

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**José Enrique Gutiérrez Ramírez**

**Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomecânico RQD no  
Depósito Mineral Animas-Peru**

**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: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro  
Março de 2009



**José Enrique Gutiérrez Ramírez**

**Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomecânico RQD no  
Depósito Mineral Animas-Peru**

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

**Prof. Celso Romanel**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Franklin dos Santos Antunes**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr**

Laboratório de Engenharia Civil - UENF

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Março de 2009.

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

### **José Enrique Gutiérrez Ramírez**

Graduou-se em engenharia na Universidade Nacional de Engenharia (UNI), em Lima - Peru, no curso de Engenharia Geológica. Trabalhou em empresas de mineração na área de modelagem geológica e avaliação de jazidas, com aplicação de métodos geoestatísticos.

#### Ficha Catalográfica

Gutiérrez Ramírez, José Enrique

Variabilidade espacial do parâmetro geomecânico RQD no depósito Animas - Peru / José Enrique Gutiérrez Ramírez; orientador: Celso Romanel - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2009.

v.,167 f. : il. ; 29.7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Tese. 2. Krigagem ordinária. 3. Modelagem 3D. 4. Simulação seqüencial Gaussiana. 5. Modelo de blocos. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

Ao professor Celso Romanel, pela orientação e amizade conquistada.

À minha noiva, Yajaira, agradecido pelo carinho, amor e companheirismo, em cada dia desses dois longos anos.

Aos meus pais, agradeço por todo o carinho e o incentivo que sempre me proporcionaram, incondicionalmente.

À minha avó Rosa, a quem sempre tive no meu coração.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-RIO pela infraestrutura e ensinamentos.

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

À mineradora BATEAS SAC pela cessão dos dados utilizados nesse estudo, em especial “a colaboração dos engenheiros Enrique Velarde e Arturo Salvador.

À Deus, criador de todas as coisas, fonte de fé e esperança.

## Resumo

Gutiérrez Ramírez, José Enrique. Romanel, Celso (Orientador). **Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomécânico RQD no Depósito Mineral Animas-Peru**. Rio de Janeiro, 2009. 167p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação desenvolve um estudo sobre a aplicação das técnicas de modelagem geológica e análises geoestatísticas na avaliação da variabilidade espacial do parâmetro geotécnico (RQD) no depósito Animas – Peru. O estudo das cinco litologias presentes no depósito permitirá melhorar o conhecimento da qualidade do maciço rochoso em regiões não-amostradas. Nesta pesquisa foram empregados o método da krigagem ordinária, para estimação da variabilidade espacial, e a simulação seqüencial Gaussiana, para simulação da distribuição dos valores de RQD. Ambos os resultados foram comparados com um técnica de estimativa clássica - o método do inverso do quadrado da distância. Verificou-se que os resultados provenientes do método clássico e da krigagem ordinária são bastante semelhantes entre si, enquanto que valores produzidos pela simulação Gaussiana apresentaram acentuadas diferenças em todas as litologias analisadas. No estudo foram utilizados os programas computacionais Datamine, para modelagem geológica, e Isatis v.7 para análises geoestatísticas.

## Palavras-chave

Krigagem ordinária. Modelagem 3D. Simulação seqüencial Gaussiana. Modelo de blocos.

## Abstract

Gutiérrez Ramírez, José Enrique. Romanel Celso (advisor). **Spatial Variability of the Geomechanical Parameter RQD at the Ore Deposit Animas – Peru**. Rio de Janeiro, 2009. 167p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis investigates the application of geological modeling techniques and geostatistical methods for estimation of the spatial variability of the geotechnical parameter RQD at the ore deposit Animas - Peru. The study of five different rock layers will permit the improvement of the overall knowledge about the quality of the rock mass, mainly in the regions where the existence of experimental samples is limited or not available at all. In this research the ordinary kriging method was used for studies of spatial variability and the Gaussian sequential simulation for analysis of the distribution of RQD values throughout the rock mass. The results of both methods were compared with those calculated on basis of a classical estimation technique - the method of the inverse of the squared distances. It was concluded that the values obtained by ordinary kriging and the classical method are quite similar between themselves but the results with Gaussian simulation show significant differences in all the rock layers investigated. In this research the following computational programs were used: Datamine, for the geologic modeling, and Isatis v.7, for geostatistical analyses.

## Keywords

Ordinary kriging. 3D modeling. Gaussian sequential simulation. Block model.

## Sumário

1 . INTRODUÇÃO	17
1.1 Parâmetro RQD	19
1.2 Variabilidade espacial	21
1.3 Objetivos e estrutura da dissertação	23
2 . LOCALIZAÇÃO, FÍSIOGRAFIA E GEOLOGIA	24
2.1. Localização	24
2.2. Relevo e clima	26
2.3. Geologia	25
2.3.1. Formação Sencca	26
2.3.2. Grupo Tacaza	26
2.3.3. Depósitos quaternários	27
2.3.4. Geologia estrutural	28
2.3.5. Gênese e tipo do depósito mineral	28
3 . METODOLOGIAS ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICAS	32
3.1. Análise estatística	32
3.1.1. Estatística descritiva	32
3.1.2. Modelos de distribuição de probabilidades	36
3.2. Análise geoestatística	38
3.2.1. Funções aleatórias estacionárias	38
3.2.2. Análises da variabilidade espacial	39
3.2.3. Estimativas clássicas	53
3.2.4. Estimativas geoestatísticas	55
3.2.5. Incertezas geoestatísticas	63
3.2.6. Simulações geoestatísticas	65
4 . MODELAGEM	72
4.1. Banco de dados	73
4.2. Modelagem geométrica e amostragem	74
4.2.1. Metodologia da amostragem do parâmetro RQD	74
4.2.2. Critérios da modelagem geológica	79
4.3. Modelagem numérica	81
4.3.1. Malhas de blocos	82
4.3.2. Regularização	83
4.3.3. Modelagem numérica	86
4.3.4. Validação cruzada	92
4.3.5. Métricas para análises comparativas	94
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	96
5.1. Modelagem geológica da área	96
5.1.1. Modelagem geométrica	101

5.1.2. Modelagem numérica	108
5.2. Estatística básica	115
5.2.1. Estatística descritiva	115
5.2.2. Estatísticas das amostras regularizadas originais e desagregadas	115
5.2.3. Transformação a uma variável normalmente distribuída por litologia	118
5.3. Variografia	119
5.3.1. Determinação dos variogramas experimentais por litologia	119
5.3.2. Modelagem dos variogramas experimentais por litologia	121
5.4. Validação cruzada e vizinhança de estimativa	137
5.4.1. Validação cruzada dos dados originais	137
5.4.2. Validação cruzada dos dados transformados	143
5.5. Análises dos resultados do parâmetro RQD por IQD, OK e SGS	149
5.5.1. Estimativa do RQD pelo método IQD	149
5.5.2. Estimativa do RQD pelo método OK	150
5.5.3. Estimativa do RQD pelo método SGS	150
5.5.4. Comparação dos resultados	151
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

## Lista de figuras

Figura 1-1 Modelagem geológica – numérica de formações geológicas .....	23
Figura 2-1 Localização da área de estudo. ....	24
Figura 2-2 Mina Cailloma .....	25
Figura 2-3 Mapa geológico da mina Cailloma. ....	27
Figura 2-4 Formação do veio Animas. ....	30
Figura 2-5 Formação da caldeira Cailloma. ....	30
Figura 2-6 Mapa dos veios da mina Cailloma. ....	31
Figura 3-1 Comportamento das medidas de correlação $\tilde{C}(h), \tilde{\rho}(h), \tilde{\gamma}(h)$ . ....	42
Figura 3-2 Esquema básico de uma função variograma. ....	43
Figura 3-3 Características do variograma. ....	45
Figura 3-4 Tipos de anisotropia variográfica; a) geométrica; b) zonal. ....	46
Figura 3-5 Modelos variográficos com patamar. ....	47
Figura 3-6 Modelo aleatório. ....	49
Figura 3-7 Modelo sem patamar. ....	50
Figura 3-8 Dessegregação em células ( Isaaks & Srivastava, 1989). ....	52
Figura 3-9 Potência $\beta$ do método IQD (Villanueva, 2000). ....	54
Figura 3-10 Método da poligonal a) mediatrizes; b) bissetrizes. ....	55
Figura 3-11 Avaliação de um bloco sub-dividido em 4 sub-blocos .....	63
Figura 3-12 Passos para uma simulação. ....	67
Figura 3-13 Diagrama de Venn. ....	68
Figura 4-1 Fluxo da modelagem (modificado a partir de S. Houlding, 1994). ....	73
Figura 4-2 Medição de parâmetros geológicos – geotécnicos nas sondagens. ....	76
Figura 4-3 Testemunhos serrados longitudinalmente. ....	76
Figura 4-4 Procedimentos utilizados para a determinação do RQD .....	78
Figura 4-5 Método dos perfis ou das seções (Yamamoto, 1996) .....	80
Figura 4-6 Tipos de modelos de blocos .....	83
Figura 4-7 Bloco unitário ortogonal .....	83
Figura 4-8 Regularização de uma sondagem (Journel & Huijbregts, 1989). ....	84
Figura 4-9 Processo estocástico .....	87
Figura 4-10 Processo de estimativa através de Krigagem .....	88
Figura 4-11 Processo de simulação geoestatística – SGS. ....	89
Figura 4-12 Volume de busca .....	90
Figura 4-13 Bloco discretizado .....	92

Figura 5-1 Sondagens efetuadas no veio Animas.....	97
Figura 5-2 Vista vertical (Leste-Oeste) das sondagens efetuadas no veio Animas .....	98
Figura 5-3 Vista vertical (Norte-Sul) das sondagens efetuadas no veio Animas.....	98
Figura 5-4 Níveis 7,8 e 9 do veio Animas.....	99
Figura 5-5 Zonas de falha no nível 7.....	99
Figura 5-6 Zonas de falha no nível 8.....	100
Figura 5-7 Zonas de falha do nível 9.....	100
Figura 5-8 Topografia 3D da área de produção .....	104
Figura 5-9 Modelo geológico AGV .....	105
Figura 5-10 Modelo geológico ANDPORF .....	105
Figura 5-11 Modelo geológico BX.....	105
Figura 5-12 Modelo geológico TBLP .....	106
Figura 5-13 Modelo geológico das zonas de falha do veio Animas.....	106
Figura 5-14 Modelo geológico V e suas zonas de falha .....	107
Figura 5-15 Conjunto de modelos geológicos .....	107
Figura 5-16 Amostras regularizadas da litologia AGV .....	109
Figura 5-17 Amostras regularizadas da litologia ANDPORF .....	109
Figura 5-18 Amostras regularizadas da litologia BX.....	110
Figura 5-19 Amostras regularizadas da litologia TBLP.....	110
Figura 5-20 Amostras regularizadas da litologia V .....	110
Figura 5-21 Malha de blocos da litologia AGV .....	112
Figura 5-22 Malha de blocos da litologia ANDPORF.....	113
Figura 5-23 Malha de blocos da litologia BX.....	113
Figura 5-24 Malha de blocos da litologia TBLP.....	114
Figura 5-25 Malha de blocos da litologia V .....	114
Figura 5-26 Histograma das amostras da litologia AGV .....	116
Figura 5-27 Histograma das amostras da litologia ANDPORF .....	116
Figura 5-28 Histograma das amostras da litologia BX.....	117
Figura 5-29 Histograma das amostras da litologia TBLP .....	117
Figura 5-30 Histograma das amostras da litologia V.....	118
Figura 5-31 Rotação de eixos – variograma direcional .....	121
Figura 5-32 Variograma omnidirecional da litologia AGV .....	122
Figura 5-33 Variograma omnidirecional da litologia ANDPORF .....	122
Figura 5-34 Variograma omnidirecional da litologia BX.....	123
Figura 5-35 Variograma omnidirecional da litologia TBLP.....	123
Figura 5-36 Variograma omnidirecional da litologia V .....	124
Figura 5-37 Variograma omnidirecional da litologia AGV .....	125

Figura 5-38 Variograma omnidirecional da litologia ANDPORF .....	125
Figura 5-39 Variograma omnidirecional da litologia BX.....	126
Figura 5-40 Variograma omnidirecional da litologia TBLP.....	126
Figura 5-41 Variograma omnidirecional da litologia V .....	127
Figura 5-42 Variograma na direção 1 da litologia ANDPORF.....	128
Figura 5-43 Variograma na direção 2 da litologia ANDPORF.....	128
Figura 5-44 Variograma na direção 3 da litologia ANDPORF.....	129
Figura 5-45 Variograma na direção 1 da litologia TBLP .....	129
Figura 5-46 Variograma na direção 2 da litologia TBLP .....	130
Figura 5-47 Variograma na direção 3 da litologia TBLP .....	130
Figura 5-48 Variograma na direção 1 da litologia V .....	131
Figura 5-49 Variograma na direção 2 da litologia V .....	131
Figura 5-50 Variograma na direção 3 da litologia V .....	132
Figura 5-51 Variograma na direção 1 da litologia ANDPORF .....	133
Figura 5-52 Variograma na direção 2 da litologia ANDPORF.....	133
Figura 5-53 Variograma na direção 3 da litologia ANDPORF.....	134
Figura 5-54 Variograma na direção 1 da litologia TBLP .....	134
Figura 5-55 Variograma na direção 2 da litologia TBLP .....	135
Figura 5-56 Variograma na direção 3 da litologia TBLP .....	135
Figura 5-57 Variograma na direção 1 da litologia V .....	136
Figura 5-58 Variograma na direção 2 da litologia V .....	136
Figura 5-59 Variograma na direção 3 da litologia V .....	137
Figura 5-60 Validação cruzada das amostras da litologia AGV.....	139
Figura 5-61 Validação cruzada das amostras da litologia ANDPORF .....	140
Figura 5-62 Validação cruzada das amostras da litologia BX.....	141
Figura 5-63 Validação cruzada das amostras da litologia TBLP .....	142
Figura 5-64 Validação cruzada das amostras da litologia V.....	143
Figura 5-65 Validação cruzada das amostras transformadas (AGV) .....	145
Figura 5-66 Validação cruzada das amostras transformados (ANDPORF) .....	146
Figura 5-67 Validação cruzada das amostras transformados (BX).....	147
Figura 5-68 Validação cruzada das amostras transformados (TBLP) .....	148
Figura 5-69 Validação cruzada das amostras transformados (V).....	149
Figura 5-70 Distribuição do RQD na litologia AGV.....	153
Figura 5-71 Distribuição do RQD na litologia ANDPORF .....	154
Figura 5-72 Distribuição do RQD na litologia BX.....	154
Figura 5-73 Distribuição do RQD na litologia TBLP .....	155
Figura 5-74 Distribuição do RQD na litologia V.....	155

## Lista de Tabelas

Tabela 1-1 Programas para modelagem geológica – geoestatística .....	24
Tabela 4-1 Classificação do índice RQD .....	78
Tabela 5-1 Campos da base de dados da mineradora Bateas .....	96
Tabela 5-2 Características dos perfis verticais .....	102
Tabela 5-3 Características dos perfis horizontais .....	103
Tabela 5-4 Número de amostras por códigos litológicos.....	103
Tabela 5-5 Número de amostras regularizadas por código litológico .....	108
Tabela 5-6 Características do modelo da litologia AGV .....	111
Tabela 5-7 Características do modelo da litologia ANDPORF .....	111
Tabela 5-8 Características do modelo da litologia BX.....	111
Tabela 5-9 Características do modelo da litologia TBLP.....	112
Tabela 5-10 Características do modelo da litologia V.....	112
Tabela 5-11 Estatística descritiva das amostras regularizadas .....	115
Tabela 5-12 Comparação entre valores originais e estimativas Gaussianas .....	119
Tabela 5-13 Parâmetros utilizados na determinação do variograma experimental.....	119
Tabela 5-14 Parâmetros utilizados na determinação dos variogramas direcionais .....	120
Tabela 5-15 Atitude dos variogramas direcionais .....	120
Tabela 5-16 Modelos variográficos omnidirecionais - dados originais.....	121
Tabela 5-17 Modelos variográficos omnidirecionais - dados transformados. ....	124
Tabela 5-18 Modelos variográficos direcionais – dados originais.....	127
Tabela 5-19 Modelos variográficos direcionais – dados transformados .....	132
Tabela 5-20 Volume de busca por código litológico.....	137
Tabela 5-21 Características das amostras utilizadas na estimativa (OK-IQD) .....	138
Tabela 5-22 Número de sub-blocos por código litológico.....	138
Tabela 5-23 Coeficiente de correlação por código litológico .....	138
Tabela 5-24 Estatística do erro reduzido (ER) por código litológico .....	138
Tabela 5-25 Volume de busca por código litológico.....	144
Tabela 5-26 Características do número de amostras na estimativa de KS.....	144
Tabela 5-27 Número de sub-blocos por código litológico.....	144

Tabela 5-28 Coeficiente de correlação por código litológico .....	144
Tabela 5-29 Estatística do erro reduzido (ER) por código litológico .....	144
Tabela 5-30 Estatística descritiva do RQD estimados pelo método IQD .....	150
Tabela 5-31 Estatística descritiva do RQD estimados com o método OK .....	150
Tabela 5-32 Estatística do RQD simulados pelo SGS (50 simulações) .....	150
Tabela 5-33 Estatística do RQD simulados pelo SGS (100 simulações).....	151
Tabela 5-34 MAPE com o RQD obtido pela OK .....	152
Tabela 5-35 MAPE modificando os modelos variográficos no método SGS.....	152
Tabela 5-36 MAPE modificando a vizinhança no método SGS .....	152

## Lista de símbolos

### Caracteres latinos

$a$  - Amplitude variográfica nos modelos de variograma

$A$  - Amplitude dos dados na análise estatística

$C$  - Patamar dos modelos variográficos

$Cov$  - Covariância

$c_{AA}$  - Covariância entre os pontos na área  $A$

$c_{UV}$  - Covariância entre as variáveis  $U$  e  $V$

$c(h)$  - Função covariância

$C_0$  - Efeito pepita nos modelos variográficos

$Cov$  - Covariância espacial entre duas variáveis

$CV$  - Coeficiente de variação

$d_i$  - Distância do centro do bloco à amostra

$DG$  - Desvio geométrico

$E\{V(x)\}$  - Valor esperado da variável  $V$

$f(x)$  - Função densidade de probabilidade

$h$  - Distância entre dois pontos de amostragem

- $k$  - Coeficiente percentílico de curtose
- $m$  - Média aritmética das amostras
- $M$  - Mediana de um conjunto de dados
- MG - Média geométrica
- $n$  - Número de dados nas análises estatísticas
- $p$  - Fator de ponderação em técnica de dessegregação.
- Pr - Probabilidade de ocorrência de um evento
- $Q_n$  - Quartis de uma distribuição
- $R(x_0)$ - Erro da estimação
- $s_i$  - Área poligonal
- $v_1, \dots, v_n$  - Valores amostrados
- $V$  - Estimativas da variável regionalizada V
- $\hat{V}$  - Valor estimado da variável V
- $\tilde{V}_A$  - Valor estimado da área A
- $\tilde{V}_{dados}(x)$  - Valor estimado com krigagem simples
- $\tilde{V}_{sim}$  - Valor simulado condicionado

$\tilde{V}_{ucsim}$  - Valor simulado não-condicionado

Var - Variância

$X$  - Variável contínua

$w_i$  - Fatores de ponderação

### **Caracteres gregos**

$\lambda$  - Valor esperado de uma distribuição

$\lambda_0$  - Fator de ajuste da estimativa

$\sigma$  - Desvio padrão populacional

$\sigma^2$  - Variância populacional

$\sigma_{ok}^2$  - Variância da krigagem Ordinaria

$\sigma_R^2$  - Variância dos erros da krigagem

$\sigma_{sk}^2$  - Variância da krigagem simples

$\varphi(A, íc)$  - Distribuição espacial de probabilidades

$\mu$  - Média aritmética populacional no modelo de distribuição normal

$\mu_1, \mu_2$  - Multiplicadores de Lagrange

$\rho(h)$  - correlograma

$\gamma(h)$  - Função variograma

$\gamma_{UV}(h)$  - Função variograma cruzado das variáveis  $U$  e  $V$

$\&$  - Valor proporcional constante