

1. INTRODUÇÃO

O conceito de “estimação” em ciências geológicas teve sua origem há centenas de anos quando os povos primitivos emitiam opiniões a respeito da distribuição de minérios em jazidas a partir de conjecturas baseadas em aspectos visuais (cor, brilho), forma do minério, peso e outras medidas empíricas.

Com o surgimento da Química Analítica e o desenvolvimento das matemáticas, vários métodos de estimação para cubagem de jazidas minerais foram propostos, alguns dos quais, conhecidos como métodos clássicos, são até hoje usados como o método dos polígonos, o método da triangularização, o método dos inversos das distâncias ponderadas, o método das curvas de isovalores, entre outros.

Os métodos clássicos são limitados na avaliação da variabilidade espacial das amostras e omissos quanto à quantificação dos erros que inevitavelmente se cometem no processo.

A formação de materiais geológicos é um fenômeno natural complicado onde vários fatores complexos, físicos e químicos, interagem simultaneamente. Em consequência, a estimativa da continuidade espacial de parâmetros geotécnicos ou de seus indicadores (índice RQD, como neste trabalho) é bastante difícil de ser realizada, salvo nos casos em que idealizações, como a hipótese de homogeneidade, são introduzidos para facilitar (ou muitas vezes permitir) o desenvolvimento analítico do modelo.

Métodos geoestatísticos, classe particular dos métodos estocásticos, foram desenvolvidos na década de 60 pelo engenheiro francês Matheron (1962, 1970) para o estudo de variáveis regionalizadas, onde considerações sobre a continuidade no espaço são essenciais para o sucesso das estimativas. Nos métodos geoestatísticos, baseados na teoria de funções aleatórias, sobressai o conceito de “variograma” que expressa a correlação entre pares de “pontos” (valores da variável amostrados em diferentes posições) e não encara o valor do “ponto” de maneira isolada, capturando, desta forma, informações sobre a variabilidade espacial como direções e distâncias de continuidade.

Métodos geoestatísticos de estimação baseados em variogramas, chamados de métodos de krigagem, não apresentam viés de estimativas (“bias”) e garantem que as variâncias dos erros de estimação são mínimas.

Geoestatística, inicialmente utilizada em áreas da engenharia de minas e geologia, é hoje amplamente empregada em diversos outros campos de conhecimento como na engenharia florestal, hidrogeologia, engenharia de petróleo, geografia, engenharia ambiental, ecologia, etc.

Nos empreendimentos envolvendo minas subterrâneas é importante definir-se a distribuição espacial das litologias que formam um depósito mineral, com o propósito de melhorar o fluxo de informações entre as áreas de geologia e da engenharia de mineração, buscando tornar a exploração mais eficiente sob os pontos de vista técnico, operacional, econômico e da conservação do meio ambiente.

1.1

Parâmetro RQD

Durante a fase inicial de um projeto, as informações sobre os parâmetros da rocha, relacionados com sua resistência mecânica e características hidrogeológicas, devem estar disponíveis, sendo que a utilização de um sistema de classificação, segundo critérios geomecânicos, auxilia de forma considerável a interpretação da estabilidade do maciço rochoso (Hoek, 2000).

As massas rochosas apresentam-se geralmente afetadas por uma série de planos de descontinuidade, ou de fraqueza, que separam os blocos da matriz rochosa. Segundo Soares (1998), a disposição arquitetural ou arranjo espacial das rochas, ou porções delas, e como se relacionam entre si, é definido como estrutura do maciço rochoso. Como meio descontínuo, os maciços apresentam um comportamento bastante complexo que, de uma forma simplificada, pode ser estudado e classificado em função de suas características para diferentes aplicações. Com este propósito, surgiram as classificações geomecânicas que fornecem índices de qualidade, mediante a observação direta das características dos maciços através da execução de ensaios simples.

O *Rock Quality Designation* (RQD) foi introduzido como índice de qualidade da rocha, numa época – década de 1960 - em que informações sobre qualidade eram

disponíveis somente através de descrições geológicas e pelo percentual do testemunho recuperado (Deere & Deere 1987).

Deere (1963) publicou um texto intitulado *Technical Description of Cores for Engineering Purposes* onde antecipava o conceito de RQD, formalmente definido em 1967, juntamente com colegas da universidade de Illinois, como uma estimativa quantitativa da qualidade do maciço rochoso através de testemunhos obtidos por sondagens (Deere & Deere, 1988). Neste processo, a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978) recomenda a utilização de barriletes duplos livres, de diâmetro mínimo NX (54,7mm), com um comprimento não superior a 2m.

O uso do RQD como uma medida geomecânica para a classificação de maciços de rocha fraturado é comumente usado por duas razões principais: a primeira é que se trata de uma medida relativamente fácil de ser obtida, a segunda é que se trata de um parâmetro universalmente aceito, permitindo comparações de medidas determinadas em diferentes lugares do mundo (Harrison, 1999). Entretanto, o RQD isoladamente não é suficiente para produzir uma descrição completa do maciço rochoso, por desconsiderar fatores como orientação da descontinuidade, tipo de preenchimento da descontinuidade, estado de tensão, etc. Com o decorrer do tempo, o RQD passou a ser empregado em outros sistemas de classificação como o RMR, Q e SRC.

O RMR é um sistema de classificação geomecânica proposto por Bieniawski (1989) que leva em consideração os seguintes parâmetros: resistência à compressão simples, RQD, espaçamento das descontinuidades, padrão das descontinuidades, influência da água subterrânea e a orientação relativa das descontinuidades. Com base no valor do RMR, é possível inferir o tempo de auto-sustentação de um maciço, bem como propor características da seção de escavação e dos métodos de suporte recomendados.

A partir da compilação de mais de 200 casos históricos de obras de escavações subterrâneas, Barton et. al. (1974) propuseram um novo sistema para quantificar o comportamento geomecânico de maciços rochosos - o sistema de classificação Q do Instituto Geotécnico da Noruega. Neste sistema, o parâmetro RQD representa a densidade de descontinuidades por volume unitário de maciço.

A classificação geomecânica SRC foi desenvolvida por Gonzáles de Vallejo (1985) e está baseado no RMR, considerando adicionalmente o estado de tensão do maciço rochoso, as condições construtivas do túnel e a utilização de dados determinados

em afloramentos. O SRC aplica um fator de correção ao RQD, dependendo do estado de tensão na fratura (compressão, extensão) e do grau de alteração das descontinuidades.

O parâmetro RQD também é considerado em algumas classificações geomecânicas para taludes como o índice SMR proposto por Romana (1997).

1.2

Variabilidade espacial

Parâmetros geomecânicos são determinados com base em amostras espacialmente distribuídas na região de interesse. Para estudar as características da variabilidade espacial desses parâmetros entre os pontos de amostragem têm sido aplicado, nos últimos anos, métodos geoestatísticos de análise.

Houlding (1994) propôs uma metodologia para a caracterização geotécnica do maciço rochoso de uma usina hidroelétrica, mostrando as vantagens que se obtém, através de uma visualização 3D, no projeto de uma escavação do entendimento do relacionamento espacial existente entre falhas e fraturas.

Gonzaga (1996) realizou uma análise da variabilidade espacial das propriedades mecânicas de um maciço rochoso a partir de medições *in situ*, investigando a variação do módulo de elasticidade longitudinal e da resistência à compressão axial em uma área do maciço rochoso gnáissico da vertente norte do morro Santa Marta, na cidade do Rio de Janeiro.

Xavier (1999) estudou a variação espacial do número de golpes do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) e do perfil do subsolo da Usina Nuclear Angra 2, no Rio de Janeiro. Foram realizadas análises geoestatísticas a 15 diferentes níveis de profundidade, com base em resultados de sondagem em 111 furos, numa área de 400m².

Ayalew, L & et. al. (2001) realizaram a caracterização de um maciço rochoso alterado na usina Gilgel Gibe (Etiópia) aplicando técnicas geoestatísticas. O parâmetro geotécnico considerado foi o RQD e o método geoestatístico empregado foi a krigagem ordinária. Embora os dados disponíveis fossem bastante limitados (apenas 6 sondagens) as estimativas previstas se aproximaram bastante dos valores reais, segundo aqueles autores.

Redondo (2003) fez um análise da variabilidade espacial do parâmetro RQD no depósito São Francisco (Mato Grosso) sem distinção dos diferentes tipos de rocha.

Nesse estudo analisou-se a variabilidade do parâmetro RQD em planos bidimensionais localizados a diferentes profundidades, com base no método da krigagem ordinária.

Exadaktylos., Stavropoulou et al. (2007) analisaram a variabilidade espacial do parâmetro RMR também com auxílio de krigagem ordinária. A partir de correlações empíricas estimaram o módulo de elasticidade longitudinal com base no parâmetro RMR e utilizaram a malha de blocos para criar uma malha de elementos finitos para análises tensão – deformação de dois túneis localizados nos Alpes. O trabalho mostra as vantagens da associação de métodos geoestatísticos com o método dos elementos finitos nas análises de engenharia.

Exadaktylos, Stavropoulou et al. (2008) estudaram também a variabilidade espacial do parâmetro RMR e Q, obtidos em campo a partir de uma relação empírica com a energia específica de um equipamento TBM. A estimativa do RMR e Q em locais não amostrados foi feita através de krigagem ordinária em um túnel do metrô de Barcelona (Espanha) e um túnel situado em Hong Kong (Mai Foo Station). Os autores enfatizaram a grande utilidade prática da caracterização de maciços rochosos com auxílio de métodos geoestatísticos.

Exadaktylos e Stavropoulou (2008) analisaram a variabilidade espacial de parâmetros de maciço rochoso RMR implementando o método de krigagem ordinária no programa computacional FLAC 3D. Correlacionando os valores estimados de RMR com o módulo de elasticidade longitudinal e do coeficiente de Poisson, os autores realizaram análises de tensão pelo método dos elementos finitos em várias formações geológicas da Espanha, com resultados como aqueles ilustrados na figura 1.1.

Na literatura, muitas das análises envolvendo modelagem geológica e geoestatística são executadas através de programas computacionais comerciais. Dentre os mais populares, com suas características principais, listam-se os da tabela 1.1.

Tabela 1-1 Programas computacionais comerciais para modelagem geológica – geoestatística.

Programa	Empresa	Área de aplicação	Ferramentas incluídas	
			Modelagem	Geoestatística
GOCAD	Nancy School of Geology	Petróleo	Sim	Sim
SURPAC	Gemcom Software International Inc.	Mineração	Sim	Sim
ISATIS	Geovariances	Mineração/Petróleo	Não	Sim
ISATOIL	Geovariances	Petróleo	Não	Sim
PETREL	Schlumberger	Petróleo	Sim	Sim
DATAMINE	Datamine Corporate Ltda.	Mineração	Sim	Sim
MINESIGHT	Mintec Inc.	Mineração	Sim	Sim
GEMS	Gemcom Software International Inc.	Mineração	Sim	Sim
VULCAM	Maptek Pty Ltda	Mineração	Sim	Sim

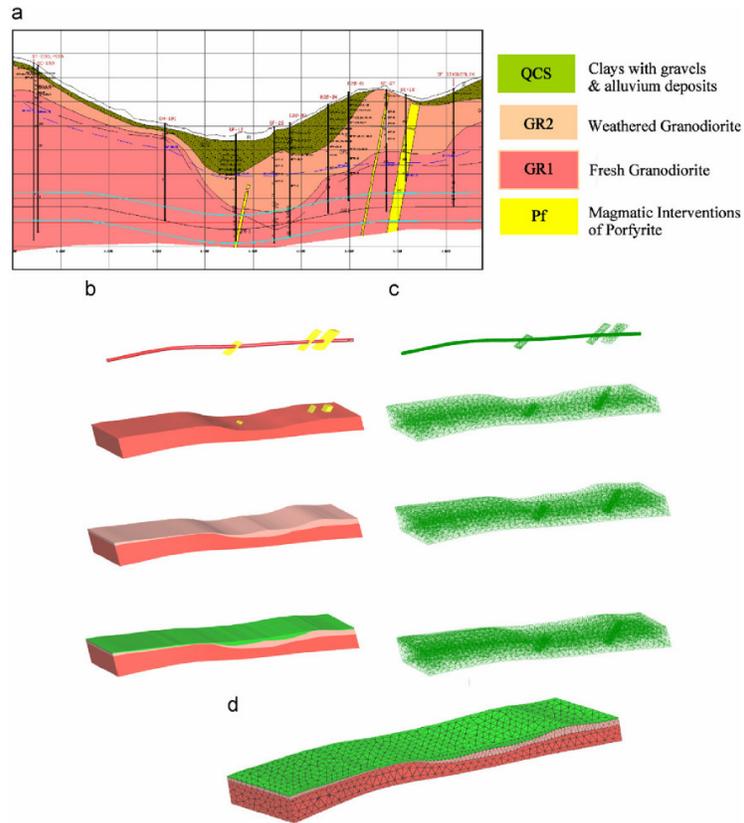


Figura 1-1 Modelagem geológica – geoestatística de formações geológicas da Espanha (Exadakylos e Stavropoulou, 2008).

1.3

Objetivos e estrutura da dissertação

O objetivo principal desta dissertação é apresentar uma modelagem geológica e geoestatística do veio Animas e de suas rochas encaixantes em uma zona de extração mineral localizada no sul do Peru.

Dentre os métodos geoestatísticos, são empregados a krigagem ordinária e a simulação sequencial Gaussiana, comparando-se seus resultados com um método clássico de estimativa – o método do inverso do quadrado das distâncias – com o propósito de verificar qual deles é o mais adequado para simular as características de variabilidade espacial dos materiais que foram o veio Animas.

Este trabalho foi subdividido na seguinte estrutura de capítulos:

Capítulo 2 - descreve a área em estudo, apresentando diversos aspectos fisiográficos (localização, clima, relevo) e as características principais da geologia local.

Capítulo 3 - apresenta informações sobre metodologias geoestatísticas, incluindo definições de variograma e processos de estimativa baseados em krigagem ordinária, krigagem simples e simulação sequencial gaussiana.

Capítulo 4 apresenta a modelagem espacial do veio Animas com base no índice geotécnico RQD e o capítulo 5 é dedicado às conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.