



Hugo David Ninanya De la Cruz

**Modelagem numérica para avaliação do
controle das águas na mineração**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípides do Amaral Vargas Jr.
Co-Orientador: Dr. Nilson Guiguer

Rio de Janeiro
Agosto de 2014



Hugo David Ninanya De la Cruz

**Modelagem numérica para avaliação do
controle das águas na mineração**

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

Prof. Eurípides do Amaral Vargas Jr

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Nilson Guiguer

Co-Orientador

DHI Brasil

Prof. Antônio Roberto Martins Barboza de Oliveira

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Andrea Ferreira Borges

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial

Centro Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de agosto de 2014

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

Hugo David Ninanya De la Cruz

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Ricardo Palma (URP), de Lima – Peru, em 2011, tendo exercido a profissão de Engenheiro Civil durante o período 2011-2012. Ingressou em 2013 no curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

De la Cruz, Hugo David Ninanya

Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração / Hugo David Ninanya De la Cruz ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr; co-orientador: Nilson Guiguer - 2014.

157 f: il. ; 29,7 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Mineração. 3. Controle das águas. 4. Fluxo em meios porosos fraturados. 5. Regime Transiente. 6. Método dos elementos Finitos. I. Vargas Jr, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus queridos irmãos, Anthony e Karen.

Agradecimentos

Ao professor. Eurípedes do Amaral Vargas Jr., pelo estímulo, orientação e confiança durante esta dissertação.

Ao Nilson Guiguer pela orientação e conselhos nesta área da mineração e pela confiança depositada neste tempo de trabalho.

Aos meus professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelo conhecimento transmitido durante o mestrado.

À mineração Votorantim Metais através dos senhores Gustavo Catão Silva Nascimento e Edmar Eufrasio de Araujo pelos dados de monitoramento fornecidos para a realização do estudo de caso da mina subterrânea de Vazante.

Ao Ramon Días pelos estudos de monitoramento e informação da mina a céu aberto.

À CAPES, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo

De la Cruz, Hugo David Ninanya; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Guiguer, Nilson. **Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração**. Rio de Janeiro, 2014. 157 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O rebaixamento e controle das águas subterrâneas são atividades implementadas e monitoradas de forma contínua ao longo da vida dos projetos de mineração subterrânea ou a céu aberto. A implementação apropriada e eficiente destas atividades depende de estudos hidrogeológicos de grande porte, que permitem avaliar os sistemas de controle mais adequados. A procura da eficiência técnico-econômica destes processos demanda análises numéricas de fluxo tridimensionais de toda a região em estudo, caracterizada por profundas e complexas estratificações de materiais permeáveis abaixo do lençol freático, como normalmente abrangem projetos de mineração, onde as soluções analíticas não podem mais ser aplicadas. O presente trabalho de pesquisa contribui na melhor compreensão das formulações numéricas que representam o comportamento do fluxo subterrâneo, através de dois estudos de caso, o primeiro em uma mina subterrânea e segundo em uma mina superficial. No caso da mina subterrânea foram incorporadas feições cársticas através de elementos discretos 1D dentro de um modelo tridimensional de elementos finitos com o intuito de representar caminhos preferenciais de fluxo. Foram discutidas as vantagens de incorporar tais feições de forma explícita, quantificando o fluxo que passam por estas, que alimentam à mina através de conexões diretas com um rio adjacente. Estes elementos discretos permitem uma representação mais realista do meio hidrogeológico e ao mesmo tempo, uma avaliação mais aprimorada dos efeitos no comportamento do fluxo subterrâneo devido à impermeabilização superficial do rio, como a solução mais coerente para este problema de infiltração. Também foi elaborado um modelo hidrogeológico conceitual para representar o comportamento hidrogeológico de uma mina a céu aberto, desenvolvendo uma sistemática de uso adequado das condições de contorno e de restrição, a calibração deste modelo e a verificação de diferentes cenários de fluxo, como resultado da

incorporação das diferentes técnicas de controle das águas avaliadas em regime transiente, que abrange poços de bombeamento, paredes *cut-off* assim como ponteiros filtrantes e drenos horizontais. As diferentes técnicas modeladas mostraram resultados satisfatórios, sendo que arranjos de várias técnicas, configuradas de forma localizada, resultam ser mais recomendáveis e eficientes para tratar problemas particulares.

Palavras-chave

Controle das águas na mineração; Fluxo em meios porosos fraturados; Análise transiente; Métodos dos elementos finitos.

Abstract

De la Cruz, Hugo David Ninanya; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (advisor); Guiguer, Nilson (Co-advisor). **Numerical modeling to assess the control of water in mine**. Rio de Janeiro, 2014. 157p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dewatering and groundwater control are activities continuously implemented and monitored throughout the duration of underground mining or open pit projects. The proper and efficient implementation of these activities depends on large hydrogeological studies, for assessing the most appropriate control systems. The demand for technical and economic efficiency of these processes requires three-dimensional flow numerical analysis of the entire study area, characterized by deep and complex stratifications of permeable materials below the water table, as usually cover mining projects, where analytical solutions cannot be applied. The present research contributes to a better understanding of the numerical formulations that represent the behavior of groundwater flow via two case studies—the first in an underground mine and the second in a surface mine. In the case of the underground mine, 1D discrete elements were incorporated within a finite-three dimensional model in order to represent preferential flow paths. The advantages of incorporating such features explicitly to quantify the flow passing through them, that feed the mine through direct connections with an adjacent river, were discussed. The use of discrete elements allows for a more realistic representation of the hydrogeological environment and, at the same time, a more refined assessment of the effects on the behavior of groundwater flow due to surface sealing of the river, as the most coherent solution to this infiltration problem. Furthermore, a conceptual hydrogeologic model representing the hydrogeological behavior of an open pit mine was created, developing a system of the appropriate use of boundary and constraint conditions, calibrating the model and verifying different flow scenarios, as a result of the incorporation of different water control techniques assessed in transient regime, such as covering pumping wells, cut-off walls as well as wellpoints and horizontal drains. The different techniques modeled showed satisfactory results, with various

arrangements of techniques configured in a localized form resulting in the most desirable and efficient treatments for particular problems.

Keywords

Control of water in mining; Flow in fractured porous media; Finite element method; Transient analysis.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 21 |
| 2 | Modelagem de águas subterrâneas | 29 |
| 2.1. | Conceitos fundamentais | 29 |
| 2.1.1. | Águas subterrâneas | 29 |
| 2.1.2. | Definições Hidrogeológicas | 30 |
| 2.1.3. | Fluxo em meio poroso e saturado | 32 |
| 2.2. | Modelo conceitual para fluxo de águas subterrâneas | 35 |
| 2.2.1. | Domínio e contornos do modelo | 36 |
| 2.2.2. | Unidades hidrogeológicas e propriedades hidráulicas | 37 |
| 2.2.3. | Recarga e descarga das águas subterrâneas | 37 |
| 2.2.4. | Interação águas subterrâneas e águas superficiais | 38 |
| 2.2.5. | Balanço de massa das águas subterrâneas | 38 |
| 2.3. | Configuração da modelagem numérica | 39 |
| 2.3.1. | Delimitação do domínio | 39 |
| 2.3.2. | Discretização horizontal e vertical | 39 |
| 2.3.3. | Condições e restrições de contorno | 40 |
| 2.3.4. | Superfície livre | 45 |
| 2.3.5. | Convergência do modelo | 46 |
| 2.4. | Calibração das águas subterrâneas e análise de sensibilidade | 48 |
| 2.4.1. | Técnicas de calibração | 48 |
| 2.4.2. | Dados necessários para calibração | 49 |
| 2.4.3. | Avaliação da calibração | 49 |
| 2.4.4. | Análise de sensibilidade | 51 |
| 3 | Controle das águas em projetos de mineração | 52 |
| 3.1. | Introdução | 52 |
| 3.2. | Conceito de rebaixamento e controle de águas | 52 |
| 3.3. | Despressurização de taludes | 53 |
| 3.4. | Técnicas de controle das águas em minas subterrâneas | 54 |
| 3.4.1. | Impermeabilização da superfície do terreno | 54 |
| 3.4.2. | Congelamento do terreno | 55 |
| 3.4.3. | <i>Grouting</i> | 56 |

| | |
|--|-----|
| 3.4.4. Drenagem de mina | 57 |
| 3.5. Técnicas de controle das águas em minas a céu aberto | 58 |
| 3.5.1. Técnicas ativas | 58 |
| 3.5.2. Técnicas passivas | 64 |
| 3.6. Critérios para a seleção da técnica de rebaixamento | 65 |
| 4 Estudo de caso: Mina subterrânea | 71 |
| 4.1. Introdução | 71 |
| 4.2. Aspectos intervenientes ao cenário hidrogeológico local | 74 |
| 4.2.1. Condicionantes geológicas | 74 |
| 4.2.2. Gênese de feições cársticas | 75 |
| 4.2.3. Condicionantes geomorfológicas | 77 |
| 4.3. Compilação e interpretação dos dados disponíveis | 77 |
| 4.3.1. Piezômetros e poços medidores de nível d'água | 77 |
| 4.3.2. Vazões bombeadas na mina | 79 |
| 4.3.3. Pluviometria | 79 |
| 4.3.4. Monitoramento do rio Santa Catarina | 80 |
| 4.4. Modelo hidrogeológico conceitual | 82 |
| 4.4.1. Domínio do modelo | 82 |
| 4.4.2. Unidades hidrogeológicas e propriedades hidráulicas | 83 |
| 4.4.3. Recarga e descarga de águas subterrânea | 84 |
| 4.5. Revisão e recalibração do modelo numérico existente | 84 |
| 4.5.1. Revisão dos pontos de calibração | 87 |
| 4.5.2. Revisão e modificação das condições de contorno | 89 |
| 4.5.3. Recalibração do modelo numérico para o meio poroso contínuo-fraturado 2014 | 90 |
| 4.5.4. Implementação de elementos discretos 1D como feições cársticas | 93 |
| 4.5.5. Recalibração do modelo numérico contínuo-fraturado considerando as feições cársticas | 96 |
| 4.6. Cenários de comportamento de fluxo subterrâneo | 99 |
| 4.6.1. Cenário 1: Fluxo subterrâneo sem considerar as feições cársticas | 99 |
| 4.6.2. Cenário 2: Fluxo subterrâneo sem as feições cársticas e impermeabilizando o rio | 102 |
| 4.6.3. Cenário 3: Fluxo subterrâneo considerando feições cársticas | 104 |
| 4.6.4. Cenário 4: Fluxo subterrâneo considerando feições cársticas e impermeabilizando o rio | 107 |
| 4.6.5. Resumo dos resultados dos cenários | 109 |

| | |
|---|-----|
| 5 Estudo de caso: Mina a céu aberto | 110 |
| 5.1. Introdução | 110 |
| 5.2. Caracterização hidrogeológica | 111 |
| 5.2.1. Condicionantes geológicos | 111 |
| 5.2.2. Condicionantes hidráulicos | 113 |
| 5.3. Compilação e interpretação dos dados disponíveis | 114 |
| 5.3.1. Pluviometria | 114 |
| 5.3.2. Vazões bombeadas da cava da mina | 115 |
| 5.3.3. Evapotranspiração | 116 |
| 5.4. Modelo hidrogeológico conceitual | 118 |
| 5.4.1. Conceitualização do problema | 118 |
| 5.4.2. Parâmetros dos materiais | 119 |
| 5.5. Desenvolvimento do modelo numérico | 120 |
| 5.5.1. Pontos de calibração do modelo | 122 |
| 5.5.2. Condições de contorno | 123 |
| 5.5.3. Calibração do modelo numérico | 124 |
| 5.5.4. Análise de sensibilidade | 127 |
| 5.6. Condição hidráulica da mina | 128 |
| 5.7. Avaliação das técnicas de controle das águas – cenários de simulação | 131 |
| 5.7.1. Arranjo 1: Poços de bombeamento | 131 |
| 5.7.2. Arranjo 2: Paredes <i>cut-off</i> | 137 |
| 5.7.3. Arranjo 3: Ponteiras filtrantes, drenos horizontais e poços de bombeamento | 141 |
| 6 Conclusões e Recomendações | 148 |
| Referências Bibliográficas | 151 |
| Anexo único: Mapas geológicos | 155 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Localização da mina subterrânea de Vazante em relação ao rio Santa Catarina e às estações de medição (Votorantim, 2013) | 23 |
| Figura 1.2 - Possíveis mecanismos de infiltração desenvolvidos: Infiltração sazonal em resposta a alta precipitação (ex. 205 mm em 5 dias), “fluxo em conduto” ao longo de cársticos interconectados, e Infiltração através de fraturas e permeabilidade do maciço rochoso (Schlumberger Water Services, 2008) | 24 |
| Figura 1.3 – Localização e traçado do limite físico (línea cheia em vermelho) da mina a céu aberto (Fonte: Google Earth, 2014). | 25 |
| Figura 1.4 - Fotografia da frente a menor cota da pedreira em condições inundadas no ano de 2010 (Díaz, 2012). | 26 |
| Figura 2.1 - Ilustração esquemática do fluxo de águas subterrâneas (Best, 1998) | 30 |
| Figura 2.2 - Condição confinada e não confinada em aquífero - seção vertical (Diersch, 2013) | 34 |
| Figura 2.3 - Representação esquemática (a) lençol freático maior que o nível do rio (b) lençol freático menor que o nível no rio (c) corrente do rio desconectada do aquífero (Reproduzido de Winter <i>et al.</i> , 1998) | 38 |
| Figura 2.4 - Condição de contorno tipo 1- carga constante (DHI Wasy, 2014) | 42 |
| Figura 2.5 - Condição de contorno tipo 2 (DHI Wasy, 2014) | 43 |
| Figura 2.6 - Fluxo de Infiltração ao aquífero (Diersch, 2013) | 44 |
| Figura 2.7 - Fluxo de Exfiltração ao rio (Diersch, 2013) | 44 |
| Figura 2.8 - Sistema de aquíferos contendo o poço de bombeamento multicamadas (Diersch, 2013) | 45 |
| Figura 2.9 - (a) Superfície livre em Malha fixa (b) Superfície livre em Malha móvel, (Diersch, 2013) | 45 |
| Figura 3.1 - Esquemática dos trabalhos de concreto no rio Oerias (Carvalho, 1990) | 55 |
| Figura 3.2 – Representação esquemática dos poços de bombeamento (exterior e interior) na cava com seu respectivo sistema de drenagem superficial (Preene, 2014) | 59 |
| Figura 3.3 – Representação esquemática do sistema poços de bombeamento e drenos horizontais, com seu respectivo sistema de drenagem e de bombeamento para fora da cava (Preene, 2014) | 62 |
| Figura 3.4 – Representação esquemática das técnicas ativas que incluem ponteiros filtrantes, drenos horizontais, sistema de drenagem e estação de bombeamento. (Preene, 2014) | 64 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.5 – Representação esquemática da técnicas passiva Parede <i>cut-off</i> aplicada a taludes para o bloquei do fluxo das águas (Preene, 2014) | 65 |
| Figura 4.1- Caminhos de fluxos presumidos entre o rio e a mina com base nas formações locais e regionais mapeadas (Guiguer <i>et al.</i> , 2013). | 72 |
| Figura 4.2 - Níveis de desenvolvimento de feições cársticas na sua condição original (Pessoa <i>et al.</i> , 2012). | 76 |
| Figura 4.3 - Mapa de distribuição dos pontos de monitoramento na área de influência definida para os estudos hidrogeológicos (Pessoa <i>et al.</i> , 2012). | 78 |
| Figura 4.4 - Diagrama das médias históricas anuais de precipitação x bombeamento (Adaptado de Prado, 2010). | 79 |
| Figura 4.5 - Pontos de monitoramento fluviométricas analisadas próximos à mina. | 81 |
| Figura 4.6- Perfil hidrogeológico esquemático na Mina Vazante (Pessoa <i>et al.</i> , 2012). | 83 |
| Figura 4.7 - Modelo numérico de fluxo em FEFLOW que inclui a localização da mina de Vazante e as estruturas 2D (Falhas) na situação atual da mina. | 86 |
| Figura 4.8 – Unidades hidrogeológicas do modelo numérico de fluxo em FEFLOW 6.2. | 87 |
| Figura 4.9 - Modelo numérico de fluxo em FEFLOW – Pontos de Calibração 2013. | 88 |
| Figura 4.10 - Curva de calibração entre níveis medidos e calculados pelo modelo. | 92 |
| Figura 4.11 - Superfície potenciométrica simulada para a mina atual (Cota 326). | 93 |
| Figura 4.12 – Representação esquemática das feições cársticas na região d amina de Vazante (Bittencourt & Reis, 2012). | 94 |
| Figura 4.13 - Representação numéricas dos elementos discreto 1D no FEFLOW: <i>Arbitrary node</i> e <i>Edge slice</i> . (DHI-Wasy, 2014) | 95 |
| Figura 4.14 - Análise de sensibilidade para a determinação das variáveis que regem o comportamento de fluxo no interior dos elementos 1D (Feições cársticas). | 95 |
| Figura 4.15 - Curva de calibração entre níveis medidos e calculados pelo modelo com feições cársticas. | 98 |
| Figura 4.16 - Superfície potenciométrica simulada para a mina atual (Cota 326) considerando as feições cársticas no modelo. | 98 |
| Figura 4.17 - Localização da seção transversal a ser analisada para os cenários 1 e 2 de análise de fluxo. | 100 |
| Figura 4.18 - Cenário 1: Superfície do lençol freático gerada pelas condições de contorno impostas no rio e na mina. | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.19 - Cenário 1: Intensidades de fluxo de recarga pelo rio e descarga na mina, para seu posterior bombeamento. | 101 |
| Figura 4.20 - Cenário 1: Trajetórias de fluxo (linhas de cor preto) do rio para a mina. | 101 |
| Figura 4.21 – Cenário 2: Representação esquemática do tramo do rio impermeabilizado (impermeabilização total) | 103 |
| Figura 4.22 - Cenário 2: Zona de impermeabilização total do rio (6,3 km) | 103 |
| Figura 4.23 - Cenário 2: Representação esquemática do tramo do rio impermeabilizado (impermeabilização parcial) | 104 |
| Figura 4.24 - Cenário 2: Zona de impermeabilização parcial do rio (2 km) | 104 |
| Figura 4.25 – Localização das feições cársticas no domínio e da seção de análise para os cenários 3 e 4. | 105 |
| Figura 4.26 – Cenário 3: Características do fluxo influenciado através das feições cársticas. | 106 |
| Figura 4.27 – Cenário 3: Faixa do rio de maior infiltração para o aquífero que inclui os caminhos preferenciais de fluxo. | 106 |
| Figura 4.28 - Cenário 4: Zona de impermeabilização total do rio (3,6 km) | 108 |
| Figura 4.29 - Cenário 4: Zona de impermeabilização parcial do rio (4,5 km) | 108 |
| Figura 4.30 – Comparação dos resultados das vazões de descarga dos cenários com e sem feições para o caso da Mina subterrânea. | 109 |
| Figura 4.31 - Comparação dos resultados dos comprimentos de infiltração dos cenários com e sem feições para o caso da Mina subterrânea. | 109 |
| Figura 5.1 - Coluna estratigráfica resultante do estudo geológico (Adaptado de Álvarez et al., 2012) | 112 |
| Figura 5.2 - Mapa geológico delimitado pela divisória de águas e borda contato com o mar, na que se situa a exploração mineira e os poços de observação. Cortes longitudinal e transversal para identificação dos mantos e dobras (Álvarez <i>et al.</i> , 2012) | 113 |
| Figura 5.3 - Histórico anual de bombeamento cujos valores estão sendo comparados com as precipitações anuais acumuladas das estações El Musel e Cabo de Peñas, realizados entre 2002 e 2010 (Díaz, 2012) | 116 |
| Figura 5.4 – Modelo numérico de fluxo em FeFlow com a localização da mina a céu aberto (ao ano de 2010). | 121 |
| Figura 5.5 - Unidades hidrogeológicas que conformam o modelo numérico no FEFLOW para a mina a céu aberto. | 122 |
| Figura 5.6 - Condições de contorno hidráulicas atribuídas ao modelo numérico. | 124 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.7 - Comparação das cargas hidráulicas calculadas e registradas no campo | 126 |
| Figura 5.8 – Ajuste das cargas hidráulicas calculadas e registradas no campo | 126 |
| Figura 5.9 - Superfície potenciométrica simulada para a mina a céu aberto. | 127 |
| Figura 5.10 - Superfície do lençol freático na mina e no domínio e a condição de inundação na cava da mina. | 129 |
| Figura 5.11 – Superfície de afloramento do lençol freático e distribuição de volumes de água na cava da mina. | 129 |
| Figura 5.12 – Linhas de fluxo que indicam o caminho que a água segue em direção à cava da mina | 130 |
| Figura 5.13 – Seção A-A : Perfil piezométrico e linhas de fluxo em direção à cava | 131 |
| Figura 5.14 – Arranjo 1 - Opção (A): Vistas em planta da cava da pedreira para diferentes números de poços de idênticas profundidades e capacidades: a) 2 poços; b) 4 poços; c) 6 poços e d) 8 poços. | 133 |
| Figura 5.15 – Arranjo 1 - Opção (B): Vista em planta da localização de um sistema com poços internos e externos à cava indicando a potenciometria resultante no tempo $t \rightarrow \infty$ na região da cava. Localização das seções A-A, B-B e C-C | 135 |
| Figura 5.16 – Arranjo 1: Vista em corte vertical da Seção A-A indicando a superfície potenciométrica e o rebaixamento do lençol freático atingido devido ao funcionamento dos poços para diferentes tempos da análise transiente. | 137 |
| Figura 5.17 – Arranjo 1: Vista em corte vertical das seções A-A, B-B e C-C indicando a superfície potenciométrica no tempo $t = \infty$ no interior da cava devido à implementação dos poços de bombeamento. | 137 |
| Figura 5.18 – Condição de exfiltração no talude sul oeste representado pela condição de contorno tipo 1 sem a incorporação de técnicas de controle das águas. | 138 |
| Figura 5.19 – Arranjo 2: Condição inicial para a análise de fluxo bidimensional na seção D-D (a) referente às cargas de pressão e (b) referente às cargas hidráulicas. | 139 |
| Figura 5.20 – Arranjo 2: Análise de fluxo transiente (seção D-D) indicando a evolução do lençol freático devido à incorporação das paredes <i>cut-off</i> | 140 |
| Figura 5.21 – Seção D-D: Exfiltração no talude sul-oeste, resultado do Arranjo 1. | 142 |
| Figura 5.22 - Disposição dos drenos horizontais e ponteiras filtrantes a ser implementado no talude sul-oeste de exfiltração (seção D-D) a ser analisado no Arranjo 3. | 142 |

Figura 5.23 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=10d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento. 144

Figura 5.24 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=50d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento. 145

Figura 5.25 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=100d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento. 146

Figura 5.26 – Arranjo 3: Seção D-D – (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=360d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento. 147

Figura Anexo 1 - Mapa geológico da área de influência definida para os estudos hidrogeológicos – Mina subterrânea (Pessoa *et al.*, 2012) 156

Figura Anexo 2 - Mapa geológico da área de influência definida para os estudos hidrogeológicos – Mina a céu aberto (Díaz, 2012) 157

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.1 - Piezômetros instalados nas diferentes unidades hidrogeológicas da área de influência da Mina Vazante a dezembro de 2013. | 78 |
| Tabela 4.2 - Localização dos pontos de monitoramento de vazão (m ³ /h) nos cursos d'água da área de interesse do estudo (Pessoa <i>et al.</i> , 2012) | 80 |
| Tabela 4.3 - Relação entre o aquífero e o Rio Santa Catarina (ganho/perda d'água do rio) (Prado, 2010) | 81 |
| Tabela 4.4 - Distribuição dos pontos de calibração de cargas hidráulicas | 88 |
| Tabela 4.5 - Parâmetros hidrodinâmicos considerados no modelo de fluxo (modificado da Votorantim, 2013) | 91 |
| Tabela 4.6 - Balanço de massa para a simulação da mina atual | 92 |
| Tabela 4.7 - Parâmetros hidrodinâmicos considerados no modelo de fluxo com feições cársticas. | 97 |
| Tabela 4.8 - Balanço de massa para a simulação da mina atual, considerando caminhos cársticos. | 98 |
| Tabela 4.9 - Localização UTM das feições cársticas no modelo numérico. | 107 |
| Tabela 5.1 – Dados de precipitação e temperatura da estação de Gijón (Díaz, 2012) | 115 |
| Tabela 5.2 – Dados de precipitação da estação de El Musel (Díaz, 2012) | 115 |
| Tabela 5.3 – Incremento do bombeamento com relação ao ano anterior (Díaz, 2012). | 116 |
| Tabela 5.4 - Evapotranspiração expresso em porcentagem (Díaz, 2012) | 117 |
| Tabela 5.5 – Valores de chuva útil para cada uma das precipitações de referência (ETP e ETR) (Díaz, 2012) | 118 |
| Tabela 5.6 – Valores de condutividade hidráulicas (cm/s) para materiais de acordo com diferentes autores. (Díaz, 2012, adaptado de San Roman, 2008) | 120 |
| Tabela 5.7 - Poços de medição usados na calibração do modelo – Mina a céu aberto (Díaz, 2012). | 123 |
| Tabela 5.8 – Medições de vazão na cava (Díaz, 2012) | 123 |
| Tabela 5.9 - Resultado da avaliação estatística para carga hidráulica e vazão de saída na cava | 125 |
| Tabela 5.10 - Propriedades hidráulicas das diferentes unidades hidrogeológicas do modelo numérico | 127 |
| Tabela 5.11 – Balanço de massa para a mina a céu aberto. | 127 |
| Tabela 5.12 – Balanço de massa para a mina a céu aberto. | 128 |

Lista de Símbolos

| | |
|--------------------------------------|--|
| $\ A\ $ | Matriz rigidez A |
| AMG | Método da multigrelha algébrica |
| B | Espessura do aquífero confinado |
| BiCGSTAB | Método Lanczos estabilizado do Gradiente Biconjugado |
| CG | Método do Gradiente Conjugado |
| CGS | Método Lanczos da Raiz do Gradiente Conjugado |
| e | Elemento finito |
| ET | Evapotranspiração |
| ε | Porosidade efetiva |
| GMRES | Método do resíduo mínimo generalizado |
| h | Espessura da camada saturada do aquífero |
| h_C | Carga hidráulica calculada |
| h_D | Carga hidráulica conhecida |
| h_m | Carga hidráulica medida |
| k | Condutividade hidráulica |
| K | Tensor de condutividade hidráulica |
| $k(A)$ | Número da condição da matriz de rigidez A |
| MAE | Erro Médio Absoluto |
| ME | Erro Médio |
| MG | Método da Multigrelha |
| N_E | Número do elemento finito |
| N_P | Número de pontos dos elementos |
| n | Porosidade |
| n | Número total de dados |
| ORTHOMIN | Método do resíduo mínimo ortogonal |
| p | Poropressão |
| Q | Função geral de fonte/dreno |
| Q_h | Fonte de recarga |
| Q_{hw} | Fonte poço (extração ou injeção) |
| q | Velocidade de Darcy |
| q_h | Fluxo conhecido imposto |
| R | Coefficiente de correlação |
| RMS | Erro de Raiz Média Quadrática |
| S | Armazenamento |
| S_r | Retenção específica |
| S_S | Armazenamento específico |
| S_y | Rendimento específico |
| w | Função de ponderação do método de Galerkin |
| $[K_{xx}]$, $[K_{yy}]$ e $[K_{zz}]$ | Matrizes de condutividade horizontais X,Y e vertical Z |
| t_0 | Tempo na condição inicial |
| Γ | Contorno total |
| Γ_C | Condição de contorno de Cauchy |
| Γ_D | Condição de contorno de Dirichlet |

| | |
|--------------------|---|
| Γ_N | Condição de contorno de Neumann |
| $-\Phi_h(h_C - h)$ | Condição de transferência de fluxo |
| ∇h | Quantidade derivada da carga conhecida |
| $O, C e F$ | Matrizes e vetores da matriz de rigidez |
| 1D | Unidimensional |
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| N_i, N_j | Funções de interpolação |
| R | Coefficiente de correlação |
| R^2 | Coefficiente de determinação |
| \forall | Operador lógico |
| ∇ | Operador vetorial |
| Ω | Domínio do modelo |
| Σ, \int | Operadores algébricos |