



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**UNIDADE ARAXÁ**  
**DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DO ÂNGULO DE TALUDE NA DELINEAÇÃO DA  
CAVA FINAL- ESTUDO DE CASO: MINA F4, VALE FERTILIZANTES**

**BERNARDO JOSÉ AKEL LEMOS OLIVEIRA**

**ARAXÁ**

**2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**UNIDADE ARAXÁ**  
**DEPARTAMENTO DE MINAS CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DO ÂNGULO DE TALUDE NA DELINEAÇÃO DA  
CAVA FINAL- ESTUDO DE CASO: MINA F4, VALE FERTILIZANTES**

**BERNARDO JOSÉ AKEL LEMOS OLIVEIRA**

**ORIENTADOR**

**MARCÉLIO PRADO FONTES**

**ARAXÁ**

**2016**

BERNARDO JOSÉ AKEL LEMOS OLIVEIRA

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DO ÂNGULO DE TALUDE NA DELINEAÇÃO DA  
CAVA FINAL- ESTUDO DE CASO: MINA F4, VALE FERTILIZANTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Educação tecnológica de  
Minas Gerais, Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. MSc. Marcélio Prado Fontes- CEFET/ARAXÁ  
Presidente da Banca Examinadora - Orientador

---

Prof. MSc. Silvânia Alves Braga  
Examinador – CEFET/ARAXÁ

---

Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo – CEFET/ARAXÁ  
Examinador – CEFET/ARAXÁ

Oliveira, Bernardo José Akel Lemos

Avaliação geométrica do ângulo de talude na delimitação da cava final- Estudo de caso: Mina F4, Vale fertilizantes / Bernardo José Akel Lemos Oliveira. - Minas Gerais, 2016.

58f.

Orientador: Marcélio Prado Fontes.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de minas e construção civil, 2016.

1. Planejamento de mina. 2. Geometria de cava. 3. Engenharia de Minas. I. Fontes, Marcélio Prado, orient. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.



Para os meus pais que não mediram esforços na minha educação e formação profissional. A eles todo agradecimento possível. Que a luta que empreenderam nessa missão seja recompensada pela minha eterna dedicação.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou imensamente grato a Deus, por possibilitar a realização deste trabalho e minha graduação. A minha família, especialmente meus pais e avós, que sempre me apoiaram e deram todas as condições necessárias para minha formação pessoal.

Aos meus amigos, com quem pude sempre ter uma convivência sadia e harmoniosa, dentro e fora do CEFET.

A todos os professores da instituição, que contribuíram para minha formação profissional, acadêmica e pessoal, em especial os professores Dr. Felipe de Moraes Russo e Dr. Maurício Antônio Carneiro e a professora MSc. Silvânia Alves Braga. E, principalmente ao meu orientador, professor MSc. Marcélio Prado Fontes, sempre solícito e cuja colaboração foi fundamental para a realização deste trabalho.

A todos vocês, sou eternamente grato.

“Pai, que as nossas vontades coincidam, mas  
que a tua prevaleça! ”

## RESUMO

Um planejamento inadequado da lavra pode gerar problemas graves, como o empobrecimento da massa de material que será explotado no futuro ou a exaustão prematura dos recursos. O estudo dos parâmetros de lavra é de fundamental importância para a sustentabilidade do empreendimento mineiro. Sendo assim, as variáveis geométricas devem ser determinadas buscando a economicidade sob a luz da segurança. Neste trabalho foi simulada a variação do ângulo individual de talude e suas consequências econômicas e geométricas. Os resultados foram evidenciados no volume de minério e estéril, na REM, no teor médio do minério da cava e no custo de remoção do material desprovido de valor econômico.

**Palavras chave:** planejamento de lavra; custo operacional; ângulo individual; relação estéril-minério.

## ABSTRACT

An inaccurate mining planning may cause big problems, such as the impoverishment of the material that is going to be exploited in the next years, or the early exhaustion of the mineral resources. The study of the mining parameters is essential for the mining enterprise's sustainability, so that the geometrical parameters should be determined in order to reach economic viability without setting safety issues apart. In the following work, the individual angle of the bench and its economic and geometric consequences have been simulated. The results were evidenced in the ore and waste volume, in the respective REM, in the ore's average grade and also in the waste removal's costs.

**Key words:** Mining planning; operational costs; individual angle; REM.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	<i>Apresentação</i> .....	1
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1	Fases da Mineração .....	3
2.1.1	Prospecção .....	3
2.1.2	Exploração .....	3
2.1.3	Desenvolvimento.....	4
2.1.4	Lavra .....	4
2.1.5	Fechamento da Mina.....	5
2.2	Conhecimento da Jazida .....	6
2.2.1	Análise do Relatório de Pesquisa.....	6
2.2.2	Estimativa do Corpo de Minério.....	6
2.2.2.1	Métodos Clássicos .....	7
2.2.2.2	Métodos de Distâncias Pesadas e Geoestatística.....	7
2.3	Teor de Corte.....	8
2.4	Delineação da Cava Final .....	11
2.5.	Modelo Geológico .....	12
2.6	Determinação do Custo de Mineração.....	13
2.6.2	Função Benefício .....	15
2.7	Métodos de se Delinear a Cava Final.....	15
2.7.1	Método Manual.....	15
2.7.2	Métodos computadorizados .....	16
2.8	Planejamento de Mina .....	21
2.8.1	Planejamento a longo prazo.....	22
2.8.2	Planejamento a médio prazo.....	22
2.8.3	Planejamento a curto prazo .....	22
2.8.4	Etapas de estudo da fase de planejamento .....	23
2.9	Sequenciamento de Lavra .....	23
2.10	Geometria da Cava .....	28
2.10.1	Altura dos Bancos .....	29
2.10.2	Largura da Bancada .....	29
2.10.3	Ângulo Individual do talude.....	30
2.10.4	Ângulo Geral de Talude .....	31
2.11	Considerações Geotécnicas.....	33
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>43</b>

# **1 Introdução**

## **1.1 Apresentação**

A mineração é uma atividade de relevância ímpar para o desenvolvimento econômico e social de muitas cidades e regiões no Brasil e no mundo. A aplicação dos minerais exerce fundamental importância sobre os bens de consumo duráveis e no desenvolvimento de tecnologia, proporcionando uma melhor qualidade de vida. No entanto, os recursos minerais são finitos e não renováveis.

De acordo com Costa (1979) o principal objetivo da indústria mineral é a maximização do valor líquido atual dos benefícios monetários futuros, ao longo de toda a vida da mina. Um planejamento inadequado da lavra pode gerar problemas graves, como o empobrecimento da massa de material que será explorada no futuro ou a exaustão prematura dos recursos, como consequência de uma lavra predatória, que ataca as partes mais ricas do depósito, sem remover um volume significativo de material considerado estéril e sem liberar o minério restante para os anos seguintes.

O planejamento de lavra pode ser dividido em curto, médio e longo prazo, visando, de forma generalizada, o aproveitamento racional da jazida, de modo a prevenir e minimizar os possíveis problemas futuros (Fontes 2016).

Nesse contexto, vários parâmetros geométricos devem ser estudados e corretamente determinados para que a economicidade do empreendimento mineral seja maximizada. Tais parâmetros, como a altura e largura dos bancos, largura e inclinação das rampas e ângulo individual e geral de talude definem o limite da cava final operacionalizada.

## **1.2 Justificativa**

Para Peroni (2002) o propósito de um planejamento de lavra tem sido prover subsídio para o engenheiro de minas decidir sobre a capacidade de lavar determinadas unidades do depósito mineral a partir de teores estimados. Já de acordo

com Carmo (2001), durante a exploração a céu aberto, o terreno é escavado continuamente, até que o limite inferior da cava final seja atingido. O contorno final da cava da mina é determinado antes do início da operação, ou seja, na fase de projeto e os limites finais da cava definem o tamanho e a forma de uma mina a céu aberto no final de sua vida útil, buscando a maximização do lucro.

Pequenas variações nos parâmetros geométricos da cava podem alterar significativamente a massa de minério e estéril contida na cava final e, conseqüentemente, a relação estéril-minério. Desse modo, uma cava corretamente determinada permite o melhor aproveitamento do corpo de minério, aumentando a vida útil da mina e reduzindo o volume de estéril a ser removido, que deve ser o menor possível, uma vez que não representa uma forma de retorno financeiro à empresa.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é o treinamento com o *software DATAMINE*, cujo uso já se encontra difundido e consolidado no mercado. O objetivo específico do trabalho é simular o ângulo individual de talude, através do referido *software*, avaliando os impactos geométricos na cava. O estudo visa demonstrar a massa e teor de minério, massa de estéril, além do valor da REM e do ângulo geral de talude. Para a execução do trabalho foram utilizados os dados da mina F4, situada no complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Araxá, Minas gerais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Fases da Mineração**

De acordo com Hartman *et al.* (2002) as empresas mineradoras, principalmente aquelas consideradas de grande porte, fazem hoje um esforço positivo para estabelecer diante da sociedade uma imagem de referência em sustentabilidade e segurança no trabalho. O objetivo é produzir os bens minerais com o menor dano possível ao meio-ambiente, garantindo segurança e saúde aos funcionários e contribuindo para o desenvolvimento das regiões nas quais as operações são conduzidas, cumprindo com suas obrigações legais.

De acordo com o interesse da empresa e/ou investidores, pode-se dar início as cinco fases da mineração, cujas execuções estão inter-relacionadas. São elas: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e fechamento da mina.

#### **2.1.1 Prospecção**

A prospecção corresponde à fase de procura de anomalias que possam indicar a presença de um depósito mineral, que é uma concentração anômala de um bem mineral metálico, ou não- metálico, na superfície ou no interior da Terra e, possivelmente, uma jazida, quando estudos apontam que esse depósito possui valor econômico.

#### **2.1.2 Exploração**

A fase de exploração consiste na aplicação sistemática dos trabalhos necessários ao conhecimento geológico detalhado das ocorrências minerais descobertas, levando a definição e avaliação do depósito.

Geralmente, o desenvolvimento da fase de exploração ocorre da seguinte forma. Primeiramente, a área favorável a presença de um depósito mineral, que foi identificada pela prospecção, é delimitada. Uma vez localizado, o depósito mineral é parcialmente amostrado, sendo as amostras recolhidas analisadas. Então os dados

da amostragem são utilizados para preparar uma estimativa de massa e teor do minério, possibilitando o cálculo do valor de parte do depósito, levando em conta a viabilidade econômica.

### 2.1.3 Desenvolvimento

A fase de desenvolvimento, por sua vez, engloba todos os trabalhos preparatórios necessários para o aproveitamento da jazida mineral de forma eficiente e segura, como vias de acesso e transporte, sistemas de drenagem, supressão da vegetação e marcações topográficas.

Maia (1980) definiu as operações de desenvolvimento como propriamente uma preparação para a lavra, realizadas em um corpo cuja utilização econômica já foi comprovada, podendo ser agrupadas em:

- A) a céu aberto ou subterrânea;
- B) prévias ou simultâneas com a lavra;
- C) sistemáticas ou supletivas;
- D) produtivas ou obras mortas;
- E) puras ou exploratórias;

O desenvolvimento sistemático, executado em coordenação com o método de lavra escolhido e com a produção diária visada, deve prover o acesso aos vários horizontes da jazida, além de dividir o corpo em convenientes unidades de desmonte e prover aberturas para a execução de manobras e instalações, de modo a possibilitar uma lavra econômica e segura.

### 2.1.4 Lavra

Enquanto a lavra, ou exploração, representa o conjunto de operações que possibilitam o aproveitamento econômico desejável do minério, de forma segura e ambientalmente sustentável.

A mina corresponde a jazida em lavra, ainda que operações estejam paralisadas ou temporariamente interrompidas. São também consideradas partes integrantes da mina toda a infraestrutura de apoio da produção, como edificações, máquinas e insumos em geral. Geralmente, o ciclo operacional para rochas resistentes é composto pelas etapas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte, e para rochas friáveis pelas etapas de carregamento e transporte.

#### 2.1.5 Fechamento da Mina

O último estágio de operação de quase todas as minas é o processo de fechamento, que envolve a recuperação da área a partir da revegetação e restauração da terra e dos recursos hídricos. Para Hartman *et al.* (2002), o melhor momento para que a recuperação do local tenha início é antes mesmo que as primeiras escavações tenham começado. Em outras palavras, o engenheiro de minas responsável pelo planejamento deve trabalhar considerando, desde o início, o processo de fechamento, visando minimizar os custos envolvidos.

Muitas preocupações são relevantes no processo de fechamento de uma mina e devem ser salientadas. A primeira refere-se à segurança da área do entorno da mina, principalmente se esta permite o acesso da população, no geral. As empresas mineradoras são responsáveis pelo fechamento de todos os poços, *shafts*, ou buracos quaisquer que possam vir a oferecer qualquer risco a segurança física das pessoas. Da mesma forma, todas as taludes, pilhas de estéril e estruturas geológicas presentes exigem a ação de medidas mitigadoras que evitem condições de instabilidade.

A segunda diz respeito à restauração da superfície da terra, bem como da qualidade da água e à manutenção das barragens de rejeito, prevenindo qualquer iminente risco de poluição e contaminação decorrente da ação do vento, da água e da erosão do solo. A restauração das espécies de plantas nativas é também parte importante do processo, uma vez que estas contribuem favoravelmente à estabilidade do solo e à naturalização da área.

A preocupação final consiste no uso subsequente do local após o esgotamento da mina. É interessante que o aproveitamento da área seja benéfico à população local,

contribuindo para a imagem da empresa perante a sociedade. A fase de fechamento da mina tem importância ímpar, devendo ser planejada o quanto antes durante a vida útil da mina.

## **2.2 Conhecimento da Jazida**

### **2.2.1 Análise do Relatório de Pesquisa**

A análise criteriosa do relatório de pesquisa é a primeira oportunidade para se conhecer a jazida em termos de quantidade e qualidade das reservas, do método de determinação desses parâmetros e sua confiabilidade. As avaliações são feitas com base em dados amostrados e estão sujeitas a erros. O real valor das variáveis de interesse, no processo de avaliação das reservas, somente será conhecido durante a lavra.

Um dos principais desafios enfrentados ao determinar o volume e o teor de uma reserva começa a forma de amostragem para um dado depósito mineral. O depósito pode ser definido em termos de um “*grid*”, uma matriz tridimensional de pontos no depósito. O ideal seria obter amostras de pontos igualmente espaçados pelo *grid*, possibilitando-se assim a definição dos limites e do teor do corpo de minério. No entanto, restrições práticas comumente inviabilizam esse objetivo. Logo, *grids* de amostragem básicos podem ser de duas formas geométricas, regular ou irregular. Sempre que possível é usado um padrão regular de pontos, visto que amostras igualmente espaçadas normalmente produzem maior quantidade de informações com um custo menor.

### **2.2.2 Estimativa do Corpo de Minério**

A estimativa do corpo de minério providencia as informações básicas necessárias para determinar se a ocorrência mineral será convertida em jazida. Este processo começa durante a fase de exploração e se estende por toda a vida da mina.

Duas categorias gerais de métodos são comumente empregadas na fase da estimativa do corpo de minério: métodos clássicos e métodos geoestatísticos.

### 2.2.2.1 Métodos Clássicos

A primeira são os métodos clássicos, que utilizam o princípio da área ou volume de influência para determinar a tonelagem e o teor do depósito. Esses métodos usam um número limitado de amostras para atribuir um teor a uma área ou volume.

### 2.2.2.2 Método do Inverso da distância e potência

A segunda categoria consiste nos métodos do inverso da distância e potência, que atribuem valores de teores ao redor de uma amostra conhecida, resultando em uma estimativa do teor em uma área ou bloco. Ambos atribuem um valor de teor em pontos de amostragem na vizinhança. Todos os procedimentos usados nessa categoria assumem que a influência de qualquer amostra na determinação do teor de uma área ou bloco é uma função de quão distante essa amostra está do local a ser estimado. Os pesos atribuídos são reduzidos à medida que as amostras se afastam do bloco a ser estimado. Esses métodos são estatisticamente superiores aos métodos clássicos por considerarem um maior número de informações ao realizarem as estimativas.

Enquanto os modelos da estatística clássica estão voltados para a verificação da distribuição de frequência dos dados, o estudo geoestatístico tem como ponto de partida um conjunto de dados constituídos por amostras geoposicionadas, incorporando a interpretação da distribuição estatística, bem como a correlação espacial das amostras. As análises quantitativa e qualitativa dessas amostras são utilizadas para inferir as propriedades do fenômeno espacial. Sendo assim, a Geoestatística tem como objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial, com determinação das incertezas associadas (Fontes 2016).

Nesse contexto, os métodos geoestatísticos surgiram para integrar os aspectos espacial (topológico) e aleatório (probabilístico). Esses se baseiam na Teoria das Variáveis Regionalizadas, a partir da qual é possível estudar a estrutura espacial, que exerce determinante influência sobre o valor associado a cada ponto. Em termos gerais, existe uma família chamada de métodos de Krigagem, a qual estima o valor

médio de um ponto ou bloco; e há também um outro grupo de métodos que estima não apenas a média, mas toda a função de distribuição de probabilidade do teor em um certo ponto ou bloco (Carmo 2001).

### 2.3 Teor de Corte

Um dos grandes desafios existentes no planejamento de mina é a compreensão e determinação do teor de corte ou rejeição. Segundo Taylor (1977), o teor de corte é aquele que por alguma razão específica é usado para separar duas diretrizes de ação, baseando-se nas características econômicas do projeto. Para que determinado bloco seja lavrado, é necessário que seu valor seja suficiente para pagar os referentes custos da lavra, beneficiamento e marketing. Pode acontecer também que um bloco não seja lavrado por seu próprio valor. Nesse caso, o custo da lavra desse bloco é compensado pelos blocos de minério mais profundos, que se tornariam acessíveis com a remoção dos blocos menos profundos.

O teor de corte é a variável que define se o bloco é considerado minério ou estéril. Blocos com valores acima do teor de corte são considerados minério e abaixo deste são considerados estéril. O planejamento da mina é responsável pela decisão se o bloco deve ser lavrado e beneficiado, estocado, depositado na pilha de estéril ou até mesmo não lavrado.

A cada variação no teor de corte, quantificam-se novos valores para reservas geológicas e lavráveis, movimentação total de minério e estéril, relação estéril-minério, metal contido, dentre outros parâmetros.

De acordo com Peroni (2002) *apud* Gama (1986), algumas jazidas minerais aceitam uma relação exponencial do seguinte tipo, apresentado na equação que constitui a equação 2.1:

$$Q = G * e$$

Equação 2.1 - Cálculo da reserva lavrável.

Onde:

Q= Reserva lavrável, com teor acima do teor de corte (Tc);

G= Reserva geológica total (Tm);

Ressalta-se que para um teor de corte igual a zero, as reservas lavráveis e geológicas se igualam.

Dessa forma, o metal (M) contido no interior da reserva lavrável seria representado conforme a equação que constitui a equação 2.2:

$$M = Q(Tc - Tm)$$

Equação 2.2 - Quantidade de metal contido na reserva lavrável.

Nesse caso, o teor médio da reserva lavrável seria igual a soma do teor de corte com o teor médio da reserva geológica.

Depois da avaliação inicial das reservas por métodos clássicos e/ou geoestatísticos, é necessário selecionar as reservas lavráveis, considerando também fatores referentes ao mercado e tecnologia. Assim, o aproveitamento ótimo da jazida não se restringe apenas a determinação do teor de corte e determinação dos blocos de lavra, compreendendo também a caracterização ótima da jazida, a escolha dos métodos adequados de beneficiamento, e identificação dos parâmetros influentes na lavra e no beneficiamento.

O instrumento clássico de planejamento nessa fase de seleção é a curva tonelagem x teor, que fornece a tonelagem total de minério a ser extraído a partir de um certo teor de corte. É também de grande utilidade a curva teor médio da reserva lavrável x teor de corte, que informa o teor médio do minério retirado acima do teor de corte.

Através das curvas de parametrização, as grandezas teor de corte, teor médio e volume e tonelagem de uma certa reserva mineral podem ser inter-relacionadas.

Nota-se na figura 2.1 que à medida que o teor de corte aumenta, têm-se na jazida uma maior quantidade de material considerado estéril e uma menor quantidade de minério. Logo, a relação estéril-minério também aumenta.

Da figura 2.2 infere-se, além do aumento da relação estéril-minério oriundo de um teor de corte maior, que o teor médio do minério será maior quanto maior for o teor de corte. É importante atentar-se ao fato de que o teor médio, nesse caso, refere-se ao teor médio do minério acima de um dado teor de corte, e não ao teor médio da reserva geológica. Através das interpretações destas curvas faz-se possível a otimização do processo de lavra, definindo-se o teor de corte e o ritmo de lavra que mais se adequa às necessidades do empreendimento.

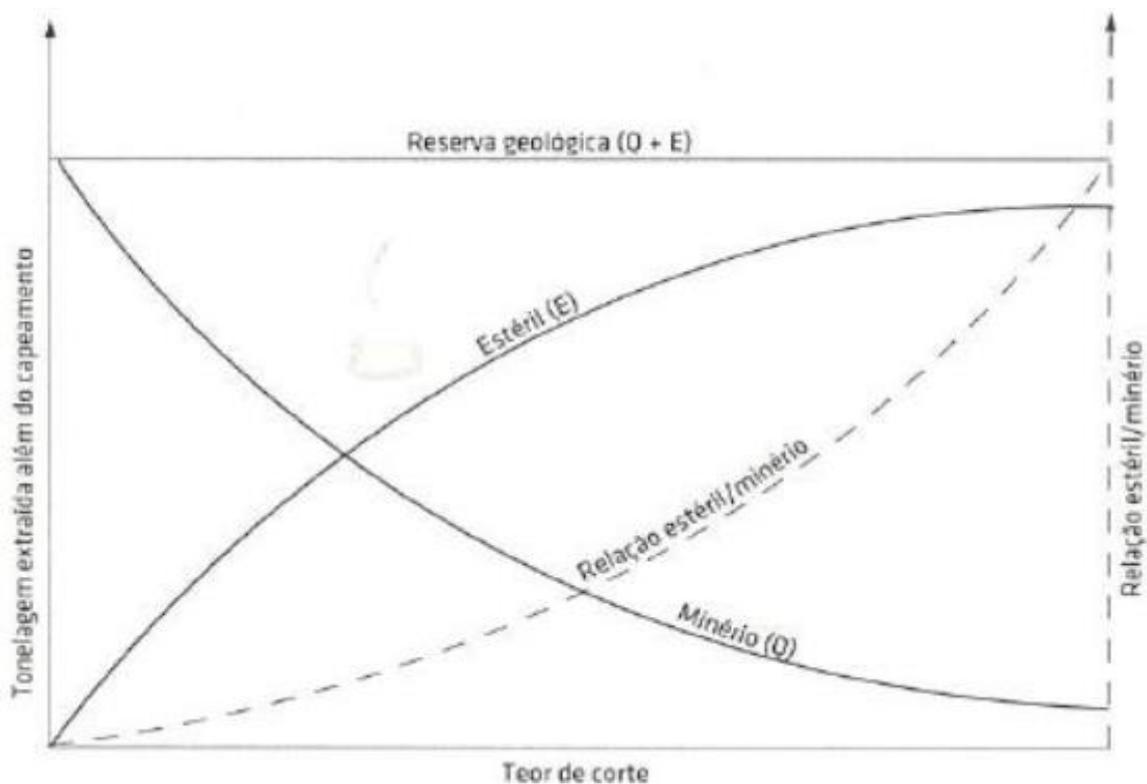


Figura 2.1 - Variação das reservas minerais e da relação estéril-minério em função do teor de corte para minas a céu aberto. Fonte: SME – Mining Engineering Handbook.

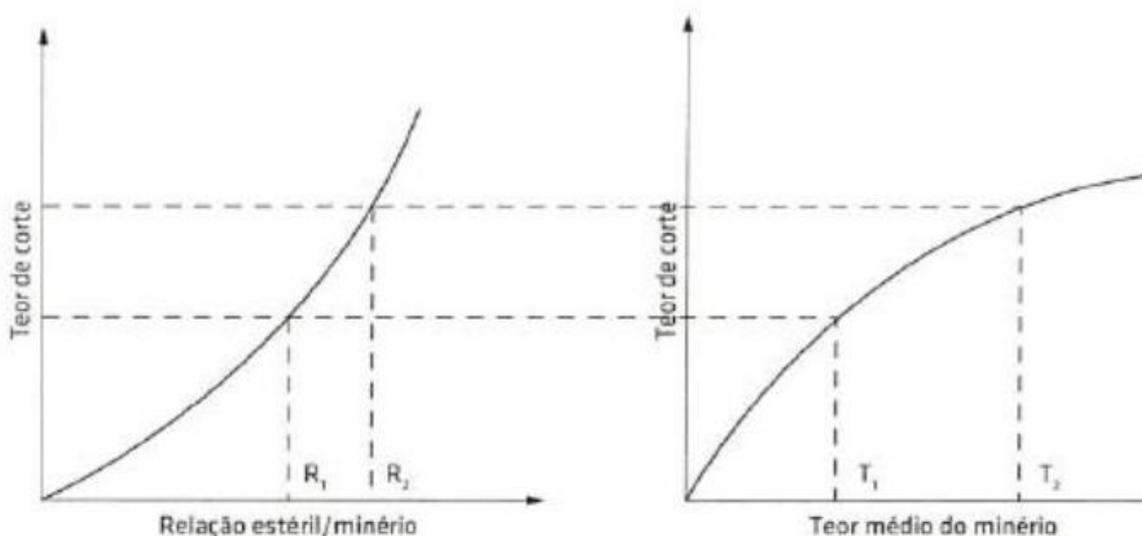


Figura 2.2 - Relação entre o teor de corte e a variação da relação estéril-minério e do teor médio do minério. Fonte: SME – Mining Engineering Handbook.

## 2.4 Delineação da Cava Final

Uma das principais tarefas do engenheiro de minas no desenvolvimento de um empreendimento mineiro é a delimitação da cava final. Três tipos de fatores estão envolvidos nesse processo:

A) Fatores naturais e geológicos: condições geológicas, tipos de minério, condições hidrológicas, topografia e condições metalúrgicas do minério.

B) Fatores econômicos: teor e tonelagem do minério, razão de extração, teor de corte, custos operacionais e de investimento, lucro desejado, razão de produção e condições de mercado.

C) Fatores tecnológicos: equipamentos, ângulos do talude, altura da bancada, construções de rampas e vias de acesso, limites de propriedade e limites de concessão de lavra e tecnologias de beneficiamento.

Pode-se afirmar com segurança que a determinação do limite da cava final é a consideração mais importante e trabalhosa no planejamento de lavra, uma vez que todas as decisões tomadas no projeto de lavra baseiam-se neste limite. É de igual

importância o estabelecimento de um sequenciamento ótimo de lavra e de um cronograma de produção ao longo da vida da mina.

Os limites da cava definem a quantidade de minério e estéril que devem ser movimentados durante toda a operação de produção, sendo sua determinação importante para o planejamento a longo e médio prazo. O tamanho, a geometria e a localização da cava final são fatores importantes no planejamento das pilhas de estéril, vias de acesso, plantas de beneficiamento e desenvolvimento e infraestrutura da mina.

A delimitação da cava final é feita pelos métodos de otimização baseados em algoritmos como Lerchs- Grossman e Cone Flutuante. Geralmente é necessário ter um modelo de blocos e uma função benefício como banco de dados para a otimização. É possível variar o preço da venda do produto dentro da função benefício, sendo assim, uma nova cava final é gerada. Um conjunto de cavas otimizadas possíveis permite o desenvolvimento de análises de sensibilidade e estudos de viabilidade econômica, que ajudam a identificar o limite da cava final mais provável ao mesmo tempo em que se maximiza o VPL do projeto.

A configuração da cava final é geralmente definida fazendo-se uso do preço mais provável do bem mineral (considerando o mercado). Para preços menores do que esse valor, são geradas sucessivas cavas menores, que migram em direção às áreas de maior teor e menor razão estéril/minério (Hustrulid *et al.* 2006).

## **2.5. Modelo Geológico**

Com o avanço da informática e o crescente emprego de algoritmos no planejamento de lavra, a representação de corpos de minério por meio do modelo de blocos se consolidou como uma ferramenta imprescindível para o engenheiro de minas, ao invés da representação por seções manuais, oferecendo possibilidades novas e mais amplas para o planejamento.

A posição geométrica de um bloco é fixada em relação a um devido sistema de coordenadas. São atribuídas a cada bloco informações referentes a sua geologia,

mecânica de rochas, processamento mineral e custo. Tal atribuição pode ser feita através de distintas técnicas, das quais têm destaque: a geoestatística, por meio da krigagem; o inverso da potência da distância e o método dos polígonos.

O dimensionamento do bloco unitário considera as características da mineralização e a quantidade de informações disponíveis, sendo o tamanho do banco de dados uma função da precisão da estimativa das variáveis de interesse. A confiabilidade do modelo está diretamente relacionada ao dimensionamento do tamanho dos blocos, sendo prejudicada pelos erros de estimativa, que são maiores quando trabalha-se com blocos pequenos.

O modelo mais utilizado é o tridimensional regular, cuja principal característica é a igualdade nas dimensões do bloco, onde a altura deste é geralmente coincidente com a altura da bancada de lavra, e a seção horizontal, por sua vez, tem forma quadrada ou retangular.

Em todo planejamento mineiro o modelo de blocos é a base para os projetos de cava nos métodos computadorizados. Ele apresenta o corpo de minério antes da representação em seções e armazena as informações que serão utilizadas no decorrer da lavra. O primeiro passo é ajustar os limites de uma “caixa vazia”, que no *DATAMINE* é chamada de “próton” para cobrir a área de interesse. Essa “caixa vazia” é então preenchida com blocos tridimensionais regulares. Em geral, o modelo de blocos capacita planos de mineração a eficiência seletiva para a extração de minério nas partes física e econômica.

## **2.6 Determinação do Custo de Mineração**

As grandezas teor de corte, teor médio e volume e tonelagem de uma certa reserva mineral estão profundamente relacionadas, de modo que ao se estabelecer o valor de algumas dessas variáveis, as outras ficam automaticamente fixadas. Na maioria das vezes o valor a ser fixado é o teor médio do minério a ser lavrado, que deverá atender aos pré-requisitos técnicos e econômicos do conjunto mina-beneficiamento.

O teor médio deve minimizar a soma do custo de mineração (soma dos custos de lavra e beneficiamento), e ao mesmo tempo, promover o máximo aproveitamento possível da reserva mineral.

Um aumento do teor médio de alimentação da usina de beneficiamento pode ser responsável por uma diminuição no custo do tratamento de minérios, porém, corresponde também a um aumento no teor de corte e, conseqüentemente, na diminuição da reserva lavrável e no aumento da relação estéril-minério, o que causa um aumento no custo de lavra.

Após o conhecimento da jazida, são feitas pesquisas que ajudam a avaliar o comportamento do mercado em relação ao bem mineral que será produzido. São também estudadas as tendências de evolução dos preços, tanto de venda do produto final da mina, quanto dos custos dos insumos de produção, considerando a vida útil estimada para a mina.

Antes que a decisão de implantação do projeto seja tomada, deve-se assegurar que o bem mineral a ser comercializado tenha seu consumo garantido por um tempo, no mínimo, suficiente para pagar os investimentos necessários. Isso é feito através de pesquisa histórica de evolução de preços, conhecimentos de política mineral e mercado internacional, além de alta sensibilidade técnica e econômica.

A determinação da escala de produção de um empreendimento mineiro é estabelecida em razão das reservas minerais, da conjuntura tecnológica econômica e da pesquisa de mercado. Dessa forma, infere-se que uma lavra muito rápida, com elevadas escalas de produção, pode não fornecer tempo suficiente para a depreciação dos equipamentos, instalações e imóveis. Por outro lado, reduzidas escalas de produção prejudicam a taxa interna de retorno do investimento.

Para Costa (1979), as pesquisas tecnológicas têm como objetivo a determinação dos tipos de minério e estéril, dos processos de tratamento de minério e dos principais parâmetros geotécnicos, enquadrando a realidade geológica dentro do conceito tecnológico.

## 2.6.2 Função Benefício

O valor econômico dos blocos do modelo geológico é essencial para as etapas subsequentes do projeto mineiro, podendo ser definido como a diferença entre sua renda, ou valor de sua parte recuperável (financeiramente) e seus custos diretos, que são atribuídos diretamente ao bloco, incluindo, por exemplo, custos de perfuração, detonação, carregamento e transporte.

Através da diferença entre a soma dos valores econômicos de todos os blocos e seus custos indiretos, que são aqueles dependentes do tempo, como salários e depreciação dos equipamentos, tem-se o valor do lucro ou prejuízo.

Blocos de estéril comumente possuem valor econômico negativo, uma vez que sua renda é zero e os custos de lavra continuam existindo. Já blocos que contêm minério e estéril misturados, ou apenas minério, apresentam um valor econômico que pode ser menor, igual ou maior que zero, dependendo da quantidade e qualidade de minério contida nesses blocos.

## 2.7 Métodos de se Delinear a Cava Final

### 2.7.1 Método Manual

O método manual de projeção de cavas envolve um tempo considerável e a habilidade por parte do engenheiro. Este método foi utilizado até a década de 1950.

Para o desenvolvimento desse processo, é necessário que tenha-se uma base de dados confiável e que forneça informações suficientes para dar suporte ao trabalho técnico. As informações básicas requeridas são:

A) Perfis geológicos do depósito mineral, com delimitação das diversas litologias presentes, com distâncias igualmente espaçadas;

B) Seções horizontais e verticais, destacando principalmente os contatos entre minério e estéril;

C) Mapa topográfico atualizado, englobando toda a área da mina;

D) Definição dos ângulos das faces dos taludes para os vários setores da mina;

E) Definição dos equipamentos que serão utilizados na lavra;

F) Curvas de parametrização suficientes para a quantificação das substâncias minerais úteis, com qualidade superior a mínima rentável;

### 2.7.2 Métodos computadorizados

É fato que o método manual permite com que o engenheiro esteja profundamente envolvido com a projeção da cava e seu design, aumentando seu conhecimento do depósito. Contudo, os procedimentos são demorados, limitados e difíceis de serem aplicados para depósitos largos e complexos. Quando mais informações são acrescentadas ao projeto ou se algum dos parâmetros de design é alterado, o processo todo deverá ser repetido. Outro fator desfavorável ao método manual é que apesar de cada seção da cava ser bem desenhada, quando as seções são juntadas e cava é suavizada, o resultado final pode não ser precisamente representativo.

O crescimento da utilização dos computadores permitiu que os engenheiros lidem com um número maior de informações e examinem um maior número de alternativas de cava. Em todo o planejamento mineiro o modelo de blocos é a base para os projetos de cava nos métodos computadorizados.

As técnicas mais usadas para o projeto de limites finais de cava são a simulação, que abrange a técnica dos cones móveis, e os métodos de programação dinâmica, que incluem algoritmos bidimensionais e tridimensionais.

O primeiro algoritmo apresentado para resolver o problema de abertura de cavas de minas foi apresentado em 1965 por Lerchs e Grossman. Apesar de antigo, é o método mais comum e aplicado na indústria da mineração, por resolver o problema de otimização. Atualmente existem vários outros, derivados deste, como Johnson e Sharp, Koborov, Koenigsberg (1982) e Cameron.

Em 1965, Lerchs e Grossman utilizando a técnica de programação dinâmica, desenvolveram, juntamente com um algoritmo bidimensional de cavas, um tratamento algébrico para a divisão da jazida em blocos tecnológicos. A partir do benefício associado de lavra de um bloco  $i$ , representado por  $B_i$ , o benefício global pode ser otimizado como a busca da combinatória de blocos que maximizem a somatória de  $B_i$  respeitando as restrições pertinentes ao estudo.

De acordo com Peroni (2002) *apud* Lerchs- Grossman (1965) a maneira mais simples de demonstrar o método é através de um exemplo: supondo um corpo mineral, onde os blocos de estéril tenham um valor presente líquido (custo) de -4.000 unidades monetárias/bloco e os blocos de minério apresentem um valor presente líquido de 12.000 unidades monetárias/bloco, o ângulo de talude adotado será de  $35,5^\circ$  para uma geometria de bloco com a relação altura/comprimento de 5/7. A figura 2.3 apresenta um esquema do corpo mineral superposto aos blocos.



Figura 2.3 - Geometria do corpo mineral. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

A figura 2.4 apresenta os blocos com os respectivos VPLs. Como pode ser observado, os blocos do limite do corpo mineral pertencem tanto ao domínio do minério quanto ao domínio do estéril. Uma ponderação foi utilizada para obter a configuração apresentada na figura 2.5. A posição dos blocos será denotada através da notação  $(i,j)$  para posicionar espacialmente os blocos, onde  $i$  representa a linha e  $j$  a coluna em que um determinado bloco está localizado.

-4	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
			-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
				-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
					-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
						-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
							-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
								-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
									-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4
										-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4
												-4	12	12	12	12	-4	-4	-4
														-4	12	12	12	12	-4

Figura 2.3 - Modelo de blocos inicial valorizado economicamente. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

I \ J	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
①	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②		-4	-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
③			-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
④				-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑤					-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑥						-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑦							-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑧								-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑨										-4	12	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4

Figura 2.4 - Modelo de blocos econômico final. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

O primeiro passo é calcular os benefícios cumulativos do modelo econômico, para cada coluna de blocos partindo do topo em direção à base, de modo que cada coluna vertical é independente das outras.

O passo seguinte é a adição de uma linha de valores 0 (no topo), e a colocação dos respectivos valores cumulativos para cada bloco. A figura 2.6 apresenta o resultado da acumulação dos valores para todas as colunas do modelo econômico e a linha de “zeros” adicionada ao topo do modelo.

		Colunas																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
2	-8	-8	-8	-8	-8	-8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
3	-12	-12	-12	-12	-12	4	32	36	20	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
4				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16			
5					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20					
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24						
7							20	52	64	36	4	-24	-28							
8								48	64	48	16	-16	-32							
9									60	56	28	-4	-32							

Figura 2.6 - Soma cumulativa por colunas. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

A etapa seguinte consiste no desenvolvimento de uma soma cumulativa geral movendo-se lateralmente da esquerda para a direita ao longo da seção, iniciando no topo extremo esquerdo até encontrar o primeiro bloco real. Dessa maneira, três blocos são examinados: um imediatamente acima à esquerda; um imediatamente à esquerda e um imediatamente abaixo à esquerda.

A figura 2.7 representa a maneira como é desenvolvida a determinação da soma cumulativa em relação e a direção de extração. Partindo-se do bloco (1,1) mais positivo posicionado mais à esquerda e no topo da seção, os blocos vizinhos na linha acima (linha 0), a linha considerada (linha 1) e a linha abaixo (linha 2) da coluna à esquerda da coluna "0" são examinados. Desses três o valor mais positivo é selecionado, nesse caso o bloco (0,0). Então, a soma dos blocos (1,1) e (0,0) é encontrada e substituída pelo valor original do bloco (1,1), que nesse caso é  $(-4 + 0 = -4)$ . Uma seta é desenhada entre o bloco (1,1) e o bloco selecionado em um processo desenvolvido movendo-se verticalmente para baixo na coluna 1. Quando completada a coluna, a coluna seguinte (coluna 2) é iniciada movendo-se novamente do topo para a base até que todos os blocos sejam tratados. Por não estarem contidos nos limites da cava final, alguns blocos não foram tratados, contudo, o procedimento se repetiria para esses blocos da mesma forma.

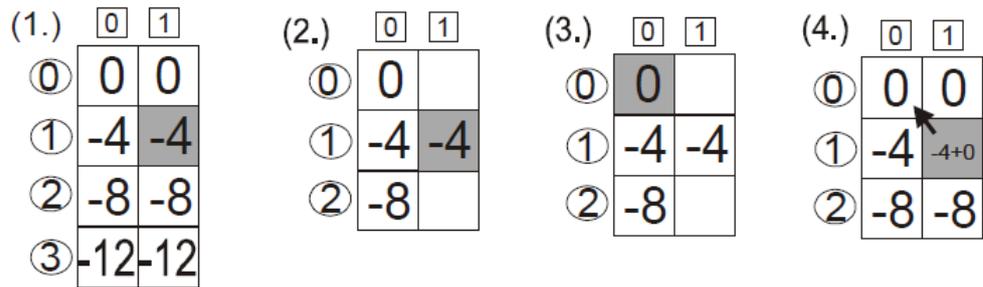


Figura 2.7 - Procedimento para definir o máximo valor cumulativo e maximizar a direção. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

A figura 2.8 por sua vez, mostra a progressão do processo de soma até a coluna 7, onde o valor presente do bloco do qual a seta se origina é somado ao valor presente do bloco contíguo mais positivo, posicionado à esquerda do mesmo.

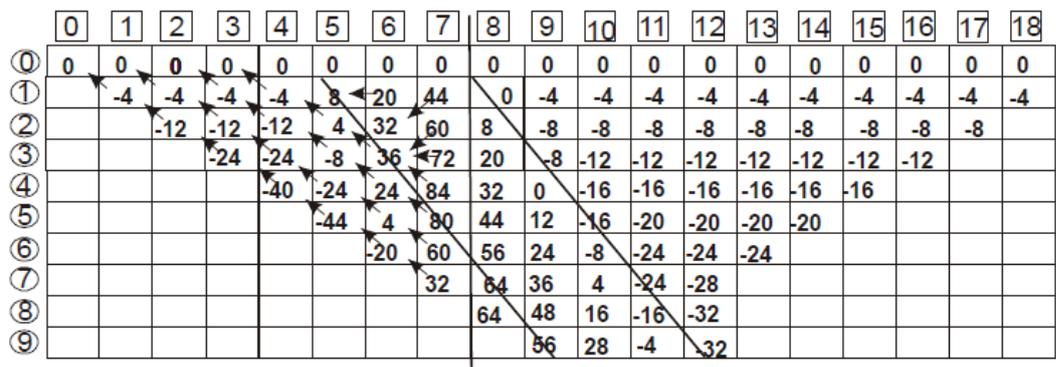


Figura 2.1 - Progressão do processo de soma até a coluna 7. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

A figura 2.9 mostra o processo de soma para todos os blocos da seção trabalhada. Enquanto na figura 2.10 está apresentado o limite da cava final, o qual é definido movendo-se ao longo da primeira linha na figura 2.7, da direita para a esquerda, até que o maior valor seja encontrado. As setas são então seguidas para dar o limite da cava final para essa seção.

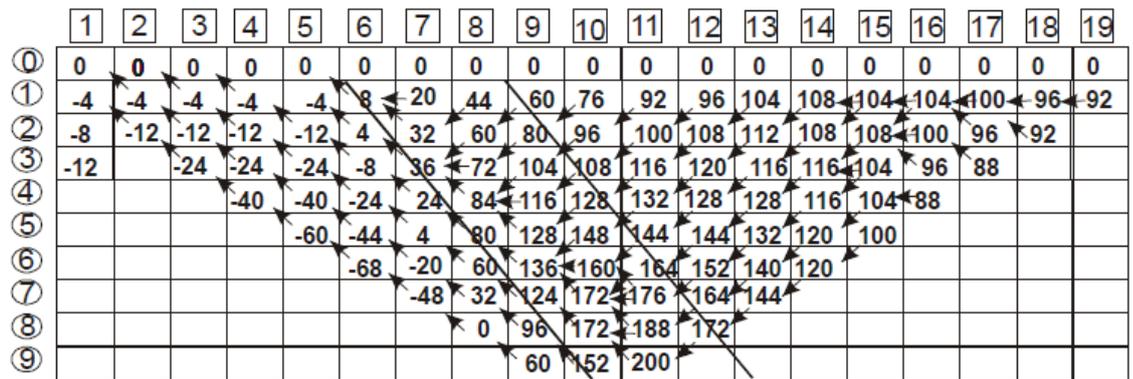


Figura 2.9 - Processo de soma estendido para toda a seção. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

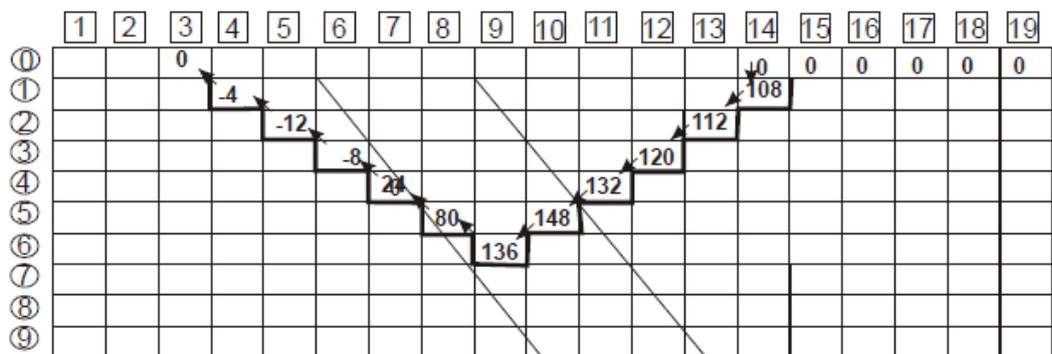


Figura 2.10- Limite otimizado superposto ao modelo de blocos. Fonte: Lerchs & Grossman (1965) adaptado.

## 2.8 Planejamento de Mina

O planejamento da mina tem como objetivo principal a garantia da sustentabilidade duradoura da atividade de mineração da empresa, promovendo simultaneamente retorno financeiro, de modo que se tenha uma rentabilidade econômica. O planejamento é visto como um conjunto coerente de dados que indicam o desenvolvimento futuro da empresa, tal como previsto pela sua administração, e seu processo geral inclui três níveis:

Plano de mineração de longo prazo, ou plano estratégico de minas, que abrangerá um período de 5, 10 ou até 30 anos. Plano de médio prazo, ou plano de tático, que diz respeito a um período mais curto, de 3 a 5 anos. E plano de curto prazo, que trata de um cenário mais atual, se estendendo até dois anos.

### 2.8.1 Planejamento a longo prazo

No planejamento a longo prazo procura-se definir os limites da cava final. Esse plano está sujeito a constantes mudanças que o adequem ao longo do tempo, em função de variações na economia de mercado, um maior conhecimento do corpo de minério e avanços na tecnologia de mineração.

O limite final da cava delimita a fronteira além da qual a lavra de um determinado bem mineral deixa de ser economicamente viável. Logo, estruturas permanentes, como planta de beneficiamento, pilhas de estéril e barragens de rejeito não devem ser construídas dentro deste limite.

### 2.8.2 Planejamento a médio prazo

O planejamento a médio prazo está relacionado principalmente à escala e à sequência de produção. Os sistemas de produção e os equipamentos são dimensionados visando atender a produção necessária, de modo a manter a viabilidade operacional e a exposição do minério, garantindo a continuidade da lavra.

O objetivo da programação da produção é a maximização do valor presente líquido e o retorno do investimento, por meio da venda dos produtos do depósito mineral.

### 2.8.3 Planejamento a curto prazo

O planejamento a curto prazo tem como objetivo otimizar a lavra para um período que varia entre seis meses e um ano. De modo geral, esse planejamento busca a manutenção da alimentação do britador com as devidas taxas de produção do projeto, além de manter a retirada de estéril no ritmo adequado para cumprir a meta anual estabelecida e desenvolver a mina de acordo com as necessidades determinadas no planejamento de médio prazo.

Cada planejamento a curto prazo objetiva a relação custo-benefício teórica expressa pela equação que constitui a equação 2.3.

$$\frac{Receita}{Custos} > 1$$

Equação 2.3 - Relação custo-benefício do planejamento a curto prazo.

#### 2.8.4 Etapas de estudo da fase de planejamento

Para Peroni (2002) *apud* Lee (1984) A fase de planejamento comumente envolve 3 etapas de estudo:

Um estudo conceitual representa a transformação de uma ideia de projeto em uma abrangente proposta de investimento, através de métodos comparativos e técnicas de estimativa de custos, através de dados históricos disponíveis, para identificar uma potencial oportunidade de investimento.

A segunda etapa, ou estudo preliminar, deve ser vista como um estágio intermediário entre um estudo conceitual, que não é muito dispendioso, e um estudo de viabilidade, sendo geralmente ainda insuficiente para uma decisão de investimento. Os objetivos são determinar se o conceito do projeto justifica uma análise mais detalhada e um estudo de viabilidade e se algum aspecto requer uma investigação mais profunda.

Finalmente, o estudo de viabilidade é a essência do processo de avaliação de mina, proporcionando uma base técnica, ambiental e comercial definitivas para uma decisão de investimento. É usado um processo iterativo para otimizar todos os elementos críticos do projeto. São identificados a capacidade de produção, tecnologia necessária, custos de investimento e produção, receitas de venda e capacidade de retorno do investimento.

### 2.9 Sequenciamento de Lavra

O principal objetivo do planejamento de mina é garantir a sustentabilidade duradoura da atividade de mineração da empresa, que é também uma das principais

metas do sequenciamento de lavra, garantindo, ao mesmo tempo, rentabilidade econômica.

Existem três alternativas extremas de aproveitamento de um bem mineral (Curi, 2014):

A primeira alternativa diz respeito a lavra do depósito mineral em sua totalidade, com aproveitamento de toda a substância útil contida, desprezando, de certa forma, os aspectos econômicos. Corresponderia, portanto, a uma lavra ambientalmente sustentável, com o aproveitamento integral de um recurso não renovável.

A segunda alternativa se refere a lavra de uma parte do depósito mineral, aproveitando parte da quantidade de substância útil contida, sem atentar, primordialmente para os aspectos econômicos. Essa alternativa pode ser adotada em casos excepcionais, como por exemplo a operação estrategicamente motivada pela política mineral ou social do país, de uma mina de urânio deficitária, com o intuito de fornecer matéria-prima para as indústrias bélicas e energéticas.

A terceira alternativa, por sua vez, corresponde a lavra ambiciosa das partes mais ricas da reserva mineral. Embora possa conduzir a ilusórios resultados econômicos positivos, esta alternativa se caracteriza por não ser sustentável econômica e ambientalmente. A lavra predatória da porção mais rica da jazida poderá implicar na degradação das características ótimas médias do jazimento, o que fatalmente comprometeria a lavra do bem mineral útil restante.

O aproveitamento do bem mineral deve se aproximar de uma solução ideal, compreendida em algum ponto entre as alternativas mencionadas, de forma que seja lucrativo e sustentável. Logo, na elaboração do projeto de mineração deve-se analisar vários cenários, através dos respectivos fluxos de caixa, até a definição da melhor solução. Trata-se de uma fase decisiva do projeto, diretamente condicionada ao conhecimento e a competência do responsável, que é influente na rentabilidade do processo e onde será determinada a escala de produção.

De acordo com Kennedy (1990), a finalidade do planejamento da produção é maximizar o valor presente líquido e o retorno do investimento derivado da extração, do beneficiamento e da venda da commodity proveniente do depósito mineral. O método e a sequência de extração, bem como o teor de corte e a estratégia de produção, são determinados pelos seguintes fatores:

- 1) Localização e distribuição do minério em relação à topografia e elevação;
- 2) Tipo de mineral, características físicas e distribuição da massa e teor;
- 3) Custos diretos da operação de mina, processamento e conversão da commodity em produto vendável;
- 4) Custos iniciais e de substituição de capital necessários para iniciar e manter a operação;
- 5) Custos indiretos, como por exemplo impostos e royalties;
- 6) Fatores e valores de recuperação da commodity;
- 7) Mercado e restrições de capital;
- 8) Considerações políticas e ambientais;

De acordo com Peroni (2002), o objetivo do sequenciamento é determinar um cronograma de lavra para minerar os blocos conectados no estágio de determinação dos avanços operacionais, também conhecidos como *pushbacks* ou *cut-backs*, definidos por Hustrulid *et al.* (2006) como o estágio na fase de expansão da mina que pode ser desenvolvido na prática e minerado bancada a bancada. Satisfeitas as condições de exposição das bancadas, cada um dos avanços operacionais pode ser minerado independente dos demais, pois cada estágio de avanço obedece às condições geomecânicas impostas.

Ainda segundo Peroni (2002), para a obtenção do maior retorno financeiro, a melhor solução seria minerar os avanços operacionais em sequência, um de cada vez. Contudo, essa estratégia raramente pode ser executada, devido à dificuldade de

se atender a todas as condições de controle de gerenciamento de operação, como relação estéril-minério e disposição de equipamentos, integralmente.

Tendo sido determinados os limites da cava final e a relação estéril-minério total, pode ser executado o planejamento em termos do sequenciamento da lavra. De modo geral, pode-se considerar três diferentes metodologias para o sequenciamento aplicando a relação estéril-minério, onde na prática atual o melhor método aplicado a um grande corpo de minério é aquele em que se consegue uma relação estéril-minério baixa inicialmente, proporcionando um retorno dos investimentos iniciais mais imediato.

A lavra por bancada baseia-se na retirada descendente do minério e no decapeamento total em cada bancada. Esse método requer que cada banco seja lavrado em sequência e todo o estéril desse banco seja removido, até os limites da cava final. Caracteriza-se por uma remoção de elevada quantidade de estéril no início da operação, que diminui com o passar dos anos, de acordo com a figura 2.11.

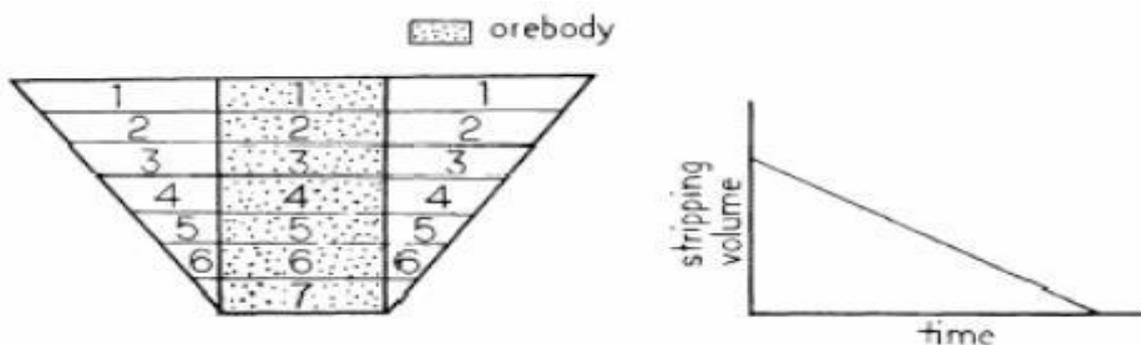


Figura 2.11 - Representação da relação estéril-minério decrescente. Fonte: SME - Mining Engineering Handbook.

A lavra por cavas sucessivas, representada pela figura 2.12 adota um método no qual a remoção do estéril é praticada apenas em função da necessidade de liberar o próximo minério a ser liberado. Esse método permite um máximo retorno financeiro nos primeiros anos, reduzindo a quantidade de estéril a ser removido nesse período.

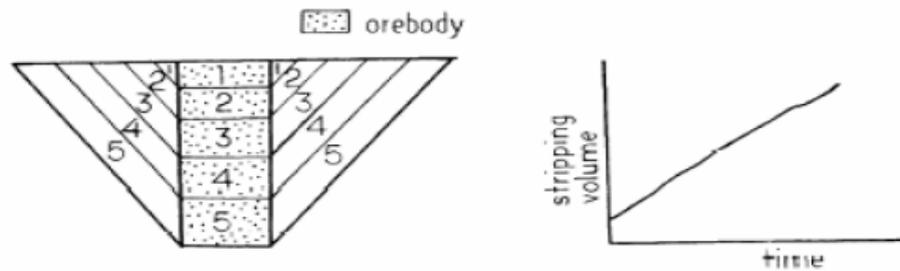


Figura 2.12 - Representação da relação estéril-minério crescente. Fonte: SME – Mining Engineering Handbook.

Já a lavra por uma relação estéril-minério constante (figura 2.16) tem por intuito remover o estéril a uma razão próxima da relação estéril-minério global, sem muitas surpresas ao longo dos anos intermediários da vida útil da mina.

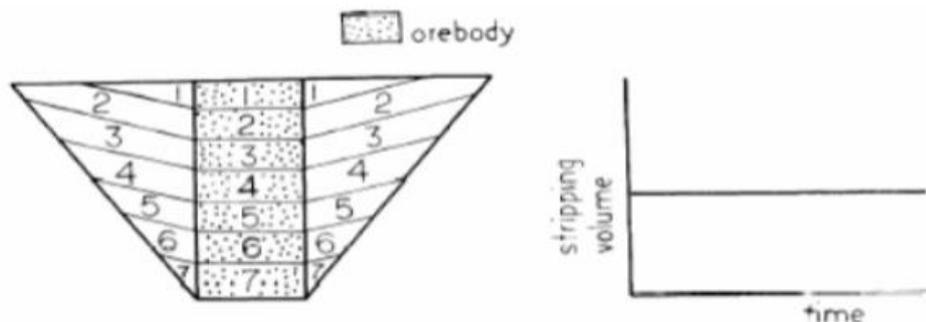


Figura 2.13 - Representação da relação estéril-minério constante. Fonte: SME – Mining Engineering Handbook.

Na prática atual, o melhor método aplicado a um corpo de minério de grandes dimensões é aquele em que trabalha-se com uma REM baixa inicialmente e na direção da exaustão da mina, mantendo esta constante no estágio intermediário da vida útil da mina, garantindo um bom retorno financeiro e um lucro maior nos anos iniciais do projeto.

Segundo Fontes (2016), essa metodologia permite ainda que o número de equipamentos aumente gradativamente, atingindo-se a capacidade de produção máxima em um período intermediário da vida útil da mina, com várias frentes de trabalho sendo conduzidas simultaneamente, o que permite maior flexibilidade no planejamento da mina. Finalmente, torna-se possível uma redução dos trabalhos à medida em que as reservas vão sendo exauridas.

## 2.10 Geometria da Cava

Como pode ser observado na figura 2.14 os bancos são as unidades básicas nas quais a exploração se subdivide, na operação de minas a céu aberto. Nestes locais o ciclo de lavra efetivamente ocorre, com as operações de perfuração, desmonte, carregamento e transporte. A geometria da cava é composta por berma, ângulo de face, ou ângulo individual, ângulo geral do talude, ângulo interrampa, além das faces, cristas e pés.

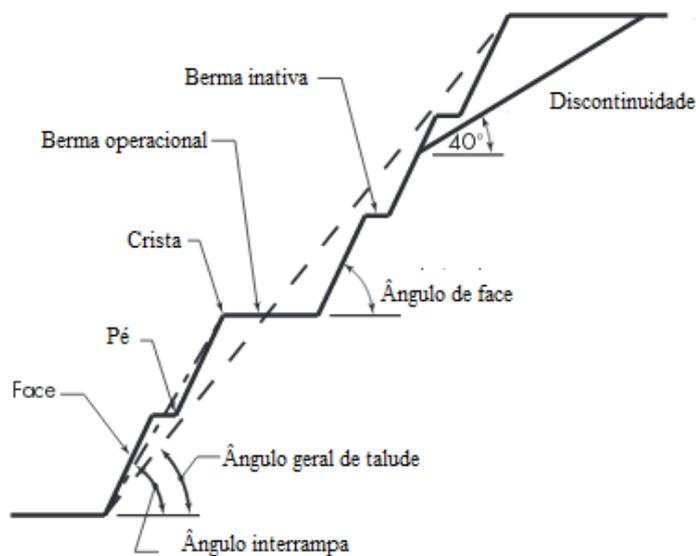


Figura 2.14 - Representação de um talude e seus bancos. Fonte: SME Handbook, adaptado.

Os principais fatores que influenciam na determinação da geometria das bancadas são: características do depósito (volume, teor, distribuição, etc.); seletividade na lavra e necessidade de blendagem; estabilidade dos taludes.

O corpo de minério é lavrado de cima para baixo em uma série de camadas horizontais de dureza uniforme, conhecidas como bancadas, ou bancos. Cada bancada tem uma superfície superior e inferior separadas por uma distância, que é igual à altura dos bancos.

### 2.10.1 Altura dos Bancos

Segundo Kennedy (1990), a altura dos bancos corresponde à distância vertical entre cada nível horizontal da mina. Todos os bancos devem possuir a mesma altura, a não ser que condições geológicas impossibilitem tal fator. A altura dependerá de características físicas do depósito, do grau de seletividade exigido na separação do minério e do estéril pelo equipamento de carregamento; da taxa de produção; da dimensão dos equipamentos usados para atingir a produtividade necessária; da dimensão dos blocos de lavra; e das condições climáticas.

A altura do banco deve ser a maior possível, dentro dos limites do tamanho e do tipo do equipamento empregado, de modo que não propicie a ocorrência de problemas de segurança, como instabilidade e queda de material desmontado ou desagregado. Bancos mais altos proporcionam vantagens operacionais, como um melhor rendimento na perfuração, com menor necessidade de deslocamento das máquinas; melhor produtividade no desmonte; menor número de bancos, permitindo uma concentração dos trabalhos; e um menor custo na construção dos acessos. Trabalhar-se com bancos menores, por sua vez, garante uma maior segurança de operação e um melhor controle no desvio dos furos e na fragmentação das rochas.

Antigamente, a altura das bancadas era limitada pela profundidade das perfurações. Perfuratrizes modernas, no entanto, têm eliminado essas restrições. Uma altura de bancada comum atualmente, para grandes minas, é de 15 m. Para minas menores essa altura é geralmente na faixa de 12 m, e em pequenos depósitos de ouro, por exemplo, 7,5 m. De acordo com Koppe (2007), a altura das bancadas pode variar bastante, mas há uma tendência mundial de padronização das mesmas em 15 metros de altura, com direito a pequenas variações congruentes à necessidade local da empresa.

### 2.10.2 Largura da Bancada

A largura das bancadas deve ser calculada pela soma dos espaços necessários para o movimento e operação das máquinas que trabalham simultaneamente nas frentes de lavra. É estabelecido que o comprimento da zona

para utilização das máquinas de carregamento e respectivas manobras deve ser pelo menos 50% maior que o comprimento destas. O espaço deve ser tal que abranja também o comprimento do veículo de transporte e ainda uma zona, ou berma de segurança.

Comparando-se diferentes bancadas nota-se que o emprego de bancadas de maior largura implicaria em alguns aspectos positivos, como menores tempos de manobra, melhores possibilidades de supervisão e também uma melhor produtividade das máquinas. Contudo, isso resultaria em uma menor seletividade e em uma maior diluição.

### 2.10.3 Ângulo Individual do talude

O ângulo individual de talude é definido como o ângulo que a face do banco faz com um plano horizontal, formado entre uma linha imaginária, de menor comprimento, que ligue o pé e a crista da bancada, e uma linha horizontal que a intercepte.

A definição do ângulo individual do talude depende da altura dos bancos e do tipo de material constituinte do maciço rochoso, podendo este sofrer alterações significativas dentre bancadas diferentes em uma mesma mina, de acordo com a litologia e qualidade do maciço rochoso.

Contudo, essa inclinação sofre limitações, em virtude da necessidade da manutenção da estabilidade e segurança dos trabalhos desenvolvidos. Em maciços rochosos de boa qualidade, ângulos de 35 a 60°, ou até taludes verticais podem ser adotados.

Deve ser salientado que os ângulos individuais do talude e a largura das bermas exercem decisiva influência sobre o ângulo geral dos taludes da cava final. Logo, é cada vez mais comum a realização de testes geotécnicos e de estabilidade de taludes para que se tenha conhecimento de um valor de ângulo adequado, que não prejudique a produtividade nem tampouco implique em condições de trabalho inseguras.

Vásquez *et al.* (1998) defende que, qualquer pequena variação neste ângulo poderá gerar efeitos diretos na estabilidade da inclinação e nos benefícios econômicos da exploração.

Normalmente, a face das bancadas são projetadas da forma mais inclinada possível, o que significa a necessidade de remoção de um volume menor de estéril. E, de modo geral, quanto menor for a altura da bancada e mais competente for o maciço rochoso, mais inclinadas podem ser as faces dos bancos. Se o maciço rochoso for de baixa qualidade, contendo fraturas ou descontinuidades, a inclinação da face dos bancos deverá ser suavizada.

#### 2.10.4 Ângulo Geral de Talude

Para a elaboração de um projeto de mineração, é necessário o conhecimento dos parâmetros que refletem o comportamento do maciço rochoso na área de influência de lavra, o que é feito por meio de trabalhos geotécnicos.

Um talude deve permanecer estável enquanto perdurarem todas as operações de lavra, no mínimo. Quando a cava atinge grandes profundidades, o talude deve ser bermado, ou seja, sua continuidade é quebrada pela existência de praças ou plataformas, em níveis adequados, posicionadas ao longo do talude.

O ângulo geral da mina é um dos elementos mais influentes sobre o tamanho e a forma da mina. A inclinação ajuda a determinar a quantidade de estéril que deve ser removida para que o minério possa ser lavrado. É usualmente expressa em graus, desde o ângulo em relação ao plano horizontal.

O ângulo geral de talude é o ângulo que uma reta que passa pela crista dos bancos faz com a horizontal. Sua correta definição não é simples e torna-se mais complexa quanto mais descontínuo e fraturado for o maciço rochoso em questão. Logo, em uma mesma mina, podem existir mais de um ângulos gerais de talude, que variam de acordo com as características do maciço e seus respectivos valores devem ser os mais apropriados para que o talude permaneça estável durante o tempo necessário.

O ângulo geral de talude de uma seção pode ser determinado de acordo com a equação que constitui a equação 2.4.

$$\alpha = (\arctg) \frac{H}{P}$$

Equação 2.4 - ângulo geral de talude de uma seção

Onde:

H = altura da bancada;

P = projeção horizontal do talude geral na seção;

As paredes da mina devem permanecer estáveis durante toda a atividade do processo mineiro. Resistência das rochas, presença de falhas e juntas, assim como a presença de água e outras informações geológicas são fatores relevantes na avaliação do ângulo de inclinação ideal. Estudos detalhados mostram que características físicas do depósito causam variações no ângulo de inclinação da mina, de acordo com o tipo de rocha, localização, elevação ou orientação dentro dos limites da mina. Uma avaliação correta da inclinação fornecerá os ângulos que possibilitarão a operação com as paredes estáveis.

A inclinação geral da mina deve permitir um sistema de estradas, com uma inclinação entre as rampas, que se estende até a cava final, evitando que uma maior quantidade de estéril deva ser retirada até que se lavre o fundo da cava. Este ângulo formado entre as rampas é projetado desde o fundo da cava até a superfície original, no topo da bancada mais alta.

A lavra inicia no topo da bancada mais alta e quando uma quantidade suficiente de área superficial é exposta, a lavra de uma nova bancada pode ser iniciada. Esse processo continua até que a elevação do fundo da bancada mais profunda é atingida, assim como o esboço da cava final. Para que se tenha acesso a diferentes bancadas uma estrada ou rampa deve ser construída. A extensão e inclinação dessa rampa dependerá dos tipos de equipamentos que serão utilizados.

## **2.11 Considerações Geotécnicas**

À medida que a escavação se aprofunda, as possibilidades de ocorrência de rupturas podem aumentar em consequência da extensão da zona de alívio de tensões. As possibilidades de se encontrar estruturas desfavoráveis, como falhas, diques e áreas de fraqueza também aumentam.

Assim, devem ser efetuadas análises cinemáticas que evidenciem os mais prováveis mecanismos de ruptura dos taludes em razão do padrão estrutural do maciço rochoso, tendo-se uma atenção especial com a orientação das descontinuidades em relação a face dos taludes em cada setor da mina.

É imprescindível que os setores de planejamento de lavra e geotecnia estejam alinhados com a hidrogeologia, visto que a presença de água no talude é um fator limitante em sua possível inclinação, causando um impacto negativo na estabilidade. O nível de água deve, quando necessário, ser rebaixado de maneira programada e organizada, possibilitando que as operações de lavra avancem.

## **3. METODOLOGIA**

O desenvolvimento deste trabalho teve início a partir da análise das informações topográficas e do modelo de blocos da Mina F4, situada no Complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, em Araxá, Minas Gerais, onde é explorada rocha fosfática destinada a fertilização do solo na agricultura pela Vale Fertilizantes.

Através da função benefício, mantida em sigilo por solicitação da empresa, o valor econômico de cada bloco foi determinado. Foi feita então a análise dos blocos através do algoritmo inserido no DATAMINE, que no caso é o algoritmo de Lerchs e Grossman. Este verifica se a extração dos blocos positivos e dos blocos de estéril sobrejacentes que estejam em sua ordem de precedência se justifica, de modo que seu lucro possa pagar os custos de remoção dos blocos de estéril necessários.

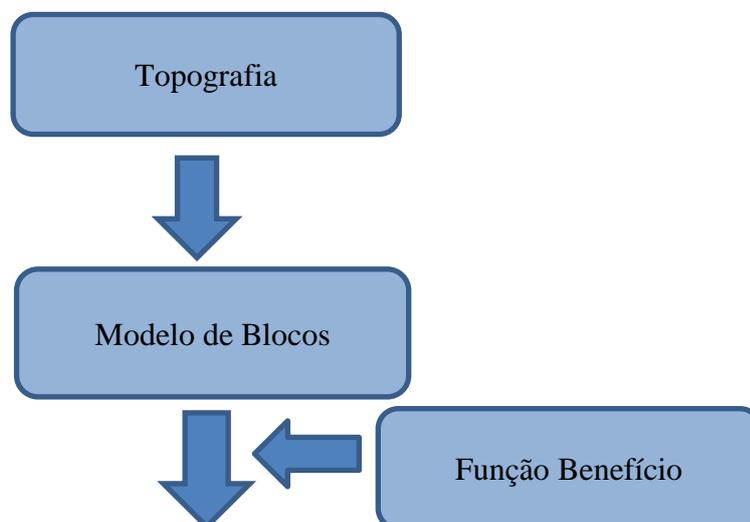
A próxima etapa consistiu na elaboração do modelo geomecânico, no qual os parâmetros referentes a geometria da cava, entre os quais merecem destaque o ângulo individual do talude, a largura das bermas, além da altura da bancada e o ângulo geral do talude são definidos. O modelo geomecânico consiste no modelo econômico após a adição das informações referentes a geotecnia, permitindo que o comportamento geomecânico do maciço rochoso seja previsto e a inclinação adequada para o ângulo geral do talude seja definida.

A inclinação geral do talude é um fator crítico na definição da geometria da cava. Ângulos mais elevados contribuem para um maior retorno financeiro do empreendimento, devido a necessidade de remoção de uma menor quantidade de material considerado estéril. Por outro lado, trabalhar com uma inclinação mais elevada pode gerar uma condição de instabilidade do talude, levando a uma situação mais propícia a ruptura deste, colocando em risco a integridade da vida humana, dos equipamentos de lavra e a produtividade da mina.

Diferentes ângulos individuais de talude foram inseridos de forma decrescente, a partir do ângulo inicial de 60°, possibilitando a determinação de ângulos gerais do talude distintos, de acordo com cada variação de ângulo individual. O ângulo de 60° foi escolhido por ser o ângulo adotado pela empresa em suas operações, não havendo apresentado rupturas de grande magnitude nos anos iniciais de lavra. Sendo assim, com base nas projeções dos pés e cristas dos bancos e respectivas bermas, foi possível gerar uma superfície da cava. A interseção desta superfície com a superfície da topografia foi feita através do limite da cava final, gerando uma terceira superfície combinada, através da qual pôde-se estimar o volume e conseqüentemente a massa de minério e estéril, a relação estéril-minério e o teor médio.

É importante salientar que o limite da cava final foi mantido constante em todas as simulações, pois existe uma poligonal de arrendamento junto a empresa contigua que limita as operações mineiras para o bem mineral fosfato.

Para o desenvolvimento das projeções das cristas e bermas de todas as cavas geradas foi considerada, impreterivelmente, uma altura de crista de 10 metros e 8 metros para a largura da berma. A metodologia pode ser vista na figura 3.1.



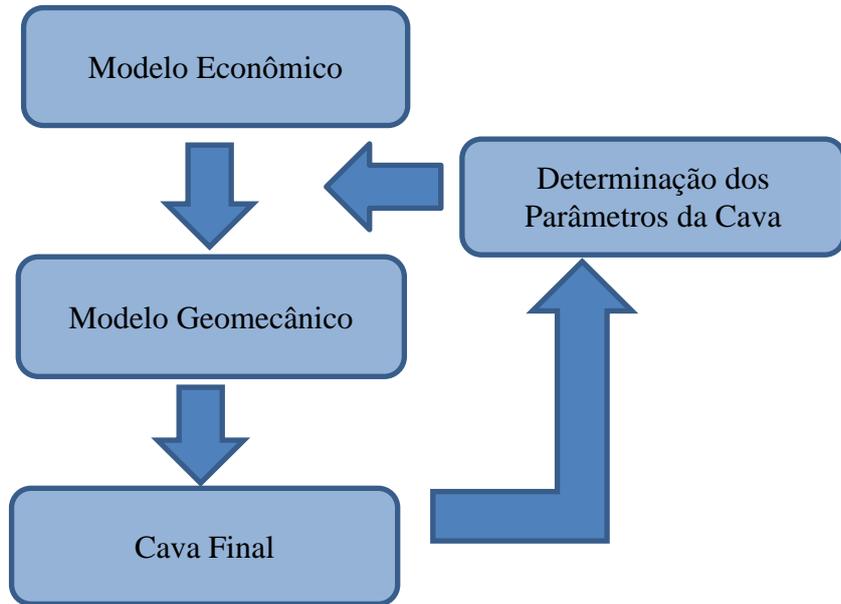


Figura 3.1 - Metodologia adotada neste trabalho.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a importação dos dados referentes aos limites da cava e da topografia local e seguindo os procedimentos sugeridos na metodologia, foram projetadas no *software DATAMINE* as cristas, bermas e pés de cada cava, fixando-se o valor da altura dos bancos em 10 metros e a largura das bermas em 8 metros. A variação no ângulo individual dos bancos levou a geração de cavas finais bastante distintas. Uma dessas cavas pode ser vista na figura [4.1](#).

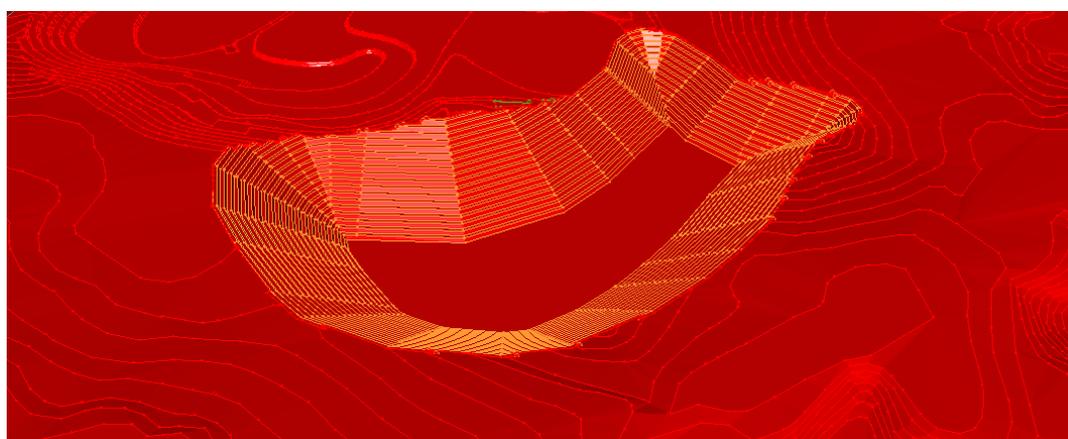


Figura 4.1 - Cava final inserida na topografia local.

Para cada valor de ângulo individual utilizado, um respectivo ângulo geral para os taludes da mina foi calculado, geometricamente, através de relações trigonométricas, conforme apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - ângulos gerais determinados em função da variação dos ângulos individuais.

Ângulo Individual (°)	Ângulo Geral (°)
60	36
59	35,5
58	35,1
57	34,6
56	34,1
55	33,7
50	31,4
45	29,1

Constatou-se que o ângulo geral das cavas adquire um menor valor à medida em que os ângulos individuais adotados na projeção das cristas, pés e bermas eram menores.

Do ponto de vista econômico, conforme os dados representados na tabela 4.2 que deram origem ao gráfico expresso na figura 4.2, cavas projetadas à partir de ângulos gerais maiores, ou seja, taludes mais inclinados, são mais interessantes, uma vez que a relação estéril-minério é menor, ou seja é necessário retirar uma proporção de massa de estéril menor, em relação à massa de minério. Tal constatação é comprovada analisando-se os dados, visto que a REM obtida aumentou veemente à medida que os ângulos individuais utilizados eram menores e as cavas mais suaves.

Nas cavas geradas a partir de ângulos maiores têm-se uma maior massa de minério. E uma vez que o preço de venda e os custos de produção associados são os mesmos em todas as simulações, logo a relação estéril-minério limite é constante, inferindo-se que o custo médio para a remoção de uma tonelada de estéril em cada uma das cavas também seria constante, em uma lavra hipotética de toda a cava final executada no primeiro ano.

Tabela 4.1 - massa de minério e estéril e REM das cavas.

Ângulo Geral (°)	Massa Minério (t)	Massa Estéril (t)	REM
36	50 437 500	166 587 500	3,3
35,5	49 337 500	164 087 500	3,33
35,1	48 275 000	161 550 000	3,35
34,6	49 150 000	162 175 000	3,3
34,1	45 787 500	156 900 000	3,43
33,7	44 737 500	154 175 000	3,45
31,4	38 500 000	141 300 000	3,67
29,1	31 800 000	126 775 000	3,99

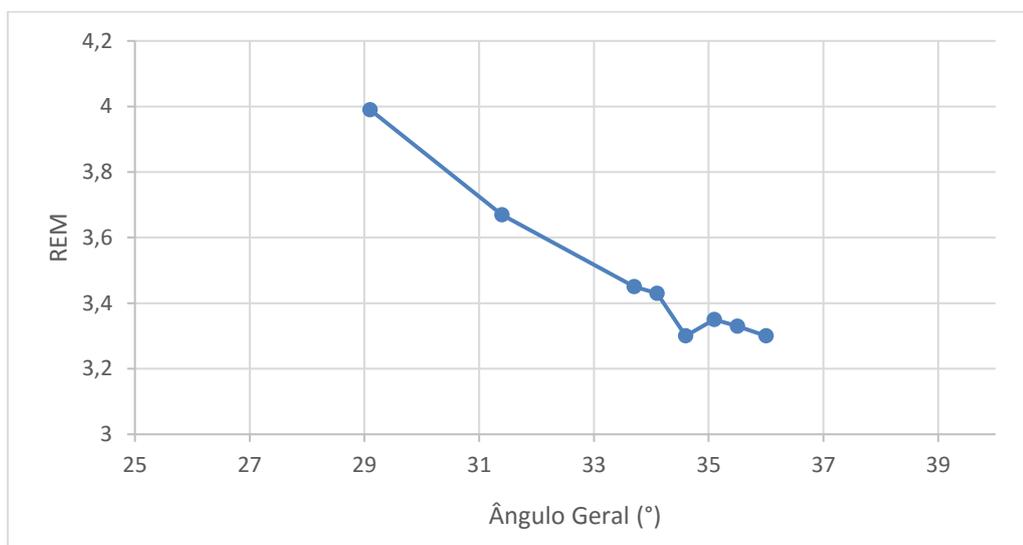


Figura 4.2 - Variação da REM em relação aos ângulos gerais adotados.

Entretanto, no que diz respeito às questões geotécnicas, as cavas com taludes mais inclinados, apesar de mais viáveis economicamente, podem ser inviáveis operacionalmente, por questões de segurança e estabilidade dos bancos e taludes.

No que refere-se ao teor médio das diferentes cavas, não foram constatadas alterações significativas. Porém, naquelas cavas onde os ângulos individuais utilizados na projeção eram maiores, o teor médio foi superior. A variação deste parâmetro, em cada cava, está apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Teor médio das cavas.

Ângulo Geral (°)	Teor Médio da Cava (%)
36	12,67
35,5	12,66
35,1	12,65
34,6	12,67
34,1	12,62
33,7	12,61
31,4	12,55
29,1	12,35

4.

Quanto aos impactos referentes aos parâmetros geométricos, constatou-se, conforme pode ser observado nas figuras [4.3](#) e [4.4](#), que à medida que o ângulo geral utilizado diminuía, o fundo da cava gerada, em ambos os casos na cota 980, ficou mais estreito, o que dificulta ou até inviabiliza as operações mineiras.

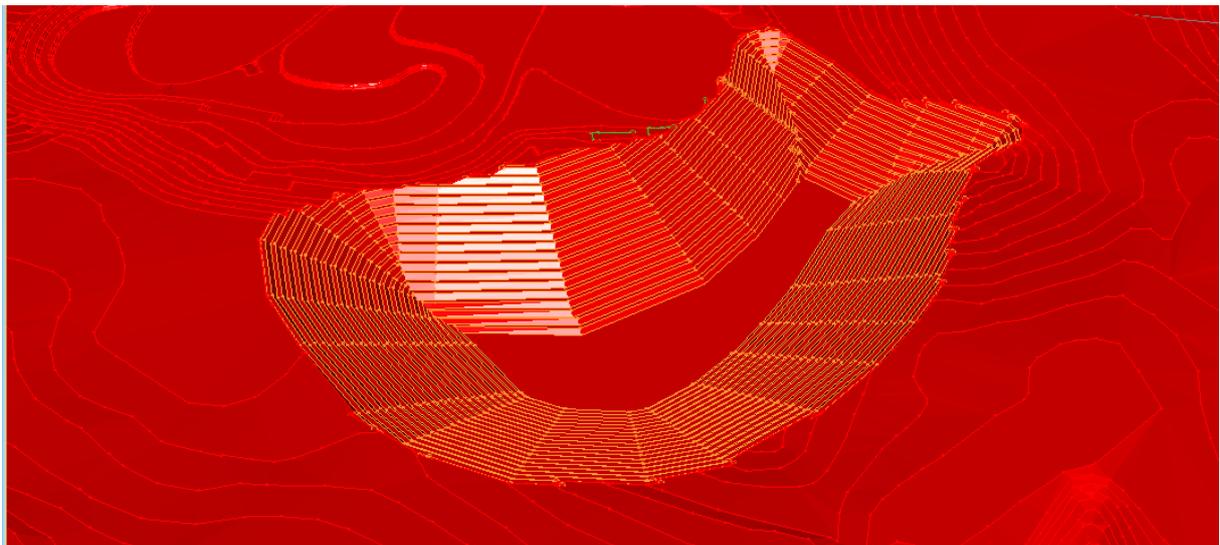


Figura 4.3 - Cava gerada com ângulo geral de 31,4°.

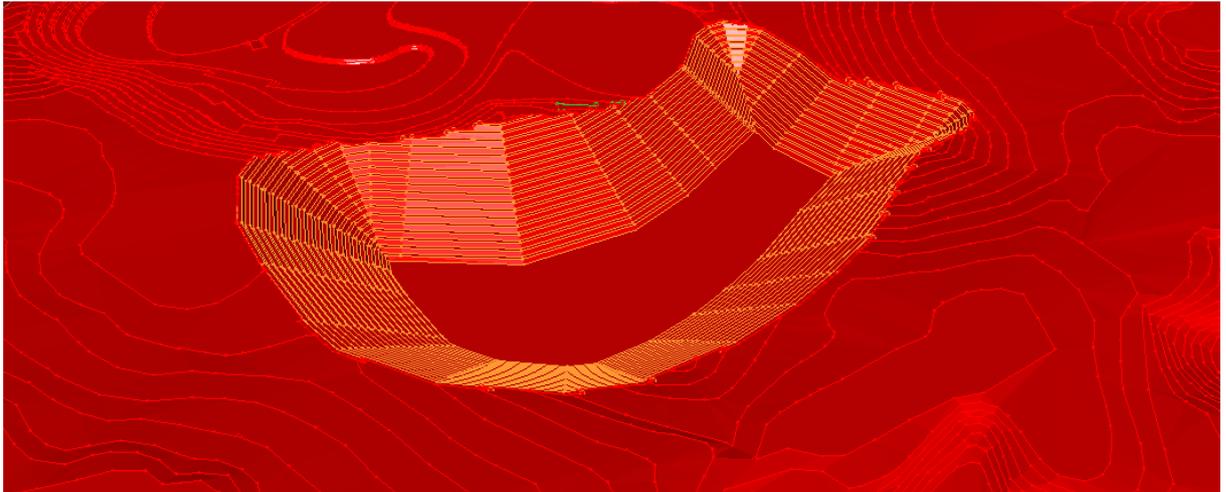


Figura 4.4 - Cava gerada com ângulo geral de 36°.

Na cava ilustrada na figura 4.4, projetada a partir de ângulos individuais de 60° e ângulo geral de 36°, o fundo da cava é mais amplo, contribuindo para a efetividade e segurança das operações mineiras.

## 5. CONCLUSÃO

É dever do engenheiro de minas que atua na área de planejamento de mina desenvolver a lavra dos recursos minerais de forma economicamente e ambientalmente sustentável, uma vez que estes recursos são finitos e não renováveis.

Uma cava precisamente determinada pode maximizar o lucro da empresa, permitindo o melhor aproveitamento possível do corpo de minério, aumentando a vida útil da mina e reduzindo o volume de estéril a ser removido, que não agrega valor para a empresa.

De acordo com o que foi estabelecido como objetivo deste trabalho, simulou-se o ângulo individual de talude através do *software* DATAMINE, avaliando-se os impactos geométricos e demonstrando-se os valores massa e teor de minério, massa de estéril, relação estéril-minério e ângulo geral de talude para cada cava final simulada.

Conforme analisado, a geometria é bastante influente na geração das cavas, de modo que variações mínimas no ângulo geral representaram impactos significativos na cava final. À medida em que o ângulo geral utilizado diminuía notou-se que o fundo da cava ficava cada vez mais estreito, o que dificulta ou até mesmo inviabiliza a operação mineira.

Para cada redução de  $0,5^\circ$  do ângulo geral foi constatada uma redução média de 1 239 130,44 toneladas na massa total de minério, ou 2,45% em relação a massa da cava projetada a partir de ângulo geral de  $36^\circ$  (maior ângulo utilizado) e 2 698 369,57 toneladas de estéril, ou 1,62%. A maior redução da massa de minério, comparada à massa de estéril, explica a maior relação estéril-minério das cavas projetadas a partir de ângulos gerais menores.

Finalmente, no que refere-se ao teor médio das diferentes cavas, não foram constatadas alterações significativas, destacando-se apenas que naquelas cavas onde os ângulos gerais utilizados na projeção eram maiores, o teor médio foi superior. Cada redução de  $0,5^\circ$  do ângulo geral representou uma redução média de 1,3% no teor médio da cava.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carmo F. A. R. D. 2001. *Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Mina a Céu Aberto Otimizadas*. Mestrado Dissertação, Departamento de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001. 135 p.
- Costa R. R. 1979. *Projeto de mineração*. 1 ed. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 286 p.
- Curi A. 2014. *Minas A Céu Aberto: planejamento de lavra*. São Paulo: Oficina de Textos, 223p.
- Darling P. 2011. *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, 1046 p.
- Fontes M. P. 2016. *Influência no nível freático no sequenciamento de lavra aplicado ao planejamento estratégico de lavra*. Mestrado Dissertação, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 123 p.
- Hartman H. L. & Mutmansky, J. M. 1980. *Introductory Mining Engineering*. Hoboken, New Jersey, 570p.
- Hustrulid W. & M. Kuchta. 1995. *Open Pit Mine Planning & Design*. Rotterdam, Balkema, 1308 p.
- Kennedy B. A. 1990. *Surface Mining*. Littleton, Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 1206 p.
- Koppe J. C. 2007. *A lavra e a indústria mineral no Brasil*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 288p.
- Lerchs H & Grossmann I., 1965. Optimum design of open pits mines. *Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, **58**(633): 47-54.
- Maia J. 1974. *Desenvolvimento*. Curso de Lavra de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 133 p.
- Peroni R. D. L. 2002. *Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico*. Doutorado Tese, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharias da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143 p.
- Taylor H. K. 1977. Mine Valuation and Feasibility Studies. *Mineral Industry Costs, Northwest Mining Association*. 1-17 p.
- Vásquez A., Galdames, B. & Le-Feaux R. 1998. *Apunte preliminar diseño y operaciones de minas a cielo abierto*. Santiago, Universidad de Chile, 184 p.
- Wetherelt A. & Wielen K. P. V. D. 2011. *Introduction to Open-Pit Mining*. In: Darling P. *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 876 p.