



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



**Paulo Elias Carneiro Pereira**

**ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS E OTIMIZAÇÃO DE CAVA  
APLICADOS A UM ESTUDO DE CASO DE UMA MINA DE CALCÁRIO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

CATALÃO – GO, 2017

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       **Dissertação**       **Tese**

### 2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: Paulo Elias Carneiro Pereira

Título do trabalho: Estimativa de recursos minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma mina de calcário

### 3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do autor <sup>2</sup>

Data: 06 / 04 / 2017

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

<sup>2</sup>A assinatura deve ser escaneada.

PAULO ELIAS CARNEIRO PEREIRA

ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS E OTIMIZAÇÃO DE CAVA  
APLICADOS A UM ESTUDO DE CASO DE UMA MINA DE CALCÁRIO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:

Prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo

Coorientador:

Prof. Dr. Carlos Cordeiro Ribeiro

CATALÃO – GO

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Pereira, Paulo Elias Carneiro

Estimativa de recursos minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma mina de calcário [manuscrito] / Paulo Elias Carneiro Pereira. - 2017.  
clxxi, 171 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo; co-orientador Dr. Carlos Cordeiro Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2017.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. calcário. 2. cava ótima. 3. geoestatística. 4. krigagem. 5. modelagem geológica. I. Rabelo, Marcos Napoleão, orient. II. Título.

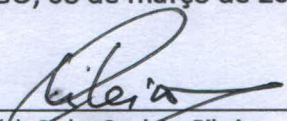
CDU 622.1

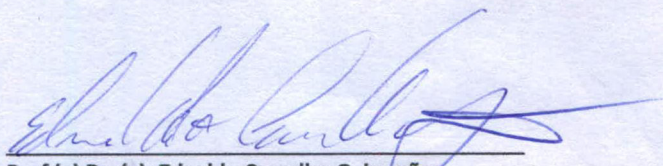


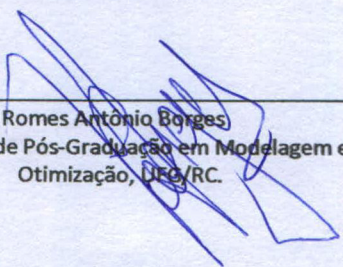
**Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado**

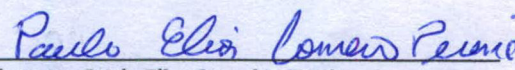
Aos 08 dias do mês de março do ano de 2017, às 14h:00min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) Dr.(a) Carlos Cordeiro Ribeiro (presidente e coorientador), Dr. (a) Ednaldo Carvalho Guimarães, Dr. (a) Romes Antônio Borges, em sessão pública realizada na Sala de Reuniões do Centro Integrado de Pesquisa da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "Estimativa de Recursos Minerais e Otimização de Cava Aplicados a um Estudo de Caso de uma Mina de Calcário", em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Paulo Elias Carneiro Pereira, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (  ) **Aprovado** (unanimidade) ou (  ) **Reprovado** (por maioria simples). Cumpridas as formalidades de pauta, às 16 h: 30 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Carlos Cordeiro Ribeiro, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 08 de março de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
Prof.(a) Dr. (a): Carlos Cordeiro Ribeiro  
Unidade Acadêmica Especial de  
Engenharia/Departamento de Engenharia de Minas,  
UFG/RC.  
(Presidente da Banca)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.(a) Dr. (a): Ednaldo Carvalho Guimarães  
Universidade Federal de Uberlândia/FAMAT

  
\_\_\_\_\_  
Prof.(a) Dr. (a): Romes Antônio Borges  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, UFG/RC.

  
\_\_\_\_\_  
Discente: Paulo Elias Carneiro Pereira  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, UFG/RC.



*À minha família e amigos. Isso foi possível graças à presença constante de vocês.*



---

# Agradecimentos

---

Os meus profundos e sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo e ao Prof. Dr. Carlos Cordeiro Ribeiro pela orientação na realização deste trabalho, sem as quais este não seria possível. Ao Prof. Dr. Henrique Senna Diniz Pinto pelo auxílio, sugestões e conselhos, que foram fundamentais durante o período. Aos Engenheiros de Minas Rodrigo da Costa Souza e Rafael Alvarenga de Souza pelas sugestões dadas durante a realização do projeto.

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Romes Antônio Borges e Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães, cujas contribuições e sugestões de melhoria foram fundamentais para a finalização desta dissertação.

Ao Grupo Pirineus Participação e Administração Ltda, em especial ao Eng. de Minas Felipe César Duque dos Santos, pela parceria e apoio no desenvolvimento deste trabalho, os quais foram imprescindíveis.

À Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade e apoio, aos quais sou muito grato.

Aos meus pais Valdomiro e Maria Aparecida, minha irmã Daniela e familiares, cujo apoio foi fundamental para a concretização deste trabalho e por estarem sempre presentes na minha vida.

Aos meus amigos, pessoas companheiras, cujos conselhos e experiências, tanto pessoas quanto profissionais, irei levar por toda vida. Agradeço especialmente a Gabriel Gomes, Hugo Barros, Lucas Pereira, Frederico da Costa, Diogo Ribeiro, Geovana Blayer, Aline Alvarenga, Danielle Rodrigues, Savoiê Duran e Arthur Carneiro pelo companheirismo, não só durante o período de mestrado, mas desde sempre.

Os meus agradecimentos a todos que direta ou indiretamente fizeram parte deste trabalho, e foram essenciais para a realização deste. Muito obrigado!



*"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original" - Sr. Oliver  
Wendell Holmes*



# RESUMO

PEREIRA, P. E. C. *Estimativa de Recursos Minerais e Otimização de Cava Aplicados a um Estudo de Caso de uma Mina de Calcário*. 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Um empreendimento mineiro é composto por um conjunto de fases sucessivas e interdependentes entre si, as quais podem culminar ou não na exploração do bem mineral. O projeto se inicia com uma fase de Exploração Mineral, cujo objetivo é descobrir e subsequentemente avaliar o depósito quanto à viabilidade de sua extração. Tal processo envolve estabelecer a forma, as dimensões e os teores, resultando em um modelo que será utilizado para a determinação das reservas lavráveis, ou seja, a parte economicamente aproveitável do recurso mineral, a qual fundamentará a decisão sobre a implantação ou não do empreendimento a partir de critérios principalmente técnico-econômicos. A elaboração do formato físico dos corpos geológicos que controlam a mineralização (modelo geológico) e a estimativa das variáveis geológicas que caracterizam a qualidade dos diferentes materiais podem ser feitas a partir de duas abordagens: por métodos tradicionais ou por geoestatísticos. Os últimos têm sido utilizados recentemente como uma proposta mais precisa em relação aos métodos tradicionais. O trabalho utiliza a krigagem indicadora (KI) e a krigagem ordinária (KO), ambas ferramentas geoestatísticas, para a determinação do modelo geológico e estimativa das variáveis geológicas (teores), respectivamente, em um depósito de calcário situado no município de Indiara, estado de Goiás. Por fim, a partir do modelo obtido estabeleceu-se os limites ótimos da extração baseados no algoritmo de Lerchs-Grossmann, que maximizam o valor presente líquido do empreendimento. Os resultados mostraram um desvio significativo entre o modelo calculado pela KI e realidade (amostras), o que pode ter como consequência significativa a atual configuração espacial da amostragem. As variáveis geológicas estimadas também demonstraram desvios (sobrestimativa e subestimativa) importantes, particularmente o óxido MgO. As áreas de ocorrência de tais desvios foram coincidentes para todas as variáveis, o que torna evidente a existência de problemas com a atual malha de amostragem (espaçamento entre amostras e presença suportes amostrais muito diferentes), de tal forma que se recomenda a coleta de amostras adicionais, e de suportes padronizados. A cava ótima delimitou uma reserva total de 109.436.160,43 toneladas, com uma relação estéril-minério (REM) total de 0,13, o que torna o empreendimento, a princípio, atrativo. Tal configuração, entretanto, tende a ser alterada conforme a coleta de novas evidências geológicas.

**Palavras-chaves:** calcário, cava ótima, geoestatística, krigagem, modelagem geológica.



# ABSTRACT

PEREIRA, P. E. C. *Estimativa de Recursos Minerais e Otimização de Cava Aplicados a um Estudo de Caso de uma Mina de Calcário*. 2017. 171 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

A mining enterprise is composed of a set of successive and interdependent phases between them, which may or may not culminate in the exploitation of the mineral assets. The project begins with a Mineral Exploration phase, whose objective is to discover and subsequently evaluate the deposit for the feasibility of its extraction. This process involves setting the shape, dimensions and grades, resulting in a model that will be used to determine the recoverable reserves, that is, the economically usable part of the mineral resource, which will base the decision on the implementation or not of the enterprise, based mainly on technical-economic criteria. The elaboration of the physical form of the geological bodies that control the mineralization (geological model) and the estimation of the geological variables that characterize the quality of the different materials can be done by two approaches: by traditional or by geostatistical methods. The latter approach is currently being preferred, as it is a more accurate alternative and therefore, more reliable over traditional methods. The work uses indicator kriging (IK) and ordinary kriging (OK), both geostatistical tools, for the determination of the geological model and estimation of the geological variables (grades), respectively, of a limestone deposit located at Indiara city, Goiás State. Finally, from the obtained model the optimal limits of the extraction were established, based on the algorithm of Lerchs-Grossmann, that maximize the net present value of the enterprise. The results showed a significant deviation between the model calculated by IK and the reality (samples), which can have as consequence the present spatial configuration of the sample data. The estimated geological variables also showed important deviations (overestimation and/or underestimation), particularly MgO oxide. The areas of occurrence of such deviations were coincident for all variables, which makes evident the existence of problems with the current sampling grid (spacing between samples and presence of very different sample supports), in such a way that it is recommended to collect additional samples, particularly with standardized supports. The optimal pit delimited a total reserve of 109,436,160.43 tons, with a total strip ratio of 0.13, which makes the venture, at first, attractive. This configuration, however, tends to be modified according to the collection of new geological evidence.

**Keywords:** geological modelling, geostatistic, kriging, limestone, optimal pit.



---

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Estágios de um empreendimento mineiro mostrando a relação entre aumento de gastos e decréscimo de risco em cada etapa. . . . .	32
Figura 2.2 – Corte transversal mostrando os elementos típicos em uma perfuração rotativa a diamante. . . . .	34
Figura 2.3 – Esquema de caixa de armazenamento de testemunhos de sondagem. . . .	34
Figura 2.4 – Esquema de uma planilha de registro das observações geológicas obtidas com a análise de testemunhos de sondagem. . . . .	36
Figura 2.5 – Exemplificação do conceito de suporte amostral. O tamanho, a forma e a orientação da amostra define o suporte. . . . .	37
Figura 2.6 – Exemplo de formação de compósitos a partir de uma média ponderada com comprimentos amostrais como ponderadores. . . . .	39
Figura 2.7 – Exemplo de uma interpretação geológica em uma seção transversal . . . .	40
Figura 2.8 – Exemplo de um sólido tridimensional formado pela união de seções geológicas interpretadas a partir de informações de sondagens. . . . .	41
Figura 2.9 – Esquema de representação de um depósito por um modelo geológico de blocos tridimensional. . . . .	42
Figura 2.10 – Exemplos de métodos tradicionais para estimativa de inventários minerais. a) Polígono com blocos retangulares uniformes, b) Polígono com blocos retangulares não uniformes, c) Polígono com polígonos definidos por perpendiculares em pontos médios entre amostras, d) Polígono com polígonos definidos por ângulos bissetores em uma malha de triângulos contínuos, e) Método dos Triângulos, f) Método das Seções. . . . .	44
Figura 2.11 – Terminologia e classificação de resultados de exploração, recursos minerais e reservas de minério utilizadas pelo Código JORC. . . . .	46
Figura 2.12 – Esquema de um inventário mineral com a consideração dos limites econômicos (limites da cava). . . . .	48
Figura 2.13 – Gráfico esquemático mostrando as cavas em ordem crescente de volume e os respectivos Valores Líquidos. . . . .	51
Figura 2.14 – Exemplos de representação de conjuntos de blocos por meio de grafos. . .	52

Figura 2.15 – Exemplos de contornos de cavas ótimas. . . . .	54
Figura 2.16 – Esquema de uma curva típica de um variograma. . . . .	56
Figura 2.17 – Esquema de um variograma mostrando as suas propriedades. . . . .	57
Figura 2.18 – Comparativo da correlação espacial entre amostras em diferentes regiões de um variograma. . . . .	58
Figura 2.19 – Esquema de um variograma experimental mostrando os pontos dos valores de $\gamma(h)$ calculados em determinadas distâncias, formando um conjunto de pontos, que definem o variograma experimental. . . . .	60
Figura 2.20 – Arranjo de dados unidimensionais com distribuição regular (acima) e irregular (abaixo) com ilustrações dos valores de passo ( <i>lag</i> ) no cálculo do variograma. . . . .	61
Figura 2.21 – Exemplo de ajuste de um variograma experimental (pontos) por um modelo teórico/matemático (linha contínua). O ponto de interseção com o eixo vertical é o Efeito Pepita. . . . .	62
Figura 2.22 – Esquema de um variograma mostrando os formatos dos modelos esférico, exponencial e Gaussiano. . . . .	63
Figura 2.23 – Exemplos esquemáticos de anisotropias geométrica (A) e zonal (B). . . . .	64
Figura 2.24 – Esquema de uma elipse no plano horizontal cujos eixos representam as orientações dos variogramas e seus respectivos alcances. . . . .	65
Figura 2.25 – Esquema de um bloco (em duas dimensões) a ser estimado por Krigagem a partir de amostras vizinhas (triângulos preenchidos de preto). . . . .	67
Figura 2.26 – Classificação mineralógica de rochas que contém pelo menos 50% de carbonato em sua composição. . . . .	74
Figura 2.27 – Recursos minerais de calcário por regiões segundo DNPM (2010). . . . .	76
Figura 2.28 – Reservas lavráveis de calcário por regiões brasileiras segundo (DNPM, 2010). . . . .	76
Figura 2.29 – Produção nacional de calcário agrícola no período de 2010 a 2014. . . . .	78
Figura 2.30 – Produção de calcário agrícola no estado de Goiás e no Distrito Federal no período de 2010 a 2014. . . . .	78
Figura 3.1 – Localização da área de estudo e posicionamento das amostras coletadas. Pontos vermelhos representam o início dos furos de sondagem e os traços pretos o início das canaletas. . . . .	80
Figura 3.2 – Construção dos blocos crustais que atuaram no processo de amalgamação do continente Gondwana, após o fechamento dos oceanos Goiás-Farusiano e Moçambique. . . . .	81
Figura 3.3 – Esquema representativo do processo de fechamento do oceano Goiás-Farusiano. . . . .	82
Figura 3.4 – Mapa em planta mostrando a localização dos dos furos de sondagem e das canaletas com linhas verdes representando furos de sondagem e linhas vermelhas as canaletas. . . . .	83
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas executadas. . . . .	85

Figura 4.2 – Diagrama ternário de classificação composicional de rochas calcárias. . . .	87
Figura 4.3 – Diagrama ternário contendo as posições das amostras segundo os teores de CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> e impurezas, e a posição destas em relação a cada classe/rocha. . . . .	89
Figura 4.4 – Diagrama ternário contendo as posições das amostras segundo os teores de CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> e impurezas, e os campos de ocorrência das classes de calcário adotadas pela empresa. . . . .	90
Figura 4.5 – Projeção em planta mostrando as disposição espacial dos furos de sondagem e canaletas. . . . .	93
Figura 4.6 – Parâmetros adotados para a realizado na krigagem indicadora no <i>ik3d</i> . . .	95
Figura 4.7 – Desenho esquemático de um bloco do modelo em perspectiva com as suas dimensões. . . . .	97
Figura 4.8 – Parâmetros para a determinação das coordenadas dos pontos estimados no <i>addcoord</i> . . . . .	99
Figura 4.9 – Histograma do comprimento das amostras. . . . .	100
Figura 4.10 – Gráfico do preço médio de venda <i>Free on Board</i> (FOB) do calcário agrícola entre 2009 e 2014. . . . .	103
Figura 4.11 – Polígono que delimita a área de exploração do empreendimento. . . . .	110
Figura 5.1 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria CLC. . . . .	113
Figura 5.2 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria MAG. . . . .	114
Figura 5.3 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria DOL. . . . .	115
Figura 5.4 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria CLI. . . . .	116
Figura 5.5 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria VMV. . . . .	117
Figura 5.6 – Variogramas indicadores experimentais (linhas vermelhas com traços) e respectivas curvas teóricas (linhas pretas contínuas). A linha tracejada na horizontal representa a variância <i>a priori</i> . Os domínios litológicos estão classificados como: a) CLC, b) MAG, c) DOL, d) CLI, e) VMV. . . . .	120
Figura 5.7 – Categorias geológicas e respectivas orientações de maior continuidade geológica. . . . .	121
Figura 5.8 – Demarcação e codificação das seções verticais. Os furos de sondagem são indicados pelas linhas em verde, e as canaletas, pelas linhas em vermelho. . . . .	123
Figura 5.9 – Seção vertical “B” do modelo geológico mostrando os domínios geológicos e estimados e amostrais em cores correspondentes. . . . .	123

Figura 5.10 –Seção vertical “E” do modelo geológico mostrando os domínios geológicos e estimados e amostrais em cores correspondentes. . . . .	124
Figura 5.11 –Comparação entre frequências relativas dos domínios nos dados amostrais e no modelo estimado por krigagem indicadora. . . . .	125
Figura 5.12 –Mapa em planta com a delimitação da ocorrência da categoria CLC no modelo geológico. Linhas em verde indicam furos de sondagem e linhas em vermelho, amostras de canaletas. . . . .	127
Figura 5.13 –Histogramas das incertezas nos domínios litológicos e no modelo global. . . . .	128
Figura 5.14 –Mapas de ocorrência de níveis de incerteza. a) 0%; b) 20%; c) 40%; d) 60%; e) 70%. . . . .	129
Figura 5.15 –Modelo geológico e superfície das prováveis falhas geológicas previstas pelo modelo. . . . .	130
Figura 5.16 –Variogramas experimentais (linha tracejada vermelha) e respectivos ajustes teóricos (linha contínua preta) dos óxidos CaO e MgO. . . . .	131
Figura 5.17 –Variáveis geológicas de teor e suas respectivas orientações espaciais de maior continuidade. . . . .	132
Figura 5.18 –Diagramas de validação cruzada para as variáveis CaO (a) e MgO (b). . . . .	133
Figura 5.19 –Histogramas dos dados amostrais e do modelo de teores para a variável CaO com classificação por domínio litológico. . . . .	135
Figura 5.20 –Histogramas dos dados amostrais e do modelo de teores para a variável MgO com classificação por domínio litológico. . . . .	136
Figura 5.21 –Gráficos Q-Q da variável CaO para cada domínio litológico. a) CLC, b) MAG, c) DOL, e d) Total (união dos três domínios). . . . .	138
Figura 5.22 –Gráficos Q-Q da variável MgO para cada domínio litológico. a) CLC, b) MAG, c) DOL, e d) Total (união dos três domínios). . . . .	140
Figura 5.23 –Gráfico da Análise de Deriva da variável CaO na direção X. . . . .	141
Figura 5.24 –Gráfico da Análise de Deriva da variável CaO na direção Y. . . . .	141
Figura 5.25 –Gráfico da Análise de Deriva da variável CaO na direção Z. . . . .	142
Figura 5.26 –Gráfico da Análise de Deriva da variável MgO na direção X. . . . .	143
Figura 5.27 –Gráfico da Análise de Deriva da variável MgO na direção Y. . . . .	143
Figura 5.28 –Gráfico da Análise de Deriva da variável MgO na direção Z. . . . .	144
Figura 5.29 –Mapas em planta com a delimitação das áreas de sobrestimativas (CaO) e subestimativas (MgO). . . . .	145
Figura 5.30 –Contorno da superfície ótima de extração (linhas em cinza) e posição espacial das amostras coletadas. . . . .	147
Figura 5.31 –Contorno da cava ótima organizado por intervalo de elevação. . . . .	147

Figura 5.32 – Posição espacial dos domínios litológicos nos limites da cava ótima. a) calcário calcítico b) calcário magnesiano; c) calcário dolomítico; d) calcário impuro; e) vulcânicas e/ou metavulcânicas; f) minério (em laranja) e estéril (em vermelho). . . . .	149
Figura 5.33 – Posição espacial das classes de reservas minerais. a) Provada; b) Provável; c) Inferida; d) união das três classes de reservas (azul = provada, cinza = provável e vermelho = inferida). . . . .	151
Figura 5.34 – Histogramas e resumo descritivo da variável $\text{CaCO}_3$ classificados por domínio litológico. . . . .	152
Figura 5.35 – Histogramas e resumo descritivo da variável $\text{MgCO}_3$ classificados por domínio litológico. . . . .	152
Figura 5.36 – Histogramas e resumo descritivo do Potencial Neutralizador (PN) classificados por domínio litológico. . . . .	153
Figura A.1 – Mapa em planta mostrando as posições das seções transversais do modelo geológico. . . . .	167
Figura A.2 – Seção transversal A-A'. . . . .	168
Figura A.3 – Seção transversal B-B'. . . . .	168
Figura A.4 – Seção transversal C-C'. . . . .	169
Figura A.5 – Seção transversal D-D'. . . . .	169
Figura A.6 – Seção transversal E-E'. . . . .	170
Figura A.7 – Seção transversal F-F'. . . . .	170
Figura A.8 – Seção transversal G-G'. . . . .	171
Figura A.9 – Seção transversal H-H'. . . . .	171



---

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Parâmetros de qualidade mínimos para corretivos de acidez. . . . .	75
Tabela 2.2 – Inventário de recursos minerais de calcário por produto para o estado de Goiás no ano de 2014 <sup>(1)</sup> . . . . .	77
Tabela 4.1 – Critérios de classificação dos calcários adotados pela empresa <sup>(1)</sup> . . . . .	90
Tabela 4.2 – Domínios litológicos e seus respectivos critérios de classificação. . . . .	91
Tabela 4.3 – Códigos aribuídos às unidades/categorias geológicas . . . . .	92
Tabela 4.4 – Domínios litológicos e suas respectivas variáveis indicadoras. . . . .	92
Tabela 4.5 – Proporções relativas das categorias/unidades geológicas na amostragem. . . . .	96
Tabela 4.6 – Parâmetros do protótipo utilizado para a krigagem indicadora. . . . .	97
Tabela 4.7 – Comprimento e orientação dos eixos dos elipsoides dos recursos Medido, Indicado e Inferido para os óxidos CaO e MgO . . . . .	101
Tabela 4.8 – Parâmetros de busca utilizados para as estimativas para as variáveis CaO e MgO nos domínios CLC, MAG e DOL. . . . .	102
Tabela 4.9 – Inventário de equipamentos de lavra com descrição e quantidade. . . . .	104
Tabela 4.10 – Inventário de equipamentos de processo com descrição e quantidades. . . . .	105
Tabela 4.11 – Quadro de pesosal de acordo com as áreas de produção. . . . .	105
Tabela 4.12 – Elementos da etapa de lavra e respectivos valores de custos operacionais unitários. . . . .	106
Tabela 4.13 – Elementos da etapa de processamento e respectivos valores de custos operacionais unitários. . . . .	106
Tabela 5.1 – Principais parâmetros estatísticos da variável CaO. . . . .	111
Tabela 5.2 – Principais parâmetros estatísticos da variável MgO. . . . .	111
Tabela 5.3 – Resultados dos intervalos de confiança da média para os óxidos CaO e MgO classificados por domínio litológico. . . . .	118
Tabela 5.4 – Resultados dos intervalos de confiança da variância para os óxidos CaO e MgO classificados por domínio litológico. . . . .	118
Tabela 5.5 – Parâmetros dos ajustes variográficos de acordo com cada categoria geológica. . . . .	119

Tabela 5.6 – Comparativo entre proporções/frequências relativas dos dados amostrais e do modelo estimado com os respectivos desvios. . . . .	124
Tabela 5.7 – Domínios litológicos e os respectivos valores médios, máximos e frequências acima de cinco metros dos comprimentos amostrais. . . . .	126
Tabela 5.8 – Principais parâmetros estatísticos da incerteza por domínio litológico. . . . .	127
Tabela 5.9 – Parâmetros dos ajustes variográficos para as variáveis CaO e MgO . . . . .	130
Tabela 5.10 –Valores de teores médios e tonelagens classificados de acordo com os domínios geológicos. . . . .	134
Tabela 5.11 –Valores de teores médios e tonelagens classificados de acordo com as categorias de recursos minerais. . . . .	134
Tabela 5.12 –Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo de teores para a variável CaO. . . . .	137
Tabela 5.13 –Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo de teores para a variável MgO. . . . .	137
Tabela 5.14 –Benefícios totais e proporções em relação ao total de blocos do modelo. . . . .	146
Tabela 5.15 –Inventário de tonelagens e teores médios das reservas lavráveis classificado de acordo com os domínios litológicos. . . . .	148
Tabela 5.16 –Inventário de tonelagens e teores médios classificados em material minério e estéril. . . . .	150
Tabela 5.17 –Inventário de tonelagens e teores médios das reservas lavráveis classificado de acordo com as categorias de reserva (provada, provável e inferida). . . . .	150

---

# LISTA DE CÓDIGOS

---

Código 4.1 – Código para inserção dos valores de $\text{CaCO}_3$ , $\text{MgCO}_3$ e PN. . . . .	107
Código 4.2 – Código para atribuir a cada bloco do modelo a sua massa específica. . . .	107
Código 4.3 – Código para o cálculo dos benefícios dos blocos (modelo econômico). . .	109



---

# SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Exploração Mineral</b>	<b>31</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Coleta de Dados</b>	<b>32</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Base de Dados</b>	<b>37</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Modelagem Geológica</b>	<b>39</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Estimativa de Inventários Minerais</b>	<b>43</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Classificação de Inventários Minerais</b>	<b>45</b>
<b>2.1.6</b>	<b>Determinação dos Limites Econômicos da Extração</b>	<b>48</b>
<b>2.1.6.1</b>	<b>Algoritmo de Lerchs-Grossmann</b>	<b>52</b>
<b>2.2</b>	<b>Teoria Geoestatística</b>	<b>54</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Variograma</b>	<b>56</b>
<b>2.2.1.1</b>	<b>Propriedades do Variograma</b>	<b>57</b>
<b>2.2.1.2</b>	<b>Cálculo de Variogramas Experimentais</b>	<b>59</b>
<b>2.2.1.3</b>	<b>Ajuste de Variogramas Experimentais por Modelos Matemáticos</b>	<b>61</b>
<b>2.2.1.4</b>	<b>Anisotropias</b>	<b>63</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Krigagem</b>	<b>65</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b>Krigagem Ordinária</b>	<b>68</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b>Krigagem Indicadora</b>	<b>70</b>
<b>2.3</b>	<b>Calcário</b>	<b>72</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Mineralogia e Formação</b>	<b>72</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Aplicações</b>	<b>72</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Classificação e Aspectos de Qualidade</b>	<b>73</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Recursos Minerais e Produção</b>	<b>75</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>79</b>
<b>3.1</b>	<b>Características do Local e Aspectos Geológicos</b>	<b>79</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização da Base de Dados</b>	<b>82</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise Exploratória dos Dados</b>	<b>86</b>
<b>4.2</b>	<b>Classificação dos Domínios Geológicos</b>	<b>87</b>

4.3	Análise Estatística . . . . .	91
4.4	Krigagem Indicadora . . . . .	92
4.5	Elaboração do Inventário Mineral de Teores . . . . .	99
4.6	Modelo Econômico e Otimização de Cava . . . . .	102
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	111
5.1	Análise Estatística Exploratória . . . . .	111
5.2	Modelagem Geológica . . . . .	118
5.3	Elaboração do Inverntário Mineral de Teores . . . . .	130
5.4	Modelo Econômico e Otimização de Cava . . . . .	146
6	CONCLUSÕES . . . . .	155
	REFERÊNCIAS . . . . .	159
APÊNDICE A	SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO GEOLÓGICO . . . . .	167

## Capítulo 1

---

# INTRODUÇÃO

---

O desenvolvimento de um projeto de mineração é composto por um conjunto de fases sucessivas e interdependentes entre si, culminando ou não na exploração do bem mineral. Inicia-se com uma fase de exploração, classificada em vários estágios consecutivos e interligados entre si, os quais envolvem, de acordo com o seu andamento, um aumento de gastos e decréscimo do risco geológico associado (MOON; WHATELEY, 2006).

Para a realização de um projeto de mineração de forma eficaz é essencial se ter primeiramente uma caracterização mais precisa possível sobre a geometria da zona mineralizada. Portanto, é fundamental o bom entendimento da representação da forma, tamanho, qualidade, variabilidade e limites da zona mineralizada, onde tais informações são necessárias nas etapas de avaliação, desenvolvimento de mina e produção (ERICKSON JÚNIOR, 1992).

A representação física das estruturas controladoras da mineralização (modelo geológico) é a base para a realização das estimativas das variáveis geológicas (óxidos e/ou minerais) que caracterizam a qualidade do material em termos dos elementos e/ou minerais de interesse econômico, e subsequentemente tal modelo será utilizado para as atividades de planejamento de lavra que se iniciam com a determinação das reservas lavráveis, delimitadas por uma superfície denominada cava. Tal superfície de extração (cava) define os limites nos quais se dará a extração do(s) bem(ns) mineral(is), e, de acordo com Marcotte e Caron (2013), a definição de tais limites é essencial nos estudos de pré-viabilidade e de viabilidade em minas superficiais, nos quais estão definidos as tonelagens de minério e estéril e o valor econômico do minério. Ainda, as atividades de planejamento de mina e demais procedimentos de projeto apenas têm início com a determinação dos limites da extração (AKBARI; OSANLOO; SHIRAZI, 2008).

A problemática em torno da elaboração do limite da cava, ou *Ultimate Pit Limit* (UPL), reside no fato de que há, para um determinado projeto mineiro, uma grande variedade de limites, cada um caracterizado por um valor econômico, de tal forma que se torna necessário a adoção de uma superfície de extração. Tal questão têm sido resolvida com a utilização de

procedimentos de otimização, iniciados com os trabalhos de [Lerchs e Grossmann \(1965\)](#), os quais desenvolveram um algoritmo baseado na teoria dos grafos com o intuito de determinar a superfície ótima de extração. Neste caso, é definido um limite ótimo o qual maximiza o valor presente líquido (VPL) do empreendimento, tornando o benefício líquido atual máximo, e conseqüentemente tornando a extração mais econômica possível.

Tal operação, como exposto previamente, é fundamental para os trabalhos de planejamento de mina e estudos de viabilidade, os quais são embasados no contorno ótimo da cava. Entretanto, a definição adequada dos contornos depende fundamentalmente da qualidade dos modelos geológico e de teores elaborados nas etapas anteriores, e portanto, do conhecimento geológico do local. A elaboração do modelo geológico, o qual descreve o formato físico das estruturas controladoras da mineração, e do modelo de teores, contendo os valores das variáveis geológicas estimadas nos locais não amostrados, podem seguir diferentes abordagens, uma tradicional, ou determinística, e outra baseada em técnicas geoestatísticas.

O método tradicional para a criação de um modelo geológico corresponde à interpretação dos atributos geológicos (domínios litológicos) em seções transversais, seguida da união destas gerando um sólido tridimensional ([ROSSI; DEUTSCH, 2014](#)). Entretanto, como apontam os trabalhos de [Emery e González \(2007\)](#) e [Emery e Ortiz \(2005\)](#), tal procedimento apresenta problemas, notadamente a subjetividade tanto na definição dos domínios litológicos quanto no delineamento dos contatos geológicos e a impossibilidade de se obter parâmetros sobre a incerteza na posição de tais contatos/limites. Alternativamente ao método tradicional, tem-se os métodos geoestatísticos baseados em indicadores (krigagem indicadora, simulação sequencial de indicadores, etc), os quais minimizam os inconvenientes do método de seções transversais e são capazes de fornecer informações sobre as incertezas no delineamento dos contatos geológicos.

De forma análoga ao exposto quanto aos métodos de modelagem geológica, a estimativa de recursos (teores, espessuras, etc) pode ser obtida tanto a partir de ferramentas tradicionais (Polígonos, Triângulos, Inverso do Quadrado das Distâncias, entre outros) quanto de geoestatísticas (Krigagem). Neste caso, os métodos tradicionais não se baseiam na continuidade das variáveis geológicas, tratando-as como variáveis aleatórias, e não são capazes de fornecer os erros de estimativa, fundamentais para a devida classificação de recursos e reservas minerais. Já os métodos geoestatísticos, baseados na Teoria das Variáveis Regionalizadas formulada por [Matheron \(1971\)](#), o qual se embasou nos trabalhos iniciados por Daniel Krige em minas de ouro na África do Sul, têm se tornado padrões para a estimativa de recursos e reservas pelo fato de considerar e prever o comportamento das variáveis geológicas e ainda ser capaz de fornecer os erros de estimativa ([SOUZA, 2002](#)).

Normalmente, em empreendimentos mineiros de pequeno a médio porte, por falta de informações e/ou de ferramentas computacionais, não se observa a utilização de meto-

dologias notadamente mais apuradas para a realização de estudos e análises geológicas, os quais são a base para a análise econômica, gerando então, resultados muitas vezes distantes de configurações próximas ao ótimo, que maximizariam o valor econômico do empreendimento.

No caso específico deste trabalho, em uma mina de calcário localizada no município de Indiara, estado de Goiás, a modelagem geológica e a estimativa de recursos, foram baseadas em métodos tradicionais - método de seções verticais e inverso do quadrado das distâncias, respetivamente. Foi observado durante a extração (lavra), diferenças entre o previsto pelo modelo e a realidade da operação mineira, principalmente atribuídas à posição dos contatos geológicos.

Pretende-se, portanto, com este trabalho, efetuar uma análise (auditoria) das condições atuais do modelo a partir de procedimentos geoestatísticos para a modelagem geológica (krigagem indicadora) e a estimativa de teores (krigagem ordinária), seguidas, por fim, pela determinação da superfície ótima de extração a partir do algoritmo de Lerchs-Grossmann (LERCHS; GROSSMANN, 1965), com o intuito de maximizar o valor presente líquido (VPL) do empreendimento mineiro, sendo este último procedimento (otimização de cava), realizado de forma puramente acadêmica, sem considerar os produtos efetivamente comercializados pela empresa. A partir dos resultados, particularmente os associados à modelagem geológica e estimativa de teores, será possível observar o comportamento das variáveis geológicas no modelo e eventuais erros, e então propor melhorias para o projeto.

A dissertação está estruturada de tal forma que serão apresentados no capítulo seguinte (Capítulo 2) uma revisão sobre os conceitos pertinentes ao trabalho, tais como: atividades características da fase de Exploração Mineral (coleta de amostras, modelagem geológica, estimativa de recursos minerais, otimização de cava, etc.); conceitos de geoestatística (variograma, krigagem ordinária e krigagem indicadora), e; características do calcário, quanto à mineralogia e formação, aplicações, recursos minerais, produção, dentre outros.

No Capítulo 3 serão expostas as características da área de estudo, com um enfoque na geologia e nos processos tectônicos de gênese da ocorrência mineral. Além disso, será exibido um levantamento sobre os atributos das informações amostrais fornecidas.

No Capítulo 4 estão tratados os procedimentos e critérios adotados para a concretização do trabalho, expondo, passo-a-passo, como cada etapa foi efetuada, cujos resultados obtidos se encontram no Capítulo 5, classificados de acordo com a etapa realizada, seguidos das discussões sobre os mesmos. Por fim, no Capítulo 6, encontram-se as conclusões obtidas com este trabalho.



## Capítulo 2

---

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O trabalho proposto está contextualizado, em um empreendimento mineiro, na etapa de Exploração Mineral. Portanto, neste capítulo abordar-se-á as atividades realizadas nesta etapa, desde a coleta de dados até a determinação dos limites finais da cava (reservas lavráveis), sendo esta informação, necessária para a futura análise econômica de empreendimentos mineiros, a qual culminará na tomada de decisão sobre a implantação ou não do projeto. Além disso, será tratado neste capítulo o bem mineral explorado pela empresa (calcário), apresentando as características mineralógicas e químicas, classificação, mercado, e outras.

O capítulo está estruturado de tal forma que serão apresentados três tópicos principais: (i) conceitos relativos à etapa de Exploração Mineral (coleta e geração de bancos de dados, modelagem geológica, estimativa de recursos, determinação dos limites da cava por meio de otimização, etc); (ii) conceitos da geoestatística, utilizados para realização deste trabalho; e, (iii) conceitos e características do calcário.

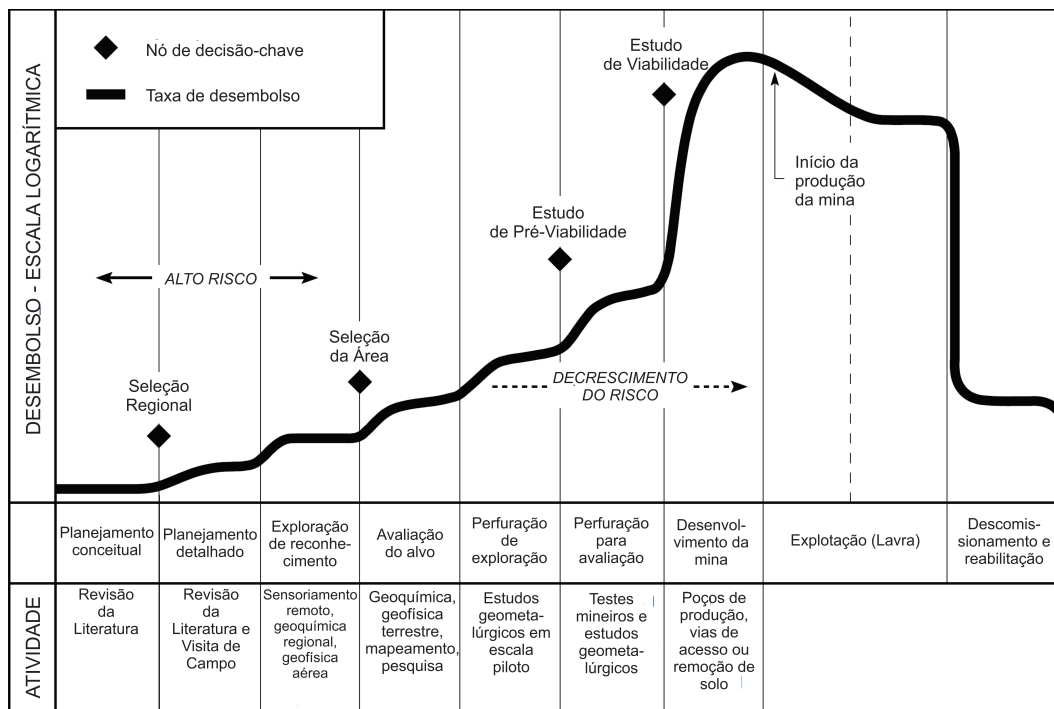
## 2.1 Exploração Mineral

Um empreendimento mineiro tem início com a fase de Exploração Mineral, a qual compreende um conjunto de atividades que tem por objetivo primeiramente localizar um depósito mineral (descoberta) e subsequentemente avaliá-lo quanto à viabilidade de sua extração (MARJORIBANKS, 2010).

As atividades componentes de um programa de Exploração Mineral ocorrem de forma sequencial. Cada etapa possui um objetivo específico a ser atingido dentro de um período de tempo estabelecido e com uma quantidade de recursos financeiros. Os resultados obtidos em cada uma são utilizados na etapa subsequente, e assim sucessivamente (HALDAR, 2013). Tal prosseguimento, em qualquer programa de exploração, envolve um aumento de gastos financeiros (curva de desembolso na Figura 2.1) e decréscimo de risco (seta pontilhada na

Figura 2.1) (MOON; WHATELEY, 2006). O nível de risco é inversamente proporcional ao nível de detalhe na descrição geológica da área, o qual aumenta gradativamente conforme se avança através dos diferentes estágios de um empreendimento mineiro (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Figura 2.1 – Estágios de um empreendimento mineiro mostrando a relação entre aumento de gastos e decréscimo de risco em cada etapa.



Fonte: Adaptado de (MOON; WHATELEY, 2006)

A terminologia das atividades varia de acordo com diferentes autores e países (agências reguladoras). Entretanto, baseiam-se nos mesmos princípios. De acordo com Lacy (1992), de uma maneira geral, a exploração mineral envolve, sequencialmente: (i) a procura por características naturais diretamente observáveis e comumente associadas com a mineralização, ou procura bibliográfica e geológica por áreas favoráveis e um tipo específico de mineralização; (ii) mapeamento geológico de detalhe, geofísica aérea e geoquímica; e (iii) coleta de amostras por um programa de perfuração e/ou exploração subterrânea (poços, trincheiras, galerias, etc).

O objetivo de tais atividades, para Bailly e Still (1973 apud LACY, 1992), é descobrir e subsequentemente avaliar um depósito mineral quanto à viabilidade de sua extração, estabelecendo, entre outros, forma, dimensões e teores para uma eventual extração.

### 2.1.1 Coleta de Dados

A avaliação de um depósito sobre a viabilidade de sua extração econômica inevitavelmente envolve investigação e coleta de informações a fim de se obter um modelo tridimen-

sional para se ter interpretações geológicas acerca da área em estudo. As informações do modelo geológico são obtidas a partir de afloramentos, trincheiras, perfurações e trabalhos subterrâneos (galerias, poços, etc.) (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). Entretanto, normalmente, a coleta de amostras é realizada basicamente por perfurações rotativas a diamante e/ou roto-percussivas, e raramente pelos demais métodos (MARJORIBANKS, 2010).

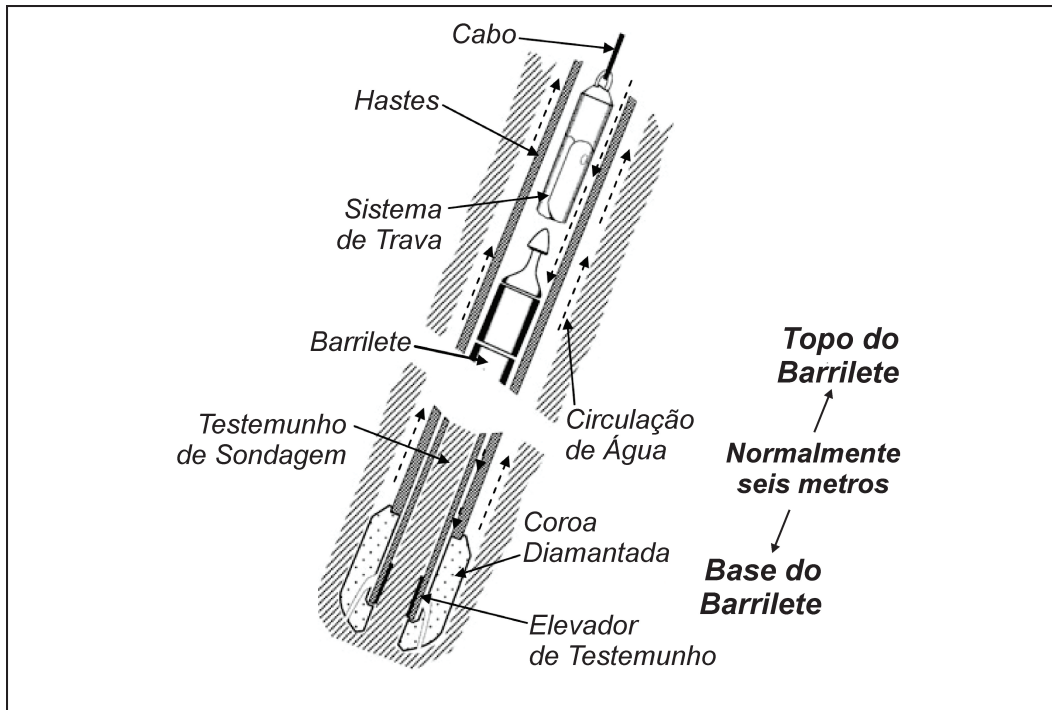
Os dados amostrais coletados são utilizados para prever tonelagens e teores, e análises estatísticas. Juntamente com outras informações geológicas e técnicas, são usadas em tomadas de decisões. É fundamental que as amostras coletadas sejam representativas da população - depósito mineral - amostrada. Isto significa que o valor de um parâmetro obtido a partir de um dado volume amostral deve ser similar a qualquer outro valor que seria obtido a partir do mesmo volume. Além disso, amostras devem ser representativas em um sentido espacial, de tal forma que a abrangência espacial do depósito seja adequada, isto é, a amostragem deve englobar uma área que seja representativa do objeto de estudo (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

As informações obtidas a partir da amostragem são necessárias para o entendimento das características geológico-estruturais da área sob estudo. Entretanto, representa uma proporção muito limitada do volume total de um depósito mineral e vizinhanças. Mesmo em um depósito bem amostrado, o volume total coletado pode representar um milionésimo do volume total do depósito (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

A perfuração, ou sondagem, dentre todos os procedimentos de exploração, é o mais importante, capaz de estabelecer continuidade da mineralização em todas as direções, visualização tridimensional e avaliação de um depósito mineral. As técnicas de perfuração utilizadas para amostragem de depósitos minerais dependem da profundidade a ser atingida. Furos pouco profundos são escavados por perfuração percussiva, enquanto os mais profundos são efetuados por perfurações roto-percussivas e/ou rotativas (HALDAR, 2013).

A sondagem rotativa diamantada, tanto superficial quanto subterrânea, é uma das ferramentas mais versáteis para investigação geológica. A extrema dureza do diamante permite o corte de todos os tipos de rochas e minerais encontrados na crosta terrestre (HALDAR, 2013). Nesta técnica, a amostra é retirada cortada da rocha por uma coroa revestida ou impregnada de diamante. Conforme o avanço da perfuração, a amostra (testemunho de sondagem) é armazenada em um tubo interno à haste de perfuração, denominado barrilete (Figura 2.2). A coroa e o barrilete, por sua vez, estão conectados à superfície por uma linha contínua de hastes, ligadas entre si por luvas. Um conjunto mecânico montado na perfuratriz transmite a estes elementos a força de avanço e a rotação para o corte da rocha (WHATELEY; SCOTT, 2006).

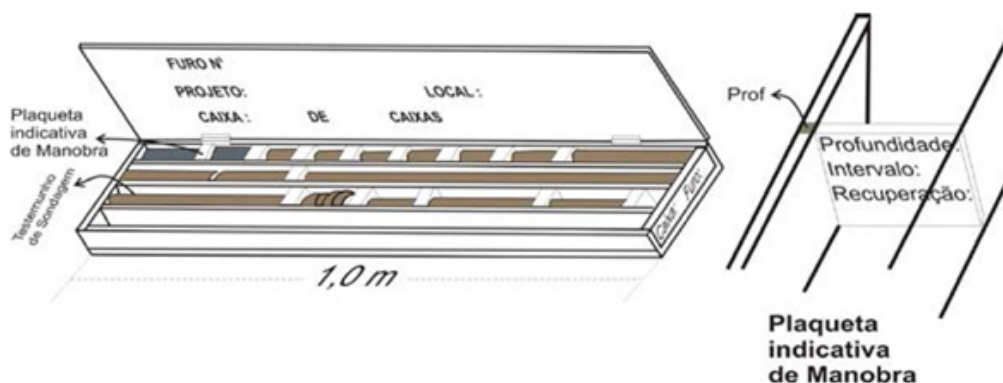
Figura 2.2 – Corte transversal mostrando os elementos típicos em uma perfuração rotativa a diamante.



Fonte: Adaptado de (MARJORIBANKS, 2010)

O testemunho de sondagem, ao ocupar todo o espaço do barrilete, é levado à superfície e então depositado em caixas de alumínio ou madeira (Figura 2.3) para armazenamento, descrições geológicas, análises químicas e ensaios geomecânicos. As caixas de armazenamento de testemunhos de sondagem contém as seguintes informações: intervalo de perfuração, registrado em tacos de madeira e/ou alumínio; profundidade inicial e final das amostras; identificação do furo de sondagem; nome do projeto; número da caixa; e data da perfuração (HALDAR, 2013).

Figura 2.3 – Esquema de caixa de armazenamento de testemunhos de sondagem.



Fonte: (NETO; ROCHA, 2010)

As amostras extraídas são primeiramente submetidas a uma etapa de descrição/análise geológica (*logging*), a qual consiste na observação das mesmas quanto à litologia, tipo e intensidade de alterações, fraturas, dobras, mineralogia, etc (WHATELEY; SCOTT, 2006). As observações feitas são inseridas em folhas de registro, as quais contém, além de tais descrições, intervalo da amostra (*From e To*) correspondente, diâmetro do barrilete, números das respectivas amostras, e nomes do furo de sondagem e do projeto (HALDAR, 2013). A Figura 2.4 mostra um esquema de um registro geológico (*logging*).

As amostras coletadas não são utilizadas apenas para observação e registro geológico, mas também para testes metalúrgicos e análises químicas (WHATELEY; SCOTT, 2006). Normalmente cada amostra é cortada ao longo de sua seção longitudinal, e uma metade é preparada e utilizada para análises químicas, enquanto a outra metade é armazenada para registro histórico (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

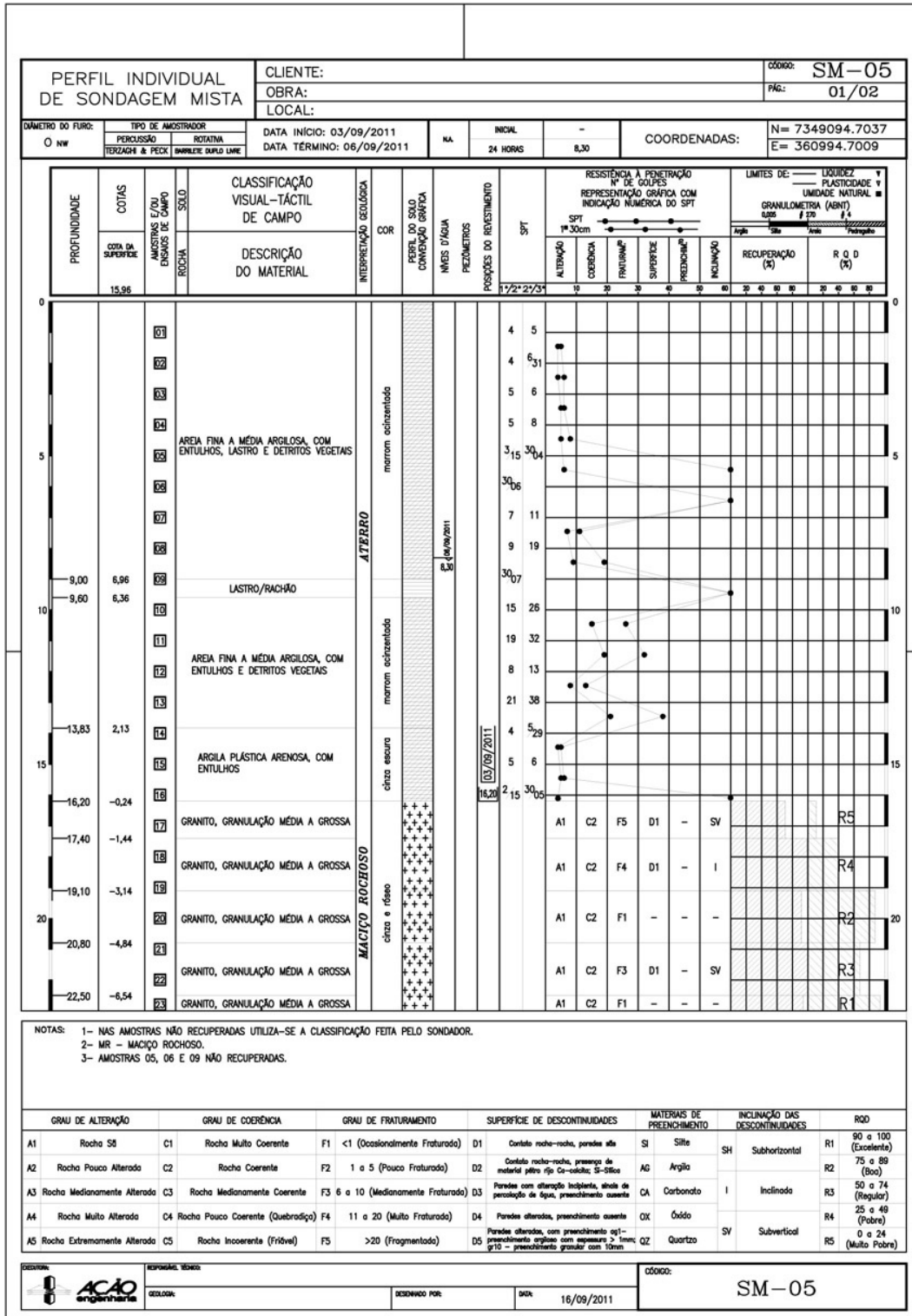
A porção da amostra destinada à análise química é submetida a uma série de procedimentos para adequação da mesma ao equipamento utilizado. Estes envolvem etapas de redução granulométrica (britagem e moagem) e de redução de quantidade (quarteamento). Geralmente, duas porções de cada amostra original são preparadas: uma é destinada à análise química e a outra (duplicata) é preservada para futuras observações e/ou para controle de qualidade (HALDAR, 2013).

Além de informações obtidas de caráter químico e/ou mineralógico para futuras estimativas de teores e tonelagens, são também coletadas informações sobre características estruturais das rochas para fins de projeto geométrico da mina (altura de bancada, ângulo de inclinação da face, largura da bancada, etc) (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

As informações quantitativas e qualitativas obtidas a partir da observação geológico-estrutural e das análises químicas são utilizadas para a elaboração de uma base de dados, normalmente computadorizada, para fins de formulação de um modelo do depósito e estimativa de recursos. As informações inseridas na base de dados são submetidas a um controle de qualidade a fim de se evitar erros e a consequente propagação dos mesmos nas etapas futuras. Tais erros envolvem, por exemplo, porcentagens de teor menores que 0% e/ou maiores que 100%, ou maiores que a porcentagem máxima que pode existir de acordo com a mineralogia da rocha sob análise (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

A base de dados geológica, elaborada a partir de observações geológicas dos testemunhos de sondagem e de ensaios laboratoriais, deve permanecer útil por muitos anos. Tais informações são a base para estudos de viabilidade econômica, planejamento mineiro e análises financeiras, tanto atuais quanto futuras (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

Figura 2.4 – Esquema de uma planilha de registro das observações geológicas obtidas com a análise de testemunhos de sondagem.



Fonte: (AÇÃO SONDAJENS LTDA, 2013)

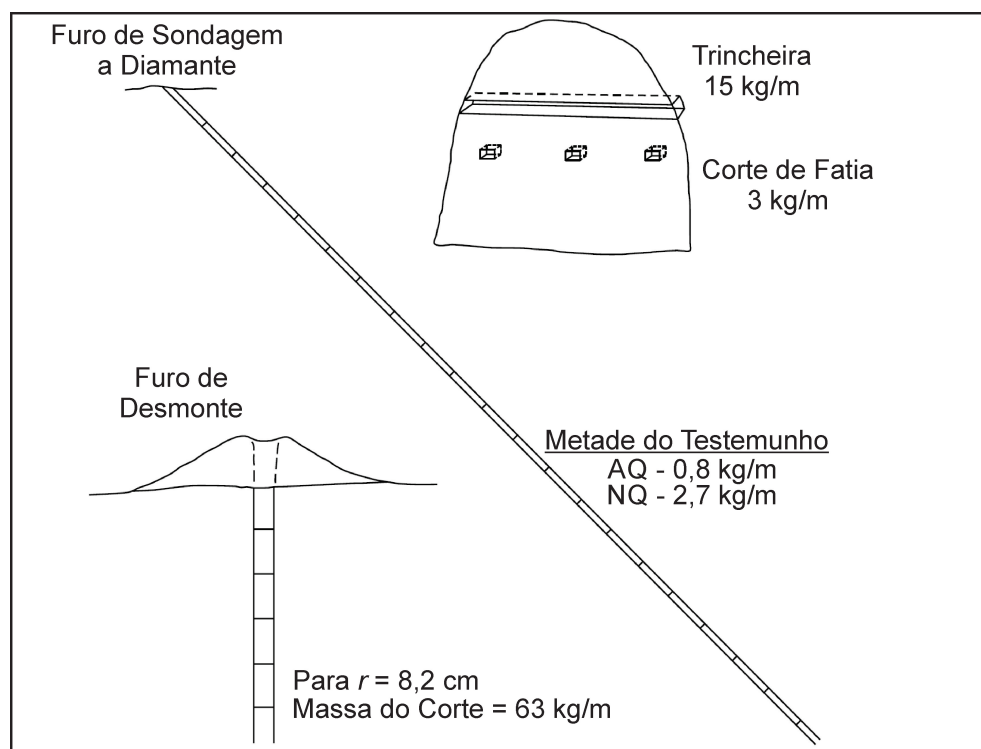
### 2.1.2 Base de Dados

As informações coletadas a partir da realização de ensaios/análises e descrições das amostras (testemunhos de sondagem) são agrupadas em uma base de dados contendo: nome dos furos de sondagem, coordenadas do início dos furos (*collar*), profundidades inicial e final (intervalos *from* e *to*) das amostras, resultados das análises químicas (*assay*), descrições de estruturas, texturas, mineralogia e alterações, dentre outras informações geológicas.

A base de dados elaborada é submetida continuamente a um programa de controle e garantia da qualidade (QA/QC). Neste programa são avaliados os seguintes itens: (i) forma de aquisição das amostras, incluindo aspectos sobre os padrões de amostragem (malha de sondagem); (ii) procedimentos de preparação das amostras e análises químicas, e; (iii) aquisição, interpretação e modelagem de dados geológicos (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

Um aspecto importante relacionado às amostras contidas da base de dados é o suporte dos dados, ou seja, tamanho, forma e orientação das amostras (Figura 2.5). Suportes diferentes significam que as amostras possuem dispersões (desvios padrões) diferentes. Em muitos casos, a variabilidade das amostras de um suporte se difere substancialmente da variabilidade das amostras de um outro suporte. Portanto, um procedimento de regularização do suporte, denominado compositagem, é geralmente necessário para uniformizar/regulizar o suporte amostral dos dados (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

Figura 2.5 – Exemplificação do conceito de suporte amostral. O tamanho, a forma e a orientação da amostra define o suporte.



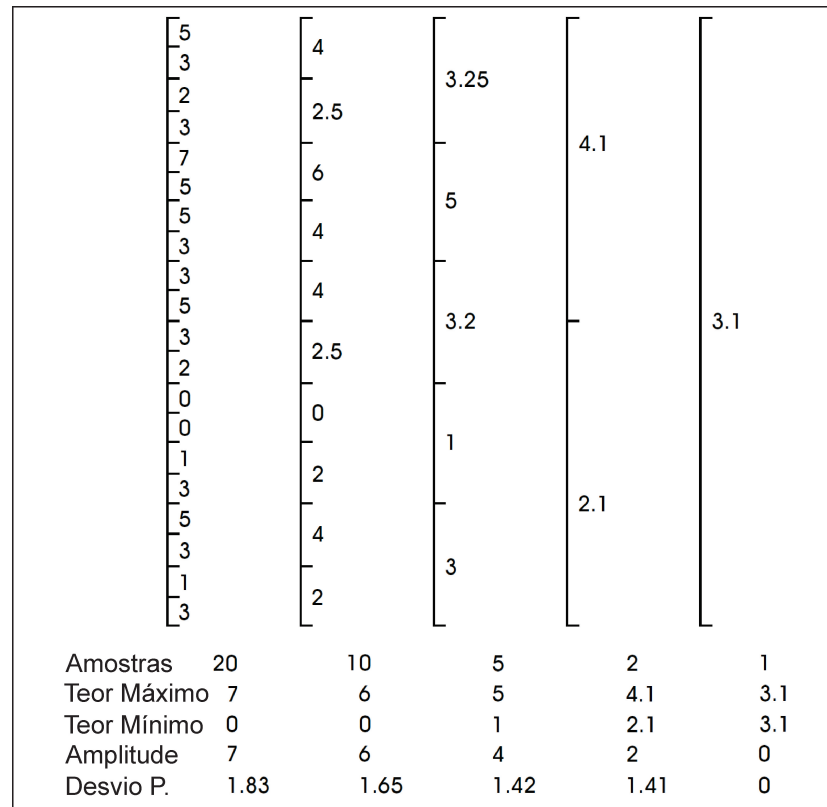
Fonte: Adaptado de (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004)

A realização da compositagem não é estritamente necessária, particularmente para a estimativa de recursos. No entanto, a homogeneização da escala dos dados ou suporte e a correção de intervalos amostrais incompletos (recuperação do testemunho de sondagem) motiva a efetuação da compositagem em praticamente todos os casos (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Outras razões para a realização da compositagem são: (i) reduzir o número de amostras; (ii) padronizar o suporte amostral dos dados; (iii) reduzir o caráter errático dos variogramas pela diminuição do efeito de amostras com teor muito elevado, conseqüentemente facilitando o ajuste variográfico; (iv) produzir amostras padronizadas de acordo com a altura das bancadas, e; (v) regularizar a atribuição dos pesos de estimativa às amostras nos procedimentos de Krigagem (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

O processo de compositagem resulta em amostras com suportes uniformes denominados compósitos, formados por uma combinação de amostras. Em muitos casos, várias amostras individuais são agrupadas fisicamente gerando uma única amostra representativa, cujas variáveis geológicas (teor) são calculadas por uma média ponderada, cujos ponderadores são normalmente os comprimentos das amostras constituintes do compósito (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). A Figura 2.6 mostra um esquema de compositagem, cujos ponderadores são os comprimentos amostrais. Observa-se a diminuição contínua do desvio padrão com o aumento do comprimento do compósito.

Os compósitos, constituídos de amostras de suporte padronizado, são a base para a realização de estimativas nos locais não amostrados, seja para fins de modelagem geológica por métodos geoestatísticos ou, mais adiante, para elaboração de inventários minerais (estimativas de teor e tonelagens).

Figura 2.6 – Exemplo de formação de compósitos a partir de uma média ponderada com comprimentos amostrais como ponderadores.



Fonte: Adaptado de (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004)

### 2.1.3 Modelagem Geológica

As informações coletadas por meio da amostragem são a base para o desenvolvimento de uma imagem tridimensional do depósito mineral, também denominado de modelo geológico, o qual é uma representação dos corpos geológicos em subsolo. Como as amostras representam apenas uma pequena parte do volume total do depósito, são necessárias interpretações para o desenvolvimento de um modelo tridimensional, a qual envolve a interpolação de características geológicas entre sítios/locais amostrados (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). O objetivo é quantificar o melhor possível as características geológicas observadas no que tange a tamanho, forma e distribuição (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

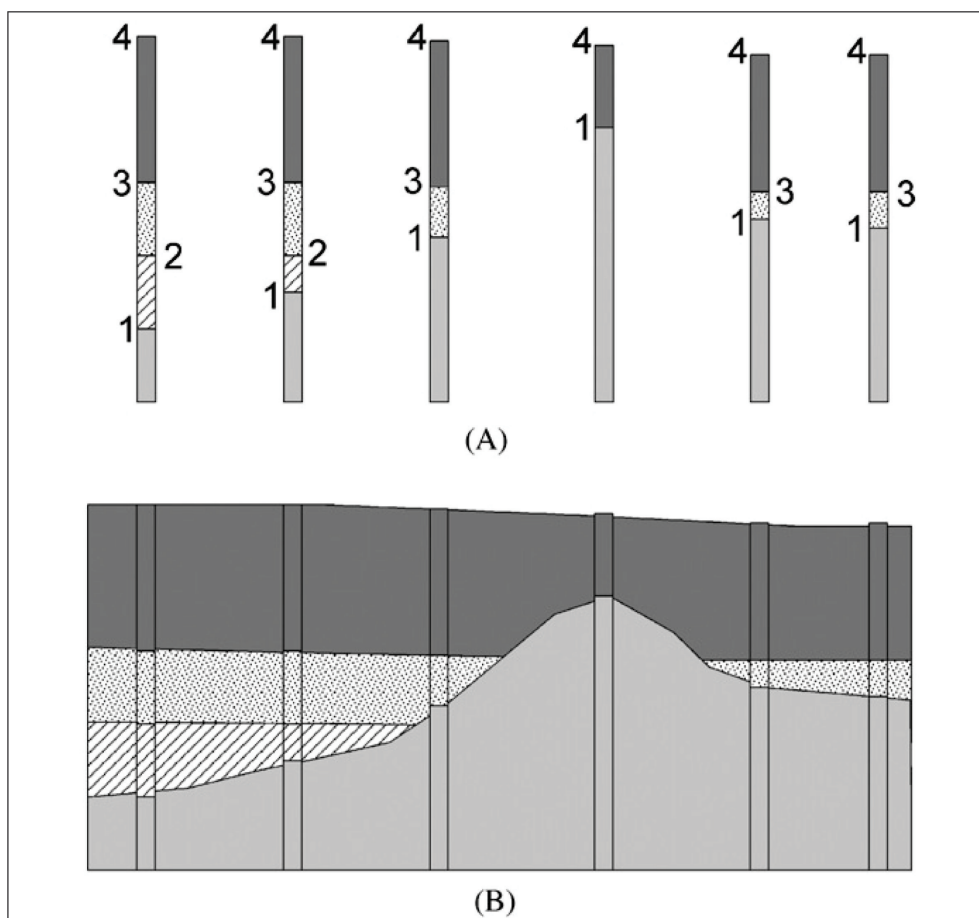
A modelagem consiste na inferência do comportamento da realidade a partir de informações coletadas, neste caso, amostras. O objetivo final desse procedimento é estabelecer uma representação física ou matemática de um sistema ou teoria, considerando-se alguns ou todos parâmetros da realidade (HALDAR, 2013) (CALCAGNO *et al.*, 2008).

O modelo geológico, especificamente, é uma representação física do formato do corpo mineralizado e arredores, a qual é formulada a partir de observações do passado (conheci-

mento da gênese do depósito), dados coletados (amostras) e interpretação, obtendo-se então um protótipo experimental e empírico. As informações coletadas, juntamente com o modelo geológico, permitem prever teores e outros parâmetros e são usados para desenho de mina, planejamento, sequenciamento da lavra, mistura de minérios (*blend*) e controle de qualidade (HALDAR, 2013).

A construção do modelo do depósito pode ser feita basicamente a partir de duas abordagens: (i) modelagem tradicional ou por seções transversais; ou, (ii) modelagem geoestatística. A abordagem tradicional se baseia na interpretação das variáveis geológicas em seções transversais (Figura 2.7) e mapas em planta, realizando-se um prolongamento de tais interpretações para sólidos tridimensionais (Figura 2.8), processo denominado de modelamento geológico determinístico, uma vez que não envolve a quantificação da incerteza associada ao modelo. O nível de confiança no delineamento dos contatos geológicos depende fundamentalmente da densidade da amostragem, isto é, número de amostras. Ainda, em casos de ausência de continuidade geológica entre seções a interpretação se torna muito pouco precisa, gerando, conseqüentemente, pouca confiança no delineamento (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Figura 2.7 – Exemplo de uma interpretação geológica em uma seção transversal



Fonte: (LEMON; JONES, 2003)