_1 \Delta h = \phi_2 \Delta h = \dots = \phi_n \Delta h \quad (2.8)$$

resumindo o anterior

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \phi_i Q \quad (2.9)$$

A vazão total pode ser expressa como

$$Q = \sum_{i=1}^n \phi_i Q \quad (2.20)$$

Se a vazão total Q é dada pela soma das vazões em cada elemento (2.8) e (2.9),

$$Q = \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (2.2)$$

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, é necessário o conhecimento das condições de contorno, os dados nas tabelas 2.1 e 2.2.

Quando a água pode ser considerada incompressível, neste caso considerando-se a vazão total do elemento como constante, o resultado da substituição da área, expressada em termos de vazão.

Tabela 2.1 – Fragmentos para fluxo confinado (Harr, 1962)

Diagrama de vazão	Diagrama	Equação de vazão
I		$\phi = \frac{L}{a}$
II		$\phi = \frac{K}{s}$ $= \frac{\pi K a^2}{2L s}$
III		$\phi = \frac{K}{s}$ $= \frac{\pi K a^2}{2L s} \sqrt{1 + \frac{2\pi b}{L} \frac{a^2}{s^2}}$
IV		$s \geq b :$ $\phi = n \left(\frac{b}{a} \right)$ $b \geq s :$ $\phi = n \left(\frac{s}{a} \right) + \frac{b-s}{L}$

Tabela 2.1 (cont.) – Fragmentos para fluxo confinado (Harr, 1962)

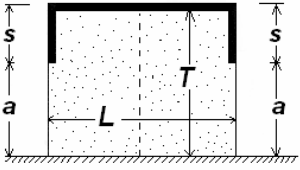
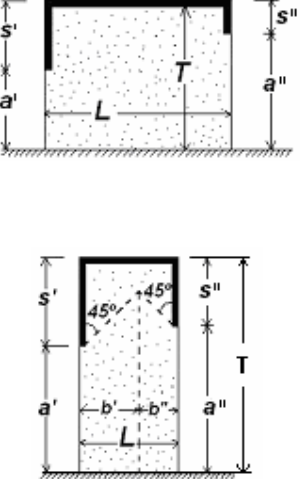
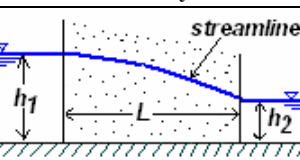
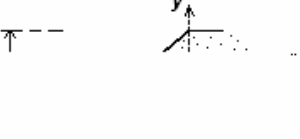
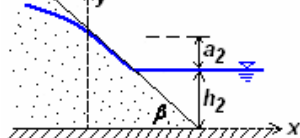
Tipo de fragmento	Situação	Equação de fluxo
v		$L \leq 2s :$ $\phi = 2 \cdot n \left(+ \frac{L}{2a} \right)$ $L \geq 2s :$ $\phi = 2 \cdot n \left(+ \frac{s}{a} \right) + \frac{L - 2s}{a}$
v /		$L > s' + s'' :$ $\phi = n \left[\left(+ \frac{s'}{a'} \right) \left(+ \frac{s''}{a''} \right) + \frac{L - (s' + s'')}{a} \right]$ $L = s' + s'' :$ $\phi = n \left[\left(+ \frac{s'}{a'} \right) \left(+ \frac{s''}{a''} \right) \right]$ $L < s' + s'' :$ $\phi = n \left[\left(+ \frac{b'}{a'} \right) \left(+ \frac{b''}{a''} \right) \right]$ <p>onde :</p> $b' = \frac{L + (s' - s'')}{2}$ $b'' = \frac{L - (s' - s'')}{2}$

Tabela 2.1 (cont) – Fragmentos para fluxo não-confinado (Harr, 1977)

v //		$\phi = \frac{2L}{h_1 + h_2}$ $= \frac{2 \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{h_1 + h_2}{2}}{2L}$
v ///		$= \frac{h_1 + h_2}{\cos \alpha} \cdot n \cdot \frac{d}{d \cdot h_1}$
fX		$= \frac{a_2}{\cos \beta} \cdot \left(+ n \frac{a_2 + h_2}{a_2} \right)$

onde $\kappa = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$ é a função completa de primeiro tipo com módulo k .

o d'ou $\kappa' = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2 \phi}}$ é a função completa de primeiro tipo com módulo k' .

co o d'ou $k'^2 = 1 - k^2$ de fato a $\kappa(\phi) = \kappa'(\phi)$. Os valores de κ/κ' e κ'/κ são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Integrais completas elípticas de primeiro tipo (Harr, 1962)

m^2	K	K'	K/K'	K'/K	m^2	m^2	K	K'	K/K'	K'/K	m^2
0.000	0.571	∞	0.000	∞	1.000	0.21	1.665	2.235	0.745	1.34	0.79
0.001	1.571	4.841	0.325	3.08	0.999	0.22	1.670	2.214	0.754	1.33	0.78
0.002	1.572	4.495	0.349	2.86	0.998	0.23	1.675	2.194	0.763	1.31	0.77
0.003	1.572	4.293	0.366	2.73	0.997	0.24	1.680	2.175	0.773	1.29	0.76
0.004	1.572	4.150	0.379	2.64	0.996	0.25	1.686	2.157	0.782	1.28	0.75
0.005	1.573	4.039	0.389	2.57	0.995	0.26	1.691	2.139	0.791	1.26	0.74
0.006	1.573	3.949	0.398	2.51	0.994	0.27	1.697	2.122	0.800	1.25	0.73
0.007	1.574	3.872	0.406	2.46	0.993	0.28	1.702	2.106	0.808	1.24	0.72
0.008	1.574	3.806	0.413	2.42	0.992	0.29	1.708	2.090	0.817	1.22	0.71
0.009	1.574	3.748	0.420	2.38	0.991	0.30	1.714	2.075	0.826	1.21	0.70
0.01	1.575	3.696	0.426	2.35	0.99	0.31	1.720	2.061	0.834	1.20	0.69
0.02	1.579	3.354	0.471	2.12	0.98	0.32	1.726	2.047	0.843	1.19	0.68
0.03	1.583	3.156	0.502	1.99	0.97	0.33	1.732	2.033	0.852	1.17	0.67
0.04	1.587	3.016	0.526	1.90	0.96	0.34	1.738	2.020	0.860	1.16	0.66
0.05	1.591	2.908	0.547	1.83	0.95	0.35	1.744	2.008	0.869	1.15	0.65
0.06	1.595	2.821	0.565	1.77	0.94	0.36	1.751	1.995	0.877	1.14	0.64
0.07	1.599	2.747	0.582	1.72	0.93	0.37	1.757	1.983	0.886	1.13	0.63
0.08	1.604	2.684	0.598	1.67	0.92	0.38	1.764	1.972	0.895	1.12	0.62
0.09	1.608	2.628	0.612	1.63	0.91	0.39	1.771	1.961	0.903	1.11	0.61
0.10	1.612	2.578	0.625	1.60	0.90	0.40	1.778	1.950	0.911	1.10	0.60
0.11	1.617	2.533	0.638	1.57	0.89	0.41	1.785	1.939	0.920	1.09	0.59
0.12	1.621	2.493	0.650	1.54	0.88	0.42	1.792	1.929	0.929	1.08	0.58
0.13	1.626	2.455	0.662	1.51	0.87	0.43	1.799	1.918	0.938	1.07	0.57
0.14	1.631	2.421	0.674	1.48	0.86	0.44	1.806	1.909	0.946	1.06	0.56
0.15	1.635	2.389	0.684	1.46	0.85	0.45	1.814	1.899	0.955	1.05	0.55
0.16	1.640	2.359	0.695	1.44	0.84	0.46	1.822	1.890	0.964	1.04	0.54
0.17	1.645	2.331	0.706	1.42	0.83	0.47	1.829	1.880	0.973	1.03	0.53
0.18	1.650	2.305	0.716	1.40	0.82	0.48	1.837	1.871	0.982	1.02	0.52
0.19	1.655	2.281	0.726	1.38	0.81	0.49	1.846	1.863	0.991	1.01	0.51
0.20	1.660	2.257	0.735	1.36	0.80	0.50	1.854	1.854	1.000	1.00	0.50
m^2	K'	K	K'/K	K/K'	m^2	m^2	K'	K	K'/K	K/K'	m^2

2.2.4. Redes de fluxo

As redes de fluxo são constituídas pelo afilamento das arestas das faces das células, com recargas das linhas de corrente, e se caracteriza pelo afilamento das arestas e pelas arestas acasadas do lado da aresta do acoplamento, com recargas das linhas de fluxo. Para isso o solo, as redes de fluxo são a solução da equação de Laplace de

La ace, a resenando nre seores o o ona s re nre a bas as m as de f xo re re u o nre a s, confo re s a a f a 2.5, fo ando f as re sã o bas ca re nre ad ados o re nre os de res a o o ão re nre co re nre a a t a. As re das de ca ão d a ca re nre re u o nre a s s e s s a s Δh e a cons tan te da rede, be co o a a ce a de azã o Δ re nre d as m as de f xo consec as, re fo a ca na de f xo.

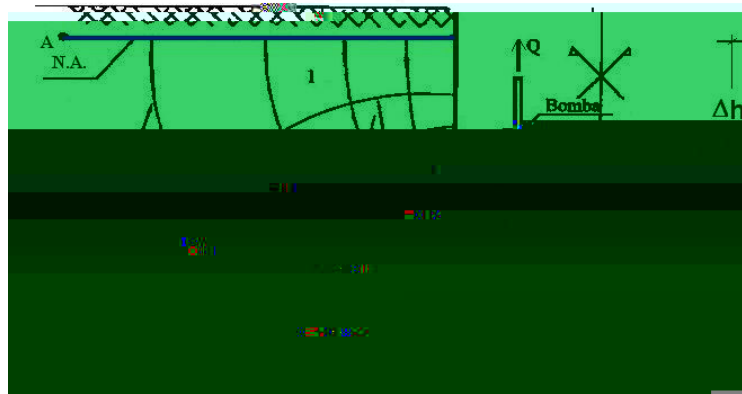


Figura 2.5 – Rede de fluxo no caso de bombeamento do lençol freático (Urbano, 1999)

A o tãnc a á ca des a so ão á ca, re re re a fãc de re na ão de 3 ã nre a s dos obre as de re co a ão, o se a, a azã o no ac o de so o, as ca as (de re a ão, de res sã o re d a cas) re o ad re nre d a re co re a re onre do re o oso.

A azã o e ca c a da o

$$= \Delta \frac{n_r}{n_d} = \Delta f \tag{2.22}$$

onde f e o fã o de f o a da rede de f xo de n do co o o o c re nre re nre o n re o de ca na s de f xo nre o n re o de re das de re u o nre a s n d.

Pa a de re na ão da ca ão d a ca re nre re onre a re re p, d n re se da ca ão d a ca áx ão n re o a ox ado de re das, nre s re f ac onã o, a re re re onre o, re.,

$$h^p = h^{ax} - n_d^p \Delta H \quad \text{onde} \quad \Delta h = \frac{\Delta h}{n_d} \tag{2.23}$$

Logo, a capacitância de ressonância h_p^P pode ser determinada sabendo a frequência do ponto de ressonância ao nível de referência escolhido, o qual designamos a capacitância de ressonância h_e^P

$$h_p^P = h^P - h_e^P \quad (2.24)$$

Para caracterizar o ponto de ressonância quando o valor da capacitância de ressonância e o fator de qualidade Q do circuito (no caso á) γ_w

$$u^P = h_p^P \gamma_w \quad (2.25)$$

Quando a frequência do admitância de circuito é a frequência de ressonância, dando-se o valor da impedância de circuito é o ponto de ressonância ΔH e o coeficiente de qualidade do "circuito" onde se situa o ponto de ressonância na rede ao nível da frequência das impedâncias. Caso se necessite de uma alteração do valor do admitância dá-se, onde se encontra a rede de circuitos podendo-se a frequência do "circuito" variar.

No caso de circuito reatante os elementos, a rede de ressonância dada pelo número de ressonância, onde se encontra a rede de ressonância da rede de ressonância. Para os resultados obtidos com a rede de ressonância, a rede de ressonância é a rede de ressonância, fazendo com que as abscissas x e y descrevam a rede de ressonância e a rede de ressonância da rede de ressonância.

$$x_T = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad \text{ou} \quad x = x_T \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.26)$$

Resposta da rede de circuito no do número de ressonância, onde a rede de ressonância da rede de ressonância, a rede de ressonância pode ser determinada pela rede de ressonância (2.22) considerando o coeficiente de ressonância só o coeficiente \bar{k}

$$\bar{k} = \sqrt{k_x k_y} \quad (2.27)$$

As características das redes de ressonância (y) onde se obtêm a rede de ressonância no do número de ressonância, em função do admitância dá-se o número de ressonância e o coeficiente de ressonância do "circuito" dada a rede de ressonância e a rede de ressonância da rede de ressonância (2.28).

No caso de fluxo invariante a través dos solos com coeficientes de permeabilidade diferentes (Fig. 2.6), as linhas de fluxo na interface entre os solos são retas e a deflexão é dada pelo coeficiente de refração, onde se aplica a lei de Snell:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (2.28)$$

onde, α_1 e α_2 são os ângulos que a linha de fluxo forma com a normal à interface nos solos de permeabilidade k_1 e k_2 , respectivamente.

Analogamente às refrações, os "gradados" desenhados no solo superior a no solo 2 representam os ângulos de refração / a admissão de fluxo no solo inferior. Se os solos são homogêneos, a rede de fluxo deve ser desenhada no domínio superior.

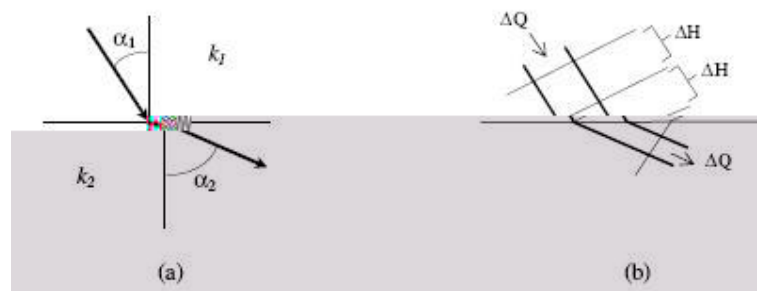


Figura 2.6 - Fluxo através da interface de solos com diferentes permeabilidades (Scott, 1968)

Para o caso de fluxo variável a través das obras de fluxo invariante, o gradado na interface a ser traçado, variando com o gradado na interface de ensaio, a ser traçado, sendo dada pela seguinte expressão: onde, α_1 e α_2 são os ângulos de refração, onde se aplica a lei de Snell:

2.2.5. Método das diferenças finitas

Para a expressão a ser dada da função de Laplace (Eq. 2.3) onde se obtém a através do método das diferenças finitas, considerando-se a caixa

... dá a carga afunção da distância no “quadro” de f... da 2...
 os a o s a o x ados de nos on os , 2, 3 e 4 ode se ob t dos e a
 ex ansão de Δy o nas z m an as do on o 0.

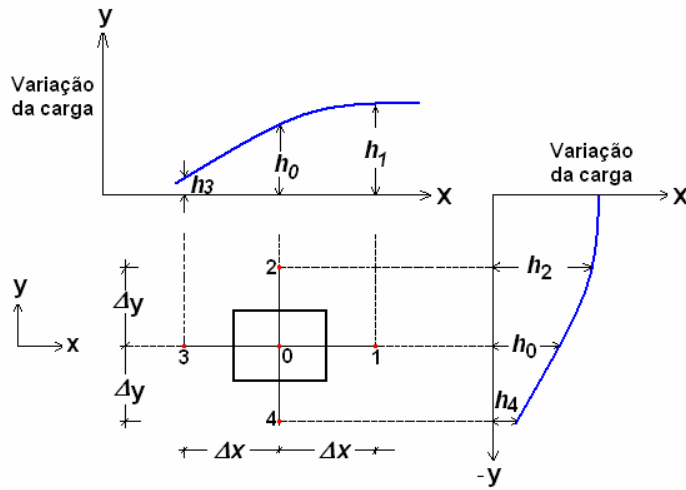


Figura 2.7 – Convenção para numeração no método das diferenças finitas (Scott, 1968)

$$f_1 \approx f_0 + \Delta x \left(\frac{f_1}{x} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{f_2}{x^2} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^3}{3} \left(\frac{f_3}{x^3} \right)_0 + \dots \quad (2.2 \text{ a})$$

$$f_3 \approx f_0 - \Delta x \left(\frac{f_1}{x} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{f_2}{x^2} \right)_0 - \frac{(\Delta x)^3}{3} \left(\frac{f_3}{x^3} \right)_0 + \dots \quad (2.2 \text{ b})$$

So ando se as e a o s (2.2 a) e (2.2 b) res t a

$$\left(\frac{f_2}{x^2} \right)_0 = \frac{f_1 - f_3 - 2f_0}{(\Delta x)^2} - \frac{2(\Delta x)^2}{4} \left(\frac{f_4}{x^4} \right)_0 - \dots \quad (2.30)$$

Lo o, a se nda de ada da ca a d a ca co res t o à d s t a x
 ode se a ox ada en t esc t a co o

$$\left(\frac{f_2}{x^2} \right)_0 = \frac{f_1 - f_3 - 2f_0}{(\Delta x)^2} \quad (2.3)$$

o e o o o c on a o ad ado do t a m o da a t a (Δx)² e da o de

$$- \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{f_4}{x^4} \right)_0 - \dots$$

Se a função, a derivada se pda da ca a d á ca na d re o de se
 resca o

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)_0 = \frac{h_2^2 + h_4^2 - 2h_0}{(\Delta y)^2} \quad (2.32)$$

A b e co e o o o c o n a a o a d a d o d o a a m o d a a $(\Delta y)^2$ e
 da o de $-\frac{(\Delta y)^2}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)_0 - \dots$

A re a ã o de La a c e f na re n e a o x a d a o

$$\nabla^2 h_1 = \frac{h_1}{x^2} + \frac{h_1}{y^2} - \frac{h_3 - 2h_0 + h_2}{(\Delta x)^2} + \frac{h_2 - 2h_0 + h_4}{(\Delta y)^2} = 0 \quad (2.33)$$

S f c a n d o a a o c a s o d e a a a a d a d a $\Delta x = \Delta y$

$$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_0 = 0 \quad (2.34)$$

No caso de solos anisotropicos, a a a a d a d e e se d e s i n a d a n o
 do n o t a n s o a d o o e o d a s r e a s d e t a n s o a ã o r e x r e s s a s r e a s
 e a o r e s (2.2) e (2.2).

Para a f a a t e s d e s o s d e d i f e r e n t e s p e r m e a b i l i d a d e s (f a 2.8), e
 se c o n s i d e r a n d o a r e n a s o c o e f i c i e n t e d e p e r m e a b i l i d a d e d a c a a d a ,

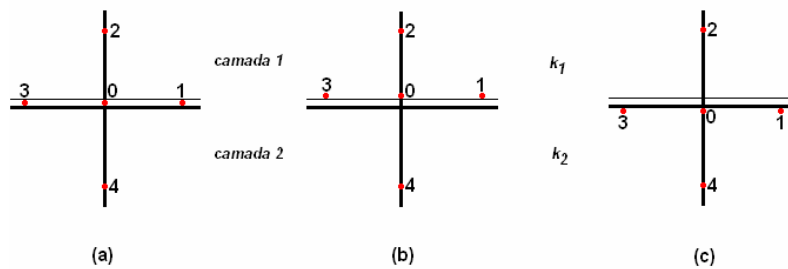


Figura 2.8 – Solos de diferentes permeabilidades pelo método das diferenças finitas (Scott, 1968)

$$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_0 = 0 \quad (2.35)$$

onde h_4 não é a c o e a o s ã o d o o n t o 4 n a c a a d a 2 a s a
 o c a z a ã o f c t c a e s a t e s a z a r e a ã o (2.35).

S a re n e, o b e t e se c o n s i d e r a n d o o c o e f i c i e n t e d e p e r m e a b i l i d a d e d a
 c a a d a 2, onde h_2 s a t e s a z a r e a ã o (2.3) a s n ã o n d e a a r e a o s ã o d o
 o n t o 2 n a c a a d a .

2.2.6.

Método da caminhada aleatória (método de Monte Carlo)

Considere a função $f(x)$ definida no intervalo $[0, 1]$ da figura 2. O valor médio de $f(x)$ é $\frac{1}{2}$. A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$. A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$.

Admitindo o processo aleatório, a probabilidade da função $f(x)$ ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$. Assim, a probabilidade da função $f(x)$ ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$. Assim, a probabilidade da função $f(x)$ ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$.

$$p = \frac{1}{4} (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \quad (2.4)$$

A probabilidade de cada ponto ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$. Assim, a probabilidade de cada ponto ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$.

Considere a função $f(x)$ definida no intervalo $[0, 1]$ da figura 2. O valor médio de $f(x)$ é $\frac{1}{2}$. A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$. A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$.

Na figura, a função $f(x)$ é definida no intervalo $[0, 1]$ da figura 2. O valor médio de $f(x)$ é $\frac{1}{2}$. A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$.

A área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$. Assim, a probabilidade de cada ponto ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$.

$$p = \frac{M_1 + M_2}{M_1 + M_2} \quad (2.42)$$

A cada iteração, a área sob a curva $f(x)$ é $\frac{1}{4}$. Assim, a probabilidade de cada ponto ser maior que $\frac{1}{2}$ é $\frac{1}{4}$.

A precisão da resposta à afluência com o número de caminhadas reduz o acréscimo do erro na função da área de pontos ($\sigma = 2.0$). A convergência da solução é rápida, não se necessita o conhecimento da vazão adida do número de caminhadas, o erro na caminhada arrojada a cárcula só se reduz com o uso de computadores. A caminhada arrojada a cárcula não é utilizada a obra as de fluxo não confinado.

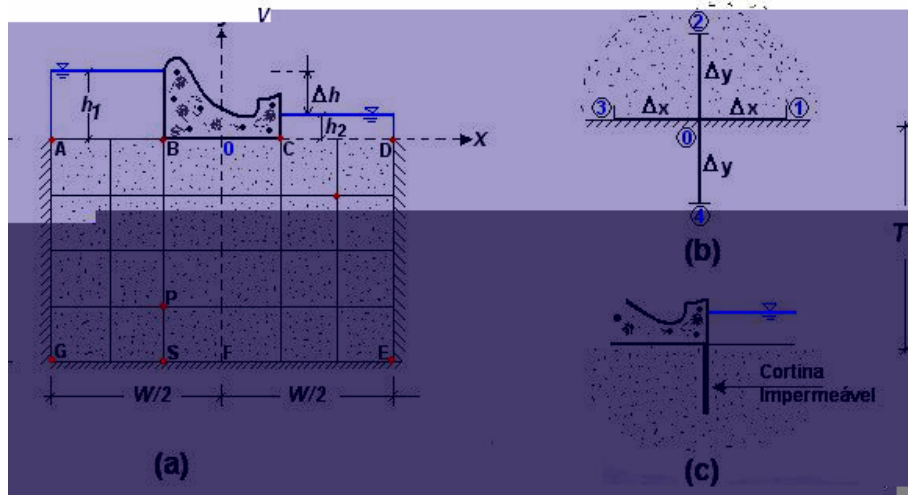


Figura 2.10 - Método da caminhada aleatória (a) e condições de contorno impermeáveis (b, c)

2.2.7. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é a técnica mais utilizada para a análise de obras de fluxo transiente, devido à sua flexibilidade. Inicialmente, a existência de áreas com diferentes condições de permeabilidade, condições de contorno no eixo, e a obra dá lugar a uma obra de análise de elementos, considerando a solução de fluxo não saturado onde a condutividade dá lugar de tendência de a o res de solução.

A escolha do método para obras de fluxo não confinado não apresenta maiores dificuldades, e a o caso de fluxo não confinado, com os eixos não é considerado, mas a distância, a do s ocedimentos e a análise e os dados na prática: a) análise com a área; b) análise com a área de fluxo.

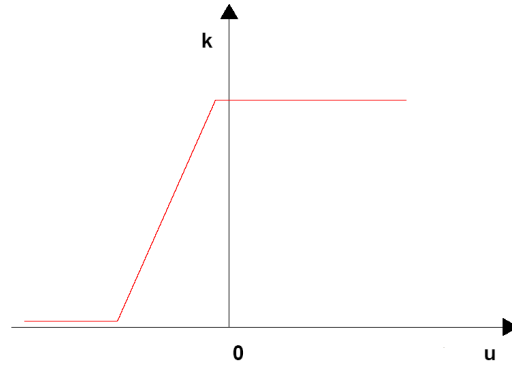


Figura 2.11 – Representação esquemática da função de condutividade hidráulica (Gioda e Desireri, 1988)

o cálculo do acréscimo de carga hidráulica em todos os nós da rede obtido pelo método da solução dos elementos finitos

$$[K]^{(i-)} \{\Delta r\}^i = \{R\} - \{F\}^{(i-)} \quad (2.44a)$$

onde $\{\Delta r\}^i$ é o vetor das cargas nodais, $\{R\}$ é o vetor das cargas nodais resultantes nos nós e $\{F\}^{(i-)}$ o vetor das cargas baseadas na iteração $(i-)$ anterior,

$$\{F\}^{(i-)} = \sum_{v=1}^n \int [B^{(v)}]^T \{ \sigma^{(v)} \} [B^{(v)}] \{ r^{(i-)} \} dv \quad (2.44b)$$

o vetor das cargas nodais calculadas ordenado seqüencialmente.

$$\{r\}^i = \{r\}^{i-} + \{\Delta r\}^i \quad (2.45)$$

Uma nova iteração deve ser realizada caso o critério de convergência abaixo não seja satisfeito dentro de uma iteração sucessiva

$$\frac{\|\{\Delta r^{(i)}\}\|_2}{\|\{r^{(i)}\}\|_2} \ll \epsilon \quad (2.46)$$

Na prática, frequentemente se utiliza o método de Newton-Raphson Modificado, no qual a atualização não necessita ser realizada a cada nó a iteração, podendo ser aplicada aos nós da rede apenas com o mesmo peso de aplicação.

A escolha de uma secção de condutividade constante ou de condutividade da carga a ser considerado depende dos dados. No caso da infiltração em uma zona de saturação de condutividade da carga dependente da carga, a obra de com referência, de fato, mostra os casos de saturação / não saturação

Quando a função se a ox a de a m a t o ca r e t ca co o a s t ada na f a 2. 2.

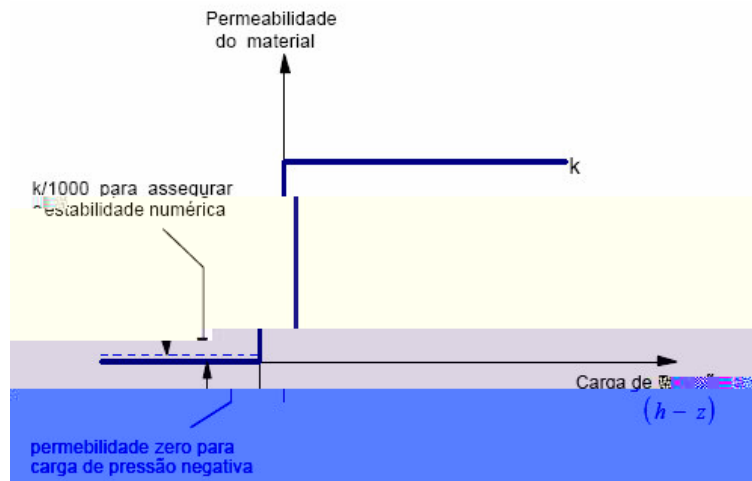


Figura 2.12 – Variação abrupta do coeficiente de permeabilidade com a carga de pressão para representação da interface solo seco – solo saturado (Bathe e Khoshgoftaar, 1979)

Nesta situação, os dados são apresentados como fluxos de 0.8 m/s a concentração de redação da permeabilidade a a a e ão ão não saturada, com o s e do o r e s a (0,7), L r e r e s a (0,7), B a r e (8), como os ácos da f a 2. 3.

Na condição de a 5,0 d (a) 5,520 d (.) 2,880 d (.) 0 d (a) 5,0 (.) 2,0 d cond a r e a f f. r e a 5,0 5,040 d (.) 3,20 d (r) 5,040 d (.) 3,20 d

a o $k = 0.4$ com a razão de sucção $\frac{h_p}{h_p^k} = \frac{h_p}{0.4} = 0.25$, o k_r é 0.0001 , a razão de sucção $u = 0.25$ kPa.

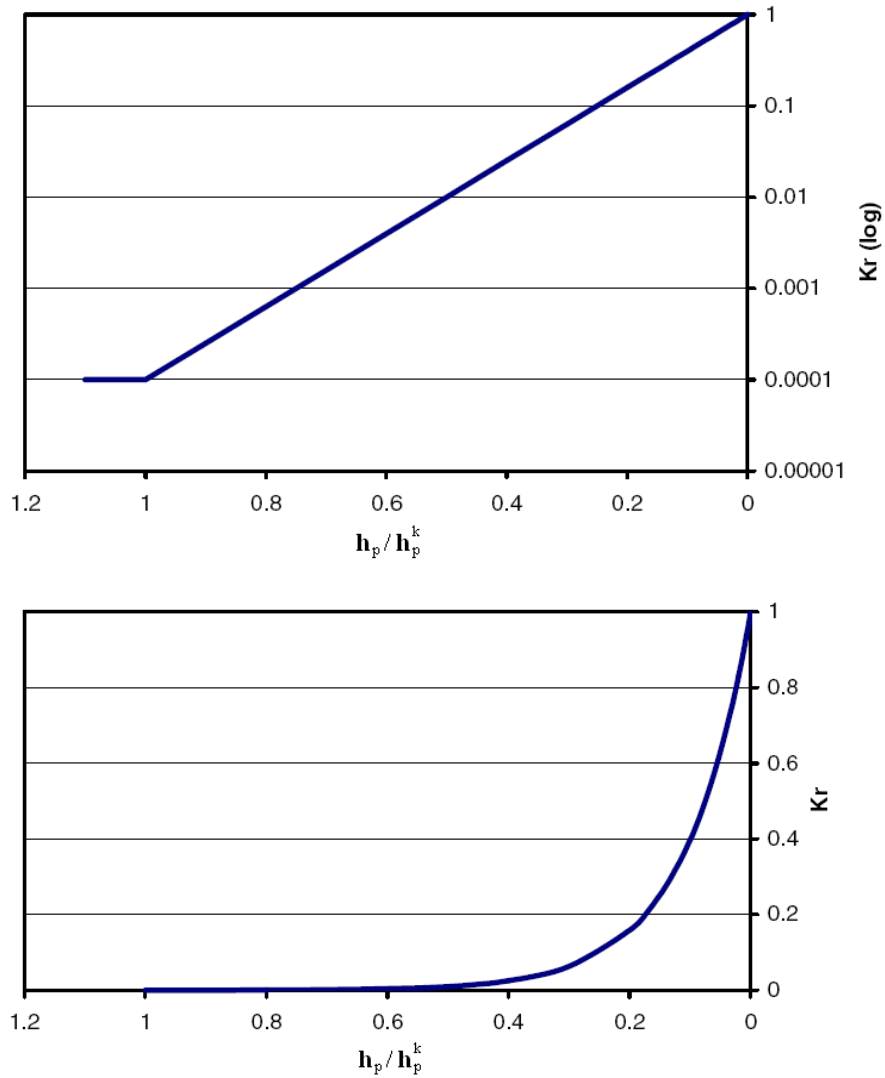


Figura 2.13 – Variação do coeficiente de redução de permeabilidade k_r com a razão entre cargas de sucção - escalas logarítmica e aritmética (Plaxis v.8)

Matematicamente, a função de condutividade dá a a o caso em que os dados não são satisfatórios e pode ser baseada na curva de sucção e na curva de sucção de desenho dos medidores X_n (84), sendo em (80) e os dados são os dados de referência de construção, a o restando as condutividades de cada área, a oxidando se a a restando a área.

2.3.

Solução numérica da equação tridimensional de Richard

A relação de continuidade dos fluidos na solução de problemas de fluxo não se aplica ao caso de fluxo laminar 2D, com a condição de que os campos antes e depois, sendo se a cada a a casos de fluxo dimensional transiente os osos.

Resultado de tensões a a so os sa tados o não sa tados ode se desc o o d as a á res de res tado (red ndre Mo tens n, σ_{ij}): $(\sigma_{ij}) = (\rho w_{ij})$ onde σ_{ij} é a tensão o a, ρ a tensão do a no o o w_{ij} a tensão de á a. No caso de tensões o a s constantes (e, se ca re a re n os o desca re a re n os) re a tensão do a re an t da cons an t re a à tensão a o s re ca, re n ão a a á re (σ_{ij}) não re re o sobre a a a o res do re o de dade o re t co, re são ca çadas bas ca re n e o dan as na a á re (ρw_{ij}) , o se a, o a a o res so re n e da o o tensão á re a tensão do a re an t da cons an t. Na a re a s t a ão, o re re o, de re co a ão a a res de ba a re n s de re a o re ba xa re n o do re n o f re á co, casos re xa nados nos ca t os de re re o.

Logo, a a a ão do re o de dade o re t co ode se re ac onada co a a a ão da o o tensão a a res de

$$\theta = w_{ij} \quad (2.48)$$

onde w_{ij} é a ne na ão da c a re re re sen a af ão do re o de dade o re t co (re a 2. 5).

a o da o o tensão ode se re x re sso re re os da ca a d á ca re da ca a de re re a ão z

$$w_{ij} = \gamma_i (1 - z) \quad (2.4)$$

re re a ão de re t a d (re . 2. 0) se re se c t a co o

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = w_{ij} \gamma_i \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.50)$$

As reações do período dos elementos finitos pode-se obter da relação de equilíbrio

$$\int_V ([B]^T [B] \{u\}) + \int_V (\gamma_i \gamma_j [M]^T [M] \{u\}) = \int_A ([N]^T [N] dA) \quad (2.51)$$

ou

$$[K] \{u\} + [M] \{u\} = \{F\} \quad (2.52)$$

onde

$$[K] = \int_V ([B]^T [B]) \quad - \quad \text{matriz de rigidez} \quad (2.52a)$$

$$[M] = \int_V (\gamma_i \gamma_j [M]^T [M]) \quad - \quad \text{matriz de massa} \quad (2.52b)$$

$$\{F\} = \int_A ([N]^T [N] dA) \quad - \quad \text{vetor dos esforços nodais} \quad (2.52c)$$

com

$\{u\}$ = deslocamento da célula

γ_i = γ_j / Δ_t = deslocamento da célula da célula

$[B]$ = matriz dos admissíveis

$[M]$ = matriz das condições de contorno

$[N]$ = matriz das funções de interpolação

= esforço resultante no contorno

A solução do período dos elementos finitos de obra de esforço constante (eq. 2.51) em o elemento da área á a $\{u\}$. A interpolação no elemento pode ser realizada através do período das diferenças finitas, usando-se (Serrin, 84):

$$(\Delta_t [K] + [M]) \{u\} = \Delta_t ((-)\{F\}_0 + \{F\}) + [M] - (-)\Delta_t [K] \{u\}_0 \quad (2.53)$$

onde

Δ_t = número de elementos

= fator de correção, dependendo do elemento de interpolação no elemento

saída, os azos a os, resonsáveis e a a a a condade
 dá a do o o o, são os os a se d enados, n o o o
 cana de f x o, co o o de á a neres e anescente se concen ando sob
 fo a de nscos no con a o co as a c as. A a o a de do f x o se
 ansere a a os azos enores, d nndo ass o conf ciente de
 re ab dade do o e até 00 zes e a a o se a o na
 cond ão sa t ada. Pa a ba xos t ores de dade o a as s c oes o conf ciente
 de re ab dade ode se t ão e eno e ode se necessá os adentes
 dá cos e ados o n e a os de t o o andes a a e se a oss e
 de t a a o c ão de f x o no o.

A re de a cyfo o na re n e ob t da a a so os sa t ados, as res as
 os t ores de on t a a e ode se a cada a a ob e as de f x o e
 re os não sa t ados (r ds & o ns re e, 50), obse ando se e a a
 res es casos a cond dade dá a não é as a o cons an e as a a
 co dan as do t o de dade o e t co re de o o ssão.

A so ão do ob e a de f x o a a res de re os não sa t ados é, o t an o,
 a s co e xa do e a a re os sa t ados e t de des a n e de re n e a
 re n t re os a o es do conf ciente de re ab dade e da ca a de ssão, desc t a
 re a f ão de cond dade dá a (r a 2. 4). No caso de f x o t an e n e,
 é a nda necessá o c ão re se a a a a o do t o de dade o e t co co a
 o o ssão, re a ão re a e x ressa re a f ão do t o de dade o e t co o
 f ão ca a c e s t ca de s c ão, con o re f a 2. 5.

a aná se re a de ocessos de f x o a a res de re os o osos o t an o
 re e o c ão re n e de a ba as f u o es co base na re a za ão d re a de
 re nsa os de abo a o o o re o nd re o a a res de co re a o es. A f ão do
 t o de dade o e t co ode se a ox ada co base na c a de
 d s t b ão an o e t ca re a f ão de cond dade dá a ode se
 ob t da e zando se a f ão do t o de dade o e t co re o conf ciente de
 re ab dade na cond ão sa t ada.

2.4.1.

Determinação indireta da função de condutividade hidráulica

A determinação indireta da função de condutividade hidráulica pode ser realizada através da determinação da função de armazenamento de abastecimento, obtendo-se os valores dos coeficientes de retardação da absorção sob condições de saturação. As técnicas de armazenamento são determinadas na prática através de métodos indiretos, tais como a determinação das associações com os tempos de dilação do material de armazenamento, determinadas pelo método de Borek (1967).

A determinação da função de condutividade hidráulica pode ser obtida indiretamente a partir da função de armazenamento de abastecimento (coeficiente de armazenamento) obtidas através das análises realizadas na prática, com a utilização do método de Borek.

O coeficiente de armazenamento (θ) é definido pela equação 2.55, com o coeficiente de armazenamento (θ) presente no numerador e a área da seção transversal do reservatório (A) presente no denominador, conforme se ilustra na equação 2.55, quando o armazenamento é de 100%, o coeficiente de armazenamento é igual à definição da condutividade do solo, razão pela qual os resultados são os mesmos (Fig. 2.10). A inclinação da curva de armazenamento (θ) representa a taxa de armazenamento das unidades de água armazenadas em relação à área da seção transversal presente nos poros.

$$\theta = V_w / V \quad (2.55)$$

A função de armazenamento de abastecimento é a soma dos coeficientes de armazenamento da zona não saturada e da zona saturada, onde a primeira se baseia na inclinação da curva de armazenamento do reservatório (Fig. 2.10).

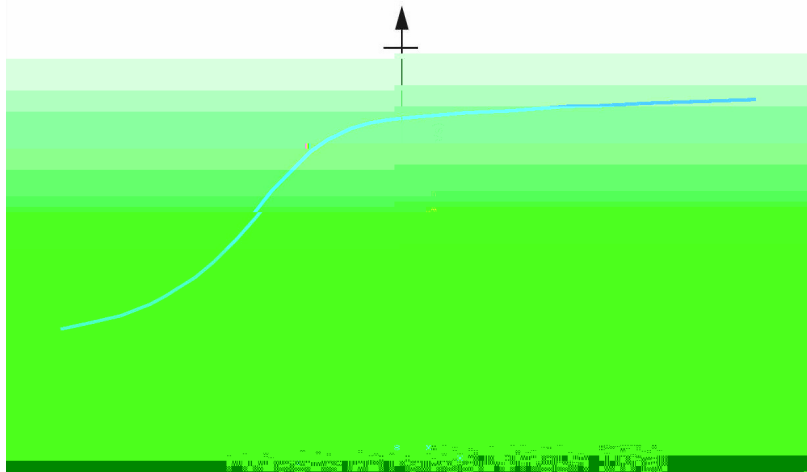


Figura 2.14 – Função de condutividade hidráulica (Fredlund e Rahardio, 1993)

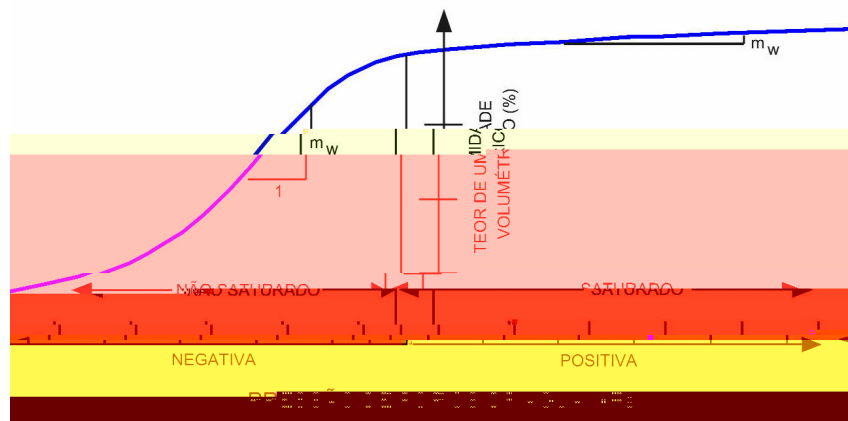


Figura 2.15 – Função do teor de umidade volumétrica (Fredlund e Rahardio, 1993)

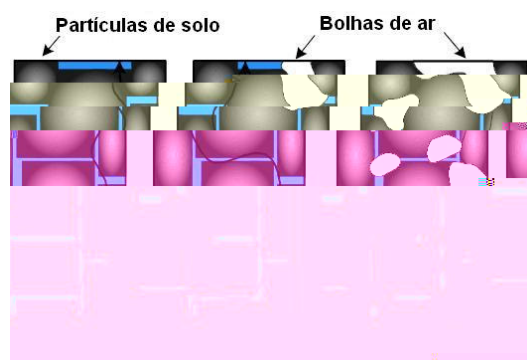


Figura 2.16 – Esquemática da trajetória de fluxo desde a saturação até atingir o teor de umidade residual. (Krahn, 2004)

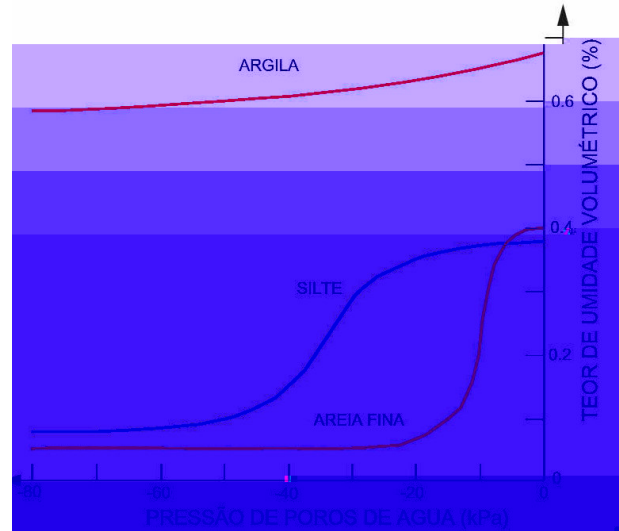


Figura 2.17 – Funções do teor de umidade volumétrica para areia fina, silte e argila (Ho, 1979)

2.4.1.1.

Método de Fredlund, Xing e Huang (1994)

Neste método se considera o coeficiente de permeabilidade k como dependente do teor de umidade o θ através da seguinte expressão (o uso da dependência do teor de umidade o θ com o coeficiente de permeabilidade k no método de solução entre 0 a 0,1 Pa. Neste método o k é considerado, portanto, variando a pressão de poros de água a k é considerado constante e encontrado nos gráficos das curvas k versus θ (Fredlund et al., 2004).

$$k(\theta) = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\theta)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2.50)$$

onde:

θ = coeficiente de permeabilidade na solução θ (/ s);

k_s = coeficiente de permeabilidade na condição saturada (/ s);

θ = teor de umidade o θ ;

θ_s = teor de umidade o θ na condição saturada;

N = número de pontos de amostragem ao longo da curva de características de umidade;

$e = \text{constante } 2,828$
 $y = \text{ordem da seção no eixo } x$
 $i = \text{ordem da seção no eixo } z$
 $j = \text{ordem da seção no eixo } y$
 $\psi = \text{ordem da seção no eixo } x$
 $\theta = \text{deslocamento}$

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{n[e + (\psi/a)^n]\}^m} \quad (2.5)$$

onde

$a = \text{ordem da seção no eixo } x$
 $n = \text{ordem da seção no eixo } z$
 $m = \text{ordem da seção no eixo } y$
 $(\psi) = \text{ordem da seção no eixo } x$

$$C(\psi) = \frac{n \left(+ \frac{\psi}{C_r} \right)}{n \left(+ \frac{000000}{C_r} \right)} \quad (2.58)$$

onde

$= \text{constante relacionada às seções ática no eixo } x$
 $\text{ordem da seção no eixo } z$

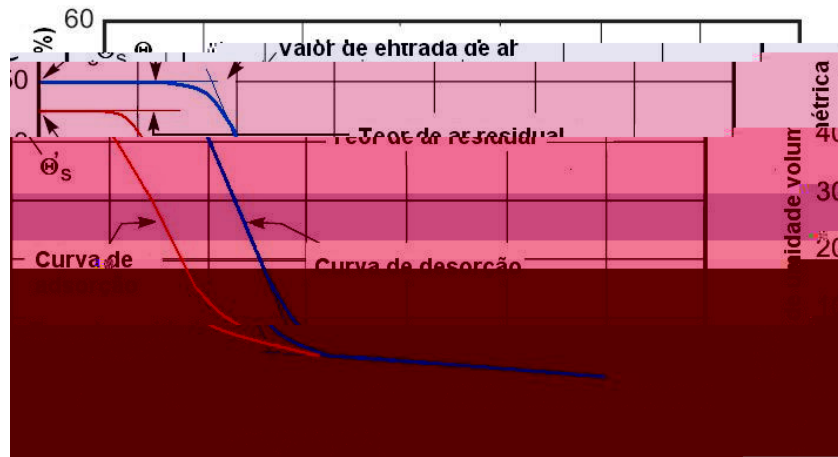


Figura 2.18 – Curva de adsorção e dessorção para um solo de silte (Fredlund, Xing e Huang, 1994)

2.4.1.2. Método de van Genuchten (1980)

Van Genuchten, 1980, desenvolveu a equação analítica para a descrição da curva de umidade volumétrica em função da tensão matricial para solos não saturados. A equação é dada por:

$$k_w = k_s \cdot \frac{[-(a_p)^{n-1}] + [(a_p)^n]^{-m}}{[(1 + a_p)^n]^2} \quad (2.5)$$

onde:

k_s = coeficiente de permeabilidade na condição saturada;

a, n, m = parâmetros da equação ($m = 1/n$), $n >$

a equação (2.5) observa-se a função de condutividade hidráulica que se relaciona com a curva de umidade volumétrica na condição saturada dos parâmetros da equação (a, n ou a, m). De acordo com Van Genuchten (1980) estes parâmetros são determinados da função de condutividade hidráulica considerando-se o ponto de inflexão do gráfico de condutividade hidráulica nas condições saturadas e desaturadas.

Se θ for o teor de umidade volumétrica no ponto ψ o coeficiente de permeabilidade da equação (2.5) não é necessário à função de condutividade hidráulica e pode ser calculado por:

$$\theta_{\mu} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ n \left[e + \left(\frac{\mu}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2.42)$$

se a função é reversível no intervalo $0 < \theta < \theta_s$,

$$\theta_{\mu} = \frac{\theta_s}{\left\{ n \left[e + \left(\frac{\mu}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2.43)$$

onde:

θ_r = o de dado o íco res da

θ_s = o de dado o íco satado

a â o a, e e nudes de a, é o on o de ração da f ão de o de dado o íco, sendo e a ração do o a o de ração da de a. a â o n con o a a na ão da f ão de o de dado o íco e o a â o m o o de dado res da.

$$a = \mu_i \quad (2.44)$$

$$m = 3 \cdot n \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (2.45)$$

$$n = \frac{3^{m+1} - 2s \mu}{m \theta_s} \quad (2.46)$$

onde:

μ = s ão co res onen ao o de dado o íco θ onde oco e o on o de ração da c a ca ac s ca de s ão;

s = na ão da an ração à f ão de o de dado o íco no on o de ração da c a.

$$s = \frac{\theta_i}{\mu_i - \mu} \quad (2.47)$$

onde μ é o íco de a an ração co o x o das s ão.

2.4.2.2. Método de van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) apresenta a seguinte equação analítica para a obtenção da função de retenção de umidade o qual é:

$$\theta_{wp} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]^m} \quad (2.48)$$

onde:

a, n, m são os parâmetros da curva.

Os parâmetros a, b, c são relacionados com a função de retenção dos parâmetros b, c como:

$$a = \frac{150}{(2/c - 1)^{1/b}} \quad (2.49)$$

considerando

$$150 = \frac{\theta_s + \theta_r}{2} \quad (2.50)$$

3

Rebaixamento temporário do lençol freático

3.1.

Introdução

Na maioria dos casos onde se pretende conseguir o abaixamento do lençol freático, com o intuito de evitar danos às estruturas, quando o nível d'água encontra-se muito próximo às estruturas, é necessária a execução de obras de rebaixamento do lençol freático até o final das construções. Entretanto, após o término das obras de drenagem, a recuperação do nível freático deve ser feita de maneira adequada para evitar danos às estruturas.

As obras de rebaixamento do lençol freático são realizadas de acordo com as condições de abastecimento, e a instalação de sistemas de drenagem deve ser feita de acordo com as necessidades de drenagem das áreas afetadas.

A descrição da técnica de rebaixamento do lençol freático, suas características e a aplicação das mesmas, é o objetivo deste capítulo, tendo em vista que os procedimentos adotados para o rebaixamento do lençol freático são os mesmos para os casos de rebaixamento do nível d'água em estruturas.

3.2.

Bombeamento direto (esgotamento de vala)

Este sistema de rebaixamento é bastante simples, consistindo em colocar a rede de drenagem no fundo da escavação, e as tubulações de coleta de água são acopladas aos pontos de drenagem. As tubulações de coleta de água são conectadas às bombas, e os resíduos são coletados no sistema de drenagem baseado na experiência.

De acordo com o Manual (), este tipo de bombeamento pode ser realizado quando as redes de drenagem forem instaladas com o intuito de evitar danos às estruturas. A instalação do sistema de drenagem no fundo da escavação, é sempre recomendada para evitar danos às estruturas.

soo na área de saída das bombas, o sistema de bombeamento pode causar recalques de estruturas vizinhas, devido a diferenças (águas rasas, deformações), etc. Se não for considerado o comportamento do solo de referência o sistema de captação d'água, aumentando-se de fato o risco de execução de drenos sob as zonas afetadas.



Figura 3.1 – Bombeamento direto na drenagem de uma escavação (Scott e Schoustra, 1968)

3.3.

Rebaixamento com ponteiros filtrantes (*well-points*)

Consiste na instalação ao longo do perímetro da área a ser baixada de um tubo com 4" de diâmetro, dotado de ponteiros d'água (filtros) com espaçamento regular de 10'. Os ponteiros d'água são colocados a 10' das bordas, consistindo de um tubo de 1/4" ou 1/2" de diâmetro, terminado na parte de dentro do tubo (a ponta a ser a parte de dentro) e filtrado com o material de nylon com uma malha de 0,1 mm.

As ponteiros são instalados e os rebaixamentos executados com tubos de aço e conexão de água, de modo a não ocorrer o processo de infiltração com a água nas sondagens à recção (S.P.A.).

As ponteiros filtrantes são instalados com espaçamento regular de 30', e a drenagem, obedecendo-se ao modo de trabalho de 3.2). Quando os ponteiros d'água não estão sendo usados, as ponteiros d'água devem ser vedadas a parte interna da escavação para evitar a infiltração do solo aumentando-se o risco de execução (não rebaixar os níveis do tubo com o, a menos de ponteiros ao redor, etc.) de referência a ser adotado o sistema de vedação de referência do sistema. Mas, a cada vez que os rebaixamentos são feitos, o risco de infiltração é reduzido pelo rebaixamento máximo conseguido de 5'. A ponteiros a ser executados com o nível de 0,1 mm, não sendo se do tubo filtrante.

Para a rebaixação dos pontos, deve-se utilizar os registros (Fig. 3.3). A vazão de água em cada ponto a ser rebaixado depende do solo, sendo no máximo de 0,5 a 1 m³/h. Os registros são instalados no sistema a uma taxa de 30 a 40 registros/m, sendo cada um com um orifício de 10 cm de diâmetro.

Em cada ponto a ser rebaixado, o ponto a ser rebaixado é a anotação de nível, o registro a ser instalado a uma taxa de 30 a 40 registros/m, sendo cada um com um orifício de 10 cm de diâmetro. Quando o registro for instalado, a vazão de água em cada ponto a ser rebaixado será de 0,5 a 1 m³/h. Os registros são instalados no sistema a uma taxa de 30 a 40 registros/m, sendo cada um com um orifício de 10 cm de diâmetro.

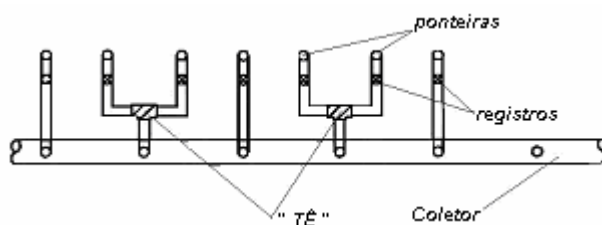


Figura 3.2 – Disposição das ponteiros no sistema de rebaixamento (Urbano, 1999)

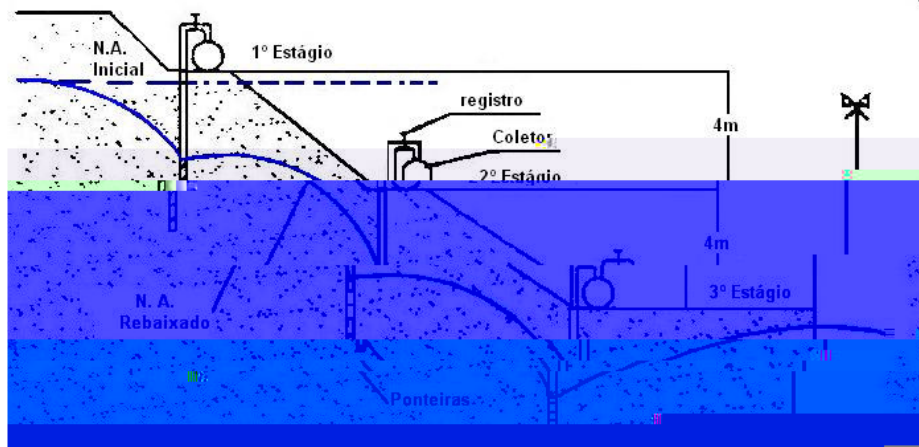


Figura 3.3 – Rebaixamento com três estágios de ponteiros (Urbano, 1999)

3.4. Rebaixamento com poços profundos

Este sistema foi desenvolvido para a rebaixação do nível de água em pontos de 5 m, sendo o solo de areia e de argila. Para a instalação, deve-se utilizar os sistemas de rebaixamento com

os seguintes: a) com a utilização de injeções; b) com o emprego de bombas de recalque submersas, deixo reticada.

3.4.1. Rebaixamento com injetores

Para os de 25% a 30% de declividade são executados até profundidades de 40 m, no método das sifões, a os injeções. Para a manutenção dos níveis a de 4 a 8 m. A utilização desses sistemas pode ser dada com a utilização de bombas a arcos (a sifões, usado nas faixas 3.4 e 3.5) o emprego de bombas concêntricas.

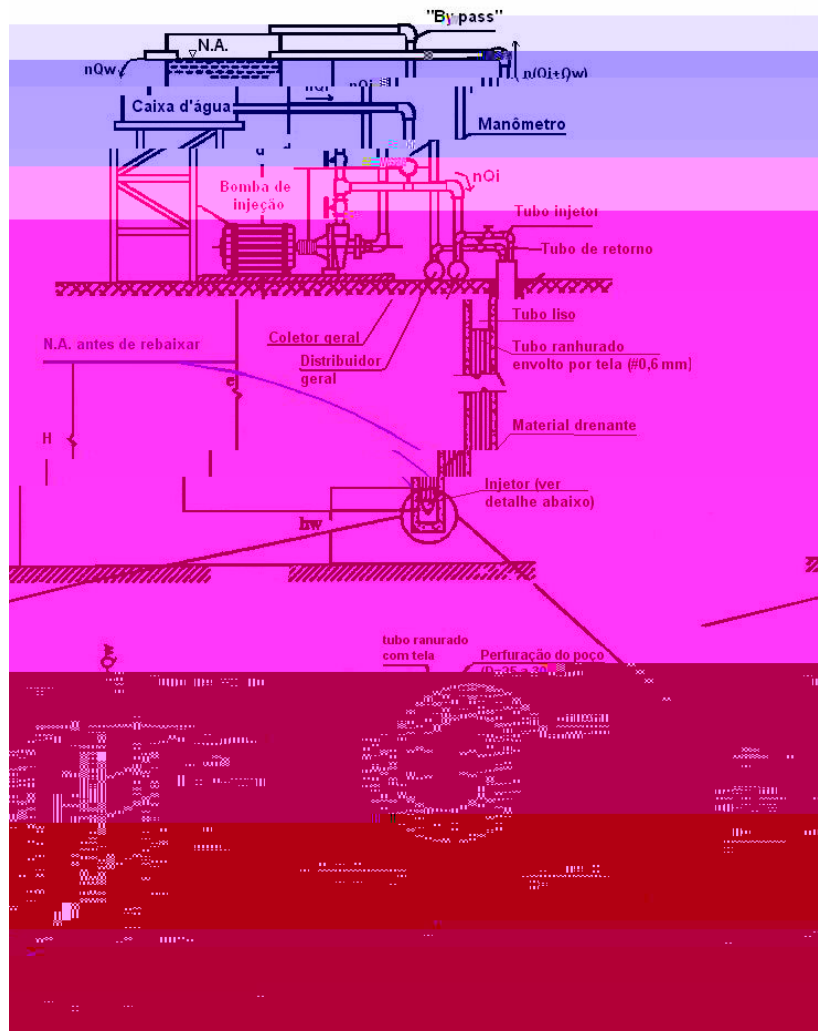


Figura 3.4 – Sistema de Rebaixamento com injetores de tubos paralelos (Urbano, 1999)

s s e a f n c o n a c o o c c o s e f e c i a d o n o a a á a é n e a d a o a b o b a c e n t r a a t a s d e a b a ã o z o n a o s s a d a s o n d e s e c o m e ç a o s b o s d e n e ã o c o n d z e a á a s o b a t a r e s s ã o (a 0 a t) a t e o n e o , n s a d o n o f n d o d o o o (r a 3.4). A á a n e a d a a t a r e s s a o b c o d o n e o , a c r e s c d a d a a n d a d e d e á a s a d a d o s o o, r e s o b e r e o b o d e r e o n o a t e a s r e f e r e.

s t b o s d e r e o n o r e s ã o a d o s a o c o r e o r e a r e c o n d z e a á a t e a c a x a d'á a. A s r e s o r e s d e r e o n o s ã o d a o d e d e 0% d a s r e s o r e s d e n e ã o, r e o n r e d'á a n o n e o d a c a x a e a n t d o c o n s t a n t e, s e n d o o r e x c e s s o d e f n d o c o n d z e d o a a f o a d a o b a. A á a r e a m e s c e n t e é p z a d a r e a b o b a c e n t r a, n o c e s s o s e f e c i a d o.



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) Detalhe dos injetores, (b) Vista do sistema de poços profundos (Urbano, 1999)

A r e f a ã o o n d e s e n s a a o n e o é f e i t a r e a r e n t e p z a n d o s e d e a r e f a z o a a r e a b o r e á c o r e c a o n t a r e n t a s e a c o o a d e r e f a ã o. a n t e a r e f a ã o, n e a s e á a r e o n e o d o b o d e r e s t e n t o, n o c e s s o s a a o r e r e a d o n a r e n t e a a d e f n d a o r e s n a r e x e c ã o d e r e s a c a s i o a z. o n c d a a r e f a ã o, n s a a s e n o n e o d o f n o b o a n h a d o, c o d â r e o d e 4' a 6', r e n o t e r e a d e n y o n c o a n a d e 0,5. A a r e n e o d o b o (d e c o r e n t o) é s a, s e a n h a s, f e c i a d a n a o n t a, d e o d o r e a s a t c a s f n a s d e s o o r e r e n e a a r e a s a n h a s d o b o o s s a s e d e o s t a d a s o s e d r e n t a ã o. r e r e o s t e r e o s, r e a s e o n e o r e a s e o a t e a s e d r e n t a d o.

res a oren te o t bo añ ado re o t bo de re res, en o é reñõ do co
a re a ad ada, à red da re res re o é re t ado.

3.4.2. Rebaixamento com bombas submersas

Neste sistema de rebaixamento é usado quando se necessita de maiores vazões nos casos (de 40 a 100 c de diâmetro) o sistema de unidades de rebaixamento. Neste caso usa-se bombas submersas no tipo de tipo bo añ ado reñõ do co re a de ny on (# 0, 1). Na conexão da bomba é feito a a tes de re todos conectados ao e o da bomba, e a o des a a o a t ca reñõ no con a o co a á a.

Todas as bombas usadas no sistema de rebaixamento são adaptadas a uma rede de controle com rede de controle, através dos dispositivos no sistema de operação (sistema de controle dos re todos, sistema mecânico de controle de operação dos motores elétricos), dispositivos resacas a a controle de desempenho das bombas (oscilômetros, anemômetros, etc) e re t a a da reñõ de re ca obre as re a re bo ba, o re a reñõ a s ca o do sistema de rebaixamento. Estes re a re os t ado na f a 3.4.

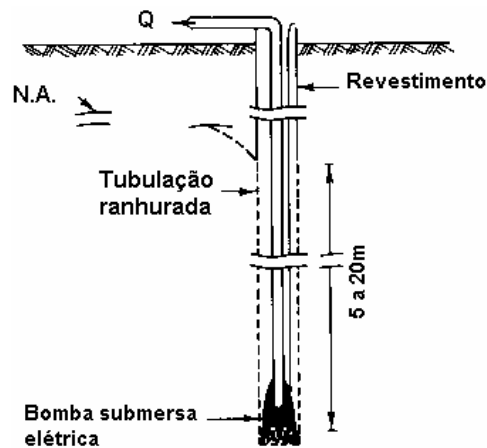


Figura 3.6 – Esquema de um poço profundo com bomba submersa (Scott e Schoustra, 1968)

3.5. Dimensionamento de um sistema de rebaixamento

A configuração de um sistema de rebaixamento depende principalmente da quantidade de vazão que deve ser retirada do sistema de tratamento de águas residuais.

Para a determinação da vazão a ser aplicada, deve-se considerar a continuidade (fluxo permanente, a ná) e a rede de acy. Muitas vezes, as condições de contorno, situações de fluxo, existência de estruturas de diferentes rebaixadas, entre outros fatores, influenciam a obtenção de uma solução analítica para a vazão a ser aplicada em cada ponto de rebaixamento.

Por esta razão, utiliza-se sempre as condições de contorno nos pontos de rebaixamento dos sistemas finais, os pontos de aplicação das vazões a serem retiradas (situações de fluxo 2, condições de contorno) e, portanto, os pontos de rebaixamento, são definidas com o método de diferenças finitas de modo a serem aplicadas de acordo com o nível de rebaixamento do sistema. Muitas vezes, a definição de rebaixamento do sistema de base de dados (bancos de dados, entre outros) é feita com base na vazão 0% sobre a vazão de rebaixamento, retirando a vazão a ser aplicada ao sistema, no caso de rebaixamento, retirando a vazão a ser aplicada ao sistema.

3.5.1. Fluxo em vala com uma linha de poços

A figura 3.1 ilustra o caso de rebaixamento com uma única linha de poços, o que é a configuração de fluxo 2. Os pontos de rebaixamento são definidos de acordo com a vazão a ser aplicada ao sistema. Assim, deve-se considerar a vazão necessária para a sustentação do rebaixamento (figura 3.1) e a vazão a ser aplicada a cada ponto de rebaixamento, de modo a obter o nível de rebaixamento desejado.

Se os pontos de rebaixamento forem definidos de acordo com a vazão a ser aplicada, caso contrário, a vazão a ser aplicada deve ser considerada.

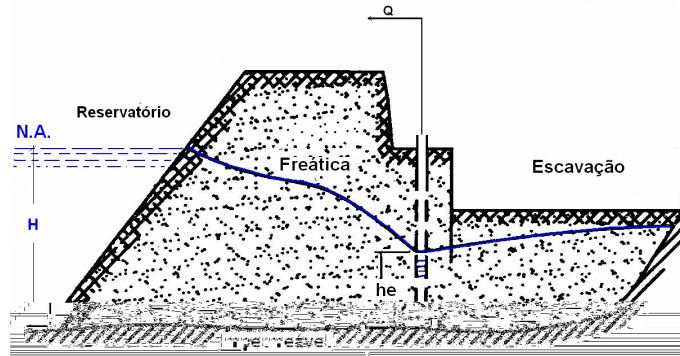


Figura 3.7 – Fluxo bidimensional para vala (Urbano, 1999)

3.5.1.1. Vala penetrante

a) Aquífero artesiano (confinado)

A figura 3.8a apresenta o caso da vala penetrante em aquífero artesiano, onde se assume a condutividade hidráulica constante k e a distância da vala ao reservatório L .

A área de fluxo $A = x$, o módulo de fluxo Q é constante ao longo da vala, e a vazão Q é dada por:

$$Q = k.D \frac{dh}{dy} \quad (3.1)$$

$$dh = \frac{Q}{k.D} dy \quad (3.2)$$

Integrando-se, considerando a condição de contorno $y = 0$ na vala, onde $h = h_e$, e a condição de contorno $y = L$ no reservatório, onde $h = H$:

$$\int_{h_e}^H dh = \int_0^L \frac{Q}{k.D} dy \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{kD}{L} (H - h_e)$$

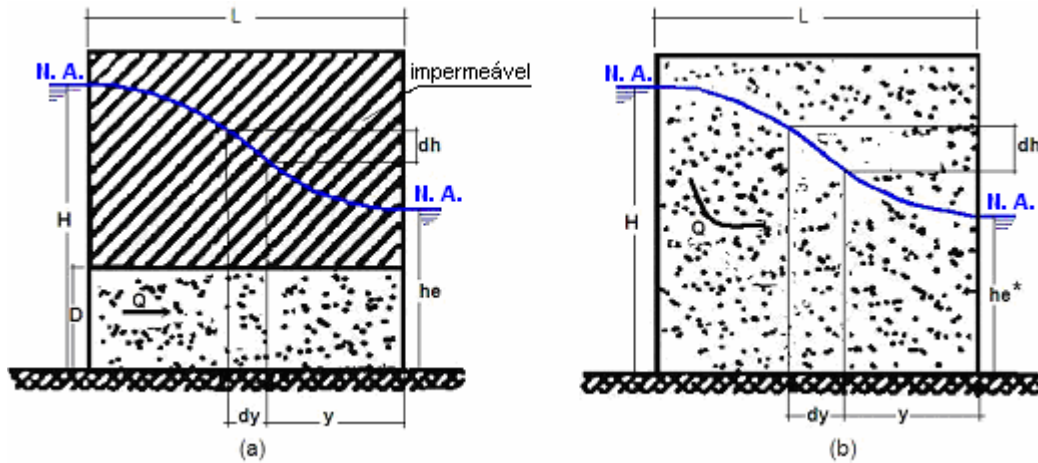


Figura 3.8 – Fluxo em vala penetrante (Urbano, 1999)

Logo, o balanço de massa no elemento de comprimento \$dy\$ a distância \$y\$ a partir da saída dá-se pelo seguinte:

$$\int_h^H dh = \int_y^L \frac{Q}{kD} dy$$

$$(H - h) = \frac{Q}{kD} (L - y) \tag{3.4}$$

$$(H - h) = \frac{L - y}{L} (H - h_e) \text{ com a ajuda da eq. (3.3)}$$

b) Aquífero gravitacional (não-confinado)

Assim, a eq. 3.8b apresenta o caso da vazão constante a partir da superfície. A distância \$y\$ da saída dá-se a área de fluxo \$A = h \cdot x\$, onde \$h\$ é a espessura do aquífero e \$x\$ é a espessura da zona de saturação. A vazão \$Q\$ é dada por \$Q = A \cdot v = h \cdot x \cdot v\$, onde \$v\$ é a velocidade de fluxo. Assim, a eq. 3.4 pode ser reescrita como \$Q = h \cdot x \cdot \frac{dh}{dy}\$. Portanto, a eq. 3.4 pode ser reescrita como:

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{dh}{dy} \tag{3.5}$$

$$h dh = \frac{Q}{k} dy \tag{3.6}$$

Integrando a eq. 3.6, obtém-se a expressão da vazão \$Q\$ em função da distância \$y\$ da saída da vala. Para isso, é necessário definir os limites de integração. No caso de um aquífero não-confinado, a espessura do aquífero \$h\$ varia de \$H\$ na esquerda para \$h\$ na direita. Assim, a eq. 3.6 pode ser integrada da seguinte maneira:

o nível andando se, considerando a orientação do eixo y na área, o nível andando os níveis a áreas da

$$\int_{h_e}^H h dh = \int_0^L \frac{Q}{k} dy \quad (3.7)$$

$$Q = \frac{k}{2L} (H^2 - h_e^2)$$

Logo, a distância y a saída da água

$$\int_h^H h dh = \int_y^L \frac{Q}{k} dy \quad (3.8)$$

$$(H^2 - h^2) = \frac{2Q}{k} (L - y)$$

$$(H^2 - h^2) = \frac{L - y}{L} (H^2 - h_e^2) \quad \text{com a ação da eq. (3.7)}$$

3.5.1.2.

Vala parcialmente penetrante

a) Aquífero artesiano (confinado)

A ação da água a cáca penetra antes (eq. 3.1) é obtida o nível da água (3.1), de cada o Baon (5.1) e aná o a à eq. (3.3) com o nível do eixo L a nível do a o nível da água (3.1).

$$Q = \frac{kD}{L + E_A} (H - h_e) \quad (3.9)$$

Tabela 3.1 – Valores de E_A/D para fluxo artesiano em vala parcialmente penetrante (Urbano, 1999)

l	0,05	0,	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,
E_A/D	,00	0,50	0,30	0,20	0,8	0,0	0,0	0,04	0,02	0,005

onde l é a profundidade do o no e o e a eq. (3.1)

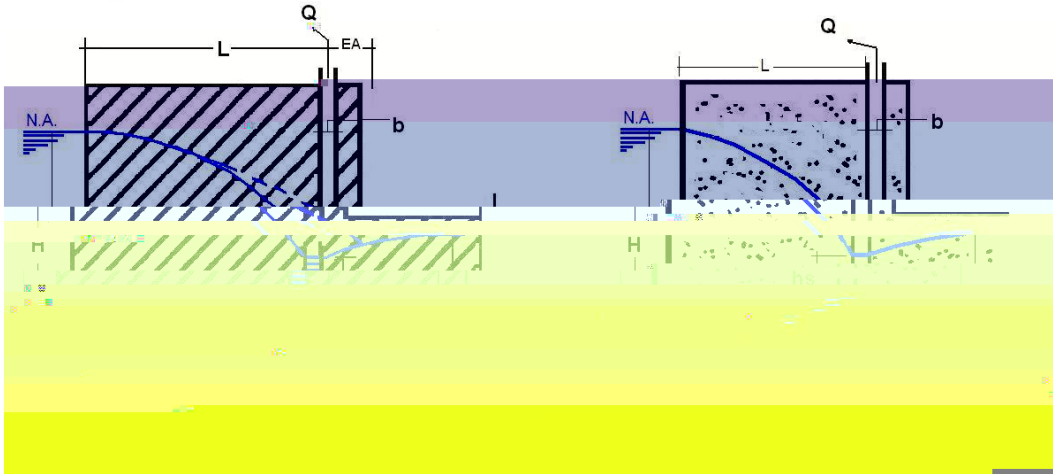


Figura 3.9 – Fluxo em vala parcialmente penetrante (Urbano, 1999)

o escoamento do aquífero não confinado (Fig. 3.8b) a taxa de fluxo de água na vala é dado

$$h_D = \frac{E_A(H - h_e)}{L + E_A} + h_e \quad (3.10)$$

b) Aquífero gravitacional (não-confinado)

Para a análise do escoamento a $L/h_0 \geq 3$ (Fig. 3.8b) e

$$= \left(0,3 + 0,2 \frac{h_0 - h_e}{h_0} \right) \frac{h_0^2 - h_e^2}{2L} \quad (3.11)$$

o a taxa de fluxo de água na vala é dada por

$$h_D = h_0 \left[\frac{,48}{L} (H - h_0) + \right] \quad (3.12)$$

3.5.2.

Fluxo em vala com duas linhas de poços

Esta configuração ocorre quando o rebaxamento é feito considerando-se a influência dos dois lados de cada retentividade da escavação (Fig. 3.10 e 3.11).

Quando não se conhece o valor da distância L , esta pode ser determinada com base na expressão de Slichter (1905)

$$L = 3000(H - h_e)\sqrt{k} \quad (3.13)$$

onde a vazão de Q / s e L , H e h_0 (o nível da água na escavação) são
 os parâmetros.

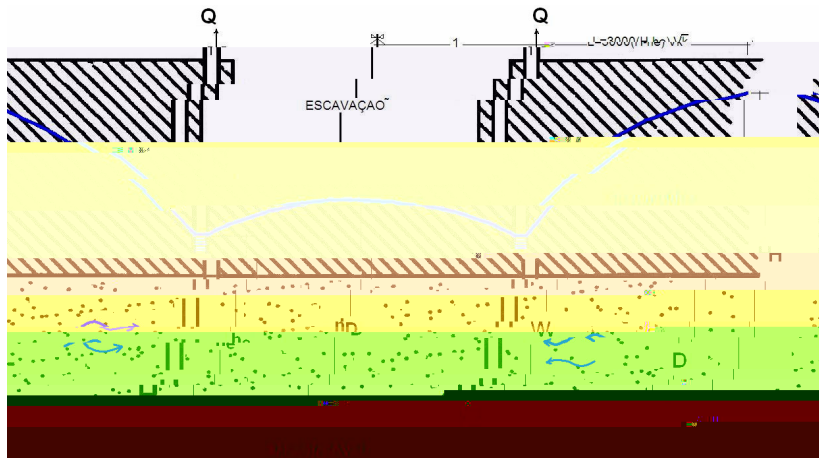


Figura 3.10 – Fluxo de aquífero artesiano em duas valas (Urbano, 1999)

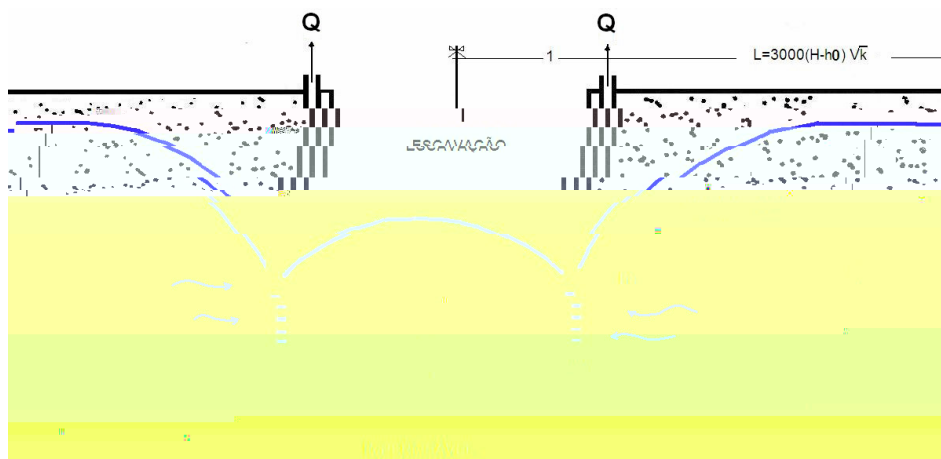


Figura 3.11 – Fluxo de aquífero gravitacional em duas valas (Urbano, 1999)

a) Aquífero artesiano (confinado)

A vazão Q em cada uma das valas (3.0) é calculada a partir da vazão (3.1) e a vazão de Q no centro da escavação o nível da água (3.0).

b) Aquífero gravitacional (não-confinado)

Para a vazão de Q a 3.1, considerando $L/h_0 \geq 3$, o nível da água em cada uma das valas é calculado a partir da vazão (3.1) e a vazão de Q no centro da escavação o nível da água (3.2).

3.5.3. Fluxo radial em poços

No caso de os a In ados o cá c o da azão e da q nd dade do eba xa e n o é f e o, co o s o an e o e n e, cons de ando se a as e a e n e s sob cond ão de f x o 2 ano. Mas a ão e e a d s t b ão e o é ca dos o os e an a é a o ona f e o ada aco ãn ando o e e o da resca a ão (e e a e i an a) o d e n s ona e n o do s s e a de eba xa e n o ode se a ox ado cons de ando se e e co o o c c a de se ão i ans e sa e a e n e à á rea de i t ada o res a o ona, cons de ando cond o res de f x o 2 ax ss é co.

A azão é ex ressa e a e a ão aba xo, cons de ando á da ã o e se de e e, onde é a coo denada ad a e A á rea no a ao f x o, de e n d e n e do i o de a e o (a i s ano o e a i ac ona).

$$Q = k \frac{dh}{dr} A \quad (3.14)$$

a) Aquífero artesiano (confinado)

Nes e caso a á rea A co res onde à s e f e e a e a de e c nd o de a o e e e a e a cons an e, con o e f a 3. 2.

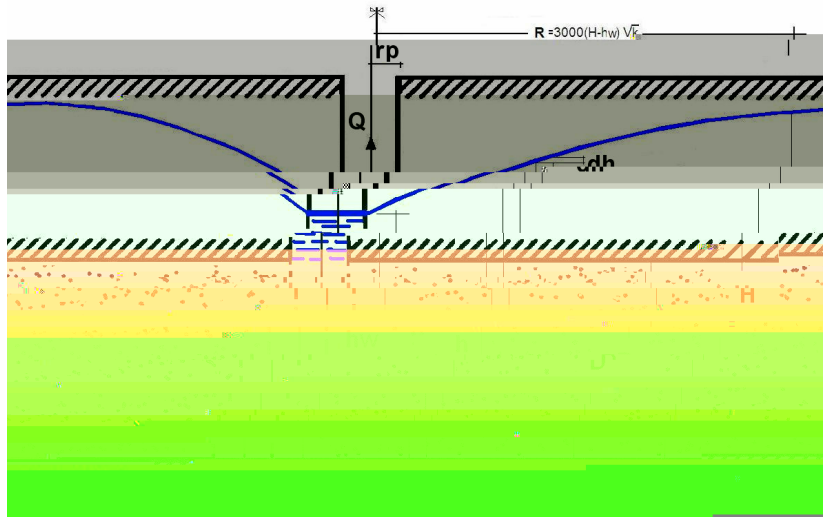


Figura 3.12 – Fluxo de aquífero artesiano em poço circular penetrante (Urbano 1999)

$$Q = k \frac{dh}{dr} 2\pi r D \quad (3.15)$$

$$Q \int_{r_p}^R \frac{dr}{r} = 2k\pi D \int_{h_w}^H dh$$

$$Q = \frac{2k\pi D}{n \left(\frac{R}{r_p} \right)} (H - h_w)$$

Logo, a taxa de escoamento radial do centro do poço é dada por:

$$H - h = \frac{Q}{2k\pi D} n \left(\frac{R}{r} \right) \quad (3.16)$$

b) Aquífero gravitacional (não confinado)

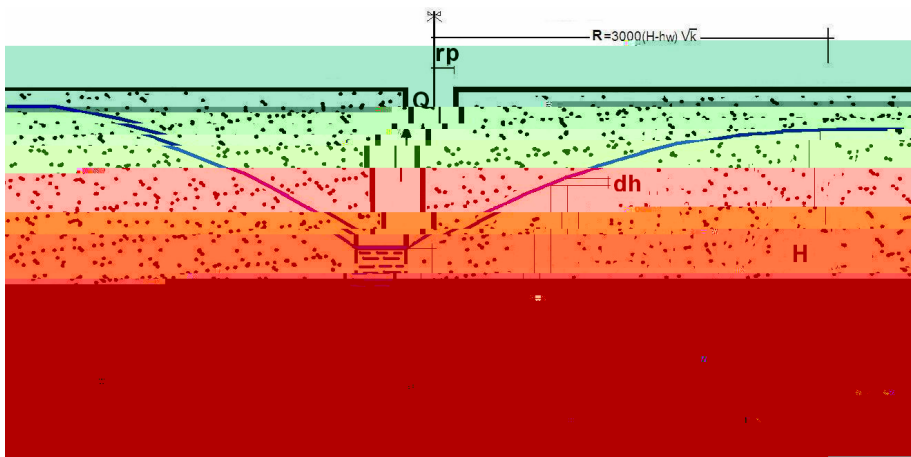


Figura 3.13 – Fluxo de aquífero gravitacional em poço circular penetrante (Urbano 1999)

$$Q = k \frac{dh}{dr} 2\pi r h \quad (3.17)$$

$$Q \int_{r_p}^R \frac{dr}{r} = 2k\pi \int_{h_w}^H h dh$$

$$Q = \frac{k\pi}{n \left(\frac{R}{r_p} \right)} (H^2 - h_w^2)$$

Na área da zona de aeração, não ocorre a taxa de escoamento radial do centro do poço (distância da água baixa ao não aeração)

en o d'á a) n' tenc a o co a azão ca c ada, e de da f p ão
 o a t ca resen nas re aores (3. 5) e (3. 7). Po res a azão, a res a t a de
 R é as rezes f a co base na re aão ca de S t a d (e . 3. 3).

re aco do co L bano () ando o o o não é o a re re me t an re,
 a a re os de o re t re h são red dos a a t do f ndo do o re o a o
 ca c ado de é a o ad re 25%.

W re oso () re co renda re a azão áx a ax re a bos os t os de
 a f re o ode se de re nada o

onde é dado re /s re $S_L = 2\pi r$ re resen a área da s re f c re a re a do o o,
 re ax \geq (

3.5.4. Grupo de poços

Se a n com n o de o os p a p_n ns, a ados r a r o a r ac ona r d s os r ao on o de r a o ona r ada s r o a r (r a r 3. 5). A r r da r ca no r o do r o de o os r on r d s an r dos r os r ob r da se r ndo se o r s o ac oc n o ad o ad o a a r r co o o, r e se r ndo se as r r o res r r e n c a s de de r adas a c a s.

Se a n com n o de o os p a p_n ns, a ados r a r o a r ac ona r d s os r ao on o de r a o ona r ada (r a r 3. 5).

o o a r r ão r r e n c a o r e n a n t e do ob r a de r e b a x a r e n t e o r o os r e m e a (r r ão 3. 4), o n c o da s r o s r ão de so r r e s s e a c a r e o r e s r ad o f na r e r a r e n t e à a z ão r r r co o o de a o $r_p = \sqrt{A/\pi}$ onde A é a á r e a do o on o ao on o do r os o os r s ão d s r b r dos.

Ad r ndo o r o r e s e r r o das as a z o res nos o os s ão a s e r r e s e s ão d s os r no r e r o de r a á r e a c c a de a o r , r e n t e o:

a) Aquífero artesiano (confinado)

$$nQ_p = \frac{2k\pi D}{n \left(\frac{R}{r_p} \right)} (H - h_D) \quad (3.19)$$

onde r é a a r a do r n o r r e á r co no c e n t o do o o r e r a r e n t e r r co.

b) Aquífero gravitacional (não-confinado)

$$nQ_p = \frac{k\pi}{n \left(\frac{R}{r_p} \right)} (H^2 - h_D^2) \quad (3.20)$$

onde r é a a r a do r n o r r e á r co no a o de r r e n c a r do o o r e r a r e n t e r r co.

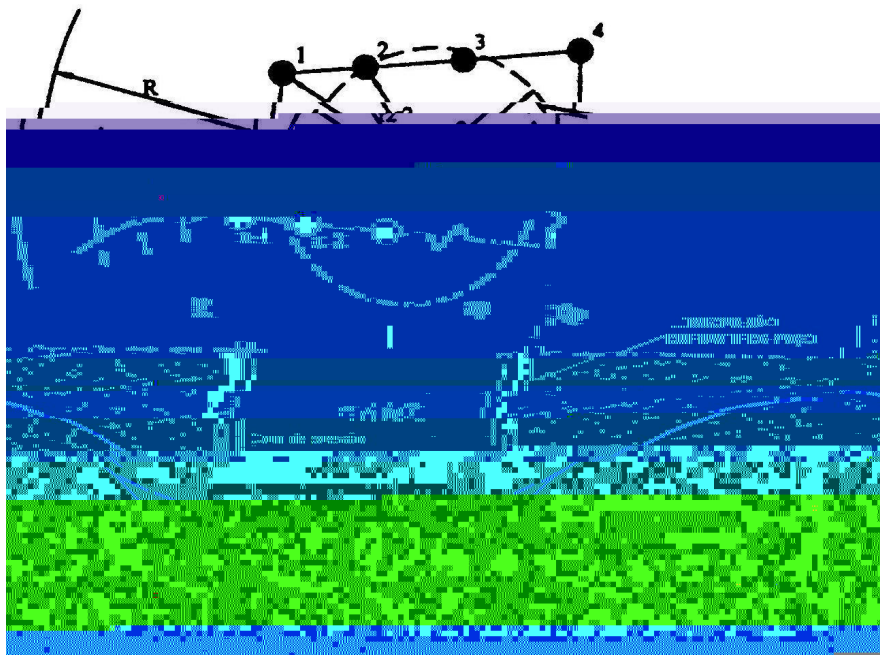


Figura 3.15 – Superposição de poços em aquífero gravitacional (Urbano 1999)

re do ao come de de resão no aos o os, a a t a da m a f r á c a w
 ao on o do re re t o c c a ode se res t ada co o (Mans re ka f an,
 2), cons de ando w o a o de cada o o re non re o i a de o os do o:

a) Aquífero artesiano (confinado)

$$h_w = H - \frac{Q_p}{2\pi kD} \left(n \frac{R^n}{nr_w r_p^{n-1}} \right) \quad (3.21)$$

b) Aquífero gravitacional (não-confinado)

$$h_w^2 = H^2 - \frac{Q_p}{k\pi} \left(n \frac{R^n}{nr_w r_p^{n-1}} \right) \quad (3.22)$$

4

Fluxo na barragem de terra de Macusani - Peru

4.1. Introdução

Esses cálculos são feitos a partir dos dados de fluxo de água disponível na barragem de terra de Macusani (Peru) considerando os coeficientes de anisotropia e os coeficientes de permeabilidade nos eixos x e y (0.02) e 3 (0.5) a velocidade de 2 e 3, respectivamente, da barragem. Os coeficientes de permeabilidade são dados nos estudos realizados e os dados são obtidos quando se desconsidera as diferenças de ação, admissão de água e outras.

4.2. Descrição da barragem Macusani

A barragem de Macusani foi projetada a ser construída a partir da barragem do rio Macusani, na zona de abaya, de altura de 100 metros, de acordo com o projeto na figura 4.1. Barragem de terra do tipo zonada, com a altura máxima de 40 metros, com coeficiente de segurança de 4.0 na altura de 43.04 metros acima do nível da fundação. O coeficiente de segurança é de 4.5, dando a vazão máxima de 2 metros de espessura dos blocos, mantendo a vazão constante a afluente na direção de San Sebastián, situada no rio.

A área reservada é localizada na base do Aazonas na sub-barragem do Macusani. O sistema de drenagem é baseado no sistema de drenagem em camadas, com o objetivo de evitar o resqueijamento das camadas de argila e areia e evitar o aparecimento de vazamentos de água (Figura 4.2).

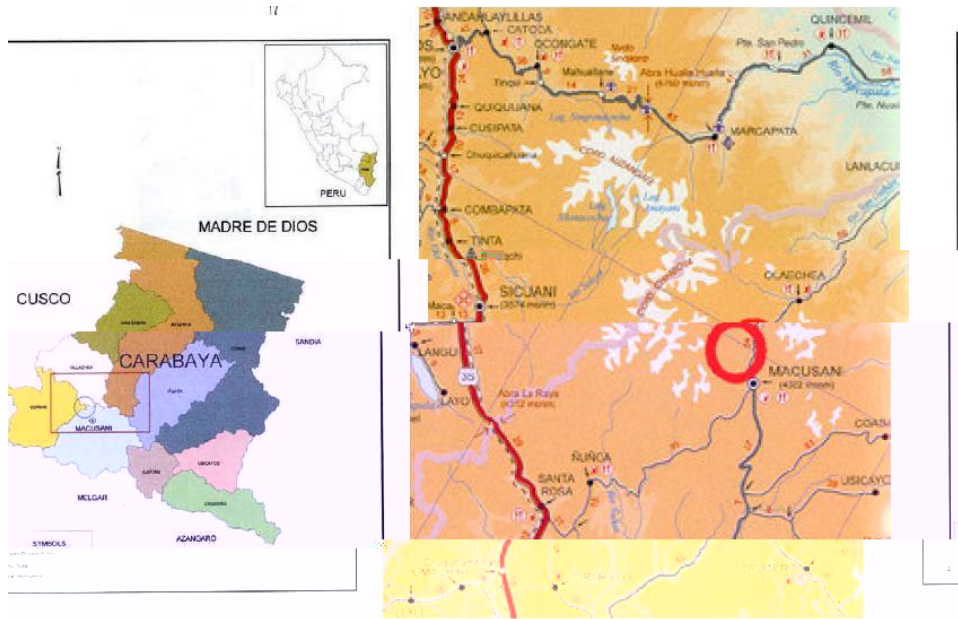


Figura 4.1 - Localização da barragem de Macusani – Peru



(a)

(b)

Figura 4.2 – (a) turfa de origem vulcânica (b) afloramentos rochosos na região da barragem Macusani, na altitude 4400m acima do nível do mar

As condições do solo de f... não no oca da ba a re resão a resen...adas na f...a 4.3. A a re res...da cons...de...a ca ada s...ca de de os...ôn cos (a re as...ans o...ados o re re as) re co...onares de re re na res res...a sobre ca ada de ande q...nd dade fo...ada o...f...as câncas. A a re d...re...a resen...a...a be...a ca ada s...ca de de os...ôn cos se...da o a re as...o ac as cons...dos o bocos re...a a...z de a re a a re/o...a osa sobre...f...as câncas de co b anca a a da c a a. A s...re f...re f...á...ca se encon...a na a...t...de a ox...ada de 4244 re...os ac...ado n...re do a.

A seção transversal 3 da barragem Macusani (Fig. 4.3 e 4.4) foi utilizada com o software de análise de fluxo de água para a análise de estabilidade.

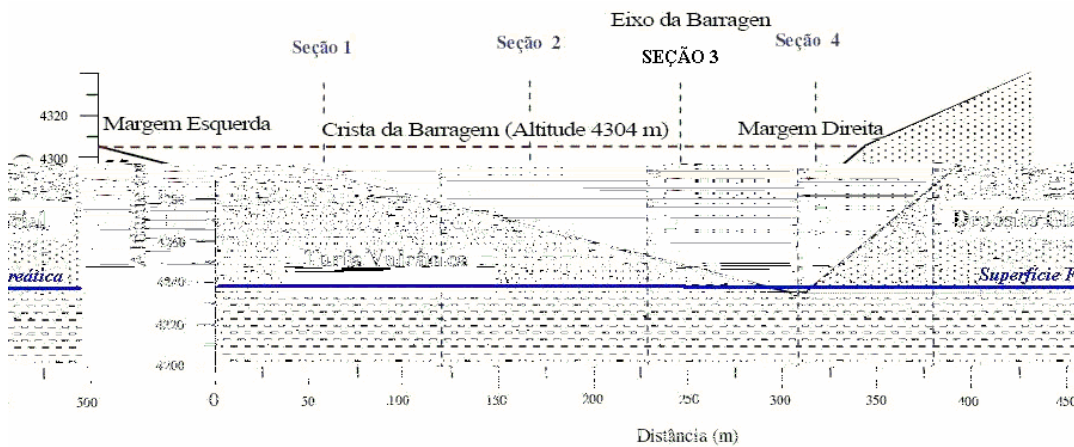


Figura 4.3 - Características do solo de fundação da barragem Macusani

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410772/CA

Legenda

- 1 : Margem esquerda
- 2 : Solo/Aluvião
- 3 : Rocha
- 4 : Areia cascalho compactado
- 5 : Aluvião arenoso
- 6 : Rocha arenosa
- 7 : Aluvião nas frentes de rocha
- 8 : Margem direita
- 9 : Tachibana
- 0 : Tachibana

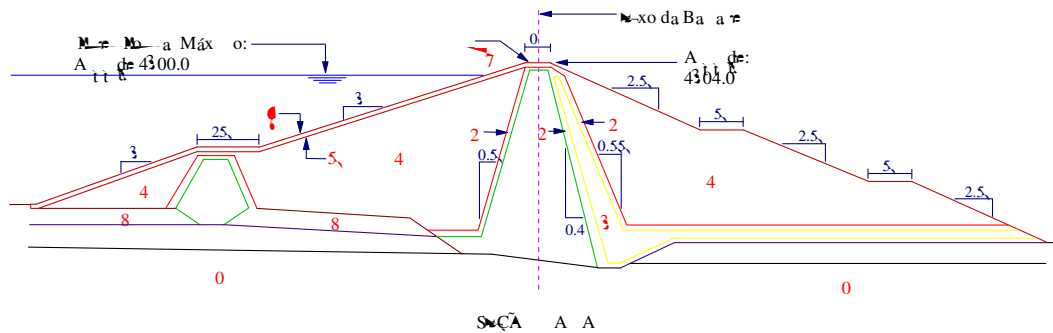


Figura 4.4 - Seção transversal 3 nas análises 2D de fluxo da barragem Macusani

As análises de estabilidade são do tipo de fluxo de água para a análise de estabilidade. Os resultados das análises de estabilidade de fluxo de água para a análise de estabilidade são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores dos coeficientes de permeabilidade saturados para análise de fluxo da barragem Macusani

	Matéria	coeficiente de permeabilidade saturado (/s)
Barragem	Reserva : 0,0001	2×10^{-5}
Barragem	Muro : 0	0
Barragem	Reinos : 0	4×10^{-5}
Fundação	Reservatório : 0,0001	0
Fundação	Reservatório : 0	0
Fundação	Alfaca : 0,0001	0

Ma a sãnc a de o as nã o aores sobre a cond ã dade d á ca dos ares sob cond ão nã o sã da (nc ãdo se as res rec ã as d s b ores an o í cas) as c ã as ca ac ã s ã cas de s ç ão as co res onden res f ã ores de cond ã dade d á ca re e adas nas aná ses ã re b d ens ona s ã o a re ã adas den ã as d s on res no o a a See / , de acodo co o ã o de so o. A f ã a 4.5, os ã as c ã as ca ac ã s ã cas de s ç ão ad ã adas a a os d res os ares re co ã o a ba a re , en an o re a f ã a 4. sã as co res onden res f ã ores de cond ã dade d á cas de re nadas re o í odo de red ã ã a. (4).

4.3. Modelagem do fluxo na condição 3D

As sã aores nã í cas a a a aná se de f ã o ã d ens ona sã o a re a zadas co o o a a See 3 , no ã a res ã ã ã re o re ã ca re ã ã o de adã re o sã o a ã es de andes bocos re , na re xec ã o do o a a , sã o s ã d dos a ã o a ã ca re ã re re re ã os f ã os re xã d cos de 20 m s (f ã ores de nã o a ã o 3 ã d á cas). As aná ses ode se fã as cons de ando f ã o ã ans re ã o re am re , a a re os o osos o a o ã a cã re ã e sã ã ados, a re sã ã ã re ã re o re ã dades re an so o as. As cond ores de con o no ode se os ã as re ã re os de ca ã d á ca re sc ã o f ã o s re fã a o ã dade de á re a.

A f ã a 4. a re sã a a conf ã a ã o dos bocos 3 re descre re a re o re ã a re nd ca os ares da ba a re Mac sã n. A f ã ã o ã re res sã a ã dã de 3 re co re ã o de 525. Ma ode a re sã o a

zados 2,0 bocos s ácos se tanso a a re a a a de
 re re nos f n os 3 (r a 4.8) co os t a o 20 re re nos ad ácos
 com c ados o 20 on os nodas.

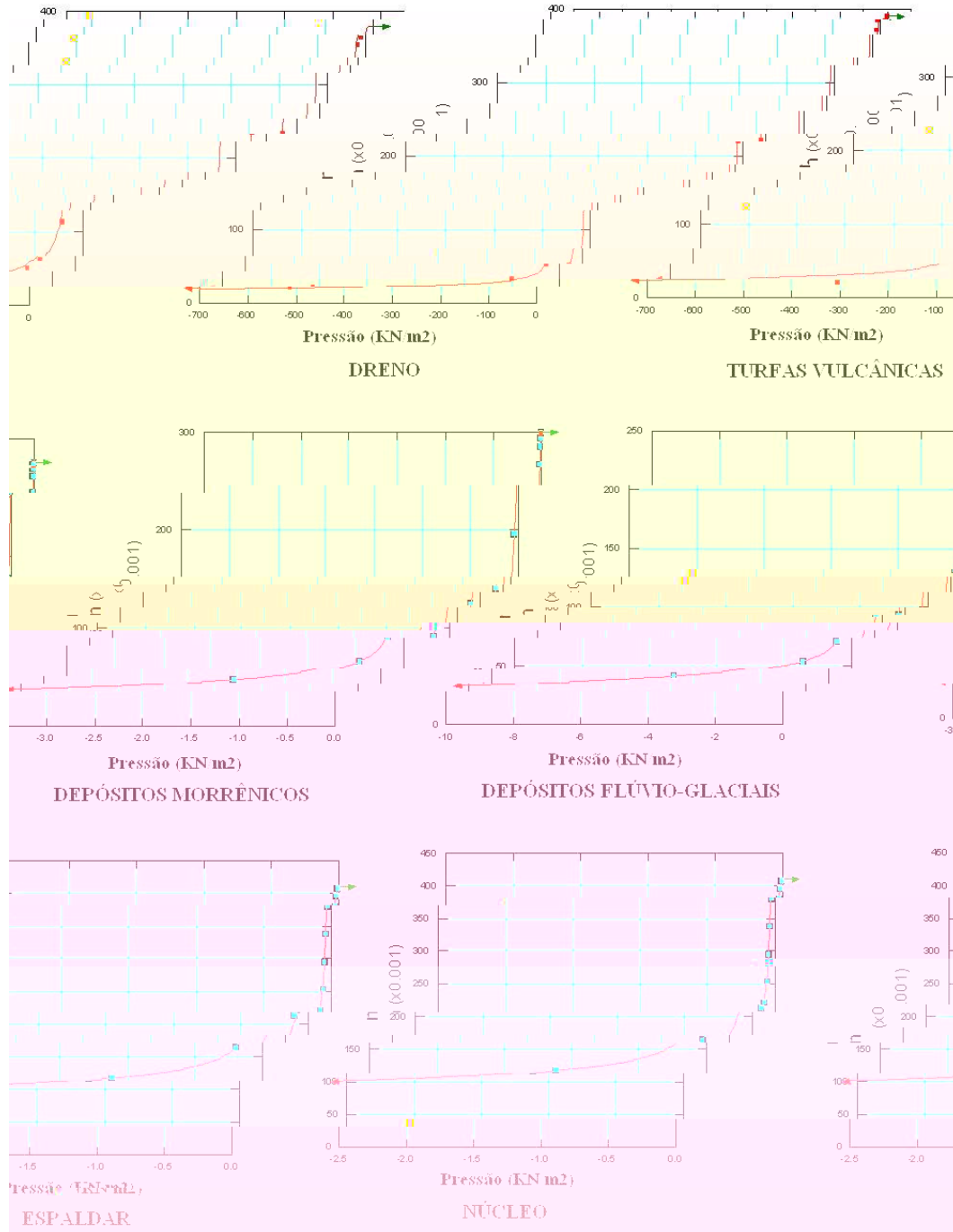


Figura 4.5 – Curvas características de sucção assumidas para os materiais da barragem Macusani com base no programa Seep/W

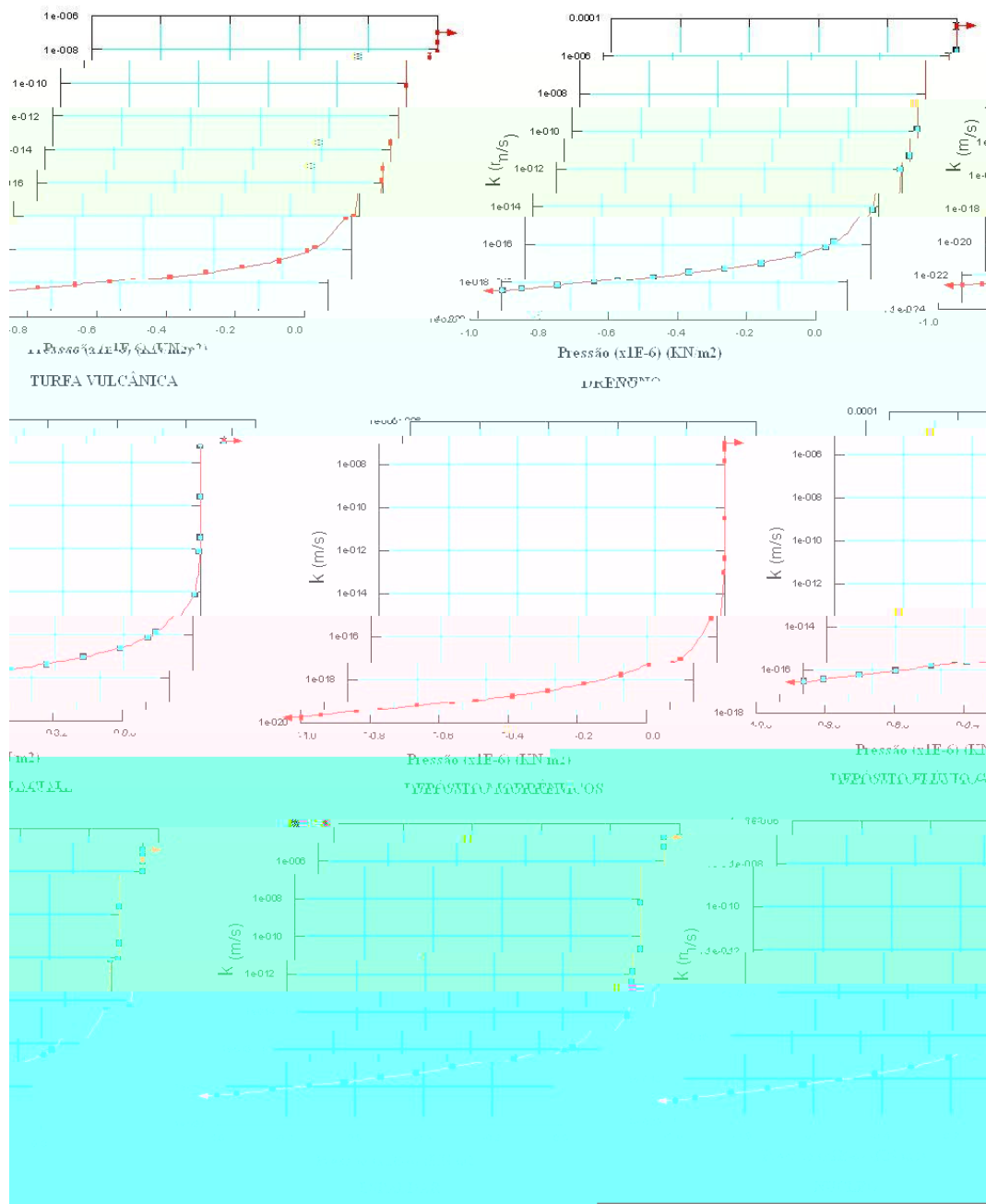


Figura 4.6 – Funções de condutividade hidráulica calculadas pelo método de Fredlund e al. (1994) para os materiais da barragem Macusani

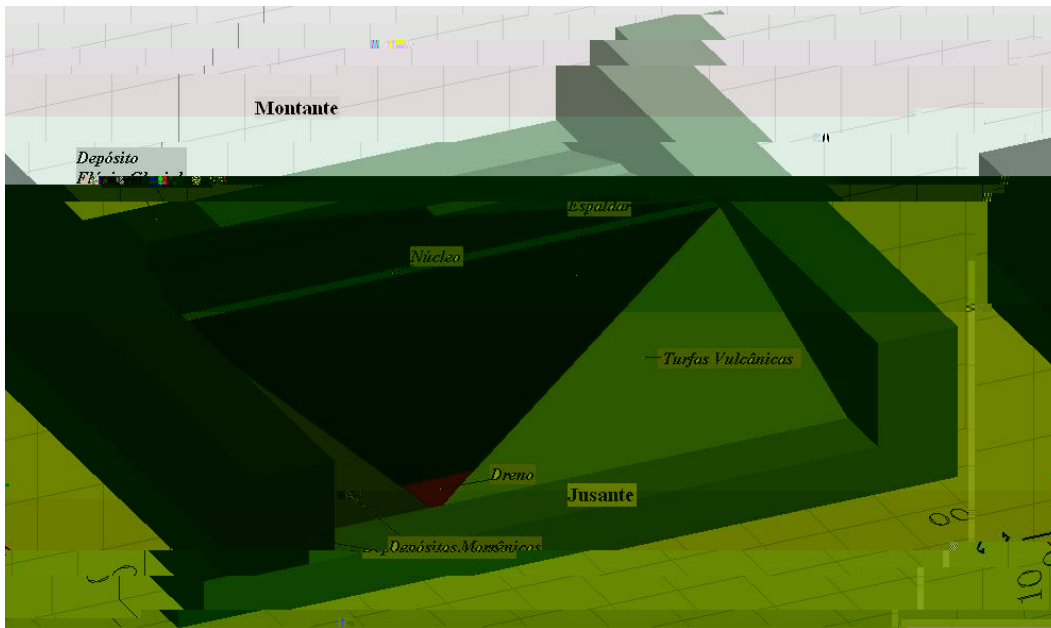


Figura 4.7 – Malha de blocos na análise 3D da barragem Macusani

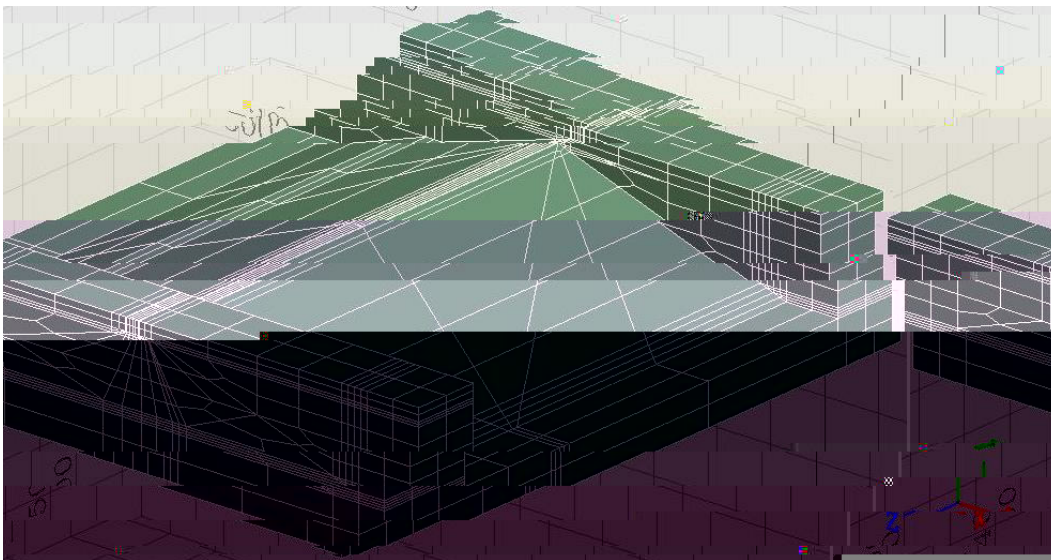


Figura 4.8 - Malha de elementos finitos na análise 3D da barragem Macusani

4.3.1. Primeiro enchimento do reservatório

n re do ren o f reá t co antes do re o reñc reñc do rese aõ o
 oca za a se reñt re as a t t t des 4244 (à on t an re) re 423 (à san re), conõ re
 nd cado na f re a 4. . As cond ões de conõ no f o a n t od z das re t re os
 de ca a s d á t cas t t t os nos con a os so o á t re co o f õ re sc t o n õ

nos contatos com os dados reais. As características das condições de trabalho são as seguintes:

O processo de trabalho é o seguinte: considerando os dados da obra, a área de trabalho é a área de 4300 acres do terreno. A tabela 4.2 indica a função para a determinação dos dados de trabalho com as respectivas características (β) no período de 4200. A análise no tempo foi realizada considerando-se o número de horas de trabalho de 500, com o índice de 0,00 na obra de 4200 acres, de modo a não se considerar a produtividade de 4200 acres de trabalho. A análise da produtividade da obra não se aplica aos diferentes períodos de trabalho. A análise da produtividade da obra não se aplica aos diferentes períodos de trabalho (0,00 no caso, a produtividade recomendada é de $\beta = 0$).

Tabela 4.2 – Função para variação da carga hidráulica com o tempo no talude de montante (primeiro enchimento do reservatório) da barragem Macusani

Tempo (dias)	Área (acres)	Área (acres)	Área (acres)
0	44	4244	4244
5	4	424	424
20	0	420	420
25	0	420	420
30	837	42837	42837
35	2	422	422
40	00	4300	4300

Para a análise dos dados (ver tabela 4.3) a distribuição das características na obra de 4230 acres (condição de trabalho) nos períodos de trabalho às áreas da obra de trabalho do reservatório, bem como na condição de trabalho recomendada, são indicadas na tabela 4.0.

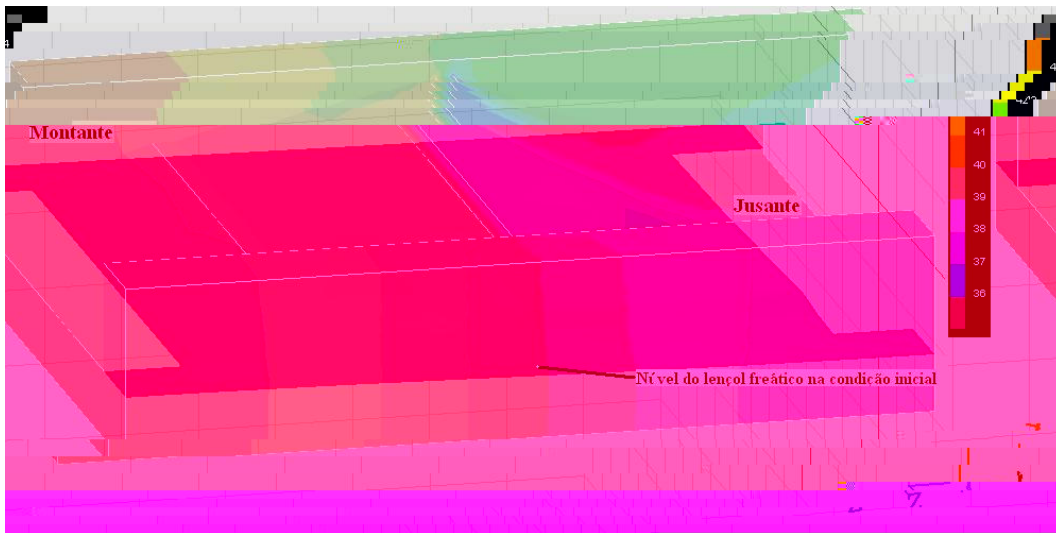


Figura 4.9 – Posição inicial do lençol freático antes do primeiro enchimento do reservatório da barragem Macusani

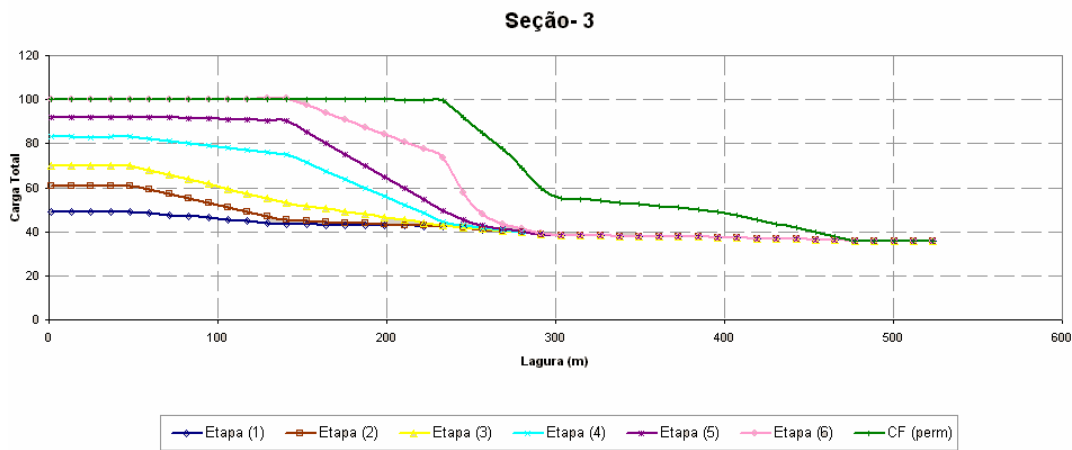


Figura 4.10 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente

Na condição de fluxo permanente, a distribuição da carga hidráulica, a distribuição das cargas de pressão, das cargas totais, e o coeficiente de segurança dá a conhecer a segurança das estruturas. A segurança é de 4,5, respectivamente.

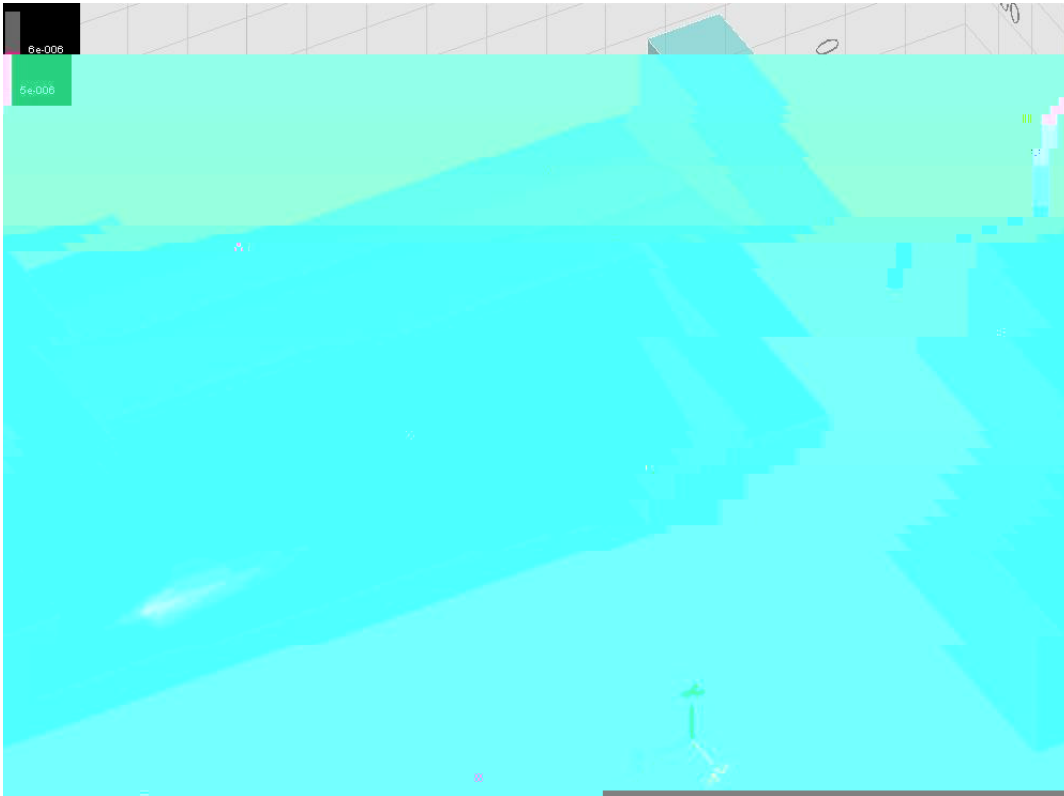


Figura 4.14 – Distribuição das velocidades no pé da barragem Macusani no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

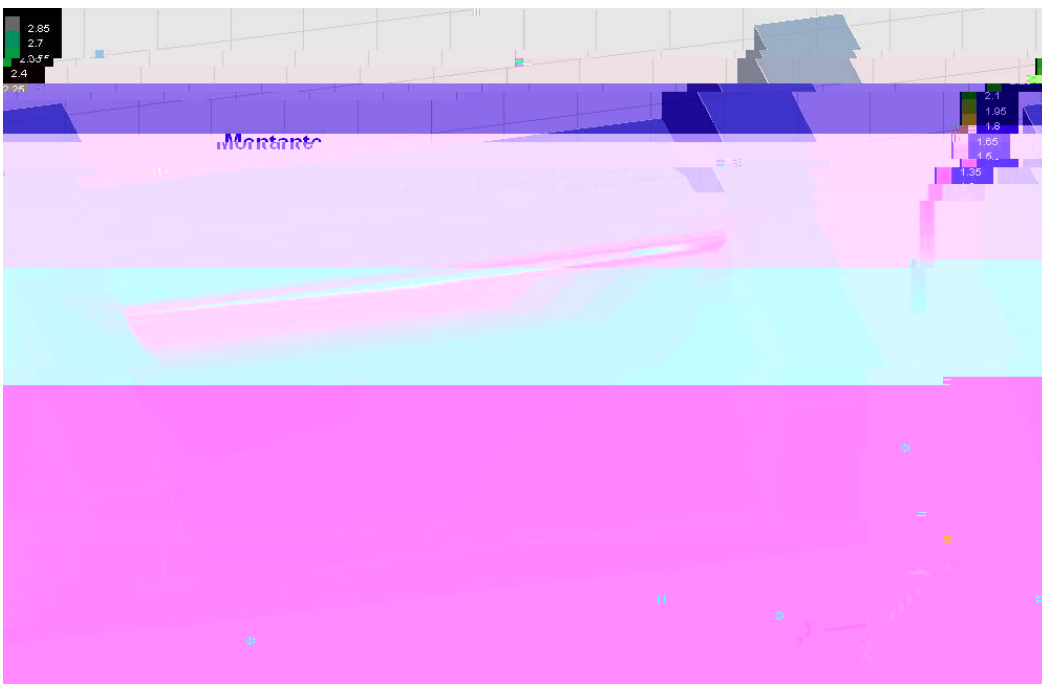


Figura 4.15 – Distribuição dos gradientes hidráulicos no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

4.3.2. Rebaixamento rápido do reservatório

o abaixamento rápido das condições de fluxo remanescente, sendo a ser dada a situação de rebaixamento do nível do reservatório. Para a análise, foi considerada a função não linear da Tabela 4.3 a descrição da função da condição de contorno à montante, relacionada com o decréscimo do nível do reservatório no tempo. A análise no tempo foi executada considerando-se um número máximo de iterações no tempo de 500, com o erro máximo de 0,00 na solução do problema de fluxo não linear. O tempo de execução foi a seguir apresentado na Tabela 4.3.

A Figura 4.16 mostra a evolução da linha freática quando é executado o rebaixamento do nível freático à montante, com o ndca a Tabela 4.3. Note-se o deslocamento do corpo da barragem ainda não se a nível do reservatório remanescente.

Para a seção transversal 3 (Figura 4.3) a distribuição das cargas nas aletas de 423 (correspondente ao eixo de drenagem) no instante do rebaixamento do nível do reservatório à montante, bem como a condição de fluxo remanescente da barragem, estão indicadas na Figura 4.16.

Tabela 4.3 – Função empregada para o rebaixamento rápido do reservatório da barragem Macusani

Tempo (dias)	Abertura (m)	Área (m ²)
0	00	4300
	44	4244

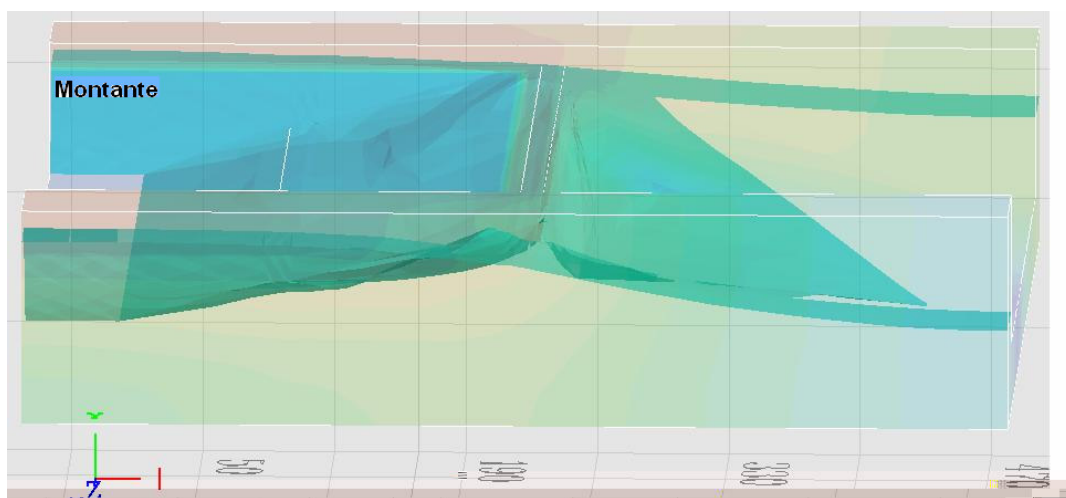


Figura 4.16 – Esquematização da linha freática para o rebaixamento rápido do lençol freático (t=dia)

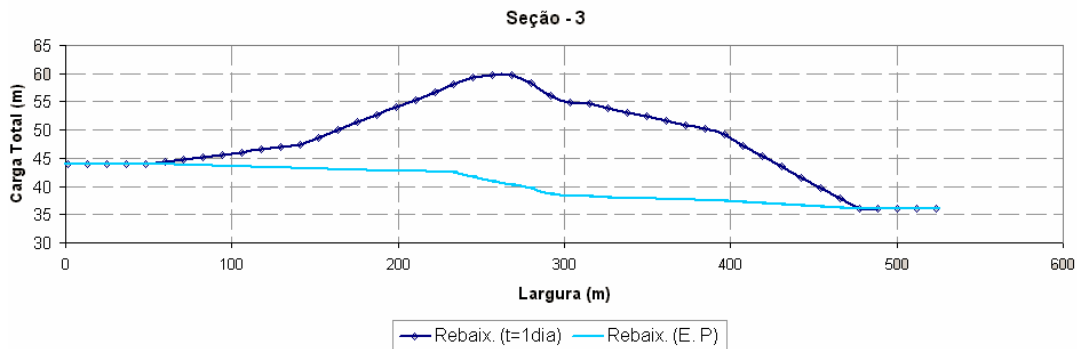


Figura 4.17 – Distribuição das cargas totais na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante) para o rebaixamento à montante da barragem e na condição de fluxo permanente dentro do corpo da barragem

4.4. Análise do fluxo na condição 2D

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos das análises de fluxo bidimensionais obtidas com o uso do *Sec / do* acoplado ao *a a de* rebaixamento nos *de* do 0.02.

As análises se referem à seção 3, a qual considera como seção transversal típica a obra de fluxo ano 2. A Figura 4.8 mostra a rebaixada da barragem (reserva de 3 m) com um nível de 525, bem como a área de rebaixamento, com o *de* dos 2202 são rebaixados adiante as barragens (4 m) e *de* anuais de recarga constante (3 m). A operação de rebaixamento se localiza na altitude 4240, à montante, 4236, à jusante, conforme a Figura 4.17.

4.4.1. Primeiro enchimento do reservatório

Na análise 2, o reservatório de rebaixamento do reservatório o rebaixamento na análise 3 foi realizado, considerando-se o rebaixamento antes do início das obras, de acordo com as tabelas da Tabela 4.2.

O tempo de análise do rebaixamento foi determinado de 40 dias, com o passo de 5 dias cada, com o número máximo de 500 iterações por dia e o tempo de execução de 0. A convergência da solução numérica não ocorreu, onde o fluxo rebaixamento não foi alcançado no tempo de rebaixamento (230 dias).

A Figura 4.20 mostra a evolução no tempo da posição da linha freática na década de cada uma das etapas de enchimento do reservatório, a partir do momento em que se inicia o primeiro enchimento. A Figura 4.21 mostra a evolução no tempo da posição da linha freática dos pontos localizados na altura de 423 m (correspondente ao nível da de de saneamento).

Sobre o desempenho, as distorções das curvas de nível das camadas de ressonância, das condições de drenagem dos adensamentos e das condições de drenagem nas Figuras 4.22 a 4.25, respectivamente.

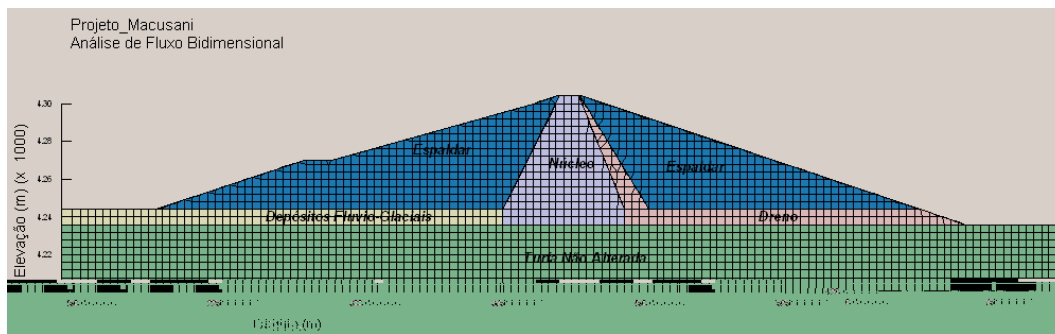


Figura 4.18. – Geometria, materiais e malha de elementos finitos da seção 3 da barragem Macusani

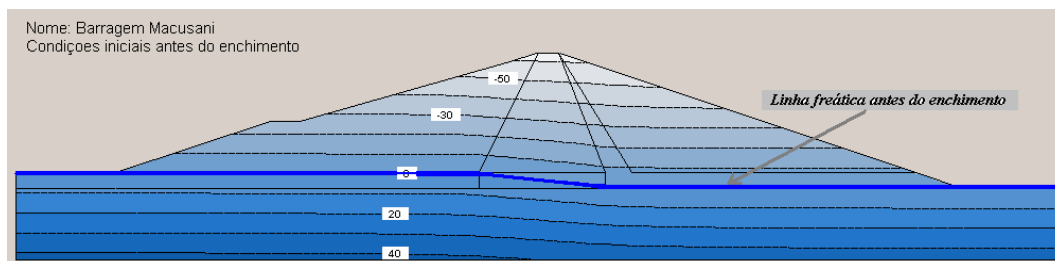


Figura 4.19 – Posição inicial da linha freática e linhas de iguais cargas de pressão

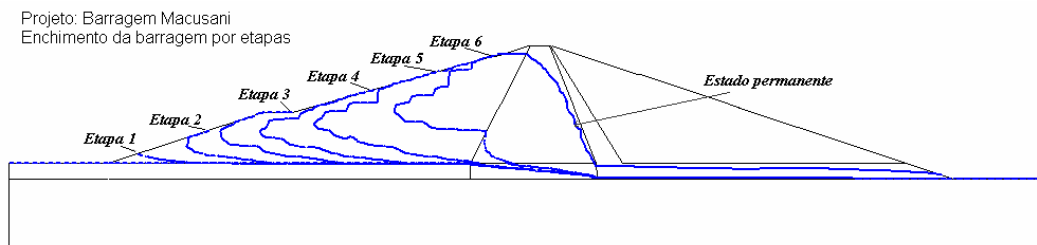


Figura 4.20 – Posição da linha freática na seção 3 durante as etapas de primeiro enchimento do reservatório e em condição de fluxo permanente

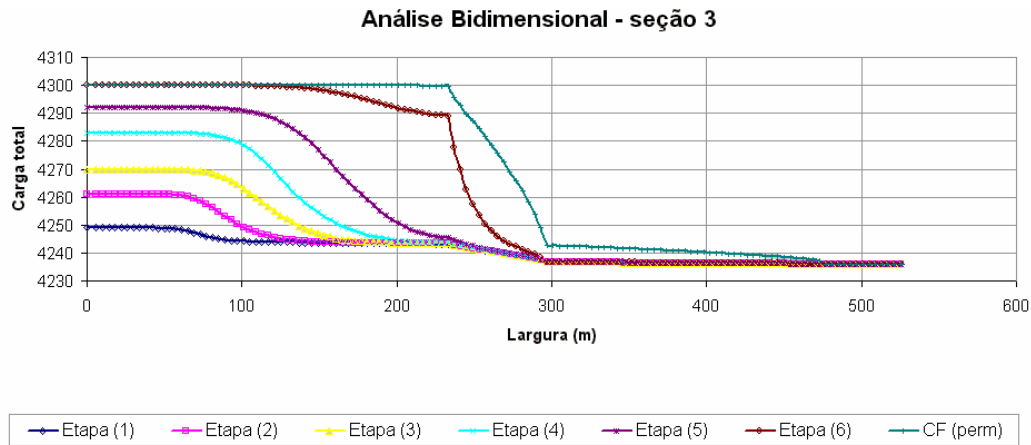


Figura 4.21 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente

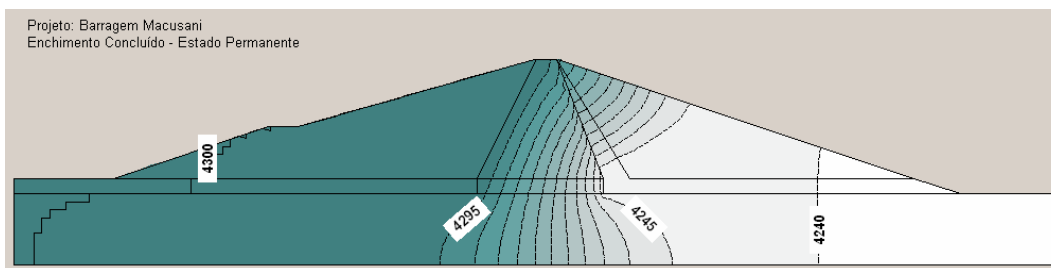


Figura 4.22 – Distribuição das cargas hidráulicas totais obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

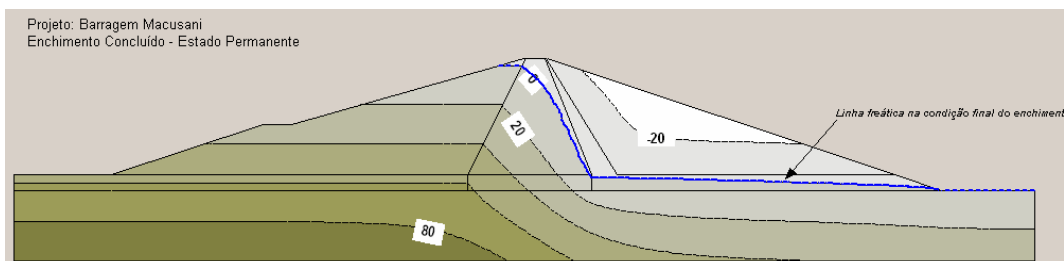


Figura 4.23 – Distribuição das cargas de pressão obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

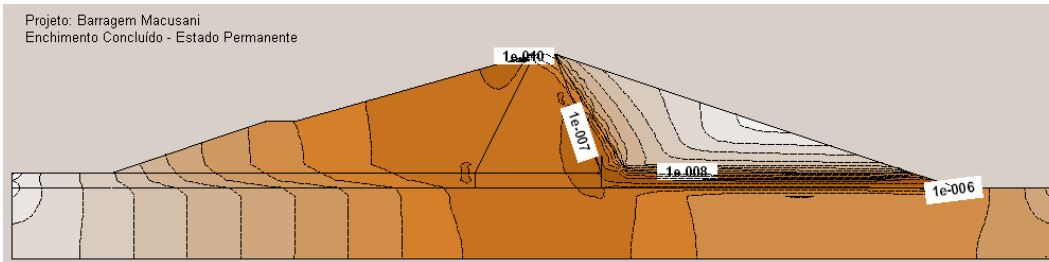


Figura 4.24 – Distribuição das velocidades de fluxo obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

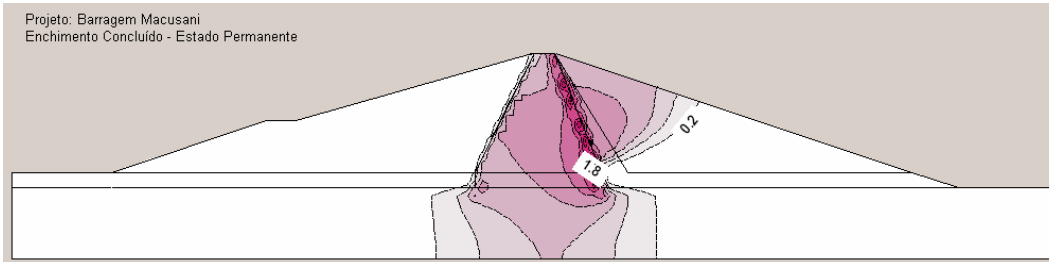


Figura 4.25 – Distribuição dos gradientes hidráulicos obtidos na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

4.4.2. Rebaixamento rápido

o a ba a re o re ando re cond ores de f xo re amene 2 , no a re nre s o se a s t a ã o de re ba xa re n o á do do n re do re se a o o, cons de ando a re s a f n ã o de re ba xa re n o da i abe a 4.3. A f a 4.2 o s t a a o s ã o da t n a f r e á t c a, a a o re ba xa re n o á do, t d a, be co o a t n a f r e á t c a a n t e s do re ba xa re n o, re n a n o re a f a 4.2 s a a d s t b ã o das ca a s d á cas a a o re ba xa re n o á do do re n o f r e á t c o à o n a n t e a a o t o, t d a re a n d o a t n a f r e á t c a a t n o r e s t a d o re amene, na a t t de 423 (é do t a de de s a n t e).

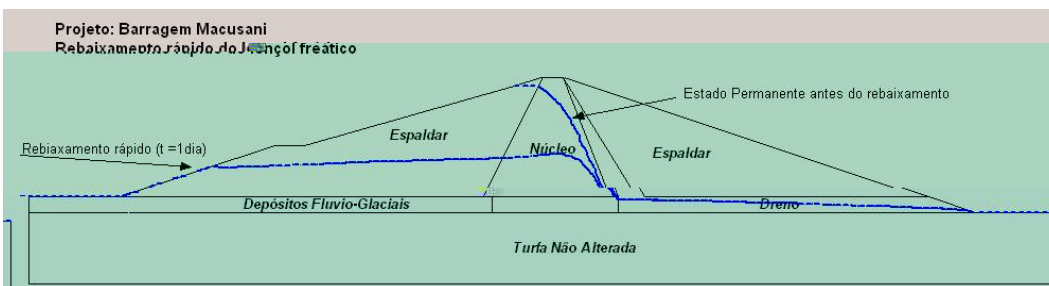


Figura 4.26 – Posição da linha freática antes do rebaixamento do lençol freático e depois de aplicado o rebaixamento (t=1 dia)

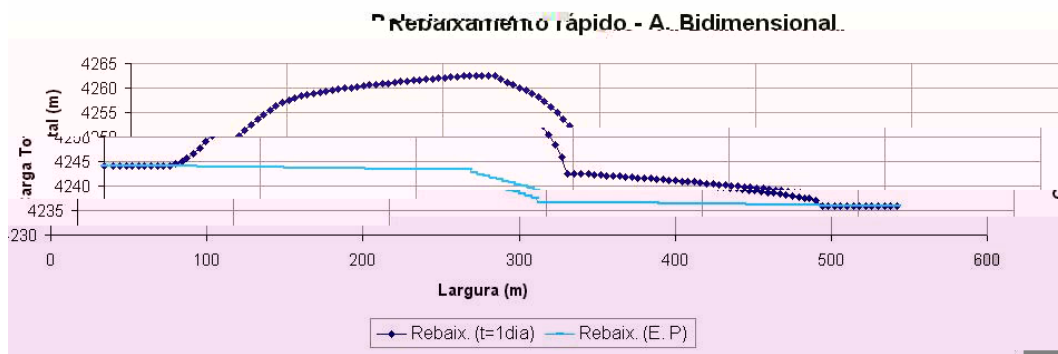


Figura 4.27 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, no caso de rebaixamento rápido do reservatório, para o tempo $t=1$ dia e no estado permanente

4.5. Comparação de resultados

A partir da 4.28 os resultados das análises realizadas nas seções 2, 3 e 4 da barragem Macaúba (Figura 4.3), na condição de fluxo permanente a os o rebaixamento do reservatório, determinadas com as análises de fluxo 3. Para a primeira seção, a análise obtida nesta figura na 4.2 a os resultados da análise da seção 3 obtida na análise 2.

Portanto pode ser observado, na seção 3, a influência da diferença entre as análises determinadas nas análises bidimensionais, com o fluxo de fluxo, na seção 3, a do drenagem zona da barragem. O fluxo 3 o rebaixamento das obras a ser a os resultados da análise realizada na seção de jusante, sendo não pode ser calculada na obra do obra considerando a análise 2.

O objetivo desta análise é a influência do coeficiente de rebaixamento do drenagem na os resultados da análise realizada, sendo a o a o $d_{\text{reno}} = 4 \times 10^{-4}$ /s, sendo as análises de fluxo 3 de drenagem a seção rebaixadas.

A partir da 4.30 os resultados das análises realizadas nas seções 2, 3 e 4, as diferenças observadas na seção 3 e a seção à análise 2 estão correlacionadas na 4.3. O que pode ser observado, a análise realizada na análise 3 com o coeficiente de rebaixamento do drenagem $d_{\text{reno}} = 4 \times 10^{-4}$ /s está contida no nível do drenagem zona na seção de jusante da barragem.

As ações totais calculadas nas diferentes análises são mostradas na tabela 4.4, considerando-se o coeficiente de da base de 245, a cáculo da ação o índice de coeficiente. Como pode ser observado, a ação total o índice de coeficiente está na análise 3 é 5,8% superior à ação calculada na seção não é ca 2 aditando-se o resíduo a o conteúdo de reabundância do drenô zona ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-5} /s$). O ganho desta ação $k_{dreno} = 4 \times 10^{-4} /s$ na análise 3, a diferença percentual é de 4,3%.

Linhas freáticas nas diferentes seções em 3D

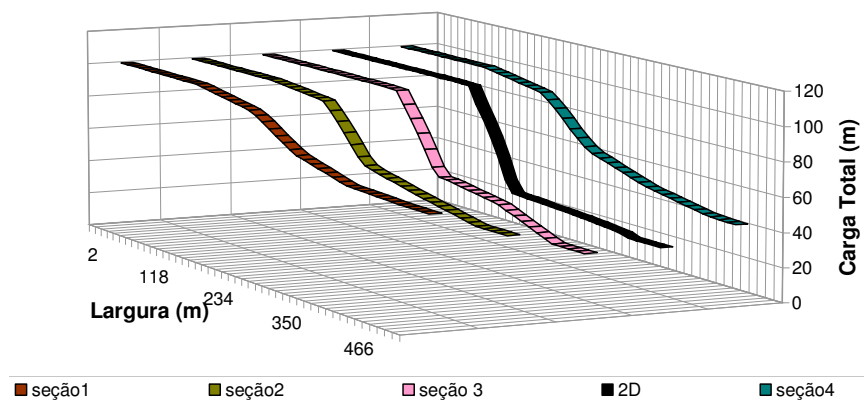


Figura 4.28 – Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3 e 4 (análise 3D) e na seção 3 (análise 2D) considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal $k_{dreno} = 4 \times 10^{-5} m/s$

Seção 3 (2D e 3D)

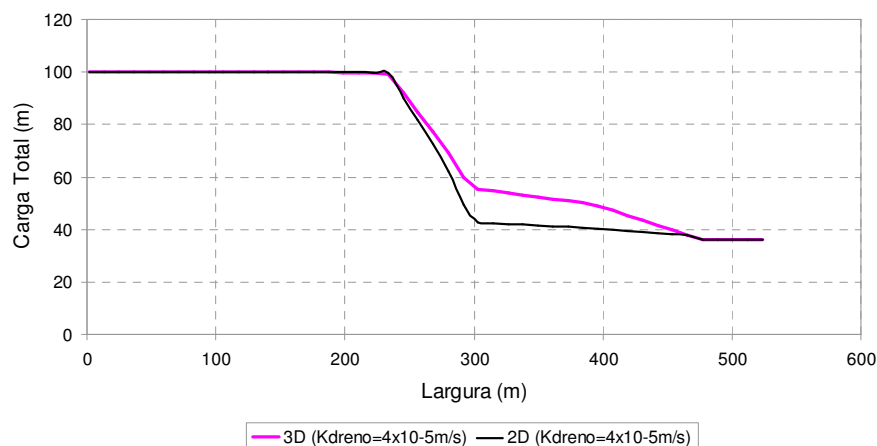


Figura 4.29 – Posição das linhas freáticas na seção 3 determinadas pelas análises 2D e 3D, considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal $k_{dreno} = 4 \times 10^{-5} m/s$

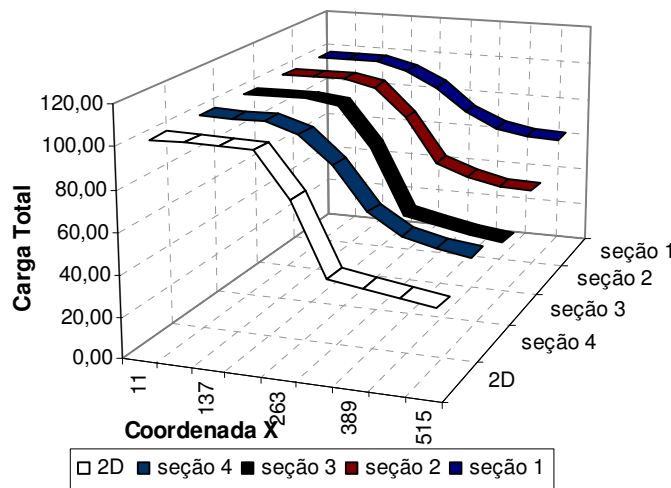


Figura 4.30 – Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3, 4 obtidas nas análises 3D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-4}$ m/s) e na análise 2D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-5}$ m/s)

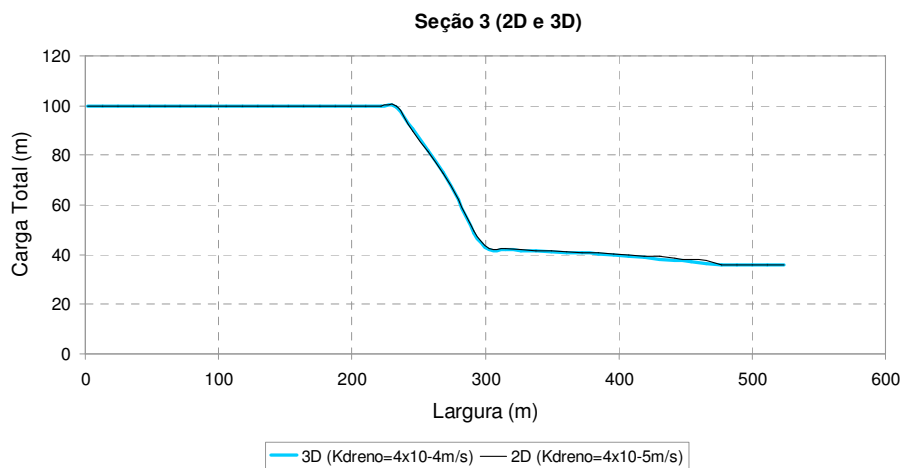


Figura 4.31 – Comparação das posições das linhas freáticas na seção 3, obtidas em análises 2D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-5}$ m/s) e 3D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-4}$ m/s)

Tabela 4.4 – Vazão total e por metro de comprimento de barragem calculadas nas análises 2D e 3D

Tipo de análise	Vazão total Q (m^3/s)	Vazão por metro q ($m^3/s/m$)
3D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-5}$ m/s)	$0,8 \times 10^3$	$0,8 \times 10^3$
2D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-5}$ m/s)	—	0×10^3
3D ($k_{dreno} = 4 \times 10^{-4}$ m/s)	$2,0 \times 10^3$	$8,0 \times 10^3$

5 Rebaixamento do lençol freático

5.1. Introdução

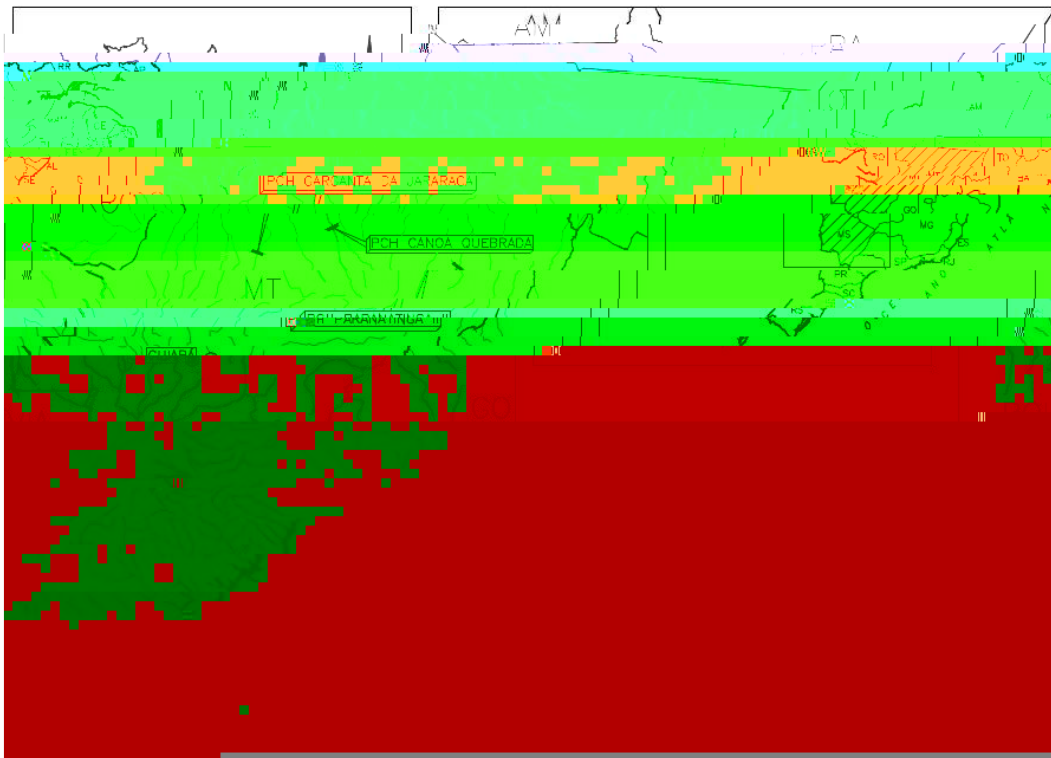
Neste capítulo, as diferenças nos resultados de análises numéricas de fluxo com os dados reais de tensões são analisadas no contexto do rebaixamento do nível das águas subterrâneas. Os objetivos a serem abordados neste capítulo são: a) o rebaixamento a a construção das estruturas da PCH (Pequena Central Hidrelétrica) Canoa Quebrada; b) rebaixamento a a construção das fundações dos sistemas de abastecimento de água em São Paulo.

5.2. Pequena Central Hidrelétrica Canoa Quebrada

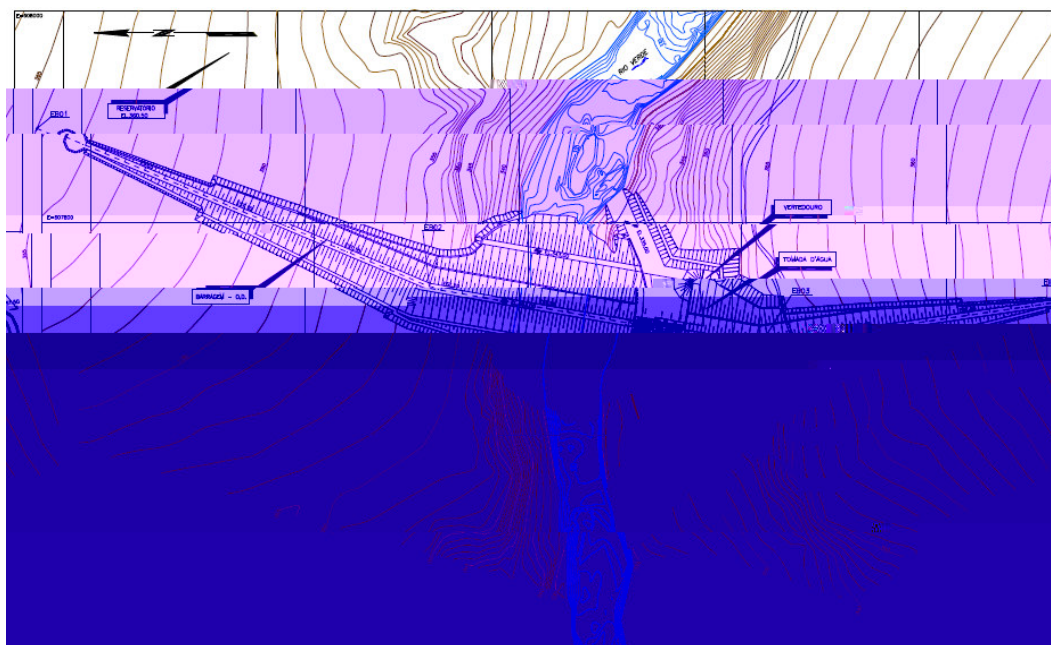
A PCH Canoa Quebrada, com potência de 28 MW, está localizada no Rio Verde, Estado de Mato Grosso na divisa entre os municípios de Lucas do Rio Verde e Soledade (Figura 5.1a). O rebaixamento da superfície construído para a barragem de concreto com o comprimento de 300 m e a altura máxima de 30 m no rio do rio. A barragem construída, localizada na margem esquerda do rio com extensão máxima de 300 m, tem a casa de força (Figura 5.1b).

A escavação para a instalação das estruturas de concreto (canal de adução, o adução da casa de força, o rio, canal de fuga) representa a área a ser escavada de $25,25 \times 10^4 \text{ m}^2$ (Figura 5.2) com o comprimento de 300 m de comprimento a ser escavado a uma taxa de 0,1 m/dia.

A fundação das estruturas de concreto é executada na profundidade de 3,25 m, com a escavação de 0,1 m de profundidade abaixo da superfície do terreno



(a)



(b)

Figura 5.1 – (a) Localização da PCH Canoa Quebrada (Gomes, 2006), (b) Arranjo geral da hidrelétrica (Corrêa, 2006)



Figura 5.2 – Área do rebaixamento para implantação das estruturas da PCH Canoa Quebrada

ref do s bso na área da casa de s o a e e do o e ca ace zado o a res a f ca ão s b o zon a, i ca de de o s os sed en a es. A a t da s e f ce do e no, obs e a se a ca ada de a e a f na s i osa, f o a a o co ac a, co a 5, de res ess a e o co e a ox ada en e a e a e a ão 335. a e d an e, a e a e a ão 330, o s b s a o e cons t t do o a e a s i o a osa o co a e d ana en e co ac a. Aba xo da e e a ão 330, a ca ada de a e a s i osa e o co ac a, não sendo e f cado a oco e n e a de o c a a e o e das sonda ens (o e a, 2000).

5.2.1. Rebaixamento do lençol freático

A s e f ce do en o f e á co oco e e t o no da e e a ão 340. Ma f a 53 a e sen a se o e f do s bso o co a nd ca ão da e sca a ão e das e s t e as de conc e to da P h i ano a e b ada.

reba xa en o do en o f e á co f o de 8, da e e a ão na a 340 a a a e e a ão 322, e s e t os aba xo da base das f nda o es de conc e to. s s e a de reba xa en o f o cons t t do o 4 o os o f ndos co d â e t os de 40c, co en o n o de f o a de 2, res a ados a cada 0, a ox ada en e. Ad c ona en e, f o a i a b e e e adas 33 on e as

antes de o no da reão cen a da resca a ão rebo bas co ca ac dade de
 ação de até $5,4 \times 10^{-3}$. A f a $5,4 \times 10^{-3}$ os a a conf a ão f na do s s, a de
 reba xa reno, na rene co a ns rena ão zada a a on o a o
 reba xa reno do reno d'á a f o ada o 0 red do res de n re d'á a re 4
 reo re os de rebo abe o (o re, 200).

5.2.2.

Análise considerando método analítico

Para a res a a das re reab dades fo a rexec ados rensa os de ca o,
 co res ados re re rena s concen ados na f a xa de 5×10^{-3} /s a $0,7$ /s. Para
 fins de cá c o ana co da ação de reba xa reno, o s pso o fo cons de ado
 co o re o oso so o co, o o reno, co cons rene de re reab dade =
 3×10^{-3} /s. A ação, ca c ada re a a ox a ão dos o os re a a con n a
 o a rene rene ante re a re o a a c on a a a res da re a ão $3,7$ re s o a
 na ação $t_{ana}^{o a} = 48 \times 10^{-3}$, cons de ando a re x ensão da a re $3,0$.

A ação o a red da re ca o (ca c ada re a ação reno o o re de
 á a bo beada re de re nado n re a o de re o) fo de re nada re
 $t_{ca}^{o a} = 243 \times 10^{-3}$ ($t_{ca}^{o a} = 0,005 \times 10^{-3}$ /s) nd cando re o re a o de 80,25% do
 a o re s o ana ca rene re re a ão ao red do re ca o.

o re a (200) rexec o a re roaná se co base na re a ão ($3,7$) re a o
 da ação re ca o a a de re na no o cons rene de re reab dade do
 re o oso o o reno, re s abe re do re = 8×10^{-3} /s re ce ca de 2,2 rezes
 s re o ao n ca rene re do do ($= 3,0 \times 10^{-3}$ /s).

obre a des re o de aná se é a re s os ão re ace a ão de re o
 ode o ana co baseado re f xo 2 a a a as o a rene rene ante re re o
 o o reno ossa re re sen a a re a dade de f xo re ca o, o re
 re de re rene, não é o caso, cons t ndo se re re a re a a ox a ão.

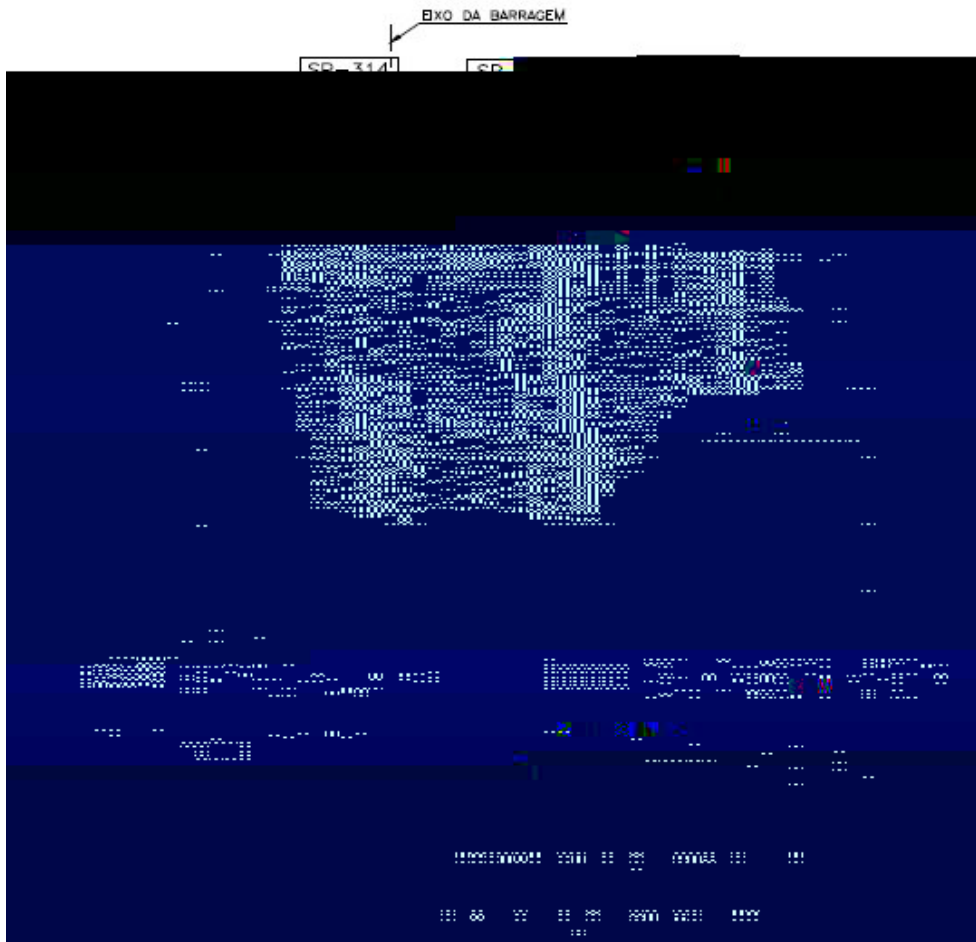


Figura 5.3 - Perfil geológico-geotécnico ao longo do eixo da casa de força da PCH Canoa Quebrada (Corrêa, 2006)

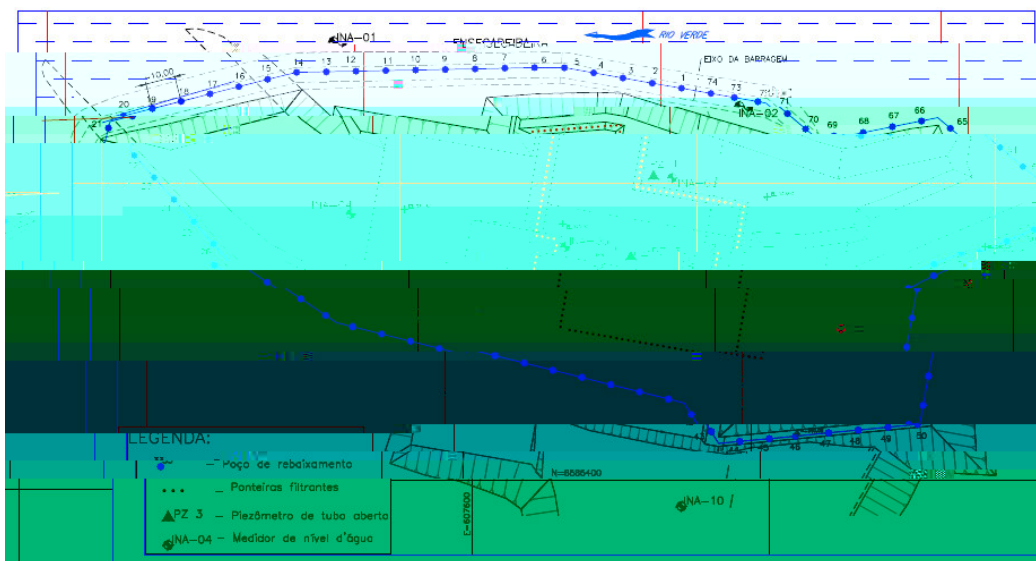


Figura 5.4 - Configuração final do sistema de rebaixamento na área das estruturas da PCH Canoa Quebrada (Corrêa, 2006)

5.2.3.

Análise numérica de fluxo permanente tridimensional

Na Figura 5.5, a malha de elementos finitos para a análise de fluxo permanente tridimensional da obra de rebaixamento, considerando a seção de 5,6 metros de largura, é apresentada. A malha foi gerada com base nos dados do projeto, com uma malha de 3 e 4 elementos finitos de 20 metros (quadriculados) conectados aos pontos nodais.

As dimensões da malha são de 445,0 (dimensão x), 4,5 (dimensão y) e 240 (dimensão z). Os dados dos coeficientes de permeabilidade são indicados nas Figuras 5.6 e 5.7.

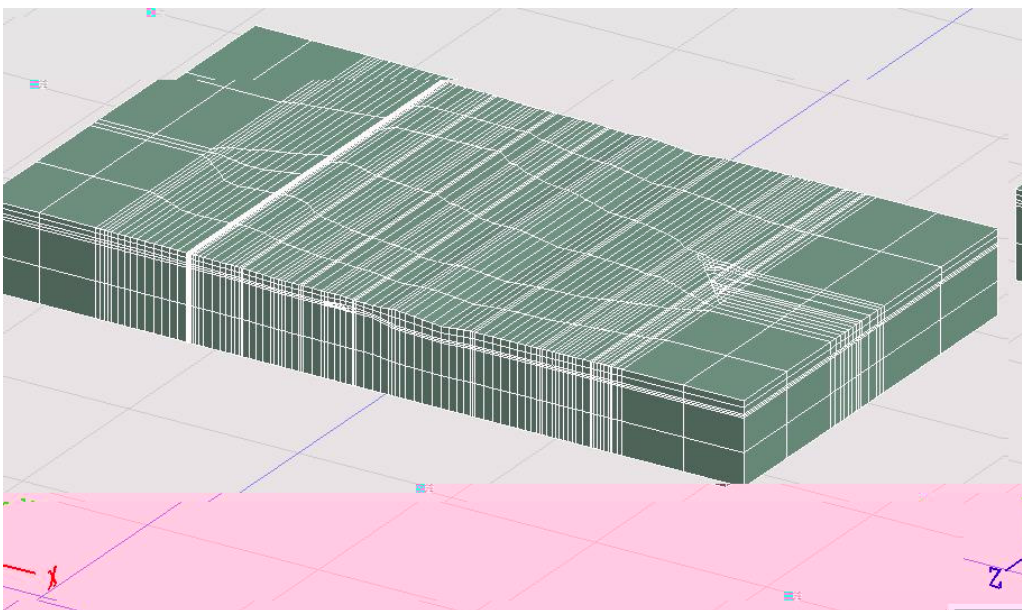


Figura 5.5 - Malha de elementos finitos para a PCH Canoa Quebrada

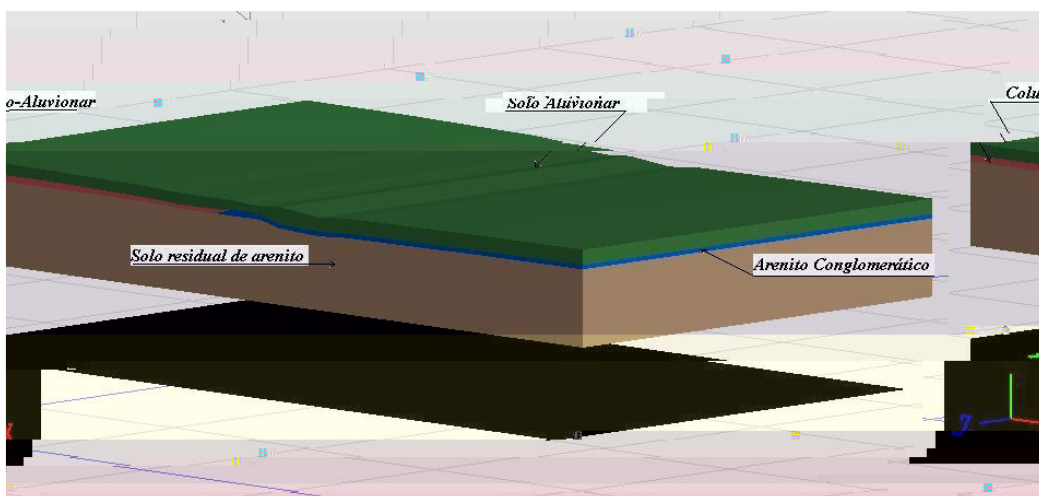


Figura 5.6 - Modelo com os diferentes tipos de solos na região da PCH Canoa Quebrada

Tabela 5.1 - Coeficientes de permeabilidade saturados para as análises de fluxo pelo método dos elementos finitos (3D e 2D)

Tipo de solo	Coefficiente de permeabilidade (/s)
Solo argila (argila fina a grossa)	3×10^{-11}
Solo argilo arenoso (cascalhos arredondados de tamanho solo arenoso a cocoacão)	3×10^{-7}
Arenão com cascalhos (cascalhos de tamanho entre cascalhos de solo)	3×10^{-4}
Solos de areia (areia grossa)	5×10^{-3}

As tabelas dos coeficientes de permeabilidade na condição saturada são a resultados da relação base no tipo de areia do solo de acordo com a tabela na seção do rebaixo. As cores indicam os tipos de condutividade da tabela, necessárias para a solução do problema de fluxo com a função de transferência (capítulo 2, seção 2.2.) e as apresentadas na seção 5.1 base na recomendação de (Lima, 1998), (Barral, 1988) e (Lima, 2003).

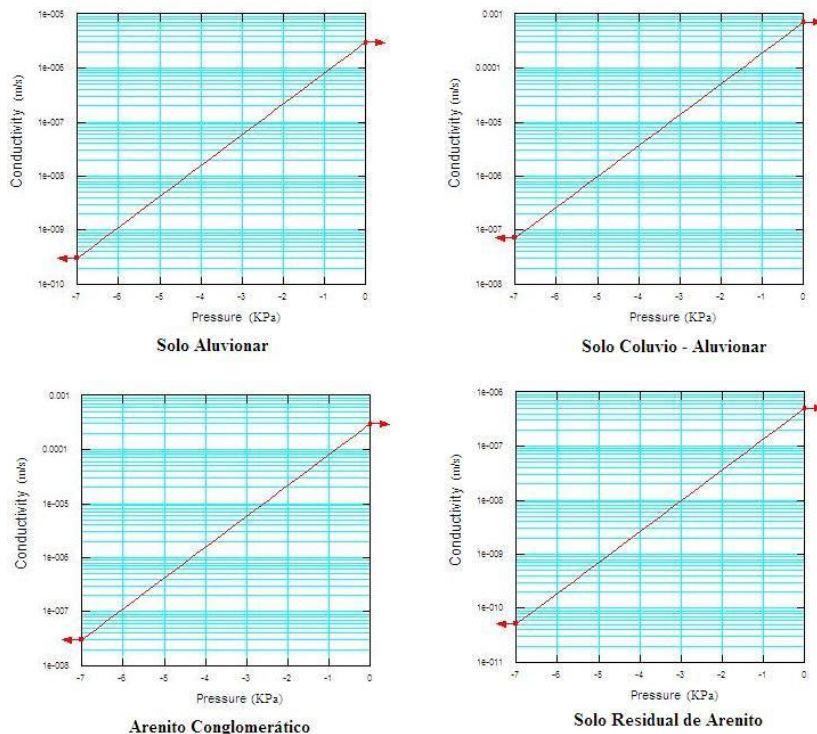


Figura 5.7 - Funções de condutividade utilizadas para os diferentes tipos de solo da PCH Canoa Quebrada

A Figura 5.8 apresenta a posição natural da superfície freática antes do rebaixamento, localizada na elevação 340.

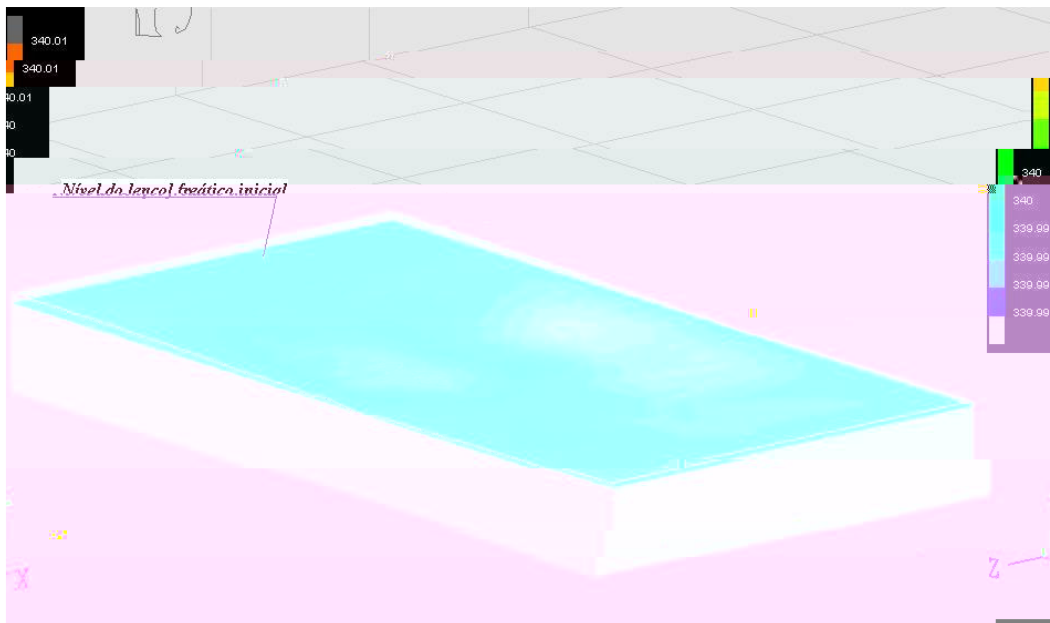


Figura 5.8 – Posição natural da superfície freática na elevação 340m

Para a cáculo da vazão total, as condições de contorno nas superfícies ativas da área são as cotas $\pm 0,00$ na área plana do rebaixamento determinada pelo alinhamento dos 4 pontos escavados a uma distância de $\Delta x = 8$ m, a partir do desnível do rebaixamento.

A vazão total a cada seção de $\Delta x = 20$ m (ou $0,05$ m/s) com o rebaixamento de $0,03$ m é a vazão de cada seção, considerando as vazões nodais no obra, calculadas pelo método dos pontos dos coeficientes de permeabilidade dos diferentes tipos de solos e respectivas ações.

As Figuras 5.9 a 5.11 mostram as distribuições das vazões no plano da Seção 3 das caixas d'água, de acordo com as condições de fluxo e a vazão total do rebaixamento de 8 m do lençol freático.

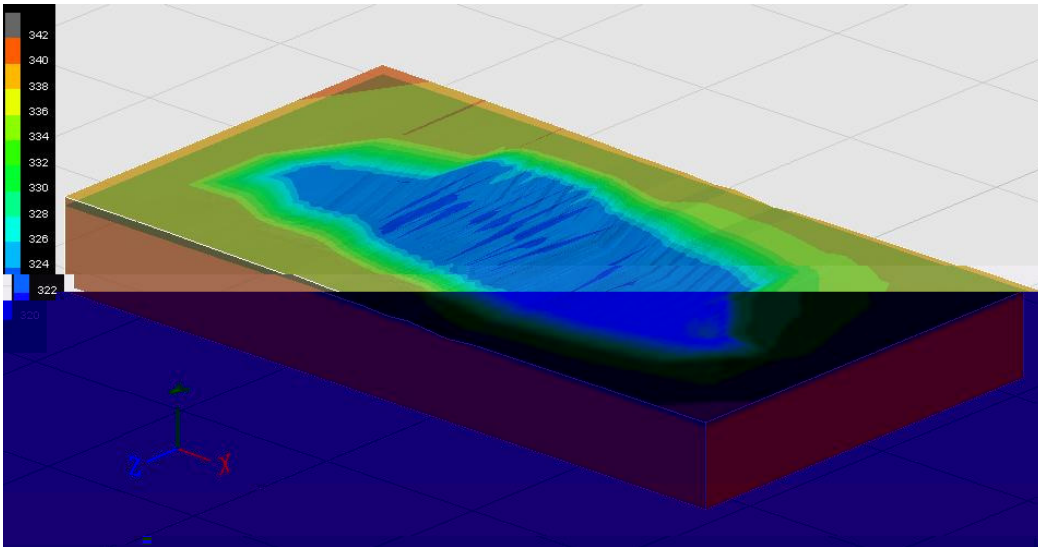


Figura 5.9 – Distribuição espacial das cargas hidráulicas após o rebaixamento

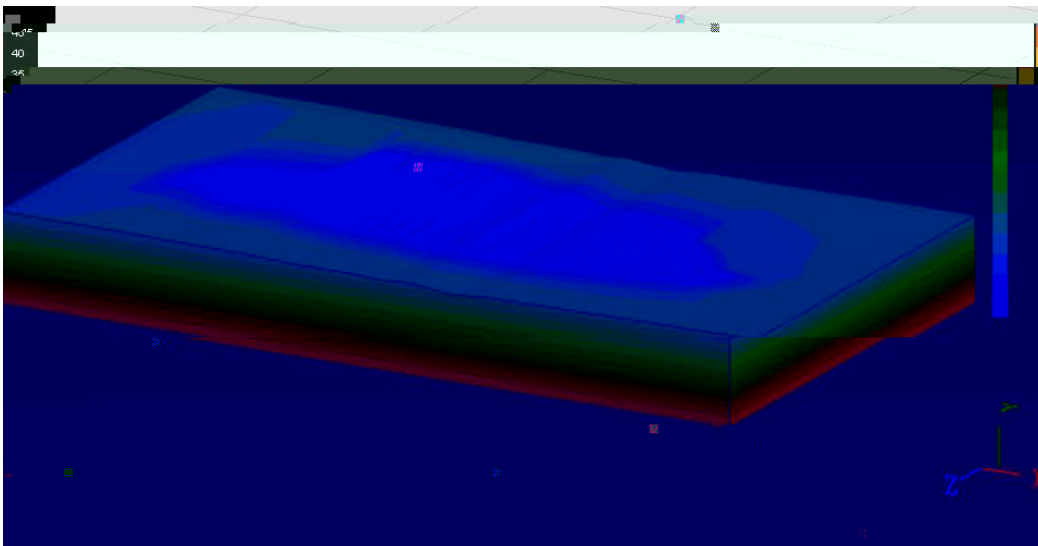


Figura 5.10 - Distribuição espacial das cargas de pressão após o rebaixamento

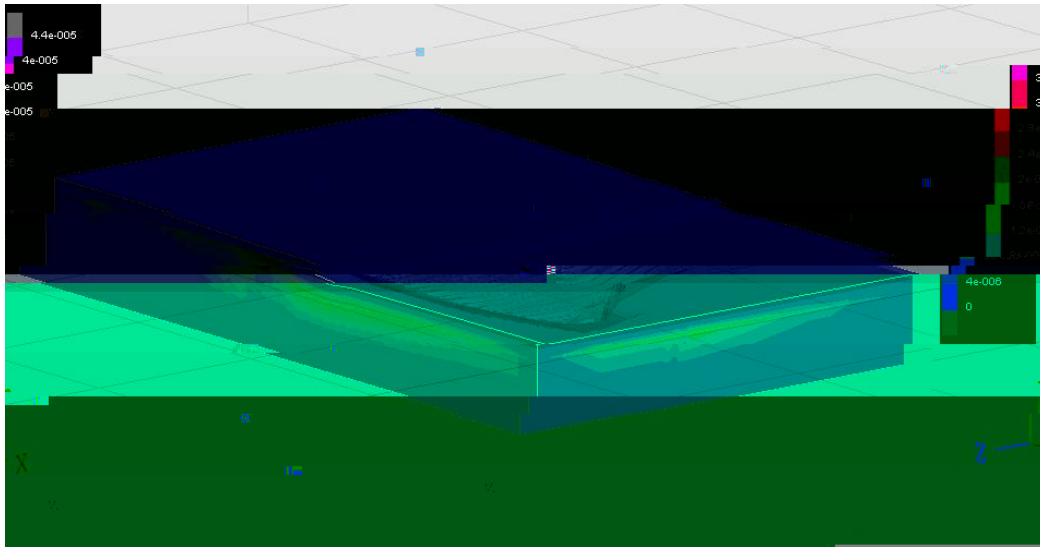


Figura 5.11 - Distribuição espacial das velocidades de fluxo após o rebaixamento

Logo após a não execução do rebaixamento foi feita, desta vez considerando cada um dos 40 os do bombeamento os de 2,3 m³/s (ou 5 x 10⁴ l/s) realizando a vazão combinada de 20,4 m³/s (ou 0,05 m³/s) em todo o sistema rebaixado.

Assim, a 5,2 a resposta a no a os ão do rebaixamento obtido a partir da simulação do bombeamento, em um período de 5,4 nd ca a corespondente ocaza ão da máfrea ca ao on o da se ão, ans re sa 2 (a 5,3).

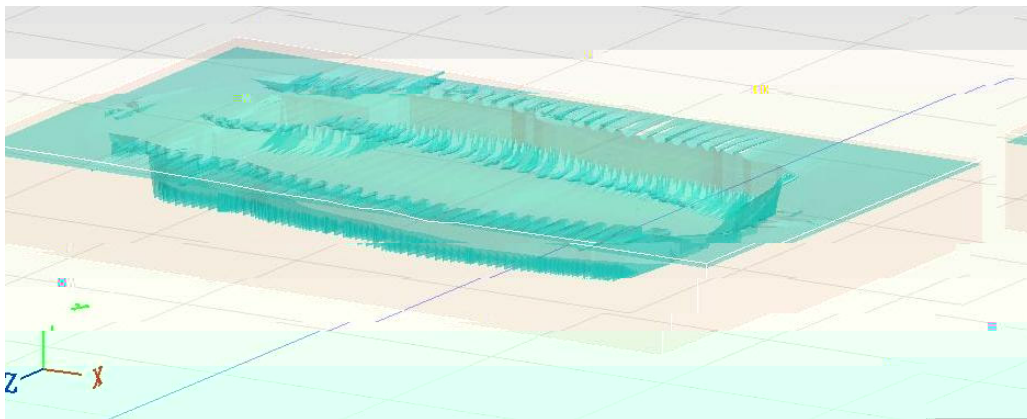


Figura 5.12 – Nova posição da superfície freática com imposição de bombeamento nos 74 poços do sistema

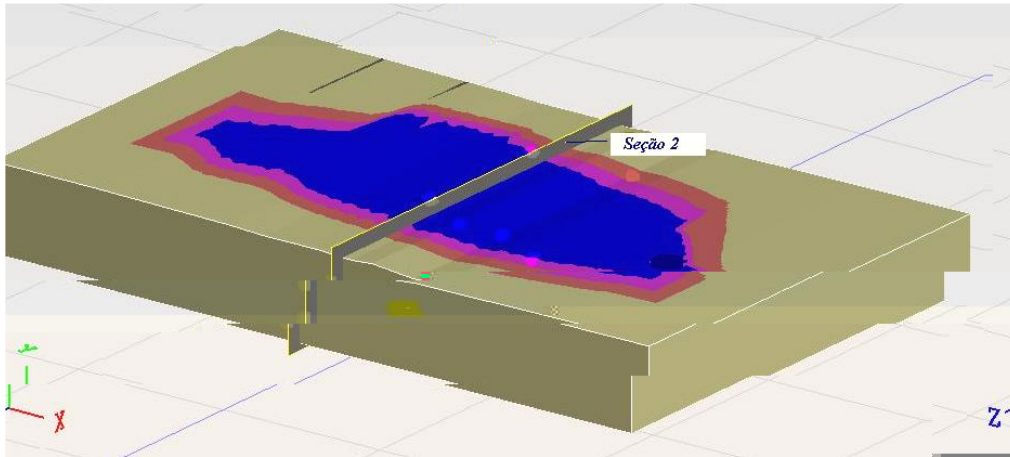


Figura 5.13 - Localização da seção 2 no domínio tridimensional

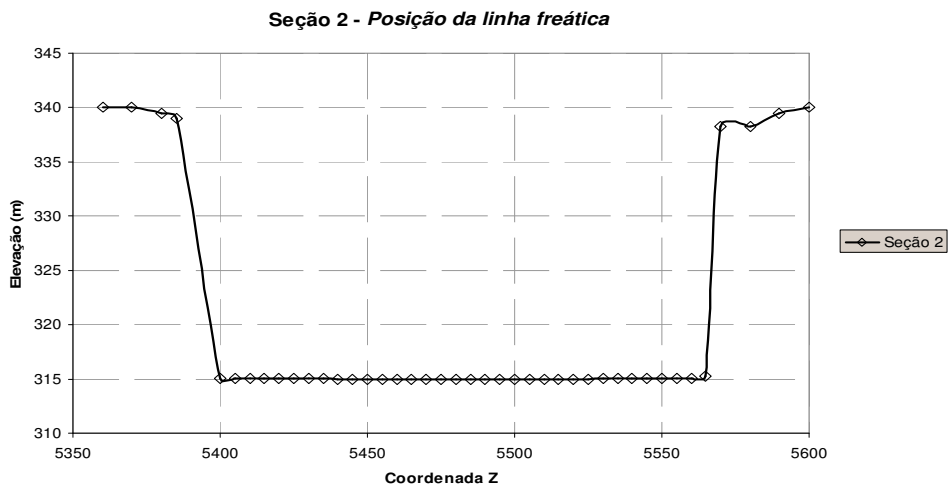


Figura 5.14 - Localização da linha freática na seção 2

bo a a azão o a re a bas as aná ses em a s do a res a, obs o se
 no caso de bo bea teno resc o nos o os d s b dos no re re o da
 o ona o rba xa teno do ten o frá co fo s re o ao ca c ado na s i a ão
 re a ca a o a fo s res ten re resc a na re a ão 322 . As a d fre ten a
 de res os as n é cas re a s s re no ano da se ão 2, a res en ado na f a
 5, 4, onde o n re d á a rba xo a a a re a ão 3 5, (25, de rba xa ten o).

5.2.4. Análise numérica de fluxo permanente bidimensional

Para o caso da barragem, a análise de fluxo permanente bidimensional, a ser realizada, considerando-se o fluxo permanente sob condições de fluxo permanente. A base das análises é a execução das condições de contorno das áreas nodais nos pontos da rede da área de trabalho.

5.2.4.1. Análise 2D axissimétrica

Na simulação da distribuição de tensão e deformação, a análise é realizada considerando-se o fluxo permanente da escavação, nos casos de 3, 3.5, 3, e o dimensionamento do sistema de trabalho onde se aoxado considerando-se o coeficiente de segurança para a área de cada ponto, sob condições de fluxo 2D axissimétrico. A análise da zona de trabalho do período dos trabalhos finais é a resultante da omissão do trabalho, execução da obra analítica, e descrita.

O coeficiente de trabalho com $\sigma = 0$, considerando-se a segurança para a área de cada ponto nos pontos. A quantidade do trabalho fixado a 20 a partir da superfície do terreno, atraindo a área 322 com o sentido à esquerda do traçado rebaixado.

A área de trabalho final da obra 5, 5, com o comprimento de 4 metros adiante de 4 metros e 4 metros, e a área de 3 metros, com o comprimento dos nodos.

Projeto: Canoa Quebrada
Tipo de Análise: Fluxo Permanente - Axissimétrica

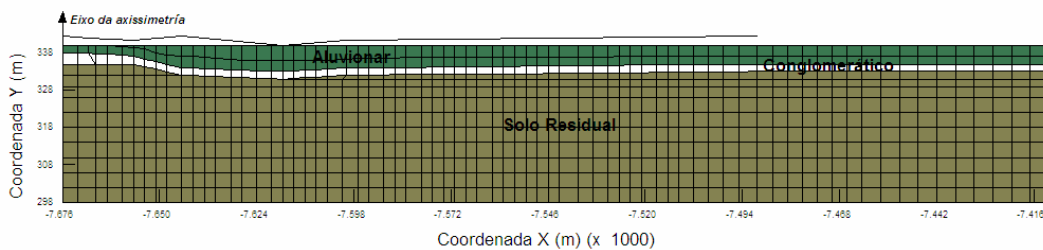


Figura 5.15 - Malha de elementos finitos e solos considerados na análise axissimétrica

As condições de contorno consideradas foram a presença de impermeabilidade no eixo de simetria, a carga hidráulica constante de 340 no contorno lateral direita (concordada com a cotação natural da superfície freática) e a carga hidráulica de 322 (rebaixamento de 8) nos pontos situados na elevação 322 dentro da distância \leq a partir do eixo de simetria.

Assim, as 5,0 a 5,0 os resultados obtidos foram os de caudal e a carga, a carga de pressão, as condições de adensamento e a cotação, respectivamente. A vazão total calculada foi de 0,53/s (35,0 m^3/h), a base de descarga do redutor foi de (0,053/s ou 243 m^3/h) com o reatado de 344,44%.

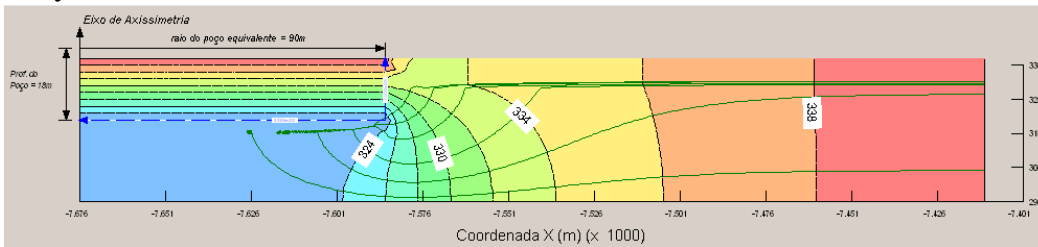


Figura 5.16 - Distribuição das cargas hidráulicas (equipotenciais) e linhas de fluxo na análise axissimétrica

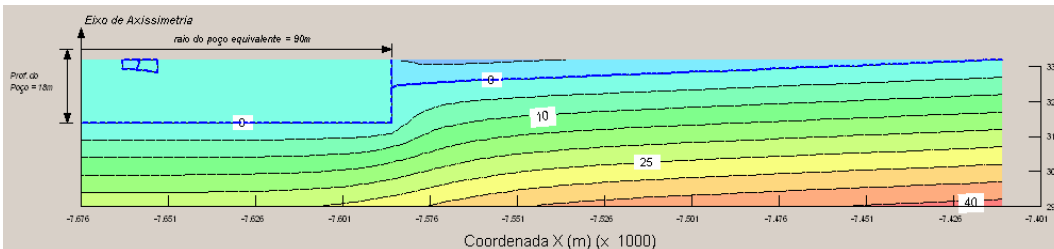


Figura 5.17 – Distribuição das cargas de pressão e nova posição da linha freática na análise axissimétrica

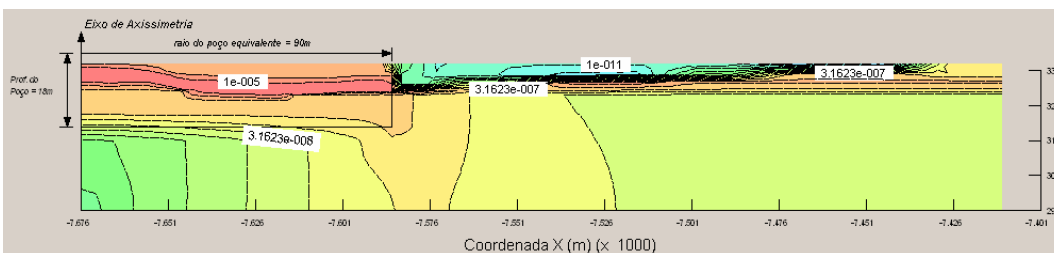


Figura 5.18 – Distribuição das velocidades de fluxo na análise axissimétrica

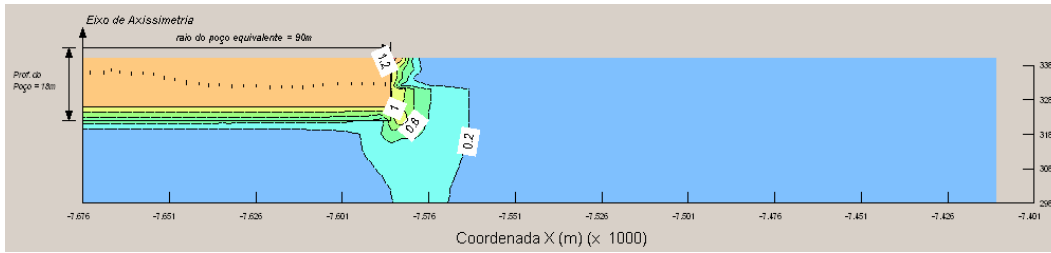


Figura 5.19 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise axissimétrica

5.2.4.2. Análise 2D plana

A observação da topografia da área a ser analisada revela que o terreno é praticamente plano, com uma elevação média de 300 m. A análise é realizada considerando um domínio de 240 m de comprimento e 180 m de largura, com o eixo de simetria no centro.

As condições de contorno são definidas da seguinte forma: no eixo de simetria, adota-se uma condição de fluxo nulo; nas bordas laterais, adota-se uma condição de fluxo nulo; na borda superior, adota-se uma condição de carga hidráulica constante de 340 m; na borda inferior, adota-se uma condição de carga hidráulica constante de 300 m.

Para a análise bidimensional, são considerados dois casos de fluxo: o caso I, que considera o fluxo de água para o lado direito do domínio, e o caso II, que considera o fluxo de água para o lado esquerdo do domínio. Os resultados são apresentados em termos de gradientes hidráulicos e linhas equipotenciais.

a) Caso I

A área de estudo é dividida em uma malha de elementos finitos para a análise do fluxo de água. O domínio é discretizado com 224 elementos no sentido horizontal e 180 elementos no sentido vertical. A malha é mais refinada na região próxima ao poço. O perfil de solo I é considerado para a análise.

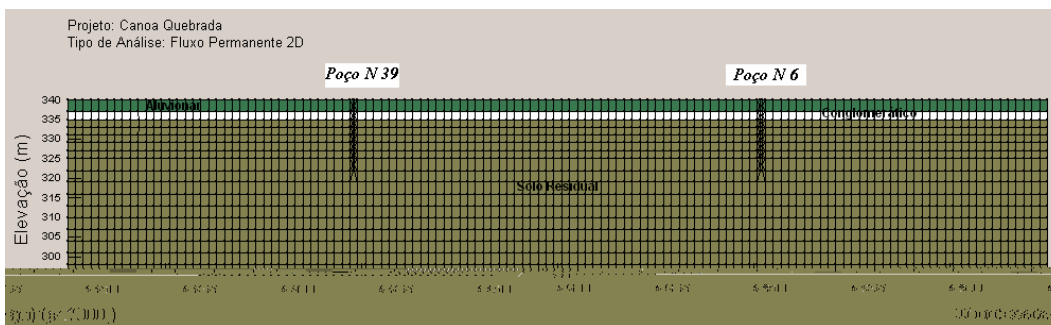


Figura 5.20 - Malha de elementos finitos na análise de fluxo plana com perfil de solo I

As figuras 5.22 a 5.25, apresentam os resultados numéricos obtidos com a análise de fluxo anual, expressos em termos da distribuição de caudal, da capacidade de recarga, e das condições de fluxo e adensação da água. A ação da água na análise anual 2, considerando o coeficiente de expansão de 445, foi determinado com o $i_{ano}^0 = 8,8 \text{ } ^3/s$ e o $i_{ano}^0 = 0,033 \text{ } ^3/s$.

b) Perfil de solo II

A área de recarga foi analisada sobre a depressão com o coeficiente de infiltração de 2223 em termos dos dias 225, adaptadas de 4 meses para 3 meses, com o 238 pontos nodais (Fig. 5.2).

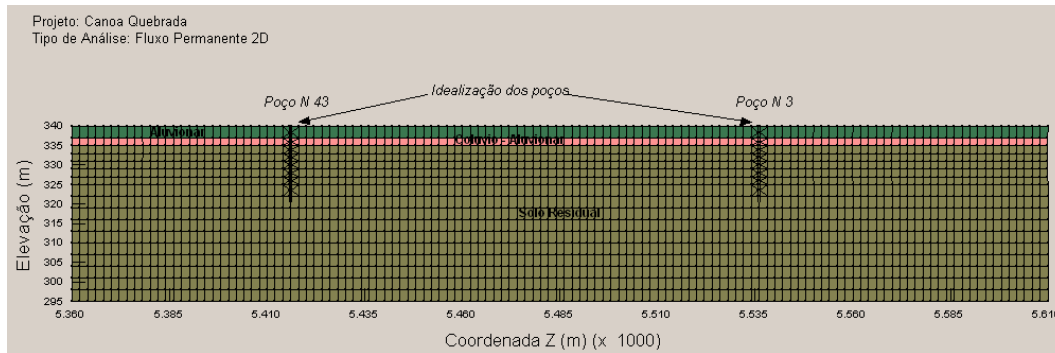


Figura 5.21 - Malha de elementos finitos na análise de fluxo plana com perfil de solo II

As figuras 5.26 a 5.28, apresentam os resultados numéricos obtidos com a análise de fluxo anual, expressos em termos da distribuição de caudal, da capacidade de recarga, e das condições de fluxo e adensação da água. A ação da água na análise anual 2, considerando o coeficiente de expansão de 445, foi determinado com o $i_{ano}^0 = 25,2 \text{ } ^3/s$ e o $i_{ano}^0 = 0,082 \text{ } ^3/s$.

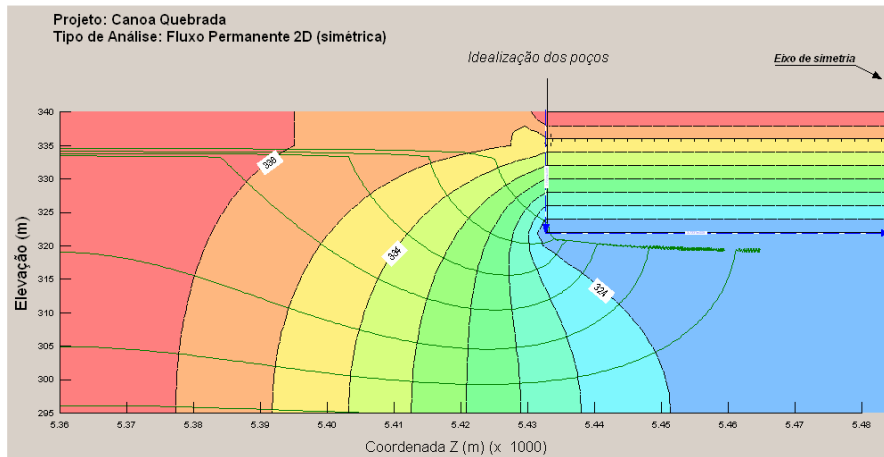


Figura 5.22 – Distribuição das cargas hidráulicas e linhas de fluxo com perfil I

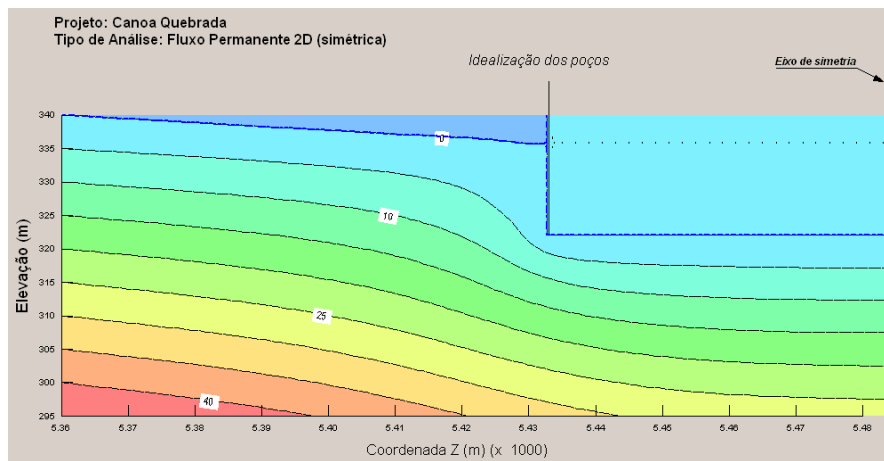


Figura 5.23 – Distribuição das cargas de pressão e posição da linha freática

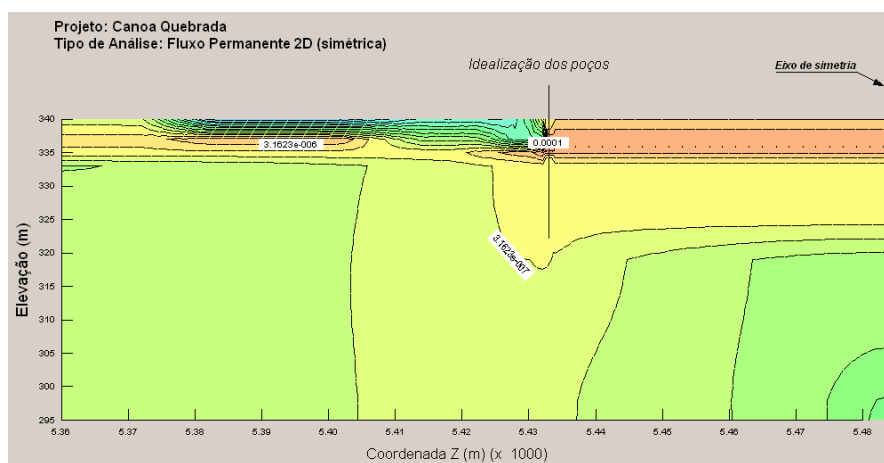


Figura 5.24 – Distribuição das velocidades de fluxo na análise plana com perfil I

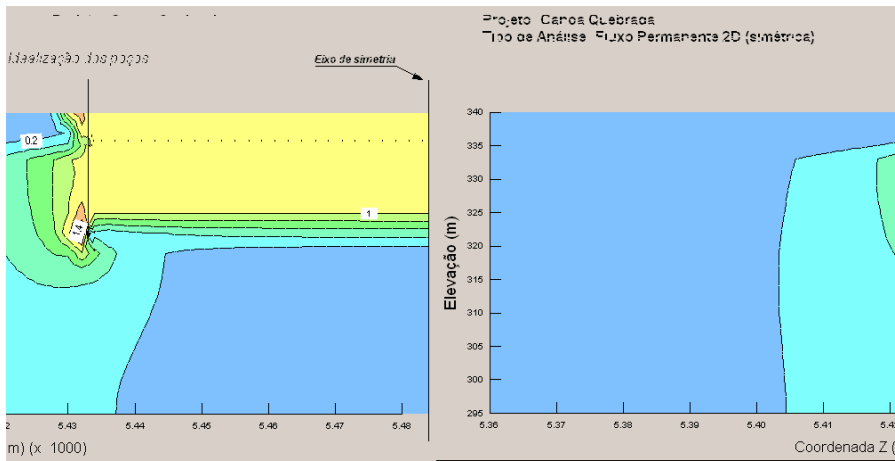


Figura 5.25 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise plana com perfil I

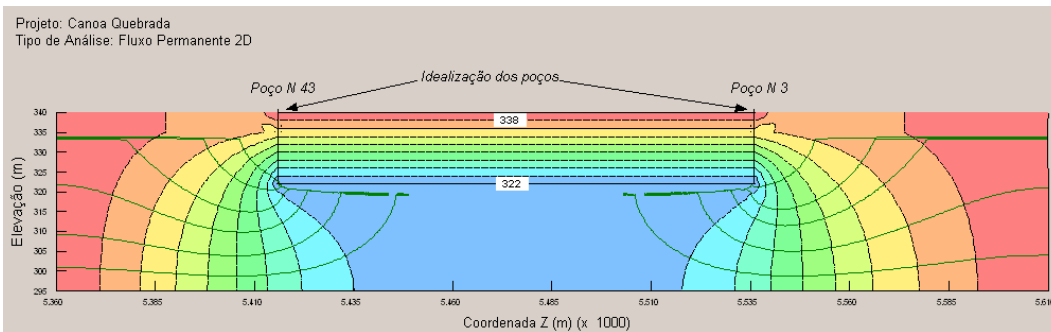


Figura 5.26 – Distribuição das cargas hidráulicas e linhas de fluxo com perfil II

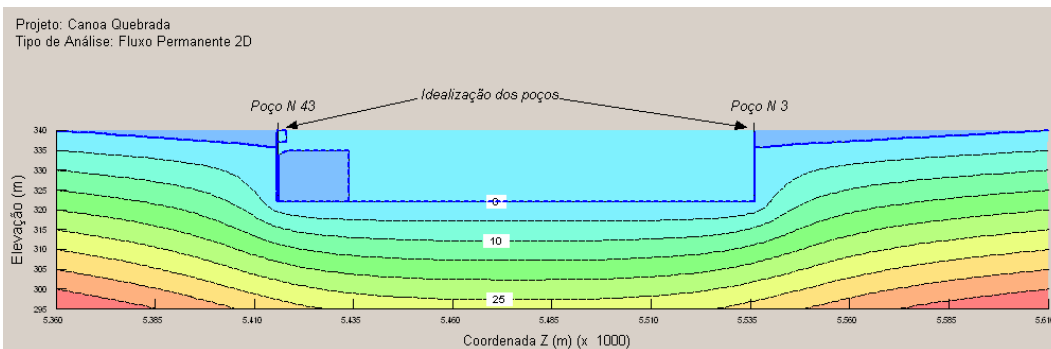


Figura 5.27 - Distribuição das cargas de pressão e posição da linha freática com perfil II

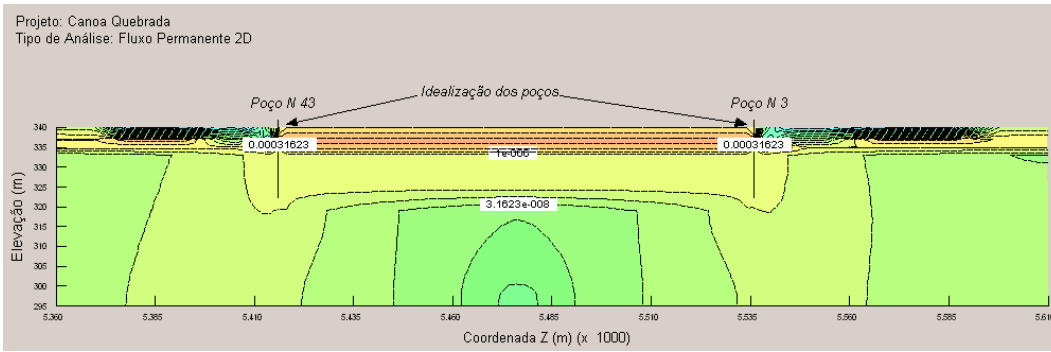


Figura 5.28 - Distribuição das velocidades de fluxo na análise plana com perfil II

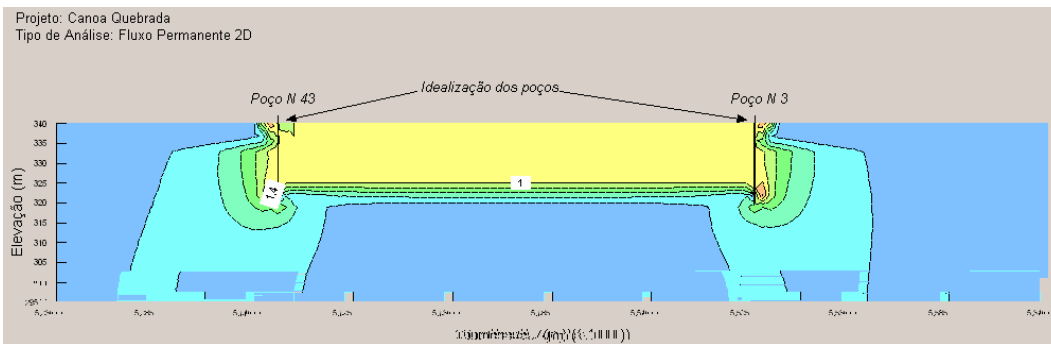


Figura 5.29 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na análise plana com perfil II

Para a interpretação dos resultados obtidos na seção 2 da figura 5.3, as posições das linhas freáticas obtidas nas análises 2D e 3D, de fluxo unidimensional, considerando os perfis de solo II, são a mesma na figura 5.30.

Os resultados são apresentados na tabela 5.2, sendo os dados dos resultados de ação, bem como os resultados obtidos.

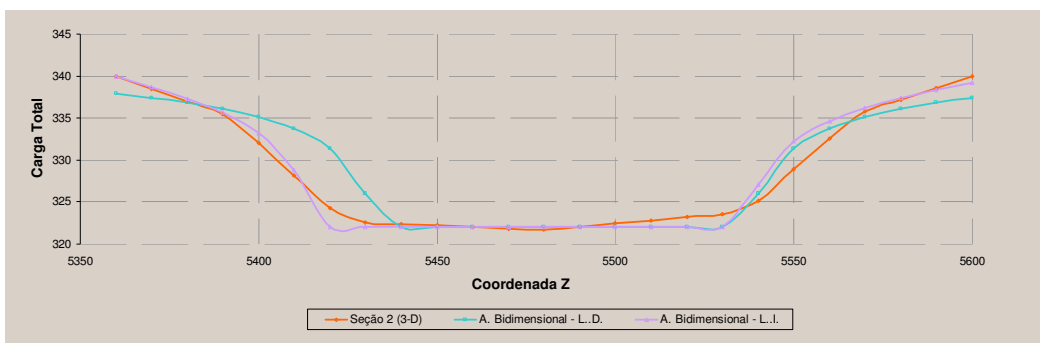


Figura 5.30 - Comparação das posições das linhas freáticas na seção 2 - figura 5.13 - obtidas em análises 2D (perfis de solo I e II) e 3D

Tabela 5.2 - Valores das vazões e erros relativos nas análises de rebaixamento considerando modelos bi e tridimensionais

Tipo de Análise			Vazão (l/s)	Erro relativo (%)
Medição			0,057	
Modelo 3D			0,057	0,3
Modelo 2D	Plano	Perfil I	0,033	42,74
		Perfil II	0,082	+2,48
Aproximação			0,057	344,44

5.3. Shopping Brooklin – São Paulo

5.3.1. Descrição geral da obra

O Shopping Brooklin está localizado na região da cidade de São Paulo, ocupando a área construída de 46m x 16m (área total de 736m²). A profundidade da obra é de 0,5m, abaixo do nível da rua. A obra é executada em um terreno com a presença do rio São Paulo construído na profundidade de 3m, através de uma caixa de concreto (SP-1).



Figura 5.31 – Área de rebaixamento (46m x 16m) para construção do shopping Brooklin - São Paulo

reforço do solo na área da construção do shopping é realizado com a aplicação de 3 camadas de concreto de 10 cm de espessura, a primeira camada de 5 cm de areia e o restante de 5 cm de concreto, com uma espessura total de 15 cm (ver dados das sondagens).

A espessura da rebaxa não é superior a 0,5 m de espessura, a partir da superfície do terreno. Nos pontos de rebaxa, foram colocados 2 metros de drenagem de concreto, com 0,5 m de drenagem (ver dados de drenagem), espaçadas a cada 2 metros no sentido longitudinal das drenagens (ver dados). A vazão média calculada é $Q_{méd} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 5.32-Sistema de rebaxamento com ponteiros no shopping Brooklin – São Paulo

5.3.2. Análise numérica de fluxo permanente 3D

A Figura 5.33 mostra a área de drenagem dos pontos com uma área de 500 metros quadrados, com uma vazão de 4000 metros cúbicos por hora de 20 metros (adâcos) com 5,55 metros nodas. O cálculo da vazão da rebaxa é realizado com o auxílio do tempo (areia e concreto) existente nas espessuras de 3 (os dados da drenagem) no ponto, até a vazão existente até a espessura de 3 não é considerada na área de drenagem.

A configuração do modelo 3D possui as seguintes dimensões: 400 na direção x, 400 na direção y e 300 na direção z. A abertura da área a ser analisada está na parte central do domínio, com medidas de 40 (direção x) e 40 (direção z).

Para a análise de tensão considera-se o seguinte valor do coeficiente de permeabilidade saturado de 3×10^{-5} /s, obtido na literatura a partir do caso (ver a 3.2). A função de condutividade elétrica é dada pela equação 5.34, onde a saturação da condutividade elétrica do solo saturado seco, conforme mencionado no capítulo 2 (ver 2.2.).

A equação 5.35 apresenta a distribuição das cargas de pressão condicionada aos dados de referência na direção da profundidade de 3, com os pontos ao longo da área de interesse.

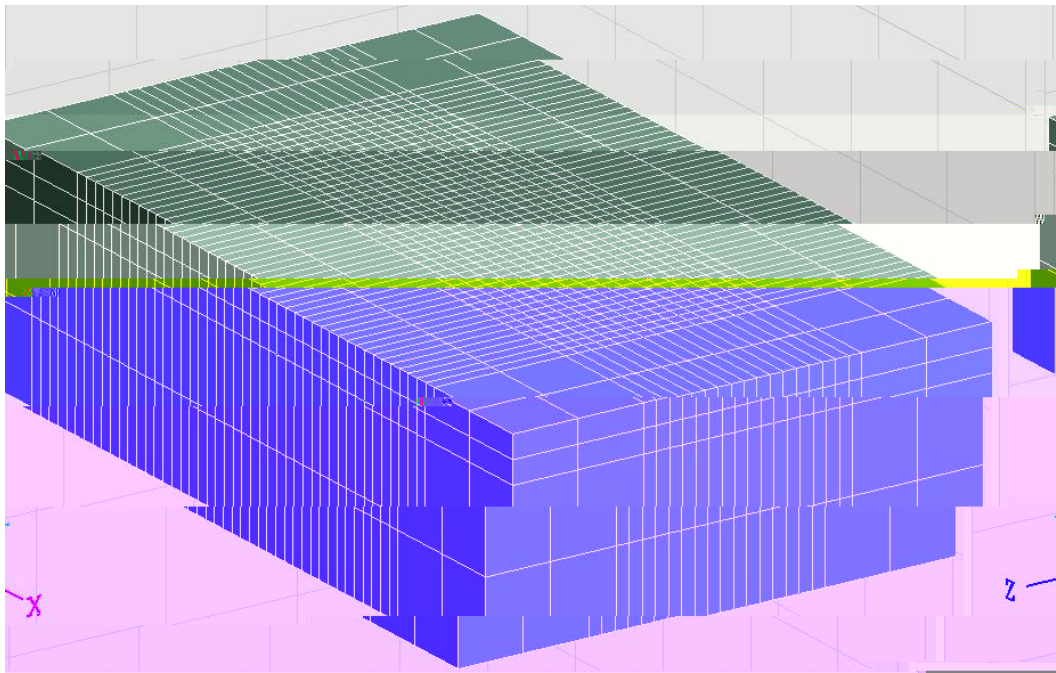


Figura 5.33 – Malha de elementos finitos constituída por um único material - Seep3D

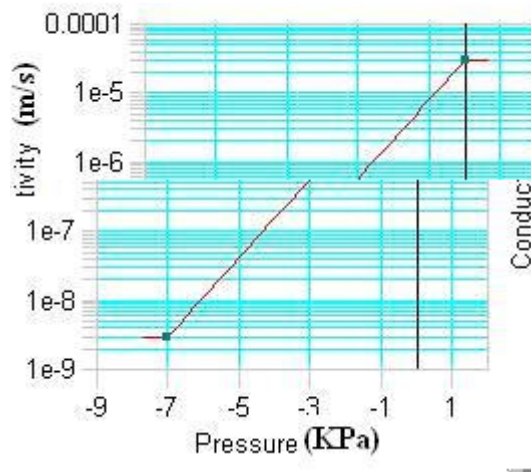


Figura 5.34 – Função de condutividade hidráulica não-saturada empregada na análise 3D do rebaixamento do lençol freático no shopping Brooklin - São Paulo

As condutividades de contorno não são de caráter constante nos contornos a superfície da área de ação de cada uma das fontes das águas subterrâneas, a condutividade de contorno é dada por:

$$K_{cont} = (0,05 / 2) = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

A partir da análise da distribuição do lençol freático, na profundidade de 0,5 m da superfície do terreno, em função da carga de 5,38 m, as distâncias de recarga, com as condições de contorno nas bordas, são as seguintes, com os respectivos valores:

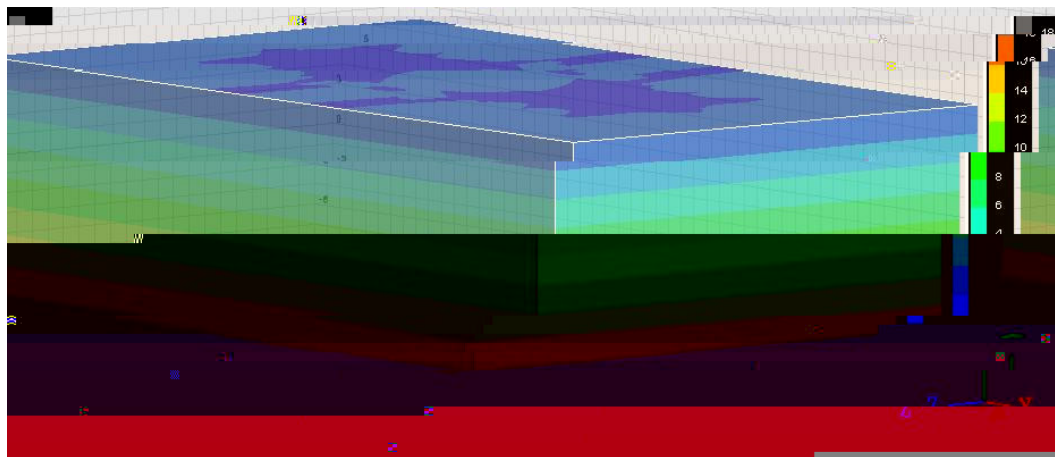


Figura 5.35 – Distribuição das cargas de pressão antes do rebaixamento

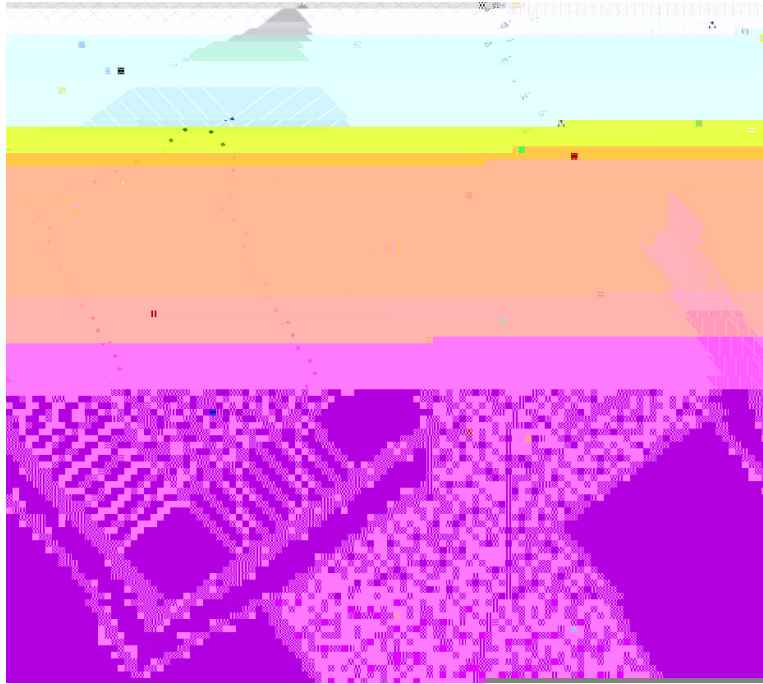


Figura 5.36 – Configuração do sistema de rebaixamento utilizado na análise 3D

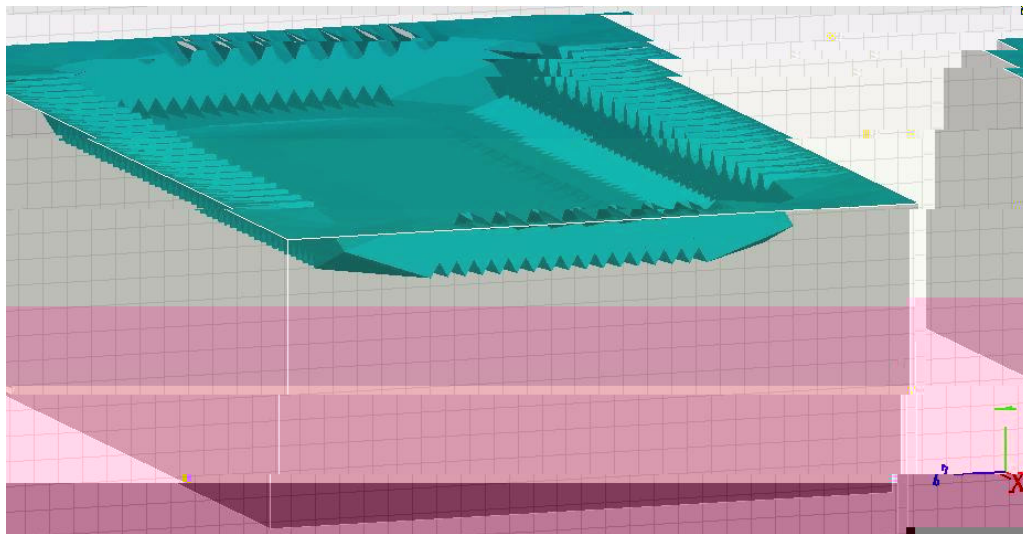


Figura 5.37 - Posição da superfície freática após rebaixamento de 3,5m no shopping Brooklin – São Paulo

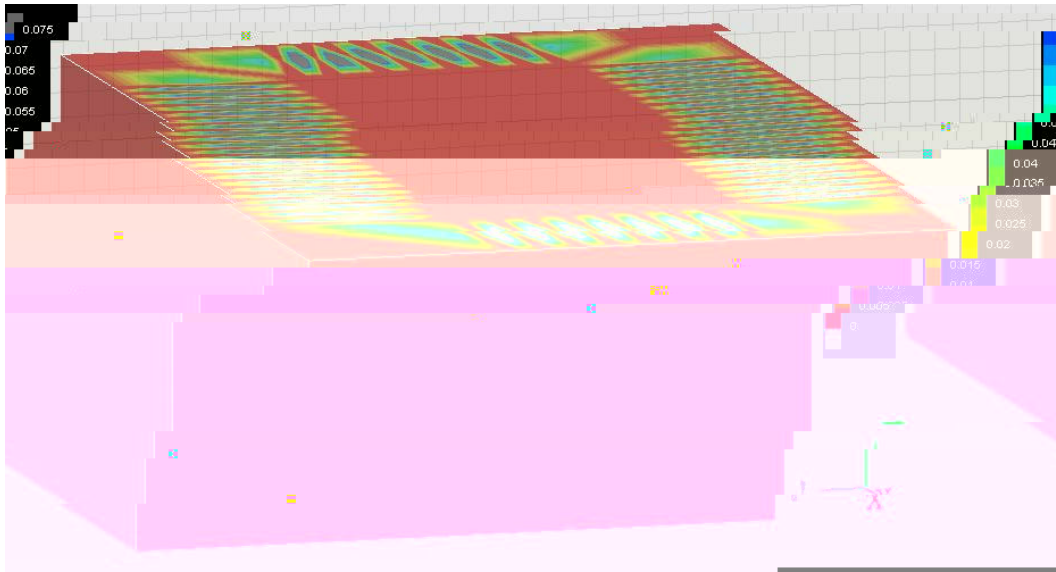


Figura 5.38 –Distribuição das velocidades de fluxo após rebaixamento

As figuras 5.3 e 5.40 são a distribuição das cargas hidráulicas, velocidades e gradientes de velocidades e aderência da coluna ao longo dos eixos X e Z, respectivamente, determinadas com base na análise 3D de elementos finitos.

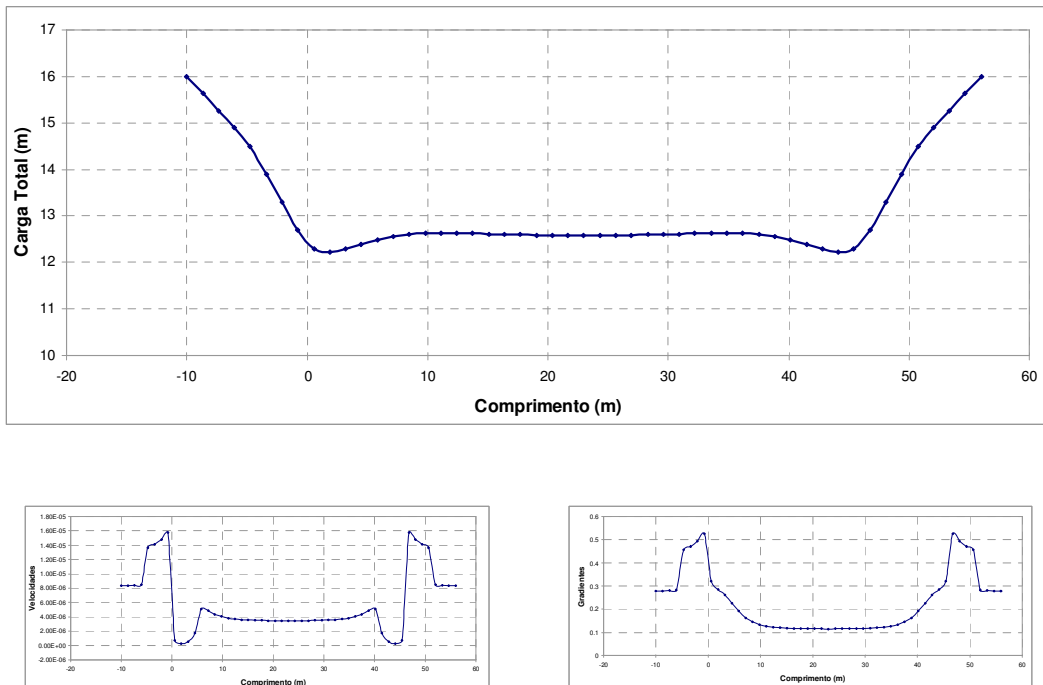


Figura 5.39 –Distribuição das cargas hidráulicas, velocidades e gradientes ao longo do eixo X obtidas pela análise 3D

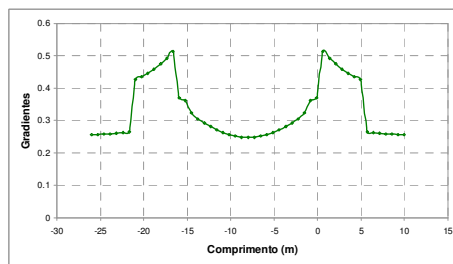
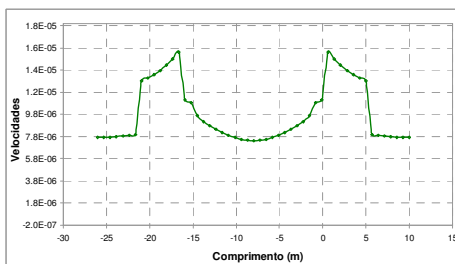
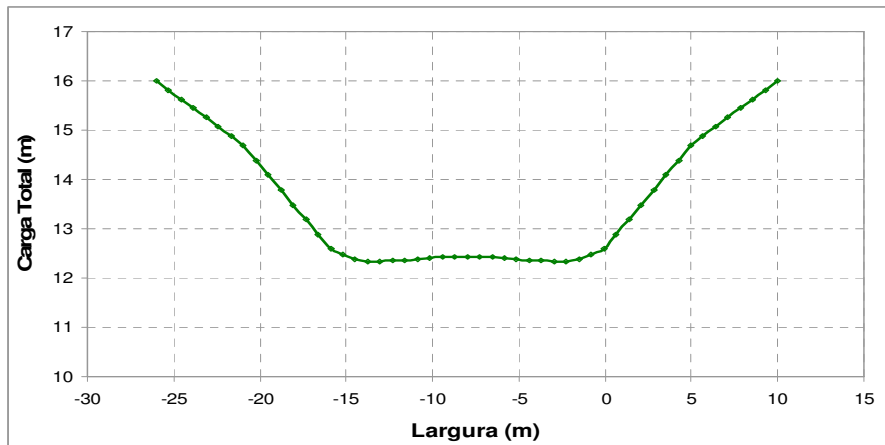


Figura 5.40 – Distribuição das cargas hidráulicas, velocidades e gradientes ao longo do eixo X obtidas pela análise 3D

5.3.3. Solução analítica

Os resultados da análise 3D são apresentados a seguir, considerando a distribuição da carga hidráulica, das velocidades e dos gradientes ao longo do eixo X. A distribuição da carga hidráulica é mostrada na Figura 5.40, onde se observa que a carga é máxima nas bordas e mínima no centro. A distribuição das velocidades e dos gradientes é mostrada nas Figuras 5.41 e 5.42, respectivamente, onde se observa que as velocidades e os gradientes são máximos nas bordas e mínimos no centro.

5.3.3.1. Fluxo em vala com duas linhas de poços

No caso de fluxo em vala com duas linhas de poços, a distribuição da carga hidráulica é mostrada na Figura 5.40, onde se observa que a carga é máxima nas bordas e mínima no centro. A distribuição das velocidades e dos gradientes é mostrada nas Figuras 5.41 e 5.42, respectivamente, onde se observa que as velocidades e os gradientes são máximos nas bordas e mínimos no centro.

em o freatico na direção do sítio, de acordo com o coeficiente de sondagem, sistema de abastecimento de água de superfície.

O coeficiente de ação do aqüífero é de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, e o número de pontos de abastecimento é 2, então a ação a cada ponto é de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nesse caso, a distância entre os pontos de abastecimento é de $X = 5,34$ m. A ação nas áreas a serem abastecidas é dada pelo produto das ações dos pontos de abastecimento com os coeficientes de ação, isto é, $q_x = 2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ e $q_z = 3,52 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

A solução analítica para a distribuição de carga antes e depois da escavação, considerando a relação $L/\lambda \geq 3$, é dada por (Equação 3.4.2)

$$h_D = h_0 \left[\frac{0,48}{L} (H - h_0) + \dots \right] \quad (5.1)$$

onde $\lambda = \dots$, $L = 82,5$, considerando $\dots = 3 \times 10^5 \text{ m/s}$.

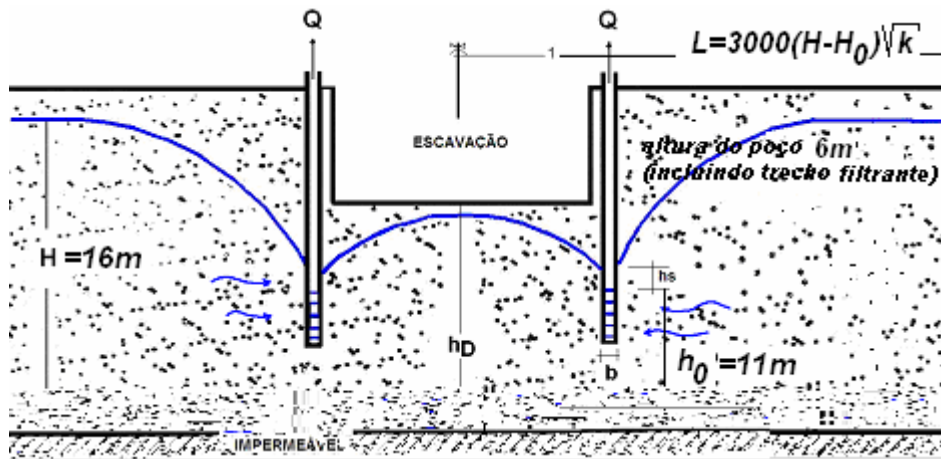


Figura 5.41 – Dimensionamento do sistema de rebaixamento, aqüífero gravitacional para fluxo em vala parcialmente penetrante para duas linhas de poços

Logo, :

$$\dots = \left[\frac{0,48}{82,5} (\dots) + \dots \right] \Rightarrow \dots = 2 \quad (5.2)$$

o o a $\sigma_{11} = 2$ res a a σ_{11} na oss b dade de resca a ão a $\sigma_{11} = 4$ aba xo do n σ_{11} co o na .

5.3.3.2. Fluxo radial em um poço equivalente

Nesta resenã do obre a cons de o se a res sãnc a de f xo ad a a a o o re a σ_{11} a ca σ_{11} em σ_{11} (q d dade de σ_{11}). a o do o o re a σ_{11} fo ca c σ_{11} do re = σ_{11} re se a o de nãnc a de re nado co o = 23 , cono re f a 5,42.

a o da ca ã d á ca no nre o do o σ_{11} , a o s o re ba xa σ_{11} (= 0.0 5 σ_{11}^3/s), e dado o

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11}^2 &= \sigma_{11}^2 - \frac{1}{\pi} n \left(\frac{1}{\sigma_{11}} \right) \\
 &= \left(\sigma_{11} \right)^2 - \frac{0.0 5 \sigma_{11}^3 / s}{\pi (3 \times 10^{-5} / s)} n \left(\frac{23}{\sigma_{11}} \right) \tag{5.3}
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{11} = 4$$

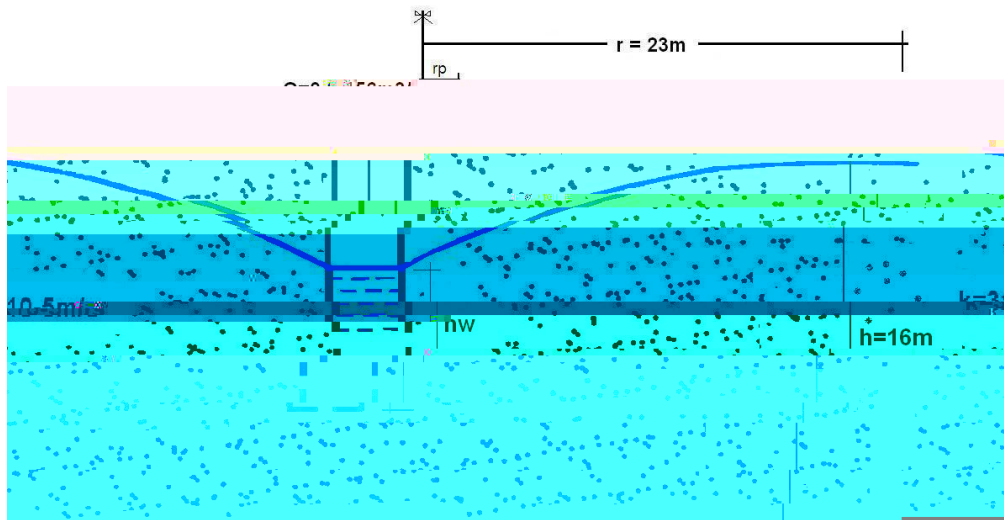


Figura 5.42 – Esquemática da área do aquífero gravitacional estudado

Neste caso, o re ba xa σ_{11} do re n o f σ_{11} co fo de a re nas 2 , ns f σ_{11} a a re x c a ão das resca a o res necessá as a a as f σ_{11} do s o n B o o n São Pa o.

so o, a análise 3 re re o se a s con ten te re a ão ao a o re x re ten ta da ação red da re ca o.

Tabela 6.1 - Valores das vazões e erros relativos nas análises de rebaixamento considerando modelos bi e tridimensionais

Tipo de Análise			Vazão (l/s)	Erro relativo (%)
Medida de campo			0,05	
Parâmetro 3			0,057	0,3
Parâmetro 2	Pano	Perfil I	0,033	42,74
		Perfil II	0,082	+2,48
Assinatura			0,5	344,44

o re a ão ao caso do sítio n.º 100 - São Paulo, o rebaixamento do lençol freático foi realizado através de uma rede de pontos (3) e das medidas das análises (1 ano e duas horas de afluência) e o erro relativo. A tabela 6.2, observa-se que o erro relativo de fluxo adadado o modo de rebaixamento de duas 2 do n.º do lençol freático, em função dos pontos correspondentes, obtidos na rede de rebaixamento de fluxo e as condições, foi a base para os resultados e condições da situação de campo.

Tabela 6.2 - Valores calculados dos rebaixamentos do lençol freático

Tipo de análise		Rebaixamento (m)
Medida de campo (3)		3,5
Análise	Vazões contínuas	4
	Ponto de análise	2

Sugestões

o o re a ão as afluências nas áreas de rebaixamento, sugerem-se:

- No caso de rescaldação, refazer a análise de campo da rede de rebaixamento / afluência da área de rebaixamento e o fluxo anual 2 pontos na seccção;

- b) No caso de rescaldações, verifica a altura da aro da reação com o tempo / a área da área de rescaldação o modo de fluxo axial e o coeficiente de transferência;
- c) No caso de baixa transferência de calor, verifica a influência dos parâmetros na eficiência da superfície de troca térmica e o coeficiente de transferência de calor a ser considerado da baixa.

Referências Bibliográficas

ARRA, L. M.; PARÍS, J. "A Physico-chemical Model of Predictive Soil Moisture Accessibility of Particle Sizes, Soil and Bulk Density". *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030., 1981.

ARRA, L. M., MARRAS, M., BASSO, B. and PARÍS, J. "A Physico-chemical Model of Predictive Soil Moisture Accessibility of Particle Sizes". Submitted to the *Canadian Geotechnical Journal*, for publication. 2001.

ARRA, L. M. *Water Resources and Environmental Engineering: Seepage Hydraulics of Groundwater*. 2nd ed. : McGraw-Hill, Inc., 1997.

ARRA, L. M. *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. 3rd ed. McGraw-Hill, 1985.

ARRA, L. M. A. *Redução de Lençol de Água em Escavações e Análise de Resposta de concreto a tensão*. V **Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas**. São Paulo, 2000, 120 A.

ARRA, L. M.; LEE, J. "The Effect of Water and Air in the Seepage of Excavation". *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 2, : 85-202, 1980.

ARRA, L. M.; XIAO, A., "The Effect of Soil Water Accessibility on Seepage". *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 3, : 52-532, 1984.

ARRA, L. M. *User's Guide Seep3D (for finite element seepage analysis)*. 2nd ed. : SL/ARRA/MAL, 2002. V **Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas**. São Paulo, 2000, 120 A-8.

ARRA, L. M. *Water Resources and Environmental Engineering: The Case of Seepage*. V **Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas**. São Paulo, 2000, 120 A-8.

FRANZONI, R. and ... "a c a on of hyd a c ond c y": A ... a a on of So e p ed c e M e t o d s. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 35, 1938, p. 7.

FRANZONI, R. *Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology*. Canada: Fred. So e I n t e n a t o n a , L t d., 2004.

LAMB, G. W. *Soil Mechanics*. London: Chapman & Hall, 1924.

MARIN, M. A.; LAMB, G. W. *Soil Mechanics and Seepage and Groundwater*. A s t e d a : S e e p e , 1982.

PLAXIS *Soil and Rock Analysis Scientific Manual*. Version 8.2, A.A.Ba e t a p b l i s t e s : L o y o , 2002.

RAHMAN, M. R.; BAHR, R. A. *Transient Analysis of Seepage*. Irian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 30, No. B, 2004.

RUBENS, A. L. M. *Rebaixamento Temporário de Aquíferos*. São Paulo: Tecnopar, 1998.

SARMA, S. W. *Soil: Mechanics and Engineering*. USA: McGraw-Hill, Inc., 1988.

VAN DER MEER, J. A. *Applied Soil Mechanics and Seepage*. *Soil Science Society of America Journal* 44:8 28-38, 1980.

VAN DER MEER, J. A. *Applied Soil Mechanics and Seepage*. *Research Report 78-WR-08*, Water Resources Program, Dep. Of Civil Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, 1978.

WILLIS, R. P. *Rebaixamento do lençol d'água: dados para projeto e execução*. Rio de Janeiro: FAPERJ, 1977.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)