

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**UNIDADE ARAXÁ**

**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**NATALIA BARBOSA DE AMORIM**

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA ALTURA E  
LARGURA DO BANCO NA OPERACIONALIZAÇÃO DA CAVA FINAL**

**ARAXÁ**

**2018**

NATALIA BARBOSA DE AMORIM

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA ALTURA E  
LARGURA DO BANCO NA OPERACIONALIZAÇÃO DA CAVA FINAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no Curso de Graduação em  
Administração do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Minas.

Prof. Orientadora: Silvia de Castro  
Martins

ARAXÁ

2018

NATALIA BARBOSA DE AMORIM

ANALISE DA SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA ALTURA E LARGURA DO  
BANCO NA OPERACIONALIZAÇÃO DA CAVA FINAL.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no Curso de Graduação em  
Administração do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Minas.

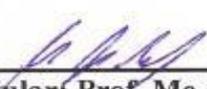
Data de aprovação: 29 / 11/ 2018

Banca Examinadora:



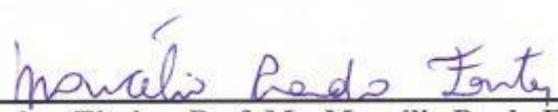
---

**Presidente e Orientadora: Prof. Me. Silvia de Castro Martins**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular: Prof. Me. Marcelo Prado Fontes**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Dedico este trabalho a meus pais, que depositaram toda confiança em sua filha de olhos vendados.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, principalmente ao departamento de Minas, todos seus professores, que contribuíram com minha formação acadêmica; aos funcionários da instituição que mantiveram a unidade em pleno funcionamento de manutenção, apoio e suporte a todos os alunos. A minha orientadora professora Silvia de Castro Martins, por me orientar nessa etapa final e confiar no meu trabalho como aluna. Ao professor coordenador do departamento de Minas, Hildor Seer que tenho uma profunda admiração. À minha família por suporte financeiro, psicológico e familiar. Aos colegas da unidade CEFET Araxá, pela contribuição, colaboração e apoio incondicional.

*“Embora seja sempre bom acreditar em si mesmo, aceitar ajuda de amigos pode ser uma grande bênção para seus pensamentos. ”*

## RESUMO

O planejamento de lavra é de fundamental importância para maximizar o potencial econômico, minimizar os impactos ambientais, garantir segurança no projeto de mineração e potencializar o melhor aproveitamento dos recursos minerais. Para o aproveitamento máximo da exploração do minério é importante ter um bom *design* de mina. Durante o planejamento a geometria da cava é definida juntamente com a delimitação da cava final. Logo, a análise dos parâmetros de mina como a variação da altura do banco e largura da berma devem possuir e promover espaço aos equipamentos em operação a serem utilizados. Tais parâmetros podem interferir na operacionalidade da cava e a análise de sensibilidade pode verificar os efeitos dos impactos na geometria da cava final. Desta forma o presente trabalho tem como objetivo utilizar o *software* de planejamento *Micromine*, numa mina hipotética de minério de ferro, avaliando os impactos na cava causados pela variação da altura do talude e da largura da berma no volume e teor de minério, volume de estéril, e consequentemente a relação estéril/minério. Dos cenários testados, os resultados utilizando menores bermas para as alturas distintas empregadas se obtém menores REM. Das análises realizadas os resultados são satisfatórios, uma vez que há aderência a cava matemática escolhida através da cava ótima por Lerchs e Grossmann.

Palavra Chave: Planejamento de lavra. Altura de banco. Largura de berma. Ângulo de talude.

## ABSTRACT

Mining planning is of fundamental importance in order to maximize economic potential, minimize environmental impacts, ensure safety in the mining project and maximize the use of mineral resources. For the maximum exploitation of the ore is important to have a good mine design. During planning the digging geometry is defined along with the delineation of the final pit. Therefore, the analysis of the mine parameters such as the variation of the height bank and berm width should possess and promote space for the equipment in operation to be used. Such parameters may interfere with the operation of the pit and the sensitivity analysis can verify the effects of impacts on the final pit geometry. In this way, the objective of this work is to use the Micromine planning software in a hypothetical iron ore mine, evaluating the impacts in the pit caused by the variation of the height slope and the berm width in the volume and content of ore, volume of barren, and consequently the Stripping-Ratio. Of the scenarios tested, the results using smaller berms for the different heights employed are obtained by lower REM. From the analyzes carried out the results are satisfactory, since there is adhesion to the mathematical pit chosen through the excellent pit by Lerchs and Grossmann.

Keyword: Mining planning. Bench height. Width of berm. Slope angle.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Área de influência do Polígono. ....	19
Figura 2 - Tipos de seções verticais usadas no <i>design</i> manual de cava.....	23
Figura 3 - Seção vertical mostrando o valor líquido de cada bloco. ....	25
Figura 4 – Geometria de um corpo mineral.....	26
Figura 5 – Modelo de Blocos inicial. ....	26
Figura 6 – Soma por colunas. ....	26
Figura 7 – Soma cumulativa e direção de extração. ....	27
Figura 8 – Soma por toda a seção. ....	27
Figura 9 – Superposição do modelo de blocos .....	28
Figura 10 - Modelo de Blocos .....	29
Figura 11 - Primeiro Cone .....	29
Figura 12 – Determinação de número de blocos. ....	30
Figura 13 - Divisões do banco de Mina.....	34
Figura 14 - Seção através da bancada de trabalho. Cut: Área de Corte. ....	36
Figura 15 - Representação de teores definida como a jazida lavrável.....	37
Figura 16 - Curva com valor total da cava em função das toneladas movimentadas.....	38
Figura 17 - Cavas aninhadas obtidas pela otimização dos blocos do depósito. ....	38
Figura 18 – Cava não operacionalizado. ....	39
Figura 19 – Fundo da Cava, primeiro pé do talude. ....	40
Figura 20 - Fluxograma da Metodologia empregada. ....	41
Figura 21 - Efeito gap entre dois dos cenários operacionais gerados.....	43
Figura 22 - Aderência das cavas operacionais à cava ótima (isométrica).....	47
Figura 23 - Aderência das cavas operacionais à cava ótima (seção transversal) .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Altura de banco, largura de berma, ângulo de talude e face.....	40
Tabela 2 – Informações de tonelagem de minério e estéril, teor de ferro e densidade.....	44
Tabela 3 – Informações da altura e largura, conforme a REM gerada.....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Cavas ótima geradas pelo <i>software</i> .....	42
Gráfico 2 – REM x Ângulo da Face .....	45
Gráfico 3 – Teor Médio Fe% x Ângulo da Face .....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> _____	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> _____	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Fases da Mineração</b> _____	<b>14</b>
2.1.1	Exploração _____	14
2.1.2	Desenvolvimento _____	15
2.1.3	Exploração _____	15
2.1.4	Fechamento de Mina _____	15
<b>2.2</b>	<b>Fases de implementação de um projeto mineiro.</b> _____	<b>16</b>
2.2.1	Estudo de Viabilidade _____	16
2.2.2	Pré-Projeto _____	16
2.2.3	Projeto Básico _____	16
2.2.4	Projeto Detalhado _____	17
<b>2.3</b>	<b>Estimativa de Reservas</b> _____	<b>17</b>
2.3.1	Método Clássico _____	18
2.3.2	Método de Pesagem _____	19
<b>2.4</b>	<b>Teor de Corte</b> _____	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>Relação estéril/minério</b> _____	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Estimativas de Custos</b> _____	<b>21</b>
2.6.1	Função benefício _____	22
<b>2.7</b>	<b>Design e Planejamento de Lavra</b> _____	<b>22</b>
2.7.1	Método de <i>Design</i> Manual _____	23
2.7.2	Método Computacional _____	24
<b>2.8</b>	<b>Planejamento de Lavra</b> _____	<b>30</b>
2.8.1	Plano de Lavra a Longo Prazo _____	31
2.8.2	Plano de Lavra a Médio Prazo _____	31
2.8.3	Plano de Lavra a Curto Prazo _____	31
<b>2.9</b>	<b>Parâmetros da Mina</b> _____	<b>31</b>
2.9.1	Ângulo Geral do Talude _____	32
2.9.2	Altura do Banco da Cava _____	32

2.9.3	Ângulo de Face da Bancada	35
2.9.4	Largura do Banco de Mina	35
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Otimização das Cavas e Definição do Limite Final</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Operacionalização da Superfície Limite Ótima</b>	<b>39</b>
<b>3.3</b>	<b>Fluxograma da Metodologia</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Otimização das cavas</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultado das operacionalizações</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Extração a céu aberto é um processo de lavra na superfície, que permite a exploração de minerais metálicos, não metálicos e rochas industriais, dos quais podem ser retirados de minas, produzindo-se bancos de cava com alturas entre 5 a 30 metros. Para se alcançar maiores profundidades na mina, há formação de talude juntamente com a presença de bermas em toda a cava. Devido a essas escavações, a mina adquire o formato de um “cone”, com bancos altos e largos, para acomodação de equipamentos de carregamento, de perfuração; e conseqüentemente para o aumento da segurança no local (HARTMAN, 2002).

O banco de lavra tem como propósito o controle da profundidade da mina e da face do talude. Os bancos individuais são designados para possuírem largura suficiente para absorver materiais provenientes da detonação, e promover espaço para a operação dos equipamentos a serem utilizados.

A caracterização geoestrutural de um talude e geometria das bancadas é essencial para sua estabilidade. O aumento do ângulo geral de talude pode ser benéfico economicamente, obtendo-se menor relação de retirada de estéril, pois o avanço da lavra no depósito está condicionado de tal forma que o lucro possa reembolsar os gastos obtidos na remoção de estéril e minério. A consequência ao se tomar essa decisão é a diminuição da estabilidade do talude, caindo assim o fator de segurança na mina. Então para a correta avaliação do ângulo geral, que pode ser desmembrado em altura do banco, largura da berma e ângulo individual se faz necessário o uso de um *software* de planejamento da cava final ótima, que possa auxiliar a observar essa variação.

Pequenas variações nos parâmetros geométricos da cava podem alterar significativamente a massa ou volume de minério e estéril contida na cava final e, conseqüentemente, a relação estéril-minério. Desta forma 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.

Hoje é possível a utilização de *software* que possibilite um estudo adequado da delimitação da cava final. Para isso no presente trabalho foi escolhido o *Micromine*. Esta ferramenta fornece ao usuário aplicações para modelagem, estimativas, projeto, planejamento de lavra com otimização estratégica à longo prazo, *design* de cavas, criação de cenários. Esse

instrumento possibilita que planos estratégicos possam ser executados de forma confiável fornecendo uma visualização tridimensional dos dados.

O trabalho tem como objetivo simular a sensibilidade da altura de bancada e da largura da berma na lavra, através do *software Micromine*, para verificar os impactos na cava através do volume e teor de minério, volume de estéril, e consequentemente a relação estéril/minério.

Para este fim, foi realizado uma revisão bibliográfica dos aspectos relevantes para a pesquisa, assim como de estudos semelhantes realizados. Para entendimento da análise de estudo, através da metodologia descreve as etapas do processo no *software*, que após os resultados obtidos é possível realizar considerações a respeito dos mesmos, para em seguida a conclusão do estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Fases da Mineração**

O ciclo mineral aborda trabalhos para definição da ocorrência mineral, sua avaliação e viabilidade econômica. Nelas são compostas as fases da mineração: prospecção e exploração. Essas fases da mineração contém o planejamento da pesquisa, identificação de minerais, compilação de dados de reconhecimento, desenvolvimento de estudos sobre o depósito mineral. Se a viabilidade econômica se concretizar, temos as fases subsequentes: desenvolvimento, exploração e fechamento de mina.

Segundo Girodo (2005) a prospecção é o primeiro estágio na mineração, possuindo como objetivo o reconhecimento geral de um depósito mineral. Essa consiste na procura por um bem mineral econômico, metálico ou não metálico. O depósito mineral pode ser localizado na superfície ou abaixo desta, ambas empregando técnicas de prospecção direta e indireta.

#### **2.1.1 Exploração**

A exploração é a segunda fase da mineração, com objetivo de reconhecimento detalhado do depósito mineral. Ela determina o possível tamanho e valor do depósito, através de técnicas similares e mais refinadas que a de prospecção.

Uma avaliação das amostras possibilita ao engenheiro de minas ou geólogo calcular a tonelagem, o teor de minério e o volume de estéril do depósito mineral. Podendo-se estimar os

custos, avaliar a recuperação dos minerais de interesse, determinação dos custos ambientais, para se chegar à conclusão de rentabilidade do depósito mineral.

### **2.1.2 Desenvolvimento**

A terceira fase é o desenvolvimento, trabalho que se realiza para preparar o depósito mineral para possibilitar a exploração de minério. As principais atividades desta etapa são as construções de acesso, supressão vegetal e retirada do solo orgânico do local que iniciará a lavra. Para que isso ocorra são necessários alguns requisitos como acessos a estradas, fontes de energia, sistema de transporte, instalações das unidades de tratamento de minérios, áreas de disposição de rejeito e estéril, escritórios, e outras instalações de apoio.

Segundo Girodo (2005), desenvolvimento representa as atividades mineiras empreendidas para proporcionar a lavra da jazida. Naturalmente esses exercícios pressupõem que o depósito esteja satisfatoriamente pesquisado, pois não seria procedente a execução desses serviços preparatórios à produção caso a pesquisa ainda deixasse a desejar e fosse calculada uma lavra arriscada ou problemática.

### **2.1.3 Exploração**

A quarta fase da mina é chamada de exploração, que está relacionada à operação da mina, ao que se resume a movimentação de estéril e minério incluindo as operações auxiliares. O desenvolvimento permanece nas operações da mina, mas a ênfase é a produção, ou seja, retirada de minério de acordo com a demanda estabelecida com base na alimentação da britagem. O método de lavra selecionado para a exploração é determinada principalmente devido às características do depósito mineral e os limites impostos pela segurança, tecnologia, meio ambiente e econômica.

### **2.1.4 Fechamento de Mina**

Segundo Girodo (2005), fechamento de mina são os deveres da empresa de mineração ligados ao encerramento da produção mineira e incremento da recuperação das áreas devastadas e diminuição dos impactos causados pelas atividades de mineração. Esse é o estágio final da operação de mina chamado de recuperação de lavra, onde se emprega processos de revegetação e mitigação dos impactos ambientais.

Tem-se a grande preocupação com a sustentabilidade, o qual necessita explorar economicamente e respeitar as necessidades ambientais, enquanto se concilia a necessidade das próximas gerações. A recuperação da mina envolve a retirada de todos os equipamentos,

escritórios, utilidades e qualquer outra estrutura do local. Em seguida, envolve a recuperação das águas do local, dos depósitos de estéreis, da cava e pôr fim ao uso da área recuperada para construção de parques de lazer, que possam beneficiar a sociedade.

## **2.2 Fases de implementação de um projeto mineiro.**

Pode-se observar quatro estágios de precisão para iniciar a implementação de um projeto mineiro. Essas fases podem ser divididas em estudo de viabilidade, pré-projeto, projeto básico e projeto detalhado.

### **2.2.1 Estudo de Viabilidade**

De acordo com Costa (1979) o estudo de viabilidade entende-se por ser o início dos estudos para o conhecimento da ocorrência mineral, podendo-se ter uma ideia da viabilidade de sua lavra perante a opinião técnica e econômica. Os estudos iniciais são baseados em dados preliminares sobre o possível jazimento e sua região de influência. Esses estudos têm como objetivo um entendimento sobre o interesse em progredir estudos mais detalhados sobre a ocorrência mineral, e assim, realizar a verdadeira acurácia de dados nesta primeira fase.

Obtém-se uma primeira estimação dos custos e investimento com erro admissível em torno de 40%. Esse estudo de viabilidade por ser realizado antes da pesquisa geológica mais detalhada, sendo que nesta fase não é possível definir sobre a implementação do projeto.

### **2.2.2 Pré-Projeto**

O pré-projeto é realizado após a conclusão do estudo de viabilidade, utilizando-se dados mais categóricos sobre a ocorrência mineral, os quais são determinados em campo ou no laboratório. A estimativa nessa fase já cai para 30%, conseguindo-se diminuir o erro em relação ao estudo de viabilidade.

Com bases nos resultados do pré-projeto, torna-se possível a negociação para o subsídio do empreendimento, com a condição do negócio ser viável para investimento. O pré-projeto no geral é decisório de como e quando realizar procedimentos para a verificação de imprecisões ainda remanescentes.

### **2.2.3 Projeto Básico**

No projeto básico as estimativas alcançam 20% dos erros, podendo-se inferir a viabilidade ou não da realização do empreendimento. Nesta fase já é possível à comprovação

da jazida. Sendo assim, com a jazida bem conhecida e todos os parâmetros de lavra definidos é possível estimar as reservas.

No projeto básico ainda pode apresentar imprecisões ou carência de dados. Caso ocorra os dados dependem da natureza que os determinam ou não a necessidade de verificá-los ou trocá-los, antes de se suceder ao Projeto Detalhado, fase seguinte ao projeto básico.

#### **2.2.4 Projeto Detalhado**

Corresponde à fase final de um empreendimento de mineração e a sua acurácia permite suficientemente a inserção do empreendimento com erros de precisão de 10%. Nesta fase há uma justaposição do projeto detalhado e sua implementação. Visando o começo da produção e retorno de capital em um prazo mais curto possível.

O projeto detalhado é o conjunto de outros projetos da fase de implementação, integrando proximidades contínuas com a garantia de êxito no empreendimento mineiro. Ressaltando-se que embora haja projetos consecutivos, todos eles não são produzidos exatamente após a criação do que o antecede, antes de se passar para o próximo passo são observados erros, que serão corrigidos posteriormente. Sendo que projetos grandes levam de 6 a 8 anos para sua execução contando com o tempo de elaboração.

### **2.3 Estimativa de Reservas**

Converter recursos em reservas baseia-se em incorporar valor à companhia mineradora, que deve determinar suas estratégias de interpretação na área mineral e decidir em quais negócios de ações irá operar. Estudos bem definidos da presença de reservas minerais que sustentem o empreendimento mineiro em suporte ao mercado e contínuo negócio de mineração, possibilita que os valores do empreendimento das companhias mineiras prosperem (GUIMARÃES, TOLEDO, FARIA, 2008).

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002), a estimativa de reservas é em geral o processo de valorização do depósito mineral, chegando-se a uma ideia do corpo a ser explorado. Nesse processo, a reserva e a tonelagem de mineral são estabelecidas como lavrável. Assim também é possível o estabelecimento dos processos de *marketing*, de transportes, taxas a pagar e a expectativa de lucro.

São empregados duas categorias de métodos para a estimação do minério na fase de exploração. O primeiro é o método clássico que utiliza a área de influência, princípio que determina o teor e a tonelagem do corpo mineral. O segundo é o método de pesagem que atribui

pesos matemáticos a numerosas amostras para fornecer estatisticamente uma estimativa mais precisa do bloco ou da área estudada.

Neste segundo método pode-se empregar o inverso da distância pesada e o método geoestatístico. Ambos os métodos determinam um peso as amostras vizinhas mais próximas para atribuir um teor ao bloco ou área com bases estatísticas. O procedimento desta categoria assume que o ponderador de qualquer amostra para a determinação do teor está em função de quão distante a amostra está da área ou bloco a ser estimado. A diferença entre a distância pesada está nos furos afastados a uma distância do ponto cujo teor se quer determinar. No método geoestatístico toma-se o melhor partido das informações coletadas, pois os estimadores geralmente usados, como a krigagem, avaliam o domínio proposto, com variância (erro) mínima (CURI, 2014).

### **2.3.1 Método Clássico**

Os métodos clássicos de estimação do minério possuem várias denominações. Uma delas é conhecida como método da área de influência, denominado também por método do polígono ou método da área estendida.

O princípio do método inclui um número de diferentes soluções que utiliza uma quantidade limitada de dados para se estimar o volume de um polígono individual que pode ser determinado geometricamente de diversas maneiras. Uma delas é por uma série perfurações que representam as amostras, das quais são interligadas por outras perfurações espaçadas. A partir disso são criadas linhas de bissetrizes regulares que circundam as amostras entre si, se definindo como a área de influência do polígono, como observado na Figura 1, chamado de *Polígono de Voronoi*. Estas amostras se encontram dentro da área do polígono, que assume um valor de teor do minério (HARTMAN, 2002; SINCLAIR, BLACKWELL, 2002).

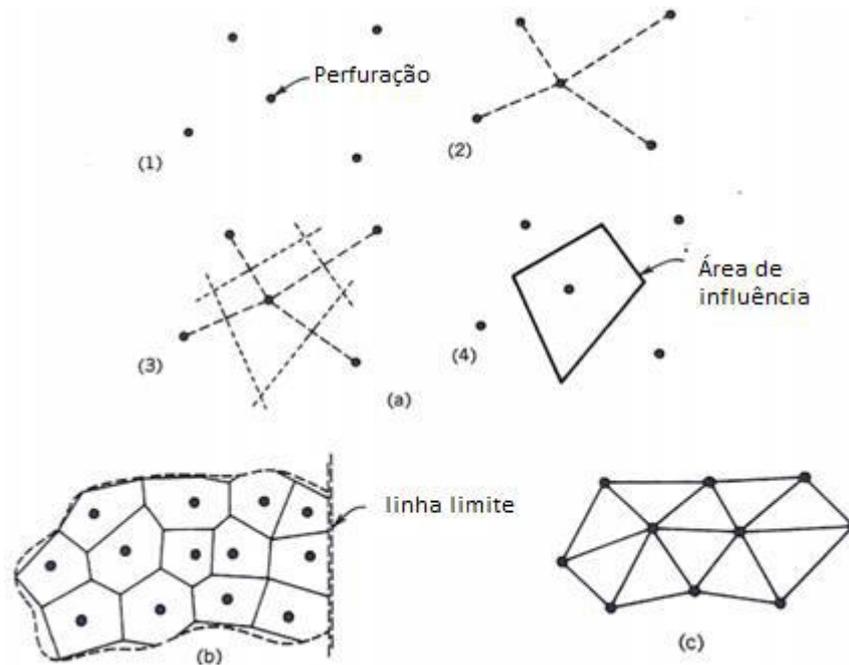


Figura 1- Área de influência do Polígono.  
 Fonte: Harman, Mutmansky, (2002, p. 78)

### 2.3.2 Método de Pesagem

São atribuídos pesos matemáticos as amostras que informam estatisticamente uma estimativa do teor do bloco e da área estudada. Este método subdivide-se em dois outros métodos comumente empregados: método do inverso da distância pesada e o método geoestatístico. Ambos os métodos utilizam uma gama de amostras para calcular o teor dos blocos.

O inverso da distância assume que a área de influência para qualquer amostra para determinação do teor do bloco ou de toda a área é uma função de quão distante a amostra está da área ou bloco a ser estimado. Os pesos são atribuídos às amostras, das quais são usadas para estimar o bloco mais distante daquela amostragem. Esses métodos não têm nenhum limite definido de quantas amostras podem ser utilizadas para a estimativa de um único bloco. Eles são estatisticamente superiores aos métodos clássicos para a maioria dos problemas de estimação de reserva, porque eles usam mais dados para chegar às estimativas.

O método de pesagem é geralmente aplicado em corpos de blocos regulares sobrepostos tridimensionalmente em um depósito. Cada bloco é estimado, independentemente dos dados que se encontram próximos deles, baseados nas distâncias relativas aos pontos ou blocos e da quantidade de dados desejados para cada estimativa individualmente (SINCLAIR, BLACKWELL, 2002).

Um segundo método usado para a estimativa de pesagem é o método geoestatístico. Enquanto a estatística lida com variáveis aleatórias, ou seja, seus diversos valores não interferem entre si, na geoestatística se trabalha com variáveis regionalizadas, ou seja, há a influência entre valores, cuja variação espacial caracteriza o fenômeno regionalizado que a originou. As variáveis podem assumir localmente qualquer valor segundo uma função de probabilidade e globalmente possuem uma estruturação que pode ser tratada por uma função espacial. A variável regionalizada deriva da utilidade do estudo das variações de teor de um depósito individual. Podendo ser realizado plotando-se o variograma, no qual se refere à variabilidade cuja ferramenta de análise é a função, semivariograma, que descreve a relação estatística das amostras em função das distâncias de cada material amostrado. O uso da geoestatística é dificultado pela possibilidade de diferentes distribuições de teor de dentro do corpo de minério e com o semivariograma variando em diferentes direções (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002; CURI, 2014, STURARO, 2015).

## **2.4 Teor de Corte**

A pesquisa geológica ordenada divide a reserva em blocos individuais, de minério e estéril, com determinadas características, como espessura da camada, teor da substância útil, volume e tonelagem de cada bloco. Raramente as camadas de jazida, da substância útil, são homogêneas. Assim, dentro da delimitação da reserva há blocos ricos, medianos e pobres de minério (CURI, 2014).

Um depósito mineral é uma concentração atípica de determinado bem mineral com teor e tamanho de potencial interesse econômico. O ideal é este teor ser igual ou acima do teor de corte, que significa o teor mínimo da substância aproveitável que se concede para a sua retirada econômica. O teor de corte nada mais é do que um limite econômico, significando que um teor abaixo dele é o estéril, e igual ou acima é o minério. Por sua vez o teor de corte depende de cada depósito mineral. Resumidamente, o teor de corte pode ser definido como teor crítico (teor limite de ganho e perda, no exercício econômico de mineração) mais o lucro (NETO, ROCHA, 2010).

O teor de corte usado neste trabalho foi para o modelo de blocos de uma mina hipotética de minério de ferro. Uma forma de cálculo é pela variação nos teores médios do depósito, calculado como uma média ponderada por massas lavradas, como mostrado na equação 1.

$$t\%_{Fe} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \times M_i}{M \sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

$M_i$  = massa do bloco  $i$

$t_i$  = é o teor do bloco  $i$

$t\%_{Fe}$  = é o teor médio do depósito

## 2.5 Relação estéril/minério

Os limites de cava final e sequenciamento de mina são determinados em última análise pela economia e demanda de produção, levando em consideração as restrições físicas e ambientais. O conceito de relação estéril-minério é a relação da quantidade de estéril que deve ser removida para a exposição de uma unidade de minério. Essa relação pode ser exposta de acordo com a equação 2.

$$SR = \frac{\text{Volume de estéril removido}}{\text{Toneladas de minério recuperado}} \left( \frac{m^3}{t} \right) \quad (2)$$

SR = Relação estéril minério (também chamada de REM)

De acordo com Darling (2011), por definição a relação estéril-minério aumenta quando se aumenta a profundidade de escavação. A necessidade de transportes, cruzamentos e maiores ângulos na cava, permite atingir grandes profundidades que também influencia essa relação.

## 2.6 Estimativas de Custos

De acordo com Kennedy (1990) a estimativa de custo é uma parte da viabilidade do estudo. Um depósito mineral pode ser desenvolvido caso a estimativa de lucro, taxas e outros custos sejam suficientemente favoráveis, no desenvolvimento da mina e para posteriormente recuperá-la e fechá-la.

A estimativa de custos para exploração é importante em qualquer projeto de desenvolvimento de mina. É importante estar atento aos custos das fases de mineração. O preço do produto vai de acordo com o mercado consumidor e conforme as tendências deste. Um valor categórico para a viabilização de um projeto de mineração pode conter análises econômicas incertas do projeto, onde são colocados vários valores para o comércio de produtos, determinando-se o preço mínimo desejável (COSTA, 1979).

Um modelo de amostragem pode ser feito através de furos verticais igualmente espaçados. Inicia-se por furos desordenados para localização do corpo mineral, para em seguida organiza-los conforme assume a forma do minério. Para corpos com acentuado mergulho, como veios minerais, os furos assumem uma perfuração com certo ângulo para alcançar o minério que se encontra inclinado. Para corpos horizontais, os *grids* regulares são utilizados sempre que possível

### **2.6.1 Função benefício**

A mineração envolve a retirada fundamentalmente de dois materiais, o minério e estéril. De acordo com Assis (2016), a função benefício é uma formulação que reúne todos os critérios a serem utilizados no projeto mineiro e os converte em valor positivo ou negativo. Também segundo Assis (2016), a maximização do valor presente líquido (VPL) procura constatar, de forma operacional, o melhor resultado para o fluxo de caixa do projeto a partir do valor econômico de cada bloco e suas restrições de massa, teores, etc, dentro de vários intervalos de tempo. O valor econômico atribuído aos blocos do modelo geológico é essencial para as etapas subsequentes do projeto mineiro, podendo ser definido como a diferença entre o valor de sua parte recuperável e seus custos diretos, que são atribuídos diretamente ao bloco.

Blocos de estéril comumente possuem valor econômico negativo, uma vez que seu lucro 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 do minério contida nesses blocos.

## **2.7 Design e Planejamento de Lavra**

O *design* manual de mina é importante para o engenheiro, pois ele aumenta o seu conhecimento sobre o depósito, fica à parte das dificuldades e procedimentos empregados no depósito. A abertura da mina é um método de operação aparentemente simples, mas com requisitos de custos e eficiência complexos. A abertura da cava deve ser cuidadosamente planejada e executada para manter as unidades de custos por tonelagem movimentada ao mínimo possível. Para o desenho da cava o engenheiro pode atribuir valores físicos e parâmetros econômicos, pois o minério na mina só é viável se cobrir os custos de operação. Alguns fatores devem ser considerados para o planejamento inicial da cava.

1. Fatores Naturais e Geológicos: condições geológicas, tipos de minério e teor, fatores hidrogeológicos, topografia, características metalúrgicas, clima e variáveis ambientais.

2. Fatores Econômicos: teor de corte, custos de operação, custo de investimento, margem de lucro, taxa de produção, custos de beneficiamento e valor do minério no mercado.
3. Fatores tecnológicos: equipamentos, inclinação do talude, altura do banco, opções de transporte e limites de cava.

Em geral o plano para estudar a cava, incluem limites de cava e sequenciamento de extração. O limite da cava final define a quantidade de minério e estéril durante a operação da mina. Eles se diferem de acordo com o tamanho do depósito, condições de mercado, a quantidade e qualidade dos dados, a disponibilidade da assistência computacional e a conclusão final do engenheiro.

### 2.7.1 Método de *Design Manual*

De acordo com Kennedy (1990) esse método envolve um espaço de tempo considerável gasto pelo engenheiro, dividido em três seções. O primeiro deles é a de seção paralela e seção normal ao longo do corpo de minério. Isso nos fornece a definição de cava, dependendo do tamanho, formato do depósito e das informações disponíveis. É possível observar na Figura 2, as seções verticais usadas no *design* de mina.

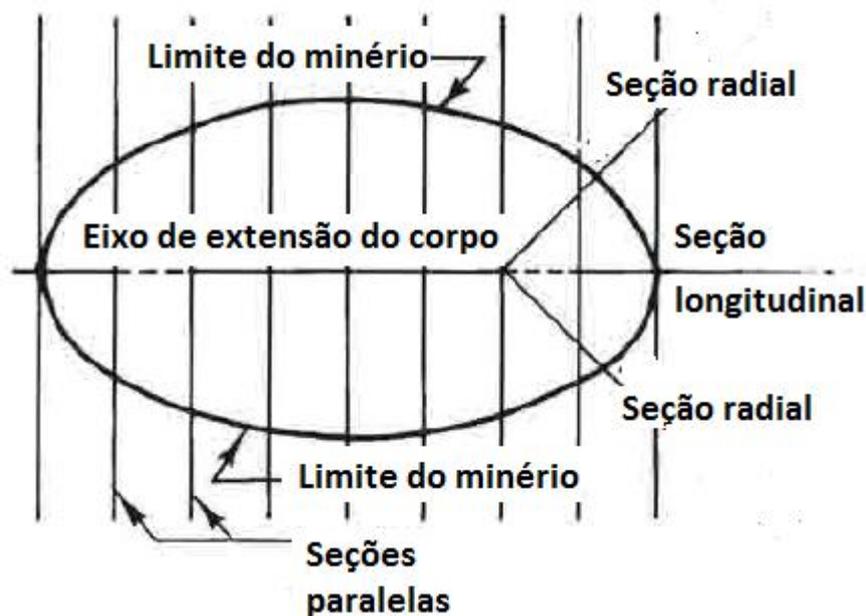


Figura 2 - Tipos de seções verticais usadas no *design* manual de cava.

Fonte: Kennedy (2009, p. 465).

O segundo se baseia na seção longitudinal ao longo do eixo do corpo de minério; e o terceiro método que se baseia em seções radiais. Ambos possuem o objetivo de definirem o limite final da cava no corpo de minério. Cada seção define o teor de minério, topografia,

geologia, controles estruturais para o limite de cava e qualquer informação que irá definir esse limite.

Os limites de cava são interpretados de forma que o teor de minério possa pagar o custo da remoção do estéril considerando a geotecnia. Quando se desenha a linha do limite de cava, o teor de minério é calculado e mensurado. O próximo passo do *design* manual é transferir o limite de cava de cada seção para um mapa do depósito. Caso haja qualquer alteração na mina, a mesma também é alterada no mapa.

Mas devido ao tempo gasto nos procedimentos que o *design* manual necessita, ele pode acarretar muito trabalho e erros. Quanto maior o número de informações recolhidas ou mais delineações modificadas, todo o processo de recolhimento de informações talvez precise ser repetido. Outra desvantagem do método manual é fazer o *design* separadamente das cavas e no fim uni-las, podendo acarretar uma junção de dados ineficiente.

### **2.7.2 Método Computacional**

Com o aumento de tecnologias computacionais os engenheiros possuem maior número de dados e alternativas de se obter diferentes limites de cava, do que o método de *design* manual. A tecnologia computacional proporcionou armazenamento e recuperação de dados de processamento e exibição de projetos de mina.

O uso computacional pode ser dividido em dois grupos:

4. Método computacional assistido, no qual os cálculos são executados conforme a armazenagem de dados inseridos pelo engenheiro. O computador não executa todo o *design* da mina, mas ele auxilia no cálculo bruto para o engenheiro poder controlar o processo. Um exemplo é a Técnica 2-D Lerchs-Grossmann e o *design* de expansão em 3-D.
5. Métodos Automatizados, no qual há a capacidade de desenhar a cava final para um conjunto de dados com restrições físicas e econômicas sem a necessidade da intervenção direta do engenheiro. Uma das categorias é o uso da matemática de programação linear, programação dinâmica ou o fluxo de rede. Uma segunda categoria é o método heurístico, que assim como o método do cone flutuante, produz uma cava final aceitável, mas não necessariamente ótima.

### 2.7.2.1 Método Lerchs-Grossmann

O método 2-D de Lechs-Grossmann desenha um limite de cava a partir de uma seção vertical, esboçando assim o lucro líquido. O método se torna interessante, porque elimina o processo de tentativa e erro do *design* manual em cada seção. O método também se torna conveniente para o processo computacional.

Um exemplo na Figura 3 representa uma seção vertical através do modelo de blocos do depósito. Cada quadrado representa o valor monetário de cada bloco, como se eles fossem separadamente minerados e processados. Os blocos de valores positivos e negativos são evidenciados. O esboço da cava pode ser observado na figura 9, onde o perfil da cava pode subir ou reduzir para apenas um bloco lateralmente, ou seja, ângulo individual de 90 graus (KENNEDY, 1990).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-\$2	-\$2	-\$4	-\$2	-\$2	-\$1	-\$2	-\$3	-\$4	-\$4	-\$3
2	-\$5	-\$4	-\$6	-\$3	-\$2	-\$2	-\$3	-\$2	-\$4	-\$5	-\$5
3	-\$6	-\$5	-\$7	\$6	\$13	-\$2	-\$5	-\$4	-\$7	-\$4	-\$6
4	-\$6	-\$6	-\$8	-\$8	\$17	\$8	\$5	-\$6	-\$8	-\$9	-\$7
5	-\$7	-\$7	-\$8	-\$8	\$6	\$21	\$5	-\$8	-\$8	-\$9	-\$7
6	-\$7	-\$9	-\$9	-\$8	-\$5	\$22	-\$8	-\$8	-\$8	-\$9	-\$8
7	-\$8	-\$9	-\$9	-\$9	-\$8	\$10	-\$9	-\$9	-\$9	-\$9	-\$9

Figura 3 - Seção vertical mostrando o valor líquido de cada bloco.

Fonte: Kennedy (2009, p. 467).

A seguir é representado o passo a passo do processo Lerchs-Grossmann. Mas para melhor entendê-lo, usaremos um exemplo de um corpo mineral, onde os blocos estéreis com o custo negativo 4000 monetário/bloco, enquanto o minério custo positivo 1200 um/bloco, 35,5 graus para o ângulo de talude e altura /comprimento do bloco em 5/7. Na Figura 4 pode ser observado um corpo mineral dividido pelos blocos.

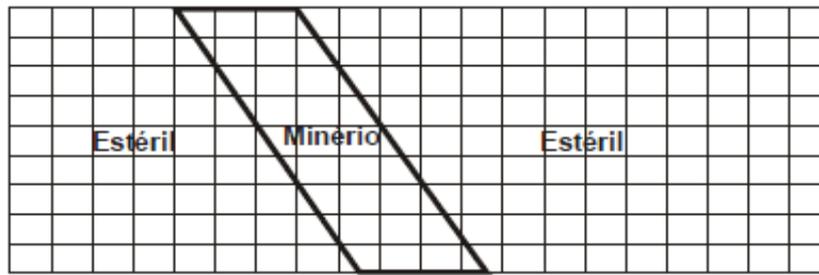


Figura 4 – Geometria de um corpo mineral.

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

**Passo 1.** Na Figura 5 pode ser observado o valor econômico de cada bloco, sendo este positivo (minério) e negativo (estéril). Posteriormente, adiciona-se uma linha de zeros no topo da seção e as linhas e colunas são enumeradas. A seguir, acontece uma soma acumulativa de dois em dois blocos de cima para baixo em cada coluna, sendo o valor encontrado, substituído no lugar do primeiro bloco da soma. O resultado da soma cumulativa pode ser observado na Figura 6.

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

Figura 5 – Modelo de Blocos inicial.

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

	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	-16	-16	-16
5					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
7							20	52	64	36	4	-24	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
8								48	64	48	16	-16	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
9									60	56	28	-4	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32

Figura 6 – Soma por colunas.

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

**Passo 2.** No passo 2 é feita uma soma acumulativa entre duas colunas adjacentes. Sendo que a mesma começa da esquerda para a direita e de cima para baixo. Após a seleção do bloco é feita a seguinte análise do valor do bloco da coluna vizinha de acordo com a sua posição:

- 6. Um bloco acima à esquerda.
- 7. Um bloco abaixo a esquerda.

Após a análise dos valores dos blocos é feito a soma acumulativa do maior valor e o valor da soma é substituída no bloco de origem. Para facilitar o delineamento da cava final no próximo passo é colocado uma seta saindo do bloco de origem em direção ao bloco que foi feita a soma acumulativa. Na Figura 7 pode ser observado esse passo e na Figura 8 o resultado do procedimento.

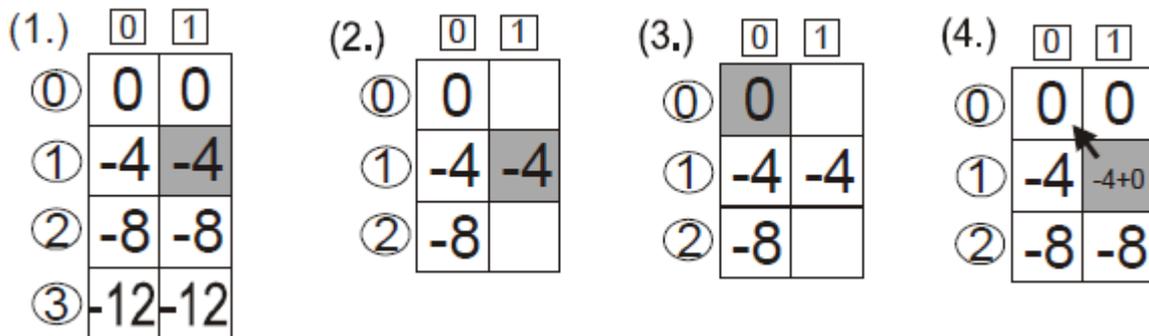


Figura 7 – Soma cumulativa e direção de extração.

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

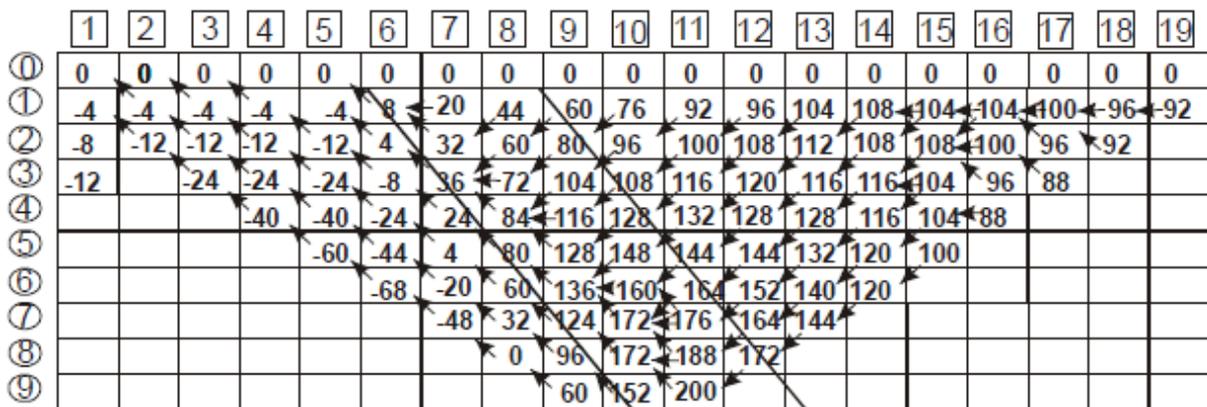


Figura 8 – Soma por toda a seção.

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

**Passo 3.** Para obter o limite da cava final é encontrado o bloco de maior valor na primeira linha da direita para a esquerda e então é seguido a direção das setas para encontrar a cava final. Depois de encontrada a cava final os valores originais dos blocos são reestabelecidos. Sendo assim

é possível encontrar o valor econômico da cava, as quantidades de minério e estéril extraídos, o teor médio do minério e a REM. O resultado do passo 3 pode ser observado na Figura 9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
①																					
①				-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4							
②					-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4								
③						-4	8	12	12	0	-4										
④							0	12	12	8	-4										
⑤								8	12	12											
⑥									12												
⑦																					
⑧																					
⑨	Cum. Sum.			-4	-12	-8	24	80	136	148	132	120	112	108							

Figura 9 – Superposição do modelo de blocos

Fonte: Hustrulid & Kuchta, (2013)

O valor presente líquido do bloco (VPL) é contabilizado pelo custo de exploração por tonelagem, como mostrado nas equações 3, 4, 5 e 6.

$$NV = \text{custo de extração} \times \text{tonelagem do bloco} \quad (3)$$

$$VEB = R - CD \text{ (blocos de minério)} \quad (4)$$

$$VEB = R - CD \text{ (blocos de estéril)} \quad (5)$$

$$\text{Máximo } Z = \sum(VEB) \quad (6)$$

$VEB_j$  = Valor econômico do bloco

$R$  = Receita;

$CD$  = Custos diretos de lavra do bloco (custos de perfuração, desmonte, carregamento e transporte)

### 2.7.2.2 Método do Cone Flutuante

O método do cone flutuante é fundamentado no contorno da cava final, pelo método das tentativas. Sua operação considera os controles físicos e geomecânicos (ângulos de talude). O procedimento começa da esquerda para a direita e de cima para baixo. Quando o bloco é selecionado, ele passa a ser à base de construção do cone. Sendo assim, para cada bloco é feito

um cone e para cada cone é feita uma avaliação econômica. Quando a soma do cone é positiva ou igual a zero, o cone é selecionado e todos os blocos nele inserido são retirados e estes entram para compor a cava final. O processo se repete até que todos os blocos sejam avaliados. Nesta metodologia não existe reavaliação dos blocos. A vantagem deste método é dele ser rápido e bastante intuitivo (GUIMARÃES, 2007).

A seguir é representado o passo a passo do processo do cone flutuante:

**Passo 1.** Conforme pode ser observado na Figura 10, temos alguns blocos com seus respectivos valores econômicos, sendo assumido o ângulo geral de talude de 45 graus. O cone é movido da esquerda para a direita pela linha número 1. Caso haja valores positivos, estes serão removidos, pois se encontram aflorantes na topografia. O resultado pode ser visto na Figura 11.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
2		-2	-2	+4	-2	-2	
3			+7	+1	-3		

Figura 10 - Modelo de Blocos

Fonte - Hustrulid & Kuchta, (2013)

**Passo 2.** Após a primeira linha, a base do cone move-se para a segunda linha e assim por diante, sempre no processo da esquerda para a direita parando quando encontrar o primeiro bloco positivo. Se o somatório dos blocos for positivo (ou zero) esses blocos serão lavrados. Se o somatório dos blocos for negativo os blocos serão deixados e a base do cone passa para o próximo bloco positivo nessa linha.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
2		-2	-2	+4	-2	-2	
3			+7	+1	-3		

Figura 11 - Primeiro Cone

Fonte - Hustrulid & Kuchta,(2013)

**Passo 3.** Depois de se analisar os blocos, estes são concatenado todos os cones positivos para compor a cava final. O procedimento pode ser visto na Figura 12. Com base na cava final é possível obter a lucratividade, somando-se os valores positivos e a relação estéril/minério, pode ser determinada pela divisão do número de blocos negativos e positivos.

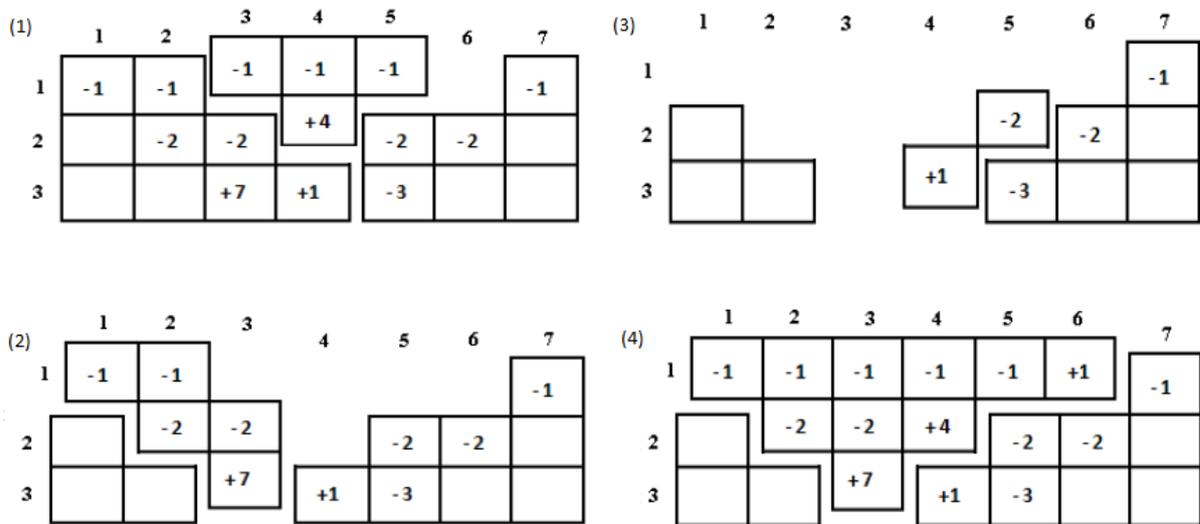


Figura 12 – Determinação de número de blocos.

(1): linha 2 coluna 4, cone de valor  $-1-1-1+4 = +$ , será minerado. (2): linha 3 coluna 3, cone de valor  $-1-1-2-2+7 = +$ , será minerado. (3): linha 3 coluna 4, cone de valor  $-2+1 = -$ , este cone não será minerado. (4): valor total da cava  $-1-1-1-1-1+1-2-2+4+7 = +3$ . Relação estéril minério 7/3.

Fonte - Hustrulid & Kuchta(2013).

## 2.8 Planejamento de Lavra

O planejamento de lavra determina a escolha dos equipamentos, pessoal e custos de operação durante o empreendimento. O planejamento constitui um sistema totalmente dinâmico, sofrendo constantes modificações durante as condições da mina, que são revelados no desenvolvimento da lavra.

O limite de cava define a quantidade de bem mineral lavrável e estéreis associados que devem ser retirados durante as operações. O tamanho, *design* e locação da cava final são importantes para o planejamento de barragens de rejeito, pilha de estéril, plantas de concentração e demais instalações industriais.

Para iniciar o desenvolvimento de lavra é fundamental saber o tamanho da jazida e sequenciar a mina durante o tempo de operação. Desta maneira, o empreendimento possui uma preparação desde o início até a exaustão da mina.

Cumprindo um roteiro de operações o planejamento de lavra pode ser classificado em planos de curto, médio e longo prazo. Os planos sofrem mudanças conforme se inicia os trabalhos, e conseqüentemente investimentos e custos operacionais (COSTA, 1979).

### **2.8.1 Plano de Lavra a Longo Prazo**

De acordo com Costa (1979) o plano à longo prazo constitui o plano de exaustão de mina. As preparações se fazem com propósito deubar a reserva lavrável, a relação estéril/minério, definição do limite da cava final. O que se evita, a estruturação de obras permanentes dentro do limite da cava final e por fim pressupor as vias de acesso que se fizerem fundamentais.

O plano à longo prazo que define a delineação da cava final, é indispensável para a elaboração dos planos a curto e médio prazo, que são partes integradas e fundamentais para o planejamento de lavra (COSTA, 1979). Períodos de planejamento podem ser variados dependendo do tamanho e vida das reservas, ao longo do propósito geral e objetivo de operação.

### **2.8.2 Plano de Lavra a Médio Prazo**

O plano de médio prazo corresponde à elaboração correspondente do quinto ao segundo ano de produção, com frequente monitoramento do andamento da lavra, com alguns pequenos erros nos períodos considerados. Outro objetivo do médio prazo é prever o sistema de produção, dimensionado os equipamentos, visando atender a produção de curto prazo. Sendo assim, o planejamento de médio prazo possui a finalidade de manter a viabilidade operacional e a exposição do minério, garantindo a continuidade da lavra.

### **2.8.3 Plano de Lavra a Curto Prazo**

Pode-se dizer que o curto prazo compreende o planejamento anual de produção. Este por sua vez pode ser dividido em planos mensais, trimestrais e semanais. O curto prazo tem como objetivo disponibilizar minério na alimentação da britagem e retirar o volume de estéril programado.

## **2.9 Parâmetros da Mina**

Os parâmetros da mina correspondem ao ângulo geral e individual de talude, altura do banco, largura da berma e critérios para construção de estradas. Esses parâmetros possuem relação direta com os volumes de minérios e estéreis a serem movimentados. Sendo assim o começo da lavra de mina, necessita-se empregar uma abertura por meio de escavações para

remoção de matéria orgânica (decapeamento) para exposição do minério. Com isso, pode-se criar situações de fragilidade se não for seguido parâmetros específicos de sustentação (COSTA, 1979)

Muitos fatores determinam o tamanho e a forma da cava. A importância de cada um dependerá do projeto a ser formado, mas deve-se respeitar alguns fatores como: geologia, o mergulho e a localização da mineralização, a extensão do depósito, topografia, limite de propriedade, taxa de produção, altura do banco, estradas, custos da mina, custos do processo, *marketing*, teor de corte, demanda de produção e REM (relação estéril/minério)

### **2.9.1 Ângulo Geral do Talude**

De acordo com Costa (1979), a escavação de poucos metros de profundidade causa instabilidade no volume rochoso, pela exposição da face de corte a atividades de intempéries. Ao se empregar um corte adequado, é possível manter a estabilidade da região removida. Dependendo do porte da mineração as aberturas podem alcançar centenas de metros, aumentando assim a instabilidade e necessitando empregar cuidados para a resolução da insegurança criada com a escavação.

O ângulo geral de talude afeta o tamanho e a forma da cava. Este determina o montante de estéril que deve ser removido para a exposição do minério. Por sua vez o talude possui bermas, que possibilitam a construção de estradas para caminhões. Quanto maior a adição de estradas, maior a tonelage de material a ser removido, causando maior tamanho da cava para um mesmo volume de minério. O ângulo geral de talude da cava operacionalizada depende da largura da berma, do ângulo individual de talude, da geologia estrutural, da presença de água e o posicionamento das estradas (KENNEDY, 2009).

O ângulo geral pode existir em diferentes inclinações em toda a cava, principalmente se o material for heterogêneo, por isso o ângulo geral é um dos desafios iniciais encontrado na mina. Também é comum encontrar diferentes ângulos para um mesmo material, correlacionada à profundidade da abertura da mina. O ângulo de talude deve ser o mais íngreme possível, mas que permita as operações na mina e se mantenha estável até a exaustão da mina.

### **2.9.2 Altura do Banco da Cava**

A altura do banco é um dos mais importantes fatores em mina a céu aberto, possuindo impacto no capital, nas operações e na produção da mina. Este pode variar entre 5 e 30 metros de altura. A altura do banco vai depender do tipo de solo/rocha, das condições de trabalho e do

tipo do equipamento de carregamento, sendo que este está diretamente relacionado com demanda de produção.

De acordo com Kennedy (1990) a altura do banco é a distância vertical entre níveis horizontais da cava, como pode ser observado na Figura 13. Cada banco é delimitado por uma feição superior, chamada crista, e por uma feição inferior, o pé da bancada. Crista e pé são separados por uma altura  $H$  igual a altura da bancada. A face subvertical exposta é chamada face da bancada. A altura dos bancos não precisa ser a mesma, podendo ter alturas diferentes para estéril e minério. A altura vai depender das características físicas do depósito, do grau de seletividade, do tamanho do equipamento de carregamento e da taxa de produção, sendo que ainda é preciso levar em consideração as condições climáticas.

A determinação de uma altura de banco ideal, é uma das principais preocupações da mina a céu aberto. A altura do banco deve ser estabelecida conforme o tamanho e o tipo de equipamento desejado para a produção, que normalmente é igual ao comprimento da lança de escavação da *shovel*, por exemplo. Mas por consequência, os bancos não devem conter altura muito grande, pois podem apresentar problemas de segurança.

Outros fatores que devem ser levados em consideração para a altura do banco são as propriedades das rochas, características geológicas da reserva de minério, parâmetros de produção como diâmetro do furo e estradas; necessidade de sequenciamento, extração seletiva, produção total e estabilidade do talude.

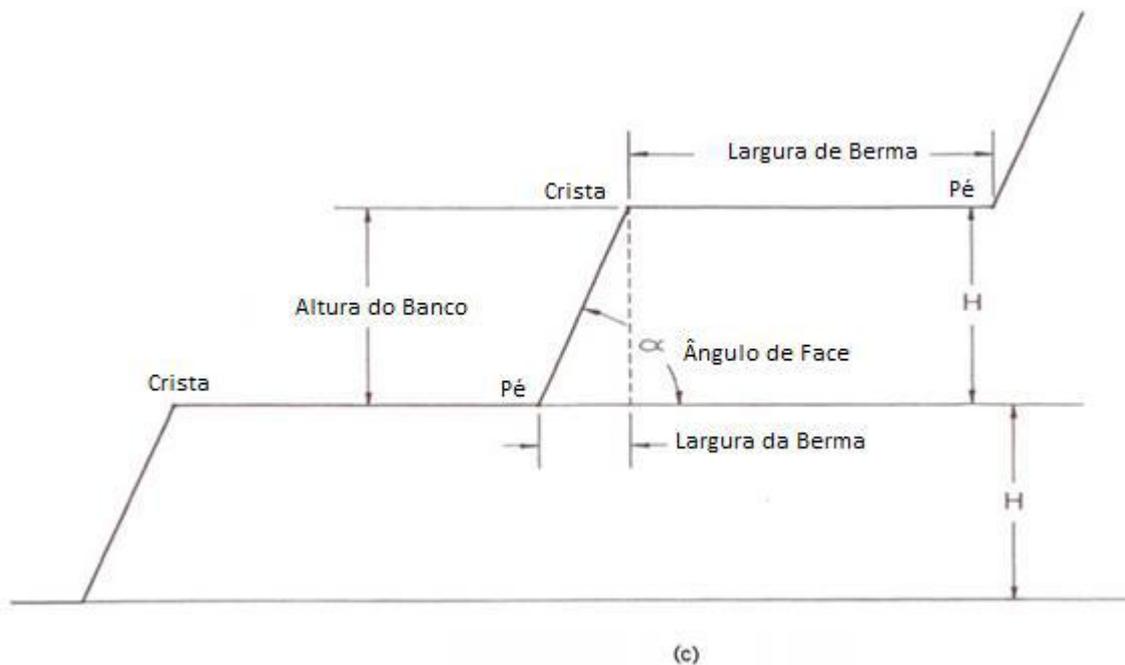
Em geral as vantagens de se construir bancos altos em minas a céu aberto podem ser observadas a seguir:

1. Utilização de um menor número de equipamentos, caso este seja de grande porte e de alta capacidade. O que significa maior produtividade e eficiência.
2. Menor tempo é requerido para organização e manutenção do equipamento.
3. A supervisão de todas as operações será mais prática.
4. É possível o desmonte de grandes blocos, o que resulta em maior produção em cada banco, o que ocasiona menor número de desmontes.

Podemos citar também algumas desvantagens para bancos altos de mina, como:

1. Diminuição da capacidade de extração seletiva.
2. Aumento da diluição.

3. Diminuição da flexibilidade das operações.
4. Maior atenção a segurança.



(c)  
Figura 13 - Divisões do banco de Mina.  
Fonte: Hustrulid e Kuchta (2013, p. 292).

Diferentes fatores podem contribuir na influência de seleção das dimensões do banco de mina. Uma vez estipulada sua altura, outras dimensões necessárias como largura do banco, as seguem diretamente. Uma altura comum de banco para grandes minas está em torno de 15 metros, para minas menores 12 metros e para depósito pequeno como de ouro, 7,5 metros.

De acordo com Hustrulid e Kuchta (2013), é possível seguir algumas etapas, nas quais são consideradas, para a realização da construção da geometria dos bancos, são elas:

1. Características do depósito (tonelagem total, distribuição do teor, valor, etc.) com método geométrico e estratégia de produção.
2. Estratégia de produção de rendimento de taxa diária de minério e estéril.
3. Tipo de equipamento necessário na produção (tipo e tamanho de frota).
4. O equipamento ideal que está associado ao tipo de geometria em operação.
5. Conjunto de resultados adequados à geometria do banco.
6. Avaliações de consequências relativas à taxa de remoção de material, operação versus custo de capital; aspectos de estabilidade de talude, etc.
7. Escolher a melhor alternativa no cenário estudado.

### 2.9.3 Ângulo de Face da Bancada

A face do talude ilustrada na figura 13, corresponde a face inclinada do banco de mina. Ela assim como o ângulo de talude geral, possui uma inclinação para melhor segurança do local de trabalho.

Ângulo de Face é a inclinação individual de um banco, formada pela interseção entre o plano da berma e o alinhamento entre o pé e a crista. De forma individual, é o ângulo que depende do espaçamento vertical entre todas as bancadas e a largura da bancada.

O ângulo da face pode ser calculado, segundo Hustrulid e Kuchta, através da equação 7:

$$\beta = \text{atan} \left[ \frac{A_b}{\frac{A_b}{\tan(OSA)} - Lb} \right] \quad (7)$$

$\beta$  = Ângulo da face

$A_b$  = Altura da bancada

$OSA$  = Ângulo geral do talude

$Lb$  = Largura da Berma

### 2.9.4 Largura do Banco de Mina

A superfície horizontal exposta ao se produzir uma bancada é chamada de largura do banco de mina. Essa largura corresponde à distância entre o pé e a crista medidos na superfície superior do banco, que varia entre 8 a 60 metros. Mas a largura depende das dimensões dos caminhões, do espaço para manobra do equipamento de carregamento e da pilha de minério desmontado por explosivo.

Há vários segmentos de bancos na mina e uma bancada em específico se executa o trabalho de mineração. Esse banco de execução do trabalho possui uma área de corte de material a ser retirado que está ilustrado na Figura 14, como “cut” ( $C$ ); possui uma largura da bancada de trabalho ( $W_B$ ), definido como a distância da crista até o novo pé. Após a extração do “cut”; e uma área de segurança ( $S_B$ ) para execução dos trabalhos, é formada após retirada do “cut”. O propósito desses bancos é coletar o material que é desmontado e impedir a queda de material para bancos inferiores (HUSTRULID, KUCHTA 2013).

Uma relação empírica desenvolvida por Call & Nicholas definem que a forma preferencial de se definir uma largura de berma é através da equação 8:

$$\text{Largura da Berma (metros)} = 0,2 \times \text{altura do banco} + 4,5 \text{ m} \quad (8)$$

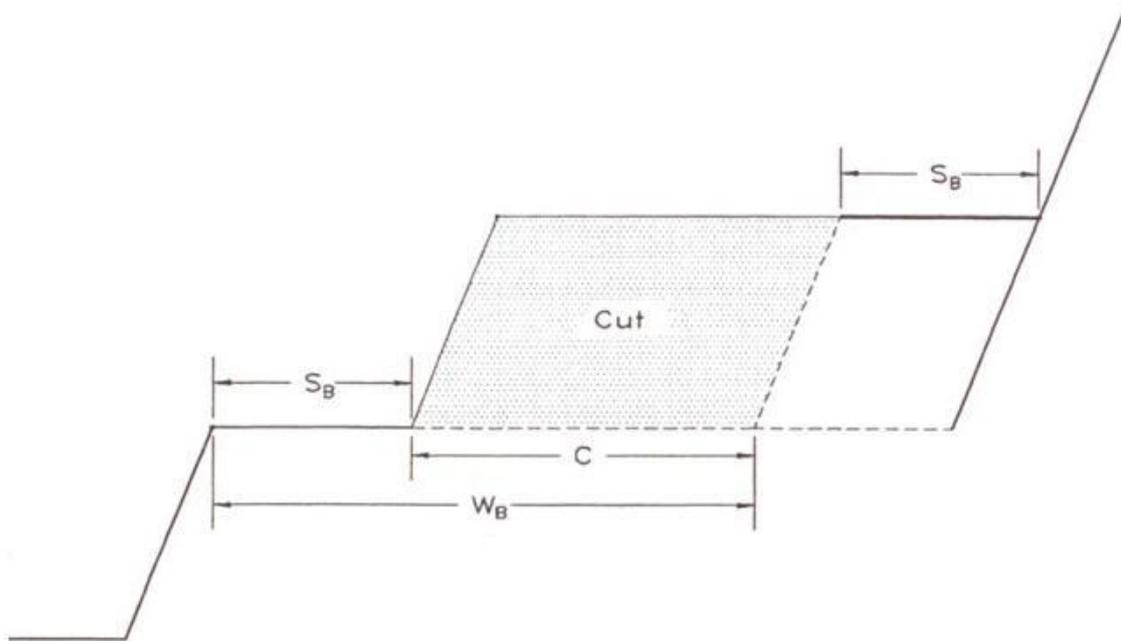


Figura 14 - Seção através da bancada de trabalho. Cut: Área de Corte.

Fonte: Hustrulid e Kuchta (2013, p. 292).

Um outro cálculo de acordo Hustrulid e Kuchta, com do espaço mínimo para acomodação de grandes caminhões e uma *shovel*, por exemplo, para carregamento na bancada de trabalho, pode ser dado pela equação 9:

$$W_B = S_B + W_C \quad (9)$$

$W_B$  = Largura do banco de trabalho.

$S_B$  = Área de segurança.

$W_C$  = Área de Corte.

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho teve início a partir da análise das informações topográficas e do modelo de blocos geológico de uma mina hipotética de Minério de Ferro cedidos pela *Micromine Pty* – BNA Consultoria e Sistemas do Brasil. A base de dados utilizada conta com dados classificados segundo descrição tipológica e não litológica; devido a esta

característica dos dados. O modelo criado foi o de uma casca de teores (*gradeshell*) com valores de teor de corte (*cut-off*) definidos em 20% de ferro, como segue a Figura 15. Os teores de Fe foram calculados por interpolação segundo o método do Inverso do Quadrado das Distâncias – IQD através do *software Micromine*.

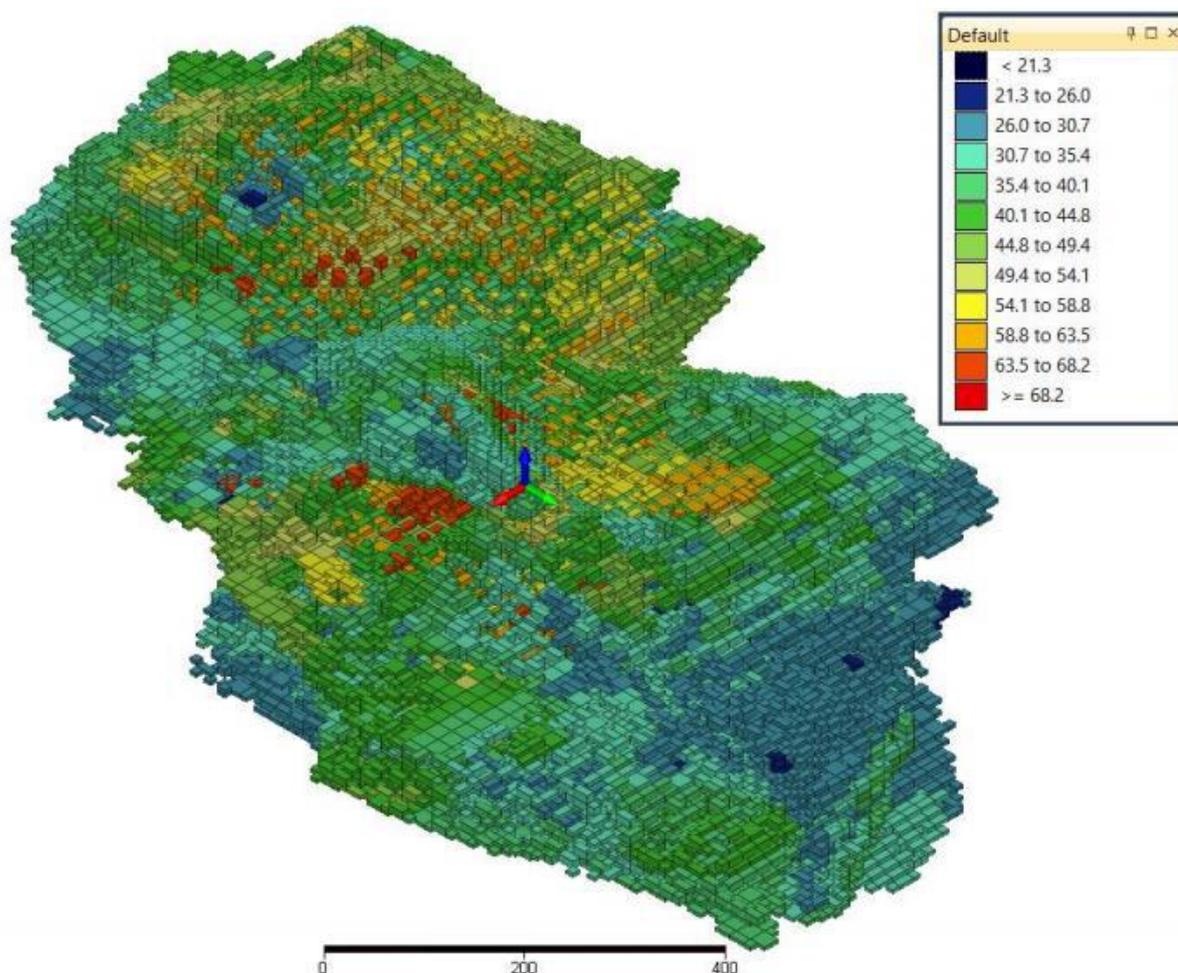


Figura 15 - Representação de teores definida como a jazida lavrável.

### 3.1 Otimização das Cavas e Definição do Limite Final

Na análise de sensibilidade de um projeto mineral, um dos processos principais é a definição de um conjunto de blocos do depósito que maximize um dos seguintes parâmetros: lucro, valor marginal do depósito ou a quantidade de metal produzido. Esse processo visa, de fato, definir a parte economicamente viável a se explorar em um depósito mineral.

A análise dos blocos foi efetuada através do algoritmo Lerchs e Grossmann, um dos poucos métodos otimizantes e o mais utilizado na definição de uma superfície limite de lavra. A partir da função benéfico, define-se o valor econômico de cada bloco do depósito, que contabiliza o valor positivo (lucro), se minério, ou negativo no caso dos blocos de estéril.

O algoritmo busca por um caminho ótimo de lavra, dada uma restrição geotécnica, definida pelo ângulo geral do talude. Para se obter uma cava ótima o algoritmo utiliza o conceito de arco estrutural, ou seja, para retirar o bloco A se necessita primeiramente retirar o bloco B, assim obtém-se o limite ótimo da cava, como se segue na Figura 16.

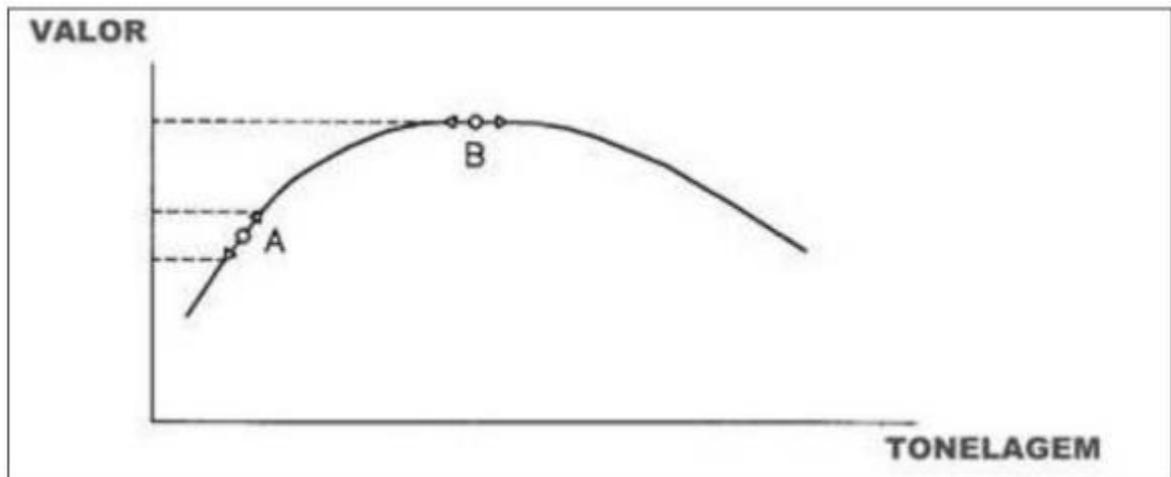


Figura 16 - Curva com valor total da cava em função das toneladas movimentadas.

Fonte: Carvalho (2012, p.61)

Neste trabalho, a cava otimizada, via *software Micromine* foi obtida de acordo com a metodologia de cavas aninhadas (*nested pits*) e foi analisado o melhor cenário dentre as cavas. O processo de geração de cavas aninhadas cria um conjunto de cavas finais, conjunto que consiste em superfícies que “rodeiam” umas às outras consecutivamente (TEIXEIRA, NADER, et al.,2016).

O valor econômico do conjunto de cavas aninhadas (*nested pits*) tende a uma estabilização, enquanto as massas movimentadas continuam a variar entre os *pitshells*. A Figura 17 mostra o conjunto de cavas aninhadas obtidas por otimização do presente depósito.



Figura 17 - Cavas aninhadas obtidas pela otimização dos blocos do depósito.

### 3.2 Operacionalização da Superfície Limite Ótima

A lavra de mina à céu aberto apresenta duas configurações mais recorrentes, lavra em bancada e em encosta. Nestas operações a praça de trabalho, é o banco ou bancada. Cada banco é delimitado por uma crista, feição superior e por um pé, feição inferior. A face subvertical exposta é chamada face da bancada que possui uma inclinação segundo um ângulo  $\alpha$  com a horizontal. Por fim a seção horizontal da bancada, é conhecida como Berma.

As cavas ótimas, gerados pela otimização dos blocos pelo algoritmo de Lerchs e Grossmann, não fornecem uma configuração de bancadas operacionais, como pode ser observado na Figura 18.

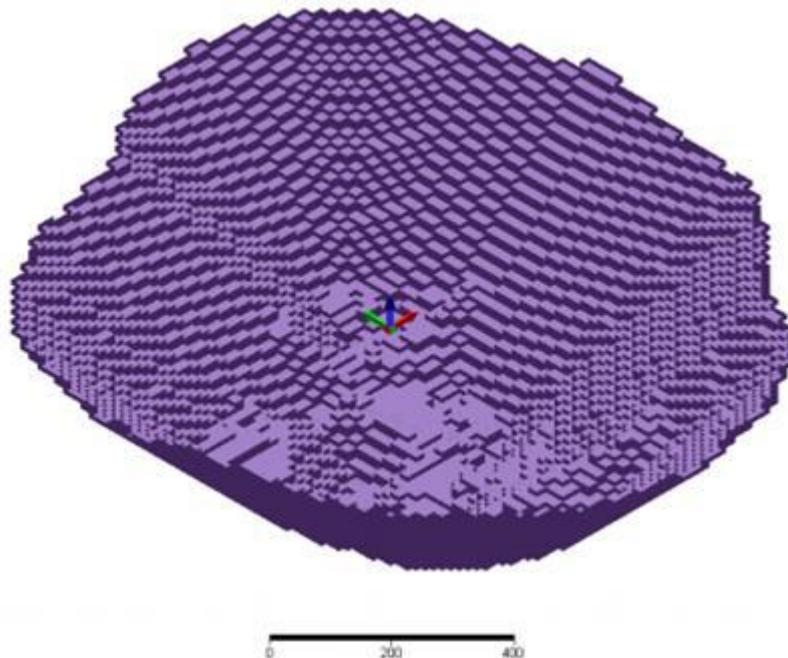


Figura 18 – Cava não operacionalizado.

O processo de operacionalização da cava ótima consiste no *design* das linhas da base da cava final. Projetam-se as linhas de pé e crista dos bancos, de maneira a garantir a melhor aderência possível da cava matemática para a formação da cava ótima.

O processo de operacionalização é realizado segundo premissas de projeto tanto geométricas quanto de caráter prático das operações unitárias de lavra. Tais premissas de operacionalização das cavas foram definidas com referência a valores de altura de bancada e largura de berma recorrentes em projetos de lavra de minério de ferro no quadrilátero ferrífero. Essas premissas são exibidas na tabela 1.

Tabela 1 – Altura de banco, largura de berma, ângulo de talude e face.

Premissas	Altura da Bancada (Metros)	Ângulo Geral do Talude (Graus)	Largura de Berma (Metros)	Ângulo da Face (Graus)
1	13,00	45	6,00	61,70
2	13,00	40	8,00	60,04
3	13,00	35	10,00	56,62
4	15,00	45	6,00	59,04
5	15,00	40	8,00	56,64
6	15,00	35	10,00	52,71
7	18,00	45	6,00	56,31
8	18,00	40	8,00	53,23
9	18,00	35	10,00	48,89

Foram operacionalizados 9 cenários variando altura das bancadas, largura das bermas e ângulos de face do talude, como pode ser observado na tabela 1. O fundo das cavas, ou seja, o pé da primeira bancada foi planejado sobre o minério cubado dentro da cava ótima e este foi respeitado como premissa básica para a operacionalização dos demais cenários, como mostrado na Figura 19.

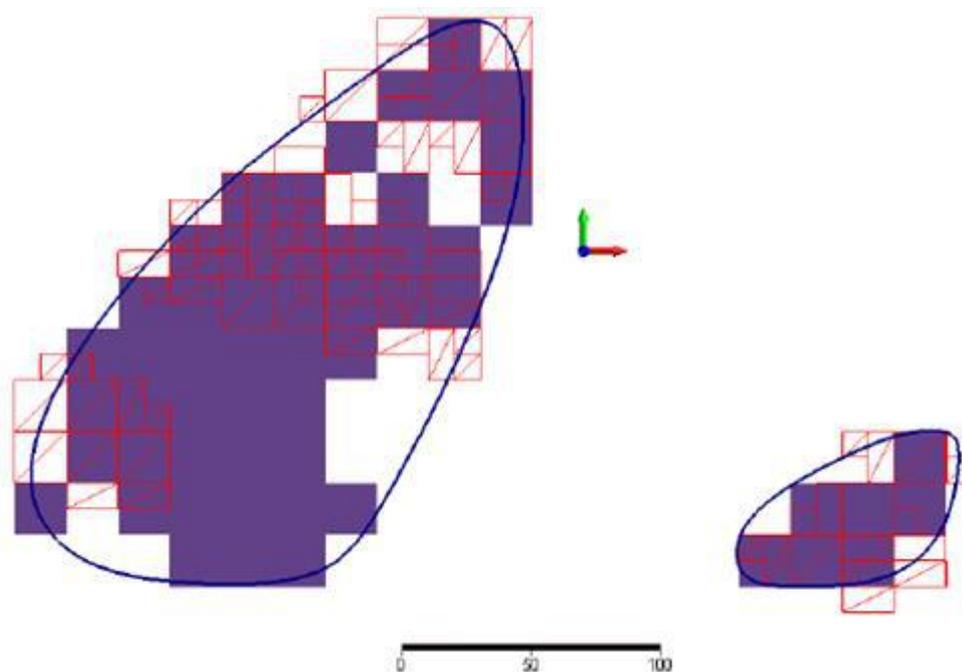


Figura 19 – Fundo da Cava, primeiro pé do talude.

As demais bancadas foram projetadas seguindo premissa única de aderência a cava ótima, está por sua vez foi definida de maneira a não interferir de maneira subjetiva na operacionalização. Após a operacionalização das cavas, cubaram-se os sólidos para avaliar

como a variação dos parâmetros geométricos afetou as massas lavradas de estéril e de minério, consequentemente, a relação estéril minério da cava e o teor médio.

### 3.3 Fluxograma da Metodologia

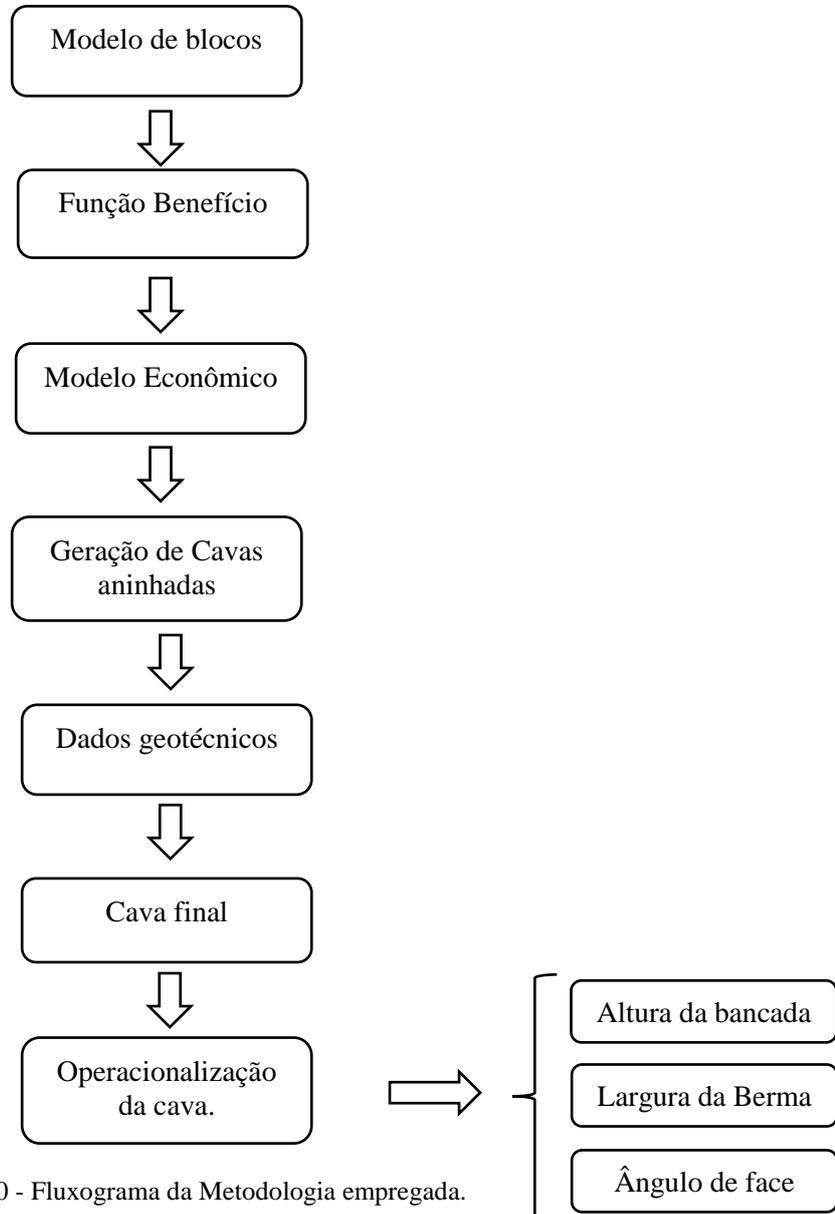


Figura 20 - Fluxograma da Metodologia empregada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo de Lerchs & Grossmann foi executado sobre o modelo de blocos do depósito para um ângulo geral de talude de 45 graus. Toda a cava, isto é, todas as bancadas, seguiram esta mesma premissa.

### 4.1 Otimização das cavas

A escolha da cava ótima foi feita analisando o resultado do conjunto de cavas oriundas das otimizações do depósito. Escolheu-se a cava que se obteve um Valor Presente Líquido maior para uma quantidade ótima de material movimentado. Como mostrado anteriormente, essa cava ótima não é aquela que retorna o maior valor absoluto do VPL, devido a estagnação teórica da curva (cava ótima, VPL, tonelagem de minério, tonelagem de estéril), este valor é aquele que otimiza a movimentação de material na cava, maximizando o somatório do valor econômico dos blocos.

A partir da análise da curva gerada no gráfico 1, se observa as 25 cavas aninhadas, com valores de minério, estéril por tonelagem e também o VPL de cada cava. A partir da análise do gráfico 1, a seleção da cava ótima foi a de número 19, por conter maior tonelagem de minério por uma menor tonelagem de estéril, onde se retorna um bom VPL, por massa movimentada.

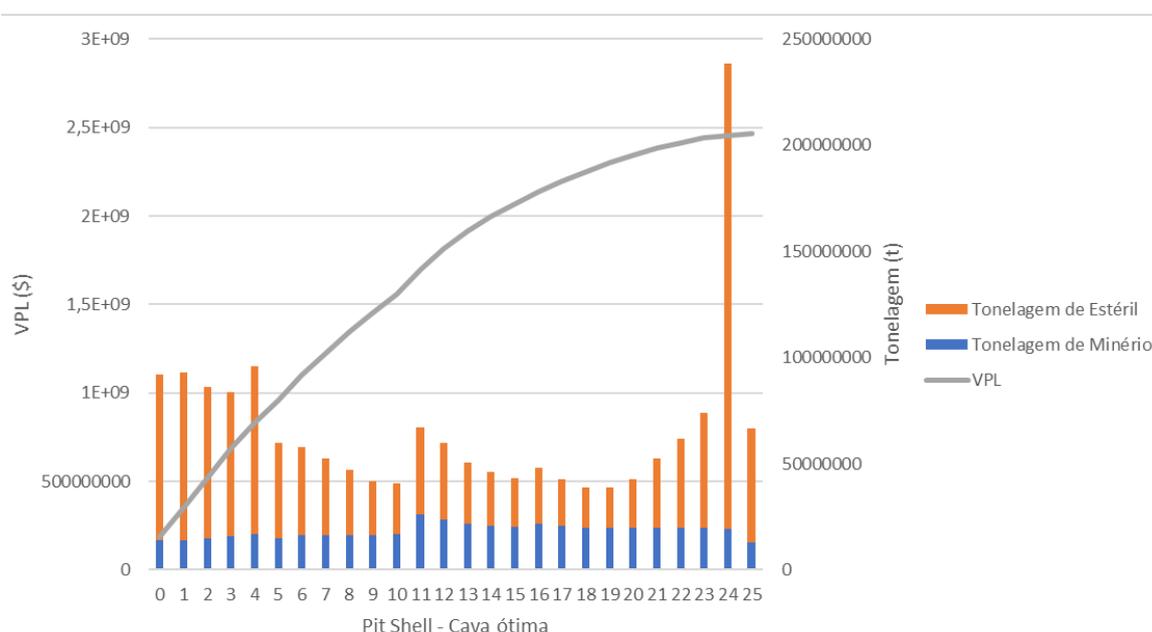


Gráfico 1 – Cavas ótimas geradas pelo *software*

Uma curiosidade em relação a essas cavas geradas no gráfico 1, é a de número 24. Nela se observa um alto valor de massa de estéril resultado da geração da otimização no *software*. Esta pode ser caracterizada em uma ação antieconômica da otimização, que visa a resolução de um problema financeiro, neste caso acarretado ao alto valor de estéril na cava. Como não se

conseguiu um melhor ajuste financeiro por via do alto valor de estéril nas gerações de cavas, o resultado foi uma maior taxa de estéril com um maior VPL. A diferença entre as cavas é obtida por meio da multiplicação por fatores de ajuste de receita (TEIXEIRA, NADER, et al.,2016).

## 4.2 Resultado das operacionalizações

A partir da cava ótima operacionalizou-se nove cenários diferentes. Variou-se os parâmetros geométricos, abordados na metodologia do tópico 3.2, para valores de altura de bancada e bermas distintos. O conjunto de cavas operacionais gerado, foi em seguida cubado e procurou-se avaliar como a variação dos parâmetros geométricos interferiu nas massas de estéril e de minério movimentadas.

A Figura 21 representa duas das nove cavas operacionais com os parâmetros geométricos inseridos na cor laranja e a casca de teores da mina hipotética de minério de ferro de cor verde. Observa-se na imagem o efeito *gap* oriundo da variação dos parâmetros geométricos, ou seja, maior relação de minério e estéril movimentada, o que ocasiona aumento do gasto financeiro para a retirada do minério, uma vez que ele paga os custos do empreendimento. Na figura 21, o modelo de blocos apresentado representa a *gradeshell* (casca de teores) e a área sombreada no entorno da cava corresponde ao estéril que deverá ser movimentado para liberar os blocos de minério subjacentes. O expressivo aumento nas massas de estéril lavradas entre as cavas, se dá principalmente a partir da flexibilização do ângulo geral de talude.

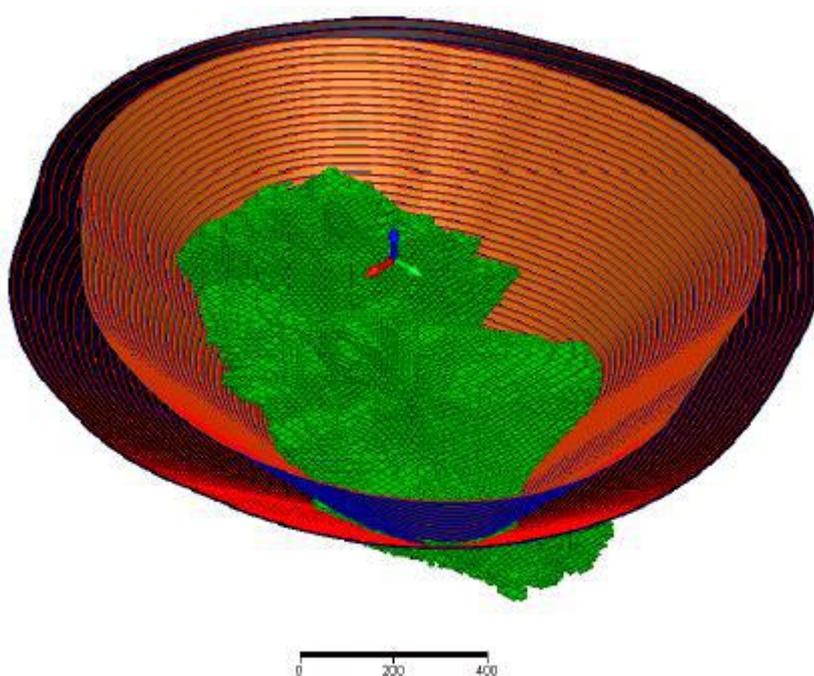


Figura 21 - Efeito *gap* entre dois dos cenários operacionais gerados.

Além da percepção espacial de aumento progressivo das massas de estéril movimentadas, buscou-se avaliar segundo parâmetros relevantes de lavra o efeito das variações nas premissas geométricas, os dois parâmetros definidos foram a Relação estéril minério. As tabelas 2 e 3 elencam os resultados obtidos pelas operacionalizações nos nove cenários. Os valores de densidade do estéril foram definidos como  $2,80 \text{ g/cm}^3$  e do minério em  $2,89 \text{ g/cm}^3$ , de acordo com a tabela de construção Civil.

Tabela 2 – Informações de tonelage de minério, estéril e teor de ferro.

Altura da Bancada (Metros)	Ângulo Geral do Talude (Graus)	Largura de Berma (Metros)	Ângulo da Face (Graus)	Material	Tonelagem	Teor de Fe
13,00	45	6,00	61,70	Minério	236.137.631,62	43,30
				Estéril	604.689.592,99	
				Total	840.827.224,61	
				REM	2,56	
13,00	40	8,00	60,04	Minério	237.727.506,33	43,23
				Estéril	700.636.290,37	
				Total	938.363.796,70	
				REM	2,95	
13,00	35	10,00	56,62	Minério	241.183.406,16	43,11
				Estéril	860.430.486,36	
				Total	1.101.613.892,52	
				REM	3,57	
15,00	45	6,00	59,04	Minério	234.473.046,93	43,35
				Estéril	581.294.876,60	
				Total	815.767.923,53	
				REM	2,48	
15,00	40	8,00	56,64	Minério	238.079.622,18	43,22
				Estéril	701.065.479,00	
				Total	939.145.101,18	
				REM	2,94	
15,00	35	10,00	52,71	Minério	240.112.104,07	43,16
				Estéril	850.822.460,74	
				Total	1.090.934.564,81	
				REM	3,54	
18,00	45	6,00	56,31	Minério	236.692.483,41	43,29
				Estéril	601.515.876,27	
				Total	838.208.359,68	
				REM	2,54	
18,00	40	8	53,23	Minério	239.443.950,58	43,17
				Estéril	722.628.902,65	
				Total	962.072.853,23	
				REM	3,02	
18,00	35	10,00	48,89	Minério	240.876.732,78	43,13
				Estéril	874.526.966,86	
				Total	1.115.403.699,64	
				REM	3,63	

A tabela 3 mostra resumidamente a tabela 2. Nesta, a coluna ângulo de face se torna dependente da altura de bancada, ângulo geral de talude e largura de berma. O ângulo de face também sofre variações conforme se muda os parâmetros geométricos empregados na cava. Este por sua vez foi obtido através do *software* usado na operacionalização da cava ótima.

Tabela 3 – Informações da altura e largura, conforme a REM gerada.

Premissas	Altura da Bancada (Metros)	Ângulo Geral do Talude (Graus)	Largura de Berma (Metros)	Ângulo da Face (Graus)	REM	Teor Médio (Fe)
1	13,00	45	6,00	61,70	2,56	43,30
2	13,00	40	8,00	60,04	2,95	43,23
3	13,00	35	10,00	56,62	3,57	43,11
4	15,00	45	6,00	59,04	2,48	43,35
5	15,00	40	8,00	56,64	2,94	43,22
6	15,00	35	10,00	52,71	3,54	43,16
7	18,00	45	6,00	56,31	2,54	43,29
8	18,00	40	8,00	53,23	3,02	43,17
9	18,00	35	10,00	48,89	3,63	43,13

Observa-se que, de maneira geral, quanto menor a largura de berma menor a relação de estéril minério, podendo optar pelas três alturas de bancadas possíveis inseridas como premissas, de acordo com a tabela anterior. Utilizando uma maior largura de berma, maior será a REM, principalmente se utilizar uma maior altura de bancada. O gráfico 2 representa a variação dos parâmetros escolhidos para análise em função da largura de berma, REM e altura de bancadas, para melhor observação.

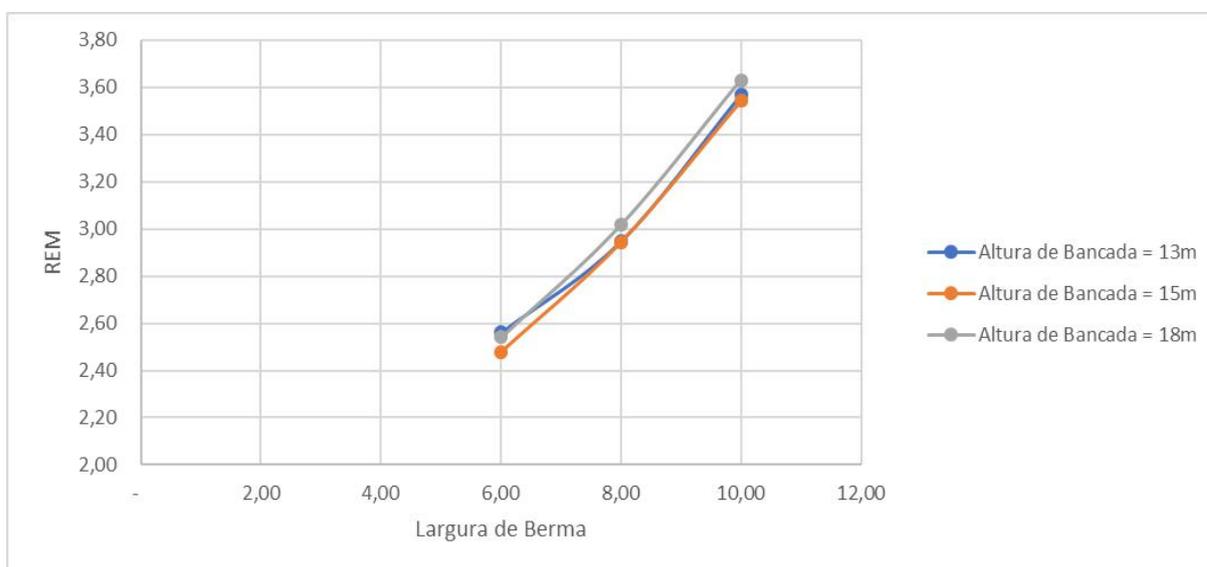


Gráfico 2 – REM x Largura de Berma

O gráfico 2, ilustra as alturas, a largura de berma e a relação estéril minério (REM). Através do gráfico observa a inserção das premissas de uma forma mais comparativa e clara. A cor azul referente às alturas de 13 metros, a laranja de 15 metros e a cinza de 18 metros. E conforme se observa as três alturas no gráfico, quanto mais se aumenta a berma, consecutivamente se aumenta a REM. Isso pode ser explicado pela redução do ângulo de talude

para 35°, gerando uma cava mais aberta que, conseqüentemente, irá lavrar maior quantidade de estéril.

O gráfico 3 mostra a relação em relação ao teor de minério. Neste também se observa que ao se empregar menor largura de berma maior é o teor a ser lavrado, em especial para a altura de bancada de 15 metros, que dentre as comparações empregadas neste caso, seria a melhor escolha. Mas apesar de seu teor ser maior, não houve variações significativamente menores de teor nos outros cenários de altura de bancada, essa diferença é muito pequena e quase insignificante. O gráfico 3 expõe os resultados de teor, largura de berma e altura de bancada. Assim como no gráfico 2, neste as alturas seguiram a mesma escolha de cores, para diferente segmento de observação. A cor azul é referente às alturas de 13 metros, a laranja de 15 metros e a cinza de 18 metros. E conforme se diminui a berma se aumenta o teor de ferro.

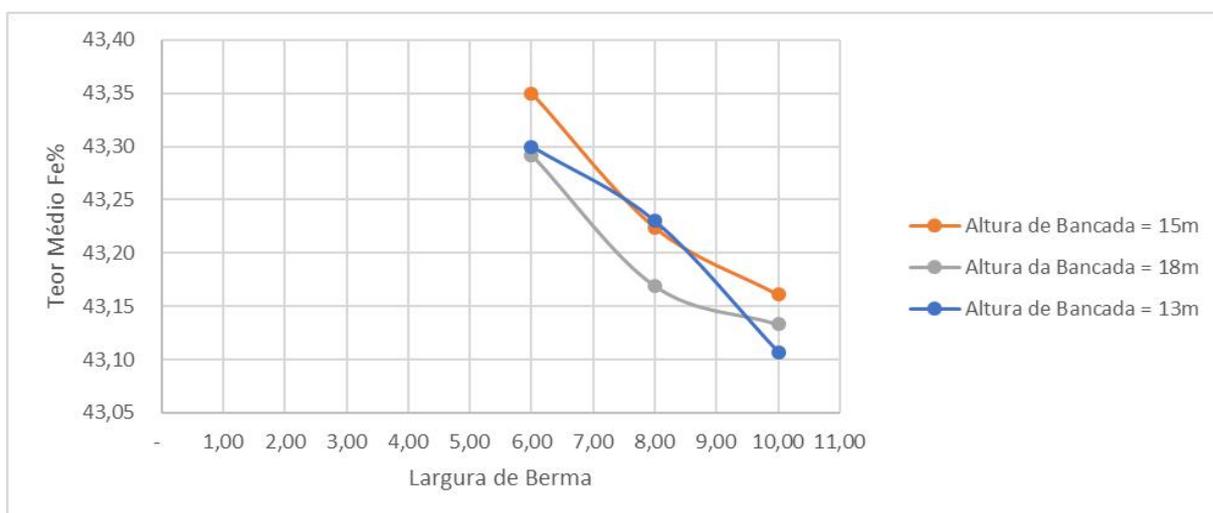


Gráfico 3 – Teor Médio Fe% x Largura de Berma

Observa-se no gráfico 3 que o emprego das três bancadas neste modelo de blocos com a cava escolhida são perfeitamente possíveis, uma vez que, neste caso, o teor de ferro na cava não possui valores significantemente expressivos. Na relação de estéril minério, a largura de berma ideal será aquela de menor largura, o que é esperado, pois ao se empregar uma largura de berma maior, maior a quantidade de estéril removido.

Fica evidente nos Gráficos 2 e 3 acima, que a largura de berma maior, tende a aumentar a REM, uma vez que a projeção da cava lateralmente se torna mais pronunciada, havendo menor aderência à cava matemática. Durante otimização a figura 22 se evidencia a aderência dos cenários de altura 15 m, premissa 4 de cor verde ser mais aderente a cava matemática de cor roxa, do que a de altura 15m premissa 3 de cor laranja. A área entre as duas premissas 3 e 4, corresponde ao estéril que deve ser retirado a mais entre os dois cenários.

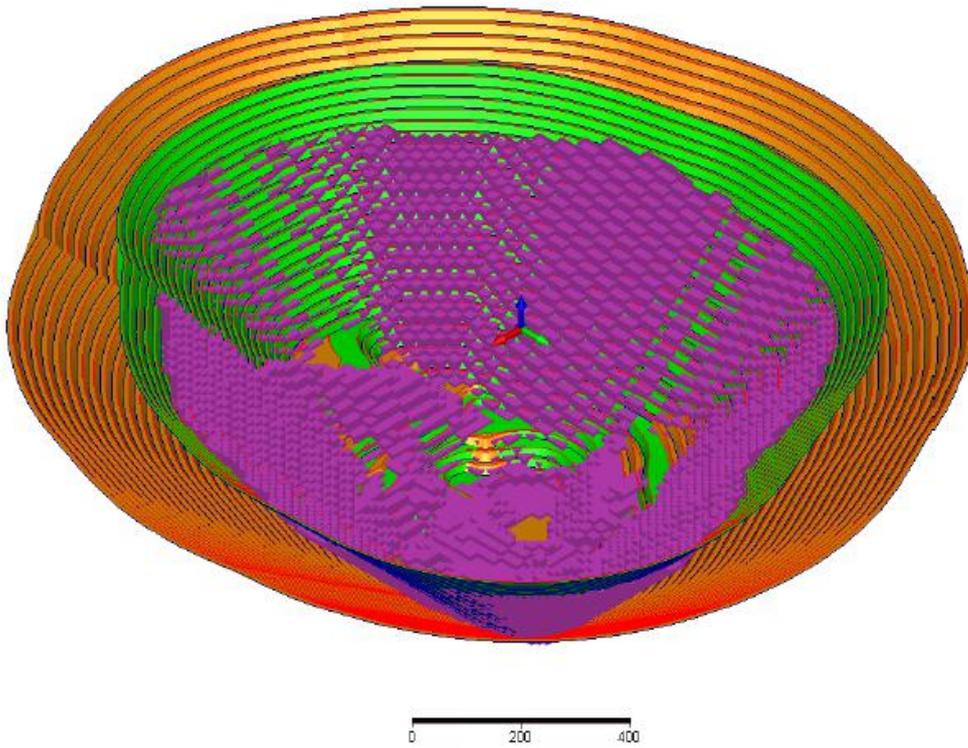


Figura 22 - Aderência das cavas operacionais à cava ótima (isométrica)

Na Figura 23 tem-se o perfil da projeção das duas cavas otimizadas em relação a cava matemática mostrada na figura 22. Nesta figura 23 fica evidente a diferença das premissas 3 e 4.

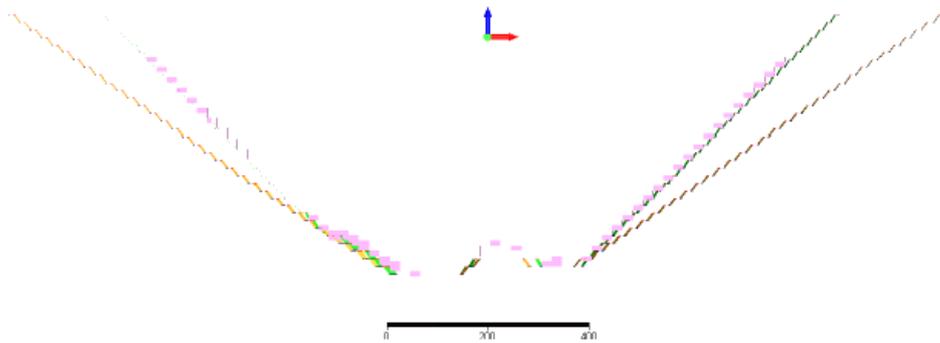


Figura 23 - Aderência das cavas operacionais à cava ótima (seção transversal)

## 5 CONCLUSÃO

No estudo do planejamento de mina deve-se usar ferramentas que permitem ao engenheiro observar diferentes possibilidades de cenários durante o estudo. O objetivo desse trabalho foi fazer uma comparação de análise de sensibilidade entre os cenários de altura de banco e largura de berma na cava final. Todos os cenários foram atribuídos um valor de ângulo geral de talude, altura da bancada, largura de berma e conseqüentemente o ângulo de face, sendo este dependente dos parâmetros anteriores. O limite ótimo da cava gerados por Lerchs e Grossmann gerado no *Micromine*, fornece a partir da inclinação do talude, a massa ou volume de minério e estéril, fornecendo também a possibilidade, como por exemplo, variar a geometria da cava.

A partir da inserção dos parâmetros geométricos na cava escolhida para o estudo, ou seja, aquela que retorna maior tonelagem de minério por menor tonelagem de estéril movimentados se iniciou o estudo dos impactos destes na cava matemática. Os testes mostraram que a REM sofre diretamente influência quando as cavas otimizadas não estão acompanhando a cava matemática, isso se dá devido a diminuição do ângulo geral de talude e o aumento da altura e largura de berma. Essa otimização aumenta em muito a quantidade de estéril e prejudica financeiramente o empreendimento, uma vez que o minério deve pagar os custos do projeto. Quando se utiliza um maior ângulo de talude, menor largura de berma e uma altura dentre as três propostas, estas podem acompanhar a cava matemática produzindo menor quantidade de estéril, conseqüentemente menor REM.

Na análise de teor de minério de ferro nas diferentes cavas, não se observou variações significativas ao se empregar largura e berma diferentes. Isso pode ser interpretado de uma forma que, ao se operacionalizar a cava acompanhou-se todo o seu contorno ótimo, que nos fornece valores de teores significativos para a execução do trabalho.

Por fim, antes do estudo era sabido que o ângulo de talude, altura de bancada e largura de berma influenciavam diretamente na relação estéril/minério, mas não exatamente o quanto. A definição da altura de bancada e largura de berma dependem dos equipamentos a serem utilizados na lavra e isso sujeita ao quanto o empreendimento poderá investir de acordo com a demanda da produção. Se observa que os nove cenários podem ser empregados em um planejamento de lavra, mas três deles se destacam mais por conter menor REM, mas se os equipamentos definidos para a operação precisarem de uma maior berma, devido ao seu maior porte, maior será a REM, para compensar o tamanho dos equipamentos utilizados.

## 6 REFERÊNCIAS

Assis, A. H. Teores de Corte: Uma Análise da Influência no Resultado Econômico de Um Empreendimento Mineiro. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. 2016. 57 p.

Candido, M.T. Impacto de Diferentes Algoritmos e Geometria de Depósitos Minerais no Planejamento de Longo Prazo. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia (Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais PPGEM) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, rs. 2012. 82 p.

Carmo F. A. R. D. Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Mina a Céu Aberto Otimizadas. 2001. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 135 p.

Costa R. R. Projeto de mineração. 1. ed. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1979. 286 p.

Curi A. Minas A Céu Aberto: planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 223p.

Darling P. SME Mining Engineering Handbook. 3. ed. Littleton, Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2011. 1046 p.

Gibson W.H.; Bruyn I.A.; Walker D.J.H. Selection of practical bench height in open pit mining using a multi-criteria decision-making solution. The South African Institute of Mining and Metallurgy International Symposium on Stability of Rock Slopes. 29 p. Jan. 2006.

Girodo, A. C. Mineração. In: Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005, v. 2.

Guimarães, O.R.A. Aplicação de algoritmos genéticos na determinação de cava final e sequenciamento de lavra em minas a céu aberto. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2007. 169 p.

Hartman H. L. & Mutmanský, J. M. Introductory Mining Engineering. Hoboken, New Jersey, 1980. 570p.

Hustrulid W. & M. Kuchta. Open Pit Mine Planning & Design. Rotterdam, Balkema, 1995. 1308 p.

Kennedy B. A. Surface Mining. Littleton, Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 1990. 1206 p.

Kose, H.; Aksoy, C.O; Gönen, A; Kun, M; Malli, T. Economic evaluation of optimum bench height in quarries. Dokuz Eylül University, Engineering Faculty, Department of Mining Engineering, Bornova, Izmir-Turkey. Feb 2005. 10 p.

Laurich R. Ultimate pit definition. Surface Mining, 2nd Edition, 469, Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 1990. 465 p.

Maia J. Desenvolvimento. Curso de Lavra de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1994, 133 p.

Micromine. (2017). Acesso em 05 de setembro de 2018, disponível em Micromine: <https://www.micromine.com/>

Neto, M. T.O.C; Rocha, A.M. Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para técnicos de Geologia e Mineração. 1. ed. Natal - RN: IFRN, 2010. 267 p.

Peroni R.D.L. Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico. Doutorado, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharias da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. 143 p.

Read.J; Stacey.P. Guidelines. For Open Pit Slope Design.CSIR.2010.511 p.

Singh R.D. Principles and Practices of Modern Coal Mining, New Age International, 1997. 696 p.

Sinclair A. J;Blackwell G. H. Applied Mineral Inventory Estimation,New York, 382 p.

Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia. Acesso em 15 de outubro de 2018, disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br>

Soltanmohammadi, H.; Osanloo, M.; Sami, A.; Malekzadeh, S. B. Selection of practical bench height in open pit mining using a multi-criteria decision-making solution. Journal of Geology and Mining Research. 2.2010.59 p.

Sturaro, J.R. Apostila de Geoestatística Básica. 32 f. Departamento de Geologia Aplicada - IGCE- UNESP, Campus de Rio Claro, 2015. 32 f.

Teixeira I.R; Nader P.A.; Lage R.A.F; Capanema Y.M.V. Planejamento de mina a céu aberto, otimização, operacionalização, dimensionamento e análise econômica previa. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016, 41 p.