



**Vivian Rodrigues Marchesi**

**Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços  
Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos  
Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplício**

**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.

Orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro, março de 2008



**Vivian Rodrigues Marchesi**

## **Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplicio**

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.

**Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura**

Orientador  
PUC-Rio

**Prof. Franklin dos Santos Antunes**

PUC-Rio

**Prof.<sup>a</sup> Anna Laura Lopes da Silva Nunes**

UFRJ

**Sandro Salvador Sandroni**  
Geoprojetos Engenharia Ltda.

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de março de 2008

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

### **Vivian Rodrigues Marchesi**

Formou-se no curso Técnico de Edificações pela Escola Técnica Federal do Espírito Santo – ETFES em 2000. Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES em 2005. Principais áreas de interesse: Mecânica das Rochas, Mecânica dos Solos e Engenharia de Petróleo.

#### Ficha Catalográfica

Marchesi, Vivian Rodrigues

Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplício / Vivian Rodrigues Marchesi; orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura. – 2008.

129 f.: il. ; 29,7 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Modelagem Geomecânica Tridimensional. 3. Estabilidade de Taludes Rochosos. 4. Geoestatística. 5. Krigagem Ordinária. I. Fontoura, Sérgio Augusto B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. III. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624

Para meu amado noivo e para minha querida família.

## Agradecimentos

Ao professor Dr. Sérgio Fontoura, não só pela orientação, mas pela amizade conquistada. Obrigada pela grande generosidade e compreensão.

Ao meu noivo, Phablo. Não há palavras para agradecer o carinho, o companheirismo, o amor e o incentivo despendidos para que eu chegasse até aqui. Obrigada por suportar junto comigo esses dois longos anos de distância. Aos meus pais, que sempre lutaram para me proporcionar tudo o que tenho e o que sou. Agradeço por nunca me deixarem faltar o carinho e o incentivo incondicionais. Às minhas irmãs, minhas eternas amigas, ao meu cunhado e à minha linda sobrinha. Ni, Renato, obrigada pelo imenso carinho e apoio desde a UFES até aqui. Dê, obrigada pela amizade e pela confiança. Vocês com certeza me propulsionaram a cada dia para alcançar este objetivo, pois eu nunca seria capaz de decepcioná-los. Juliana, minha fofinha, sei que compreenderá a ausência da tia.

Aos amigos que se tornaram praticamente a minha família aqui no Rio: Jô, Lorena, Amanda, Bê, Elvidio, Guilherme, Hyllttonn e Roberto. Como eu poderia esquecer dos jantares que preparamos ao som da dupla Rouxinol & Gralha Azul? Sempre guardarei este imenso carinho que tenho por vocês. Jô, agradeço por sua fiel amizade. Acredito que não estaria aqui se não fosse por você, minha maninha Buback. À Lorena, pelo seu jeito brincalhão e pela amizade que divertiram um pouco os infundáveis finais de semana de estudo no GTEP. Aos demais amigos do mestrado, em especial à Fanny, que se é para mim um exemplo de garra e determinação.

Aos amigos do GTEP, especialmente Nelly, Nelson, Lorena, Cristiane, Clarisse e Bruno, pelo apoio e amizade. Também aqueles que não estiveram diretamente ligados ao meu mestrado, mas que também estiveram presentes indiretamente. Eduardo, Juliane e tantos amigos, obrigada pelo exemplo.

À FURNAS Centrais Elétricas S.A., pelo fornecimento dos dados utilizados para este estudo. Em especial aos colegas da Divisão de Geotecnia e Segurança de Barragens, engenheiros Celso Pires e Melo Franco e geólogos Pedro Macedo e Gilmar Nunes, pelo apoio e prestatividade.

À ENGEVIX, por proporcionar a visita ao local da obra, em fase de desenvolvimento.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e ao Grupo de Tecnologia em Engenharia do Petróleo (GTEP), pela infra-estrutura e suporte.

À Schlumberger e à Rocscience, pelo fornecimento dos *softwares* utilizados para a realização desta pesquisa.

À CAPES e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro.

A Deus, criador de todas as coisas e fonte de fé e esperança. Sem Ele nada disso seria possível.

## Resumo

Marchesi, Vivian Rodrigues; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. (Orientador) **Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplício**. Rio de Janeiro, 2008. 129p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na engenharia geotécnica, o conhecimento das propriedades geomecânicas de subsuperfície é fundamental aos cálculos de estabilidade. Na prática cotidiana, a estimativa dessa distribuição é realizada pelo geólogo/geotécnico responsável, que traça seções geológico-geotécnicas em função de sua experiência e da observação dos dados das investigações de campo e laboratório. Tais estimativas bidimensionais, porém, não contemplam a distribuição espacial. Assim, o objetivo deste trabalho é enriquecer a compreensão global do maciço com a previsão da distribuição tridimensional dessas propriedades. Utilizou-se o modelador geológico PETREL™ para a estimativa geoestatística da variação espacial dos valores de RMR e grau de fraturamento ao longo do maciço rochoso destinado à implantação da casa de força do Aproveitamento Hidrelétrico de Simplício. Essa distribuição foi estimada em função da disposição dos dados ao longo dos furos de sondagem localizados espacialmente no modelo. Também foi lançada a geometria da futura superfície de escavação, para que se pudesse avaliar qual a seção crítica de qualidade do maciço em relação aos taludes de corte. Essa seção foi então extraída do modelo com a distribuição ponto a ponto do valor de RMR, de onde foram obtidos os parâmetros de resistência  $c$  e  $\phi$  para a análise de estabilidade. Analisou-se então a estabilidade desse talude em um programa que permite essa variação espacial de parâmetros de resistência e, em paralelo também foram realizadas as análises convencionais de estabilidade de taludes rochosos, de forma a apresentar a importância da modelagem tridimensional para tal estudo.

## Palavras-chave

Modelagem Geomecânica Tridimensional; Estabilidade De Taludes Rochosos; Geoestatística; Krigagem Ordinária.

## Abstract

Marchesi, Vivian Rodrigues; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. (Advisor) **3d Rock Mass Geomechanical Modeling to Excavated Slope Bi-Dimensional Stability Analysis at AHE-Simplício Power House.** Rio de Janeiro, 2008. 129p. Msc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In geotechnical engineering, the knowledge of geomechanical subsurface properties is fundamental to stability analyses. The usual practice is that a geologist/geotechnical engineer does this distribution estimate. The professional makes some geologic-geotechnical sections based on his/her experience and by the observation of field/laboratory investigations data. But these 2D sections cannot take spatial distribution. To solve this problem and provide a better global comprehension of rock mass, this work presents a study of 3D property distribution. The geological modeler PETREL™ has been used to do a geostatistical estimate of RMR and fracture density spatial variety at the rock mass where the AHE Simplício's power house will be installed. This distribution has been estimated based on data linked to the boreholes, spatially arranged at the model. The geometry of the future excavated surface was introduced in the model. The purpose was to carry out a study to find the critical quality section of the model related to the excavated slopes. This section was extracted with its RMR value distribution. Before the stability analysis, the resistance parameters  $c$  and  $\phi$  were calculated to every point on this section from the RMR correlations. The slope stability of the critical section was calculated in a program where the resistance parameters can vary point by point. The conventional rock slope stability analysis has been done too. At the end of the study, the first analysis was compared against the last one, proving the importance of the subsurface tridimensional modeling.

## Palavras-chave

3D Geomechanical Modeling; Rock Slope Stability; Geostatistics; Ordinary Kriging.



# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>20</b>
1.1. Motivação e objetivos	20
1.2. Estrutura da dissertação	21
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>23</b>
2.1. Histórico da modelagem	23
2.1.1. Modelagem geométrica e estimativa espacial de distribuição de propriedades	32
<b>3 Caracterização e classificação do maciço em estudo</b>	<b>37</b>
3.1. Descrição da região de estudo e do projeto a ser implantado	37
3.1.1. Geologia local	40
3.2. Dados recebidos	43
3.2.1. Levantamento topográfico	43
3.2.2. Projeto básico	46
3.2.3. Mapeamento geológico-estrutural	48
3.2.4. Perfis de sondagem	49
3.2.5. Caminhamento geoeletrico	50
3.2.6. Ensaios de laboratório	53
3.3. Tratamento dos dados para a caracterização e a classificação do maciço	54
3.3.1. Determinação dos limites da área de estudo	55
3.3.2. Caracterização e classificação do maciço	56
3.3.2.1. Estudo do sistema de fraturamento do maciço	57
3.3.2.2. Classificação do maciço rochoso no sistema RMR-1989	59
<b>4 Modelagem geomecânica tridimensional no PETREL™</b>	<b>67</b>
4.1. Preparação dos arquivos de entrada	67
4.1.1. Arquivos de pontos	68
4.1.2. Arquivos de geometria e dados dos furos de sondagem	69
4.1.3. Arquivos de figuras	71
4.2. Modelagem geométrica	71
4.3. Modelagem de propriedades	77
4.3.1. Estimativa de fraturamento	79

4.3.2. Estimativa de RMR	86
4.4. Análise de resultados	88
<b>5 Análise de estabilidade dos taludes de escavação</b>	<b>94</b>
5.1. Análise estrutural	96
5.1.1. Análise de ruptura planar	97
5.1.2. Análise de tombamento	101
5.1.3. Análise de ruptura em cunha	104
5.1.4. Síntese dos resultados da análise estrutural	106
5.2. Análise estática	108
5.2.1. Ruptura planar	108
5.2.2. Ruptura em cunha	111
5.2.3. Ruptura complexa	112
<b>6 Conclusões e sugestões</b>	<b>117</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>119</b>
<b>Anexos</b>	<b>125</b>

## Lista de figuras

- Figura 2.1 – Representação de volumes através de *wireframe models* (Nascimento, 2001). 24
- Figura 2.2 – Modelagem geológica tridimensional da mina de Chuquicamata – Chile no VULCAN®, elaborada pelo setor de geotecnia da mina. a) Modelo do maciço rochoso; b) Estrutura da escavação em 1998 (Adaptado de Hoek, 1999). 26
- Figura 2.3 – Modelo geométrico do maciço do Morro Dois Irmãos. Observar os litotipos: lilás - gnaisse facoidal; marrom – kinzigito e; amarelo – quartzito. Em azul é apresentado o traço de falha regional e em cinza o túnel Zuzu Angel (Nascimento, 2001). 28
- Figura 2.4 – Fluxograma do processo de modelagem de GSIS. (Turner, 2006). 32
- Figura 2.5 – Modelo tridimensional com base em números variados de furos de sondagem: a) com todos os furos disponíveis; b) com 90% dos furos; c) com 50% dos furos (Adaptada de Hack *et al.*, 2006. 34
- Figura 2.6 – O conceito de tipos de clientes (Turner, 2006). 34
- Figura 2.7 – Semivariograma com ajuste de modelo esférico (PETREL™). 36
- Figura 3.1 – Mapa do AHE-Simplício e vias de acesso (adaptado de Marinho, 2007). 37
- Figura 3.2 – Perspectiva elaborada em ambiente CAD 3D contendo o maciço em estudo e as escavações previstas no projeto básico. 38
- Figura 3.3 – Fotografia da escavação da casa de força e retaludamento a montante (11/03/08). 39
- Figura 3.4 – Localização da Faixa Ribeira em Planta e Corte (modificado de Campanha & Neves, 2004). 40
- Figura 3.5 – Alinhamento topográfico ENE marcante do Lineamento de Além-Paraíba entre os municípios de Além Paraíba e Sapucaia (Google Earth, 17/12/2007). 41
- Figura 3.6 – Mapa geológico do Lineamento de Além Paraíba (modificado de FURNAS). 42
- Figura 3.7 – Planta topográfica da área de contorno da casa de força do AHE-Simplício (FURNAS). 45
- Figura 3.8 – Planta de escavação da casa de força (FURNAS). 47

Figura 3.9 – Exemplo de estereogramas da área de Simplício (Valeriano, 2006).	48
Figura 3.10 – Esboço geológico da área do AHE-Simplício (Valeriano, 2006).	49
Figura 3.11 – Locação dos caminhamentos geoeletricos no entorno da casa de força (Marchioreto, 2006).	51
Figura 3.12 – Caminhamento geoeletrico em arranjo dipolo-dipolo (Marchioreto, 2006).	51
Figura 3.13 – Exemplo de seção geoeletrica obtida de caminhamento em arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 20 metros (adaptado de Marchioreto, 2006).	52
Figura 3.14 – Limites da área de estudo e escavações previstas.	56
Figura 3.15 – Estimativa de planos médios de fraturamento no entorno da casa de força.	58
Figura 3.16 – Disposição das famílias de fraturas na área da casa de força (11/03/2008).	59
Figura 3.17 – Correlação entre RQD e número de faturas por metro .	62
Figura 3.18 – Padrões de rugosidade e regularidade de paredes de fraturas (adaptado de ISRM, 1978).	64
Figura 4.1 – Arquivo de pontos das curvas de nível da superfície do terreno.	68
Figura 4.2 – Arquivo <i>well heads</i> dos furos de sondagem da área de estudo.	69
Figura 4.3 – Arquivo de trajetória para o furo de sondagem SR-01.	70
Figura 4.4 – Arquivo de distribuição dos dados ao longo da sondagem SR-02.	70
Figura 4.5 – Corte da seção geoeletrica CE2-DP20 para limites do modelo.	71
Figura 4.6 – Visualização espacial de dados de entrada.	72
Figura 4.7 – Etapas de geração do <i>grid</i> do modelo.	73
Figura 4.8 – Horizontes delimitadores das zonas de solo e rocha.	74
Figura 4.9 – Discretização de camadas para o horizonte de rocha.	75
Figura 4.10 – Superfície de escavação da casa de força e retaludamento a montante.	76
Figura 4.11 – Locação das seções geoeletricas.	76
Figura 4.12 – Propriedades de entrada dos furos de sondagem.	78
Figura 4.13 – Formatos de apresentação das propriedades de um furo de sondagem.	79
Figura 4.14 – <i>Upscaling</i> dos dados de grau de fraturamento.	80
Figura 4.15 – Transformações aplicadas aos dados, com ênfase na remoção de tendência em z.	81
Figura 4.16 – Representação de anisotropia geométrica.	82

Figura 4.17 – Janela de confecção dos variogramas de fraturamento, com apresentação do variograma da direção de maior alcance.	83
Figura 4.18 – Parâmetros de cálculo de semivariograma a partir de amostras irregularmente espaçadas. (Modificada de Camargo, 1997).	84
Figura 4.19 – Distribuição espacial estimada do fraturamento para o maciço em estudo.	86
Figura 4.20 – Janela de confecção dos variogramas de RMR, com ênfase no variograma da direção de maior alcance.	87
Figura 4.21 – Distribuição espacial estimada do RMR no maciço em estudo.	88
Figura 4.22 – Seção estimada de grau de fraturamento em relação à superfície de escavação.	89
Figura 4.23 – Seção estimada de RMR em relação à superfície de escavação.	90
Figura 4.24 – Comparação entre seção estimada de fraturamento e seção geométrica.	91
Figura 4.25 – Detalhe da região da caixa de falha encontrada durante as escavações no local indicado pela modelagem como um bolsão fraturado e de má qualidade geomecânica.	93
Figura 5.1 – Tipos de instabilidade de taludes rochosos (Adaptada de Hoek & Bray, 1981).	94
Figura 5.2 – Planta de localização dos taludes de corte.	95
Figura 5.3 – Cortes dos taludes de escavação (cotas em metros).	96
Figura 5.4 – Projeção de taludes de corte da casa de força e famílias de fraturas.	97
Figura 5.5 – Critérios de ruptura planar (Adaptado de Goodman, 1989 e Hoek & Bray, 1981).	98
Figura 5.6 – Análise de ruptura planar no talude Oeste da casa de força.	99
Figura 5.7 – Análise de ruptura planar para talude o Sul da casa de força.	100
Figura 5.8 – Análise de ruptura planar para o talude Norte da casa de força.	100
Figura 5.9 – Condições de tombamento ilustradas em corte e estereograma (modificada de Goodman, 1989).	101
Figura 5.10 – Análise de tombamento para talude Oeste da casa de força.	102
Figura 5.11 – Análise de tombamento para o talude Sul da casa de força.	103
Figura 5.12 – Análise de tombamento para talude Norte da casa de força.	103
Figura 5.13 – Condições de ruptura em cunha ilustradas em corte e estereograma.	104
Figura 5.14 – Análise de ruptura em cunha para o talude Oeste da casa de força.	105

Figura 5.15 – Análise de ruptura em cunha para o talude Sul da casa de força.	105
Figura 5.16 – Análise de ruptura em cunha para o talude Norte da casa de força.	106
Figura 5.17 – Síntese de situações críticas possíveis – a) Ruptura planar do talude Sul em função da família 1; b) Ruptura por tombamento do talude Norte em função da família 1; c) Ruptura em cunha do talude Sul em função da interseção entre as famílias 1 e 2.	107
Figura 5.18 – Análise de ruptura planar do talude Sul com a família 1.	109
Figura 5.19 – Análise de sensibilidade do talude Sul em relação à presença de coesão.	110
Figura 5.20 – Análise de sensibilidade do talude Sul ao preenchimento com água.	110
Figura 5.21 – Vistas da provável cunha formada pelas famílias 1 e 2 no talude Sul.	111
Figura 5.22 – Seção de corte projetada no AutoCAD® para entrada no SLIDE®.	114
Figura 5.23 – Arquivo de entrada de dados de resistência do maciço no SLIDE®.	114
Figura 5.24 – Dados de entrada da seção do talude Oeste no SLIDE®.	115
Figura 5.25 – Análise de estabilidade do talude Oeste por Janbu simplificado.	116
Figura A1 – Perfil descritivo de sondagem da campanha de 1995 a 1996 (FURNAS).	125
Figura A2 – Descrição de perfil de sondagem da campanha de 2006 a 2007 (FURNAS).	126

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Modeladores geológicos comerciais.	26
Tabela 3.1 – Campanha de ensaios geomecânicos (Adaptado de FURNAS).	53
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (Adaptado de FURNAS).	54
Tabela 3.3 – Leituras de campo de feições estruturais efetuadas nos arredores da casa de força.	57
Tabela 3.4 – Orientação das famílias componentes do sistema de fraturamento da casa de força.	58
Tabela 3.5 – Comparação entre resistência à compressão uniaxial, alteração e coerência de testemunhos de rocha gnáissica.	61
Tabela 3.6 – Atribuição de faixas de pesos do RMR para a resistência à compressão uniaxial a partir dos níveis de alteração e coerência.	61
Tabela 3.7 – Número de fraturas por metro, adotado em função do grau de fraturamento.	62
Tabela 3.8 – Alteração e preenchimento das descontinuidades - campanha 2006 a 2007.	65
Tabela 3.9 – Comparação entre o grau de decomposição da rocha (1994 a 1995) e a descrição das paredes (2006 a 2007).	65
Tabela 3.10 – Atribuição de pesos RMR para as condições das fraturas.	66
Tabela 3.11 – Classificação, ao longo do furo de sondagem SR-16, no sistema RMR-1989.	66
Tabela 5.1 – Planos médios dos taludes de corte da casa de força.	96
Tabela 5.2 – Ângulo de atrito médio obtido de ensaio de plano inclinado (adaptado de Armelin & Oliveira, 2007).	98
Tabela 5.3 – Síntese das possíveis formas de ruptura e potenciais associados (onde *** = risco elevado; ** = risco moderado e; * = baixo risco)	106
Tabela 5.4 – Atribuição de $c$ e $\phi$ aos valores de RMR-1989.	113
Tabela 5.5 – Tabela de valores de $c$ e $\phi$ disponíveis na literatura (compilado de Gomes da Silva, 2006).	115
Tabela B1a – Classificação no RMR-1989, parte a. (Bieniawski, 1989)	127
Tabela B1b – Classificação no RMR-1989, parte b (Bieniawski, 1989).	128

Tabela C1 – Resumo das etapas de caracterização e classificação RMR-1989 do maciço ao longo do furo de sondagem SR-16.

129



## Lista de símbolos e abreviaturas

a = alcance da correlação espacial de dados

A = grau de alteração

c = coesão

C = coerência

cm = centímetros

D = grau de decomposição

D = grau de alteração e preenchimento das descontinuidades

e = espaçamento

$f$  = número de fraturas por metro

g = aceleração da gravidade

h = altura

H = altura do talude

Km = quilômetros

KN = kilonewtons

KPa = quiloPascal

m = metro

$m$  = média

MD = profundidade de medida

mm = milímetros

MPa = megaPascal

n = enésimo

P = pólo

RQD = índice de qualidade da rocha

s = segundos

S = rugosidade

t = toneladas

$x_i$  = ponto de coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$

$Z_{x_i}$  = valor amostrado de uma propriedade em um ponto  $x_i$

$Z^*_{x_i}$  = valor estimado de uma propriedade em um ponto  $x_i$

% = porcentagem

° = graus

' = minutos

$\alpha$  = coeficiente de aceleração sísmica

$\alpha$  = azimute da elipse de anisotropia

$\gamma$  = peso específico

$\lambda_i$  = peso atribuído ao valor de  $Z_{xi}$  para a interpolação por krigagem

$\sigma_{ci}$  = resistência à compressão simples

$\phi$  = ângulo atrito

$\psi_f$  = ângulo de mergulho da face do talude

$\psi_i$  = ângulo de mergulho do vetor de interseção entre planos de fratura

$\psi_p$  = ângulo de mergulho do plano de fratura

“O caos é uma ordem por decifrar.” (José Saramago)