



**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 hidrogeologic 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 - Esquematização 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 bloqueio 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 ponteiros 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 ponteiros filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiros 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 ponteiros filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiros 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 ponteiros filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiros 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 ponteiros filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiros 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 <sup>3</sup> /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
$\varepsilon$	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	Coeficiente 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
$\Gamma$	Contorno total
$\Gamma_C$	Condição de contorno de Cauchy
$\Gamma_D$	Condição de contorno de Dirichlet

$\Gamma_N$	Condição de contorno de Neumann
$-\Phi_h(h_C - h)$	Condição de transferência de fluxo
$\nabla h$	Quantidade derivada da carga conhecida
$O, C \text{ e } F$	Matrizes e vetores da matriz de rigidez
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
$N_i, N_j$	Funções de interpolação
R	Coeficiente de correlação
$R^2$	Coeficiente de determinação
$\forall$	Operador lógico
$\nabla$	Operador vetorial
$\Omega$	Domínio do modelo
$\Sigma, \int$	Operadores algébricos