



**Fernando Portugal Maia Saliba**

**Avaliação Hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril  
nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas  
(Minas Gerais)**

**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.

Orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.  
Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro, março de 2007



**Fernando Portugal Maia Saliba**

**Avaliação Hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril  
nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas  
(Minas Gerais)**

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.

**Eurípedes do Amaral Vargas Jr.**  
Orientador  
PUC-Rio

**Tácio Mauro Pereira de Campos**  
PUC-Rio

**José Tavares Araruna Jr.**  
PUC-Rio

**Franklin dos Santos Antunes**  
PUC-Rio

**José Eugênio Leal**  
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de março de 2007.

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

### **Fernando Portugal Maia Saliba**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em 2000. Durante a graduação e até o ano de 2005 atuou na área de geotecnia e meio ambiente, participando principalmente de projetos relacionados à mineração.

#### Ficha Catalográfica

Saliba, Fernando Portugal Maia.

Avaliação hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Minas Gerais) / Fernando Portugal Maia Saliba ; orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. , Tácio Mauro Pereira de Campos. – 2007.

224f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Pilha de estéril. 3. Hidrogeologia. 4. Análise numérica. 5. Fluxo subterrâneo. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. II. Campos, Tácio Mauro Pereira de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

Aos meus familiares e parentes, especialmente aos meus pais, Aluízio e Ana Maria, por todo amor, carinho e confiança.

Ao meu melhor amigo e irmão, Aloysio (Lu), por estar ao meu lado o tempo todo e me incentivar na conclusão deste trabalho.

À querida Mari, pelo grande amor, compreensão e apoio durante todos os anos de convivência.

Ao Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr., pela sua orientação, credibilidade e amizade durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores Tácio Pereira de Campos e Franklin dos Santos Antunes pelas sugestões e comentários imprescindíveis para a finalização deste trabalho.

Aos amigos da VOGBR, que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, em especial ao Ângelo Zenóbio, Jorge e Rodrigo Cristiano.

Aos colegas de turma, Antônio Pellissari, Guilherme Barros e Viviana Torralba pelo companheirismo, carinho e convivência.

A todos os demais colegas da PUC-Rio pela convivência e troca de informações úteis para minha pesquisa e formação.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil e do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

À CVRD (Gerência de Geotecnia) pelo apoio financeiro nas atividades de campo.

Ao Walter de Brito e sua equipe (Serviço de Tecnologia Mineral do CDTN) pelas análises mineralógicas realizadas.

À PUC-Rio e ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

## Resumo

Saliba, Fernando Portugal Maia; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral; Campos, Tácio Mauro Pereira de. **Avaliação Hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade - Bela Vista de Minas (Minas Gerais)**. Rio de Janeiro, 2007. 224p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho concentra-se na caracterização geológica-geotécnica e hidrogeotécnica de uma pilha de estéril temporária, proveniente de rocha itabirítica, e de seu entorno, a fim de apresentar as possíveis condicionantes geradoras das elevadas pressões hidrostáticas medidas na fundação desta pilha. Com base nesta caracterização, criou-se um modelo hidrogeológico das condições de escoamento da água subterrânea pelo material estéril e pelas regiões adjacentes desta pilha, utilizando os programas computacionais Slide® e VisualModflow®. Em ambos os resultados apresentados pelos modelos computacionais, observou-se que a sub-pressão existente na fundação da pilha de estéril está diretamente associada a dois fatores: (i) aos condicionantes geológicos do local e (ii) ao índice pluviométrico do ano de 2005.

## Palavras-chave

Pilha de Estéril; Hidrogeologia; Análise Numérica; Fluxo Subterrâneo.

## Abstract

Saliba, Fernando Portugal Maia; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Advisor); Campos, Tácio Mauro Pereira de (Co-advisor). **Hydrogeotechnical Evaluation of the Foundation of #5 Waste Pile at Andrade's Mine - Bela Vista de Minas (Minas Gerais)**. Rio de Janeiro, 2007. 224p. MSc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study focuses on the geological, geotechnical and hydrogeotechnical characterization of a temporary waste pile, made of itabirite rock, and of its surrounding area, and presents possible causes for the high pore pressures measured at the waste pile foundations. Based on this characterization, a computer models of this scenario were developed using both Slide® and VisualModFlow® softwares. In both cases, results indicate that the high pore pressures are directly related to two main causes: (1) to local geological conditions and boundaries and (2) to high rainfall rate recorded in 2005.

## Keywords

Waste Pile; Hydrogeology; Numerical Analyse; Groundwater.

# SUMÁRIO

1	Introdução	16
2	Considerações sobre Hidrogeotecnia de Pilhas de Estéril	20
2.1.	Características Hidráulicas	20
2.2.	Instabilidade Geotécnica Relacionadas às Condições de Fluxo	23
2.3.	Vulnerabilidade à Contaminação	25
3	Localização e Dados Disponíveis da Área em Estudo	27
3.1.	Localização e Histórico da Pilha	27
3.2.	Geologia	30
3.2.1.	Geologia Regional	30
3.2.2.	Litoestratigrafia	31
3.2.3.	Arcabouço estrutural	32
3.3.	Dados Climatológicos	35
3.4.	Investigações Hidrogeológico-Geotécnicas Executadas	38
3.4.1.	Sondagens Rotativas, Exploratórias e à Percussão	39
3.4.2.	Piezômetros e Indicadores de Nível de Água	39
3.4.3.	Poços de Investigação	42
3.4.4.	Ensaio de Laboratório	42
4	Condições Geométricas e Caracterização Geológico-Geotécnica e Hidrogeotécnica da PDE-05 e Entornos	44
4.1.	Configuração Geométrica da Pilha	44
4.2.	Caracterização Geológico-Geotécnica da Área da PDE-05 e Adjacências	45
4.3.	Ensaio de Campo e Laboratório Complementares	54
4.3.1.	Ensaio de Campo	55
4.3.2.	Ensaio de Laboratório	63
5	Modelo Conceitual de Fluxo Subterrâneo	70

5.1. Unidades Hidroestratigráficas	70
5.2. Recarga	74
5.3. Condições Atuais de Fluxo	78
6 Modelagem Numérica do Fluxo na Área de Estudo	81
6.1. Modelagem Computacional 2 D	82
6.1.1. Parâmetros de Entrada do Modelo 2 D	83
6.1.2. Condições de Contorno e Definição da Malha 2 D	84
6.1.3. Calibração do Modelo 2 D	85
6.1.4. Resultados Obtidos – Modelo 2 D	86
6.2. Modelagem Computacional 3 D	89
6.2.1. Configurações do Modelo 3 D	89
6.2.2. Calibração do Modelo 3 D	93
6.2.3. Resultados Obtidos no Modelo 3 D	95
6.3. Comparação entre os Resultados Obtidos nos Modelos Numéricos	97
7 Conclusões e Considerações Finais	99
8 Referências Bibliográficas	102
Apêndice A – Seção Geológica-Geotécnica Vertical da Área em Estudo	109
Apêndice B – Gráficos de Variação Temporal – Monitoramento Hidrogeotécnico dos PZs e INAs	111
Apêndice C – Resultados dos Ensaios de Campo e Laboratório	115
C.1. Ensaios com Permeâmetro de Guelph	115
C.2. Curvas Características do Estéril e Alteração de Rocha	135
C.3. Resultados dos Ensaios de Permeabilidade	136
C.4. Resultados dos Ensaios de Laboratório	143
C.5. Resultados da Difratometria de Raios-X	151
Anexo A – Dados de Precipitação Diária das Estações Mina do Andrade e Usina Peti	156



Anexo B – Perfis Geológicos das Sondagens Executadas na Mina do Andrade Mencionadas neste Trabalho	192
B.1. Sondagens Exploratórias	192
B.2. Sondagens Rotativas	206

## Lista de figuras

- Figura 1 – Material estéril depositado na PDE-05, localizada na mina do Andrade, indicando grande heterogeneidade. Segregação do material disposto devido à conformação da pilha, apresentando blocos maiores na base do talude e fragmentos menores na crista e demais regiões. 23
- Figura 2 – Modos de ruptura em pilhas de estéril, onde a água é o principal condicionante (adaptado de Caldwell e Moss, 1981). 24
- Figura 3 – Localização da área em estudo. 28
- Figura 4 - Vista lateral do 3º e 4º banco da PDE-05 apresentando material depositado recentemente. 29
- Figura 5 - Mapa geológico local da mina do Andrade (PROMINAS,2005) e locação das investigações geotécnicas utilizadas no estudo. 34
- Figura 6 – Evaporação total mensal média (ponderação estação Belo Horizonte e Caratinga) e precipitações mensais médias (Estação Mina do Andrade).37
- Figura 7 – Variação temporal dos totais anuais médios de precipitação obtidos na estação Mina do Andrade (1979-2006). 38
- Figura 8 - Curvas granulométricas coletadas nas áreas adjacentes às pilhas de estéril (PDE-01, PDE-02 e PDE-05) da mina do Andrade (VOGBR, 2006).43
- Figura 9 – Vista aérea da região em estudo (imagem Ikonos), identificando alguns aspectos importantes registrados durante a caracterização da área. 47
- Figura 10 – Vista a partir do topo da PDE-05 para região de montante. No canto esquerdo da foto, grande afloramento de itabirito e presença vegetação rasteira. No lado direito da foto, vista do paiol de explosivos nº2 e vegetação de mata densa sobre o solo residual de xisto. 49
- Figura 11 – Vista a partir do paiol de explosivos nº1 da PDE-05 para região de montante, mostrando os dobramentos (vergência W-E) presentes nos itabiritos. 50
- Figura 12 – Testemunho da sondagem rotativa NA-ANPE2-03 apresentando o início do gnaiss pouco fraturado a são a partir dos 10,0 m. 53
- Figura 13 – Execução do ensaio EN-6a utilizando o permeâmetro de Guelph, realizado no 1º banco. Ao fundo, vista do 2º, 3º e 4º bancos da pilha de estéril PDE-05. 57

- Figura 14 – Vista do ensaio utilizando simultaneamente o tensiômetro e o permeâmetro de Guelph, realizado no 3º banco da PDE-05, conforme procedimento proposto por Veloso (2000). No detalhe, tensiômetro cravado no estéril de itabirito. 61
- Figura 15 – Vista do bloco AM-03 de amostra indeformada extraída da ombreira esquerda da PDE-05. Material classificado como solo residual com alterações de rocha (quartzo-feldspato-xisto). 64
- Figura 16 - Curvas granulométricas das amostras de estéril de itabirito (AM-01, AM-02) coletadas na superfície da PDE-05 e de solo residual com porções de alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto (AM-03) coletadas na ombreira esquerda da pilha. 66
- Figura 17 - Curvas de adensamento do par de ensaios na condição inundada extraída da amostra AM-03. Material ensaiado: solo residual de xisto com porções de alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto (ombreira esquerda da PDDE-05). 67
- Figura 18 – Esquema representativo do modelo hidrogeológico conceitual. 80
- Figura 19 – Malha triangular de elementos finitos utilizada – detalhe focalizando a área da PDE-05. 85
- Figura 20 – Resultado da calibração do modelo hidrogeológico numérico bidimensional. 86
- Figura 21 – Resultado do modelo hidrogeológico numérico bidimensional. 88
- Figura 22 - Domínio do modelo hidrogeológico, identificação das condições de contorno adotadas e malha de cálculo (método das diferenças finitas). 91
- Figura 23 – Comparações entre as cargas hidráulicas medidas e calculadas pelo modelo numérico tridimensional. 94
- Figura 24 - Distribuição potenciométrica da superfície freática simulada pelo modelo hidrogeológico numérico 3 D calibrado. 96

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultado dos ensaios utilizando o permeâmetro de Guelph na região da PDE-05 e entorno.	57
Tabela 2 – Parâmetros dos materiais não saturados estimados a partir da retro-análise.	60
Tabela 3 – Valores medidos para o cálculo da condutividade hidráulica realizados nos piezômetros existente nas pilhas de estéril da mina do Andrade.	62
Tabela 4 – Fatores adotados para cálculo do deflúvio para a área em estudo a partir dos fatores sugeridos por Greaner (1997) em função dos valores de precipitação mensal.	75
Tabela 5 – Balanço hídrico simplificado para área da mina do Andrade.	77
Tabela 6 – Valores das unidades hidroestratigráficas utilizados no modelo bidimensional	83
Tabela 7 – Valores das unidades hidroestratigráficas utilizados no modelo regional	92
Tabela 8 – Balanço de água do modelo numérico – volumes totais de entrada e saída.	93

## Lista de quadros

Quadro 1 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo, 1997).	31
Quadro 2 – Instrumentos de monitoramento hidrogeotécnico instalados nas pilhas de estéril PDE-01, PDE-02 e PDE-05.	40
Quadro 3 – Informações extraídas das descrições geológicas dos testemunhos das sondagens exploratórias na área de montante.	50
Quadro 4 – Informações extraídas das descrições geológicas dos testemunhos das sondagens exploratórias na área de jusante.	52
Quadro 5 – Características gerais de cada tipo de solo encontrado na PDE-05 e entornos.	53
Quadro 6 – Sumário das investigações de campo e laboratório complementares.	55
Quadro 7 – Resultado da difratometria de raios-X nas amostras da PDE-05.	69

## Lista de símbolos e abreviações

CP	Corpo de prova [ - ]
Cv	Coeficiente de adensamento do solo [ $L^2 T^{-1}$ ]
D	Deflúvio superficial médio [ L ]
E	Direção leste [ - ]
EI.	Elevação topográfica [ L ]
Ev	Evaporação [ L ]
Evap	Evapotranspiração real média [ L ]
h	Carga hidráulica [ L ];
$K_{sat}$	Condutividade hidráulica saturada de campo [ $LT^{-1}$ ]
$K_x, K_y$ e $K_z$	Componentes do tensor de condutividade hidráulica nas direções x, y e z [ $LT^{-1}$ ]
INA	Indicador de nível de água [ - ]
N	Direção norte [ - ]
n	Parâmetro empírico do modelo de Van Genuchten (1980) [ - ]
NE	Direção nordeste [ - ]
NW	Direção noroeste [ - ]
P	Precipitação média [ L ]
PDE	Pilha de estéril [ - ]
PZ	Piezômetro [ - ]
Q	Vazão [ $L^3 T^{-1}$ ]
t	Tempo [ T ]
R	Recarga média [ L ]
$R^*$	Fonte ou sumidouro de água [ $T^{-1}$ ]
SE	Direção sudeste [ - ]
$S_s$	Armazenamento específico do meio poroso [ $LT^{-1}$ ]
UTM	Sistema referencial de localização terrestre [ L ]
V	Volume [ $L^3$ ]
W	Direção oeste [ - ]
$\alpha$	Parâmetro empírico do modelo de Van Genuchten (1980) [ - ]
$\Delta V$	Variação média mensal do armazenamento de água no solo [ L ]
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual do solo [ - ]
$\theta_s$	Umidade volumétrica saturada do solo [ - ]

*“Como descrever a sensação de completa exaustão, do medo controlado, do risco, da dúvida. Do prazer físico, da beleza ou das proporções? É como querer explicar uma paixão ou um orgasmo. Não é azul, nem azedo, nem líquido. Com um pouco de ousadia na cabeça e muita disciplina, o homem pode se transformar num animal de olhar selvagem, obsessivo, que acaricia o diabo e desafia suas forças. E quando isso lhe acontece, só ele pode saber o quanto lhe custou chegar lá.”*

*Luiz Makoto Ishibe (1997)*