



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

JOÃO ANTÔNIO DA SILVA NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS LIMITES DA CAVA FINAL
ÓTIMA COM BASE NA VARIAÇÃO DO PREÇO DE MERCADO DO
FOSFATO**

ARAXÁ/MG

2017

JOÃO ANTÔNIO DA SILVA NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS LIMITES DA CAVA FINAL
ÓTIMA COM BASE NA VARIAÇÃO DO PREÇO DE MERCADO DO
FOSFATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Marcélio Prado Fontes

ARAXÁ/MG

2017

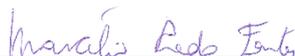
FOLHA DE APROVAÇÃO

JOÃO ANTÔNIO DA SILVA NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS LIMITES DA CAVA FINAL
ÓTIMA COM BASE NA VARIAÇÃO DO PREÇO DE MERCADO DO
FOSFATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 23 de junho de 2017.



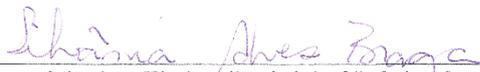
Presidente e Orientador: Prof. Me. Marcelo Prado Fontes

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. Silvana Alves Braga

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade Araxá

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, que nunca mediu esforços para que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar à minha família, em especial a minha mãe, por toda ajuda, suporte, carinho e incentivo, sem os quais nada disso seria possível.

Aos meus colegas de faculdade, em especial, Ana Maria e Kamylla, pela amizade, apoio e carinho, pelo convívio saudável e pelos momentos engraçados e de muitas risadas.

Aos meus amigos e colegas de curso, Bernardo e João Victor, por toda ajuda e companheirismo.

Ao meu orientador, Prof. Me. Marcélio Prado Fontes, pela disponibilidade de orientação e por todo o conhecimento e ensinamentos passados, os quais foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Aos professores, por todo o conhecimento compartilhado ao longo de todo o tempo em que estive na instituição.

A todos que de alguma forma contribuíram com a minha formação durante os meus anos no CEFET.

A todos, o meu eterno agradecimento.

“O grande inimigo do conhecimento não é a ignorância, mas a ilusão do conhecimento”.

Daniel J. Boorstin

RESUMO

O planejamento de uma mina a céu aberto é um processo de tomada de decisão que envolve todas as variáveis que podem interferir no sucesso do empreendimento mineral. Uma das principais atribuições do planejamento estratégico de minas é definição dos limites da cava final. Diversos algoritmos podem ser utilizados para se obter os contornos ótimos para a cava, resultando na maior lucratividade, no entanto estes limites dependem de um conjunto de fatores, internos e externos ao empreendimento mineral, os quais podem variar substancialmente ao longo do tempo. O preço de mercado do minério é provavelmente um dos fatores mais significativos para a lucratividade do empreendimento mineral, tendo influência direta nos limites da cava final. O preço pode variar significativamente perante mudanças na economia e no mercado, a nível nacional ou mundial, o que torna difícil prever o seu comportamento ao longo do tempo. Análises de sensibilidade podem ser utilizadas como forma de verificar os efeitos que determinadas variações no preço trariam para a cava final. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo realizar uma análise de sensibilidade dos limites da cava final ótima, com base na variação do preço de mercado do fosfato. Uma variação de 50% acima e abaixo de um valor base foi adotada. Dois cenários distintos foram avaliados: um considerando restrições físicas de área e fundo de cava e outro sem limitação alguma. Os resultados mostraram que variações positivas no preço de mercado provocam um aumento no volume minério movimentado. O oposto também é verdadeiro. O aumento do preço também teve influência direta na lucratividade do empreendimento, aumentando o VPL da cava. Estes resultados permitem que seja possível a criação de planos mais flexíveis e capazes de se adaptar a cenários futuros de variação do preço da *commodity*.

Palavras-chave: Planejamento de Mina. Cava Final. Análise de Sensibilidade. Preço.

ABSTRACT

Open pit mine planning is a decision-making process that involves all variables that may interfere with the success of the mining business. One of the main tasks of strategic mine planning is to find the ultimate pit limits. Several algorithms can be used to obtain the optimum pit limits, which would yield in the maximum profitability, however these limits depend on a set of factors, internal and external to the mineral enterprise, which can vary substantially over time. Commodity price is probably one of the most significant factors for the profitability of the mineral undertaking, having a direct influence on the optimum limits of the final pit. Commodity price can vary significantly over changes in the economy and in the market, nationally or globally, which makes it difficult to predict its behavior over time. Sensitivity analyses can be carried out as a way of verifying the effects that certain price variations would have on the ultimate pit limits. In this context, the main objective of this paper was to perform a sensitivity analysis of the optimal ultimate pit limits, based on the variation of the phosphate rock market price. A variation of 50% above and below the base value was adopted. Two distinct scenarios were evaluated: one considering physical constraints of area and for the bottom of the pit, and another without any limitations whatsoever. The results showed that positive changes in the market price cause an increase in the volume of ore moved. The opposite is also true. The increase in prices also had a direct influence on the profitability of the mining business, increasing the NPV of the pit. These results allow for the creation of plans that are more flexible and able to adapt to future scenarios of variation of the commodity price.

Keywords: Mine Planning. Final Pit. Sensitivity Analysis. Price.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Representação de um modelo de blocos. Fonte: Candido (2012, p. 14).....	17
Figura 2.2 - Variações da quantidade de minério, estéril e da relação estéril/minério em função do teor de corte. Fonte: Bazante (2004, p. 62).....	26
Figura 2.3 - Análise de sensibilidade: VPL. Fonte: Adaptado de Runge (1998, p. 136).	34
Figura 2.4 - Representação das diferenças entre pushbacks convencionais e sequenciais. Fonte: Adaptado de Wetherelt e Wielen (2011, p. 862).....	36
Figura 2.5 - Representação dos principais elementos de um talude. Fonte: Modificado de Kliche (2011, p. 497).....	39
Figura 2.6 - Relação entre o tamanho dos equipamentos e a largura da bancada. Fonte: Curi (2014, p. 109).	41
Figura 2.7 - Diferentes ângulos gerais de talude aplicados a diferentes setores da cava. Fonte: Adaptado de Armstrong (1990, p. 459).....	42
Figura 2.8 - Redistribuição das tensões horizontais devido a escavação da cava. Fonte: Adaptado de Hustrulid et al. (2013, p. 333).	44
Figura 3.1 - Seção E-W do modelo de blocos mostrando as diferentes tipologias de minério e de estéril.....	46
Figura 3.2 - Média anual do preço de mercado do fosfato nos últimos 5 anos. Fonte: Adaptado de Global Economic Monitoring (GEM) Commodities, World Bank Group.	48
Figura 3.3 - Fluxograma representativo da metodologia adotada no trabalho.	52
Figura 4.1 - Cavas matemáticas 1-4 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler.....	53
Figura 4.2 - Cavas matemáticas 5-8 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler.....	54
Figura 4.3 - Cavas matemáticas 9-11 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler....	54
Figura 4.4 - Comparativo das 11 cavas geradas para o Cenário I, em relação aos valores de tonelagem de minério, estéril e VPL da cava.	55
Figura 4.5 - Cavas matemáticas 1-4 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler.	58
Figura 4.6 - Cavas matemáticas 5-8 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler.	58
Figura 4.7 - Cavas matemáticas 9-11 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler. ..	59
Figura 4.8 - Comparativo das 11 cavas geradas para o Cenário II, em relação aos valores de tonelagem de minério, estéril e VPL da cava.	59

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 - Horizontes de tempo para os diferentes tipos de planejamento de lavra.....	20
Tabela 3.1 - Variação do preço de mercado do fosfato nos últimos 5 anos.	47
Tabela 3.2 - Parâmetros da análise de sensibilidade do preço de mercado do fosfato.	50
Tabela 4.1 - Variação do teor médio, REM e vida útil para as cavas geradas no Cenário I	57
Tabela 4.2 - Variação do teor médio, REM e vida útil para as cavas geradas no Cenário II. ..	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
CD	Custos Diretos
CI	Custos Indiretos
DMT	Distância Média de Transporte
FC	Fluxo de Caixa
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
R	Renda
REM	Relação Estéril/Minério
VEB	Valor Econômico do Bloco
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Descrição da Jazida e Estimativa de Reservas	16
2.1.1	<i>Furos de Sondagem</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Modelo de Blocos</i>	<i>17</i>
2.1.3	<i>Krigagem</i>	<i>18</i>
2.2	Delineação da Cava Final	19
2.2.1	<i>Planejamento Estratégico</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Função Benefício</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Teor de Corte</i>	<i>24</i>
2.2.4	<i>Otimização da Cava</i>	<i>27</i>
2.2.4.1	<i>Algoritmo de Lerchs-Grossmann</i>	<i>27</i>
2.3	Fatores que Influenciam a Cava Final	28
2.3.1	<i>Fatores Geológicos</i>	<i>28</i>
2.3.2	<i>Fatores Geotécnicos</i>	<i>29</i>
2.3.3	<i>Fatores Operacionais</i>	<i>30</i>
2.3.4	<i>Fatores Tecnológicos</i>	<i>30</i>
2.3.5	<i>Fatores Mercadológicos</i>	<i>31</i>
2.3.6	<i>Fatores Econômicos</i>	<i>31</i>
2.3.7	<i>Fatores Ambientais</i>	<i>32</i>
2.4	Análise de Sensibilidade	33
2.5	Sequenciamento de Lavra	35
2.5.1	<i>Programação da Produção</i>	<i>37</i>
2.6	Geometria da Cava	38
2.6.1	<i>Altura dos Bancos</i>	<i>39</i>
2.6.2	<i>Largura da Bancada</i>	<i>40</i>
2.6.3	<i>Ângulo Individual de Talude</i>	<i>41</i>
2.6.4	<i>Ângulo Geral de Talude</i>	<i>42</i>
2.7	Considerações Geotécnicas	43
3	METODOLOGIA	46
3.1	Estudo de Caso	46
3.2	Histórico de Preços	46
3.3	Análise de Sensibilidade	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Cenário I - Cava Final Com Limites Físicos	53
4.2	Cenário II - Cava Final Sem Limites Físicos	57
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de grande importância para manutenção do padrão de vida e avanços da sociedade moderna, fornecendo recursos básicos para diversos setores da indústria e contribuindo para a geração de riquezas e desenvolvimento socioeconômico de várias cidades e regiões, no Brasil e no mundo.

O sucesso de um empreendimento mineiro está diretamente ligado a execução de um planejamento adequado. Isto se deve ao fato de que na indústria mineral normalmente trabalha-se com grandes investimentos, direcionados tanto para o conhecimento da jazida quanto para as demais obras que permitam a implantação e operação da mina. Sendo assim, um bom planejamento estratégico de uma mina a céu aberto, por exemplo, torna-se fator fundamental para garantir o retorno financeiro através da extração do minério, minimizando-se os custos e garantindo a longevidade e lucratividade do empreendimento de mineração ao longo da sua vida útil.

Segundo Flores (2008) uma das atribuições do planejamento estratégico é a delimitação dos limites da cava final. Estes limites definem a geometria correspondente ao volume de minério e estéril a serem extraídos que maximiza o lucro, respeitando-se as restrições geométricas e de segurança. Candido (2012) comenta que a definição da cava final é um elemento importante para que se possa realizar o melhor aproveitamento do depósito mineral, especialmente frente a um cenário econômico competitivo. Atualmente, os contornos da cava final podem ser obtidos através de diversos algoritmos de otimização, os quais definem os limites da cava que possibilitam uma maior lucratividade.

Entretanto, de um ponto de vista prático, o problema da definição dos limites da cava final ótima não possui uma solução simples. Tal dificuldade pode ser atribuída principalmente ao fato de que estes limites estão normalmente condicionados a um conjunto de fatores dinâmicos, internos e externos ao empreendimento mineral, que se alteram ao longo do tempo frente a mudanças tecnológicas, econômicas e mercadológicas. Dentre estes fatores, o preço de mercado de uma determinada *commodity*, por exemplo, é provavelmente o mais significativo para a lucratividade do empreendimento mineral. Contudo, o preço do minério está normalmente ligado a condições econômicas e mercadológicas, possuindo um alto nível de incerteza e sendo de difícil previsão. Cabe, portanto, ao planejamento estratégico elaborar planos que considerem estas incertezas, buscando identificar e quantificar os efeitos que a variação do preço de mercado da *commodity* tem nos limites da cava final ótima.

De uma forma geral, espera-se que aumentos no preço de mercado possam viabilizar a lavra de locais onde os teores não são economicamente explotáveis, ou em locais onde a relação estéril/minério (REM) é elevada e não permite a extração dos blocos de minério, ampliando os limites da cava final. Em contrapartida, preços mais baixos irão implicar em uma lavra mais seletiva, buscando apenas minérios com teores mais altos e/ou áreas com baixa REM, resultando em uma diminuição da cava final e do volume total de material movimentado. Este fenômeno pode ser observado no trabalho realizado por Flores e Cabral (2008), no qual cavas geradas utilizando-se preços de mercado menores, apresentavam também quantidades menores de minério e estéril extraídos.

Dentro deste contexto, o presente trabalho terá por objetivo geral analisar os efeitos da variação do preço de mercado do minério fosfático nos contornos definidos para a cava final ótima, calculando para as diferentes situações de preço geradas, o valor presente líquido (VPL) da cava, teor médio da cava, bem como os valores de tonelagem de minério, estéril e a relação estéril/minério, além da vida útil da mina. Para isso, dois cenários, um considerando restrições físicas de área e fundo de cava e outro sem limitações, serão avaliados. O trabalho ainda possui como objetivo específico a familiarização do autor com os *softwares* utilizados para as simulações, visando melhorar o seu entendimento acerca da utilização e das principais funções destes *softwares* na execução de trabalhos de planejamento de mina.

De acordo com Akbari et al. (2008) os algoritmos de otimização da cava final disponíveis atualmente são capazes de produzir uma solução ótima baseada na máxima lucratividade, porém não levam em consideração incertezas relacionadas, por exemplo, ao preço de mercado do minério. Estas limitações fazem com que seja necessária a busca por alternativas, tais como análises de sensibilidade, como forma de fornecer para o planejamento estratégico dados e informações que permitam a criação de planos que contabilizem, de certa forma, as incertezas relacionadas ao preço de mercado. Flores e Cabral (2008) comentam que análises como esta constituem uma prática necessária em projetos de mineração, contribuindo para criação de planos de lavra mais flexíveis às mudanças no preço, já que esta é uma das variáveis externas que tornam a estabilidade econômica de um empreendimento mineral mais vulnerável.

Diante disto, este trabalho pode ser caracterizado como sendo um “estudo de caso” de uma mina de fosfato, localizada no estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil. Para realização da pesquisa foram utilizados dados de topografia, limite de propriedade e o modelo de blocos da mina em questão. As simulações e análises das diferentes condições de preço

avaliadas foram conduzidas com o auxílio de dois *softwares*, sendo eles o NPV Scheduler e o Studio OP, ambos da empresa DATAMINE.

Para este fim, o presente trabalho foi realizado de forma sistemática, e organizado em cinco capítulos. O primeiro deles aborda os aspectos preliminares do trabalho, realizando uma breve apresentação dos assuntos relacionados ao tema da pesquisa, os objetivos, metodologia e a justificativa para realização deste estudo. O segundo capítulo refere-se à pesquisa bibliográfica dos temas abordados neste trabalho e os resultados de trabalhos semelhantes, que possam contribuir para o enriquecimento da pesquisa. O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada nesta pesquisa, descrevendo os passos e as particularidades dos testes e análises realizadas. O quarto capítulo discorre acerca dos resultados obtidos e faz devidas considerações a respeito dos mesmos. Por fim, o último capítulo expõe as conclusões alcançadas através da realização deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descrição da Jazida e Estimativa de Reservas

A descrição precisa das principais características de uma jazida mineral, tais como a geometria do corpo de minério, distribuição de teores e a extensão da mineralização, constitui etapa fundamental para embasar as decisões acerca da viabilidade da lavra, minimizar incertezas e evitar prejuízos econômicos futuros para o empreendimento mineral.

Devido à complexidade dos depósitos minerais e ao alto custo de investimento necessário para descrever detalhadamente o corpo de minério, a obtenção de dados confiáveis torna-se um desafio para geólogos e engenheiros de minas. Por consequência, erros de estimativa da distribuição de teores e da geometria do depósito não são raros de acontecer. Neste sentido, Hartman e Mutmansky (2002) comentam que sempre que possível, um padrão regular de amostragem deve ser empregado, uma vez que amostras igualmente espaçadas produzem um número maior de informações a um custo mais baixo, resultando em estimativas de reserva mais precisas.

2.1.1 Furos de Sondagem

A execução de furos de sondagem é atualmente a alternativa mais econômica e rápida de se obter amostras representativas de depósitos minerais, aflorantes ou em profundidade. Os três métodos mais comuns de perfuração utilizados na exploração mineral são a sondagem rotativa, sondagem rotativa diamantada e sondagem percussiva ou rotopercussiva com circulação reversa. A escolha do método de perfuração mais adequado irá depender do tipo e das características do depósito estudado (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Segundo Hustrulid et al. (2013) a maioria dos depósitos minerais atualmente são explorados utilizando-se sondagem rotativa diamantada. Este método permite a obtenção de núcleos cilíndricos da rocha perfurada, denominados testemunhos de sondagem. A análise dos testemunhos fornece o perfil geológico contínuo do local, indicando contatos geológicos, espessura de camadas, representação de feições e estruturas presentes no depósito. Cada testemunho é estudado em detalhe e têm suas informações registradas em um processo que recebe o nome de *logging*.

A utilização das informações obtidas a partir dos testemunhos, juntamente com o conhecimento geológico e topográfico do local permitem construir a representação

tridimensional do corpo mineralizado. O objetivo é estimar, da melhor maneira possível, o tamanho, a forma e a distribuição dos teores do depósito (HUSTRULID et al., 2013).

2.1.2 Modelo de Blocos

A discretização de um corpo mineralizado em blocos é a base para a utilização de ferramentas computacionais em cálculos de estimativa de reservas, planejamento e sequenciamento de lavra. Segundo Amaral (2008) um modelo de blocos é uma representação tridimensional de uma mina ou depósito mineral, subdividido em vários blocos. A Figura 2.1 ilustra a representação de um modelo de blocos.

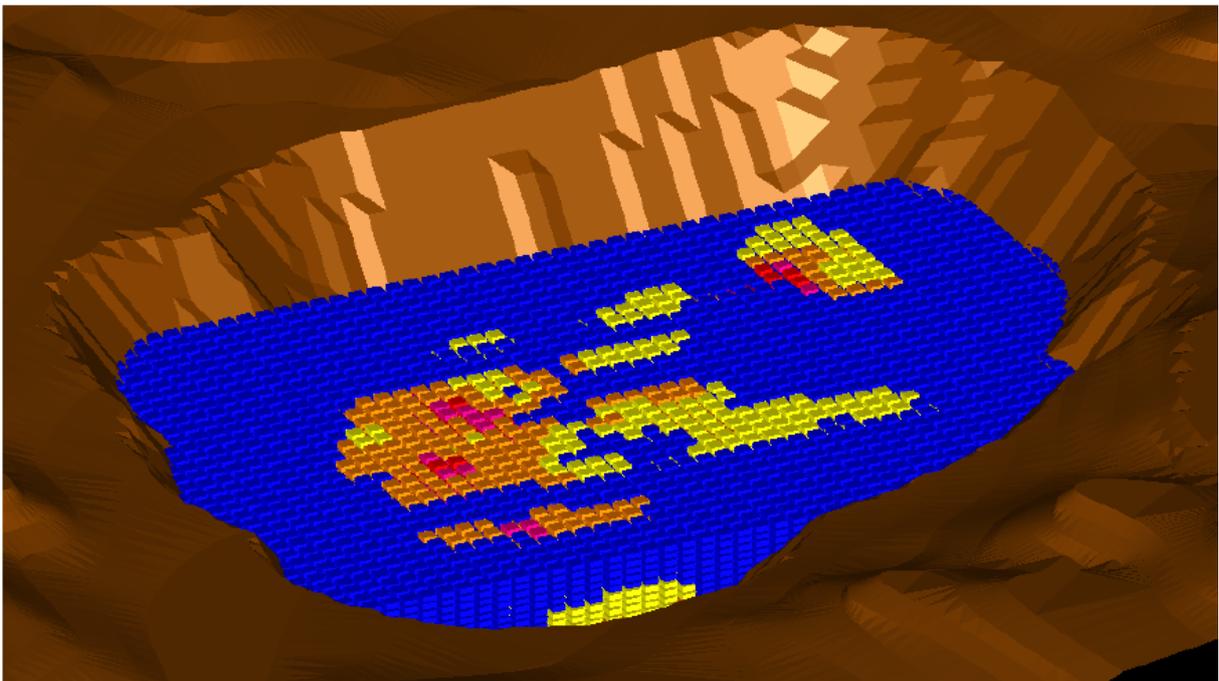


Figura 2.1 - Representação de um modelo de blocos. Fonte: Candido (2012, p. 14).

A construção de um modelo de blocos parte das informações de teor obtidas através da descrição e análise de furos de sondagem, geoposicionados conforme um padrão de amostragem. Em seguida é gerada uma representação tridimensional composta por diversos blocos, compreendendo toda a área de interesse. Os blocos que forem interceptados pelos furos de sondagem já terão o seu teor definido, enquanto que para os demais blocos sem informação, ditos “vazios”, será necessária a utilização de algum meio de estimativa para que estes adquiram valores de teor, e demais atributos de interesse.

O formato e o tamanho dos blocos podem variar dependendo das características do depósito. Normalmente são utilizados blocos de seção retangular ou quadrada (CARMO, 2001), com tamanho constante ou variável (CANDIDO, 2012). Conforme Fontes (2016) a escolha do tamanho dos blocos irá depender, principalmente, da heterogeneidade do corpo mineralizado e do espaçamento da amostragem. David (1977) comenta que o tamanho mínimo dos blocos não deve ultrapassar $\frac{1}{4}$ da malha de amostragem, sendo que a utilização de blocos muito pequenos provocaria suavizações excessivas, uma vez que ao se diminuir o tamanho dos blocos, aumenta-se o erro de estimativa para cada bloco, o que resultaria em imprecisões no modelo final. No que diz respeito à altura dos blocos, de acordo com Hustrulid et al. (2013), em minas a céu aberto, esta é normalmente coincidente com a altura definida para os bancos da cava.

2.1.3 Krigagem

O modelo de blocos reúne as informações que servem de base para definição do valor econômico da jazida, permitindo as decisões acerca de investimentos, planejamento e sequenciamento da lavra. Sabe-se, no entanto, que apenas uma pequena parcela do depósito é estudada em detalhe através de furos de sondagem, fazendo com que teores e outros atributos sejam estimados nas regiões não amostradas, onde variações na geologia e distribuição de teores dificultam a obtenção de estimativas precisas (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Diante deste cenário, diversos métodos convencionais, tais como polígonos, vizinho mais próximo, inverso do quadrado da distância (IQD), ou métodos geoestatísticos como a krigagem, podem ser utilizados para estimar, da melhor maneira possível, os atributos de um depósito mineral.

Segundo Sinclair e Blackwell (2004) a krigagem é um termo genérico que define uma família de métodos geoestatísticos de estimativa que tem por objetivo fornecer a melhor estimativa linear não enviesada possível. A krigagem leva em consideração a correlação espacial de variáveis regionalizadas para estimar valores desconhecidos, minimizando a variância entre o valor estimado e o valor real do ponto ou bloco estimado.

De acordo com Costa et al. (1998, apud Gambin et al., 2005) o controle de teores de um depósito mineral é normalmente realizado através da utilização de um modelo de blocos gerado por um estimador tradicional, geralmente krigagem ordinária de blocos, a qual fornece a melhor estimativa (não tendenciosa e minimizando-se o erro) a partir dos dados disponíveis, obtidos por meio da etapa de amostragem.

A representatividade do modelo geológico do depósito e a precisão dos dados os quais este fornece são de fundamental importância para o planejamento de mina, uma vez que os

algoritmos utilizados para a delimitação da cava final e sequenciamento de lavra fazem uso dos dados do modelo para otimização dos parâmetros geométricos e avanços da cava, fazendo com que estimativas errôneas no modelo provoquem variações significativas no retorno financeiro da lavra.

2.2 Delineação da Cava Final

O projeto da cava é a primeira etapa no planejamento de uma mina a céu aberto. Segundo Hustrulid et al. (2013) a forma e o tamanho da cava dependem de parâmetros econômicos e de restrições de projeto e produção. Aumentos no preço de mercado do minério, por exemplo, podem ampliar os limites da cava, considerando que os demais fatores sejam mantidos constantes. O inverso é também verdadeiro.

De acordo com Silva (2008) os contornos da cava final, por dependerem diretamente de todas as variáveis técnicas e econômicas de um projeto de lavra, possuem caráter dinâmico, variando ao longo do tempo. Por consequência, inúmeros fatores, tais como o preço do minério, custos de produção, tecnologias de beneficiamento, alterações no modelo geológico entre outros, têm potencial de modificar os limites da cava final.

2.2.1 Planejamento Estratégico

De uma forma geral, o planejamento pode ser descrito como sendo um processo de determinação de como um empreendimento pode atingir suas metas e objetivos futuros (CAMUS, 2002). Ao se identificar tais objetivos cria-se planos para atingi-los progressivamente, da forma mais eficiente, eficaz e efetiva, e com a menor concentração de esforços e recursos por parte do empreendimento (OLIVEIRA, 2007).

Whittle (2011) define o planejamento de uma mina a céu aberto como um processo de tomada de decisão que resulta em um plano realista e executável para retirada dos recursos minerais de maneira lucrativa. Dagdelen (2001) comenta que o planejamento de minas a céu aberto começa com o modelo geológico de blocos e envolve a determinação dos seguintes fatores: se um determinado bloco do modelo deve ou não ser lavrado; se for lavrado, quando deverá ser lavrado, e uma vez lavrado, como deverá ser processado. A resposta para cada uma destas perguntas, quando combinada em um contexto geral envolvendo o modelo de blocos, define a progressão anual da cava e os fluxos de caixa anuais advindos das operações de lavra durante a vida da mina.

De acordo com Flores (2008) a indústria mineral normalmente divide o planejamento de lavra a céu aberto em três horizontes de tempo: planejamento de longo prazo, planejamento de médio prazo e planejamento de curto prazo. Outra terminologia também muito utilizada é a divisão do planejamento de lavra em: planejamento estratégico, planejamento tático e planejamento operacional. A Tabela 2.1 mostra a relação entre esta terminologia e os horizontes de tempo em que cada tipo de planejamento é empregado.

Tabela 2.1 - Horizontes de tempo para os diferentes tipos de planejamento de lavra.

Tipo de Planejamento	Horizonte de Tempo (períodos)
Planejamento Estratégico	Vida da mina Quinquenal (5 anos)
Planejamento Tático	Anual Trimestral/Mensal
Planejamento Operacional	Semanal Diário/Turno

Fonte: Flores (2008, p. 17).

De acordo com Bazante (2004), a principal diferença entre os três tipos de planejamento citados na Tabela 2.1 é o fator tempo. Assim, o planejamento estratégico ocupa-se com questões que envolvem o futuro do empreendimento, se atendo ao que se espera que aconteça nos próximos anos. O tático interpreta as decisões estratégicas e elabora planos realistas e executáveis a serem implementados nos próximos meses, ou em no máximo um ano. E o operacional desdobra a tática em ações a curto prazo, desde planos semanais até ações diárias ou por turnos de trabalho.

O planejamento estratégico de uma mina a céu aberto é, portanto, um processo de tomada de decisão que envolve a análise de todas as informações disponíveis, com intuito de elaborar um plano que permita extrair todo o recurso mineral (CAMUS, 2002). Segundo Ascarza et al. (2008, apud CHIMUCO, 2010) o principal objetivo do planejamento estratégico é determinar o valor do empreendimento, delimitando as áreas economicamente viáveis correspondentes à reserva lavrável, e a sequência na qual os recursos que se encontrem dentro destes limites devem ser aproveitados. Isto é, cabe ao planejamento estratégico definir a geometria final ótima da cava e a sequência de lavra a longo prazo.

Segundo Flores (2008) nesta etapa é interessante que sejam realizadas análises de sensibilidade e análises de risco para as variáveis mais relevantes do projeto, em relação às mudanças das condições externas e internas ao empreendimento mineral, tais como: variações

do preço de mercado das *commodities*, variações nos custos de lavra e beneficiamento, variações nos teores e/ou reservas, alterações nas recuperações da lavra e na recuperação metalúrgica, além de possíveis modificações nos ângulos de talude, entre outros fatores.

Desta forma, mesmo os planos de caráter estratégico, voltados para o longo prazo, devem ser sempre revistos e aprimorados, como forma de considerar novas informações acerca do modelo geológico, novas tecnologias de beneficiamento, mudanças na economia e no mercado, entre outras, que possam surgir ao longo da vida do empreendimento mineral. De acordo com Bazante (2004) os planos de longo prazo carecem de revisões periódicas, sendo que estas devem conter obrigatoriamente parâmetros como os valores da taxa de produção e o teor de corte, para cada período de tempo.

Camus (2002) comenta ainda que considerações estratégicas não devem ser limitadas apenas a decisões realizadas nos estágios iniciais do ciclo de vida do empreendimento de mineração, devendo ser incorporadas também na rotina de planejamento que envolve todas as demais etapas ao longo de sua vida útil. Isto garante um caráter atemporal ao planejamento estratégico, permitindo a manutenção de uma base de dados atualizada, e propiciando que novas situações e cenários que se apresentem ao longo do tempo sejam considerados de um ponto de vista estratégico nas tomadas de decisão.

2.2.2 Função Benefício

Atualmente, a base para o planejamento de minas envolve a construção de um modelo de teores representativo dos atributos reais da jazida. Este modelo serve de base para a análise econômica dos blocos, a qual constitui o primeiro passo para a definição do valor da reserva lavrável e conseqüentemente os contornos da cava final. Este modelo de teores pode ser gerado através de diversas técnicas de estimativa, sendo que a acurácia e representatividade dos valores estimados para cada bloco irá influenciar diretamente no cálculo do valor do empreendimento.

Uma vez definidos os valores de teor médio (e demais atributos de interesse) para todos os blocos presentes no modelo geológico, estes devem ser avaliados conforme um critério econômico, atribuindo-se para cada bloco um dado valor líquido, positivo ou negativo. Para isto, uma função denominada função benefício é criada e adotada como critério de avaliação econômica para os blocos. De acordo com Cândido (2012), de uma forma geral, a função benefício pode ser entendida como sendo a diferença entre receitas e custos. Assim sendo, sua construção deve ser um processo criterioso e detalhado, de forma que todas as características do empreendimento sejam consideradas e levadas em conta ao se obter o valor do bloco.

Segundo Flores (2008) toda otimização de uma cava tem por objetivo a maximização do valor total da cava pelo maior período de tempo possível, sendo este o maior desafio do planejamento. Diante deste cenário, a grande dificuldade no projeto da cava é, portanto, encontrar o conjunto de blocos que forneça o maior valor possível, respeitando, as restrições da lavra e a estabilidade da cava (CARMO, 2001). Assim, a determinação do valor econômico de cada bloco torna-se fundamental para o planejamento da lavra, permitindo o melhor aproveitamento da jazida. Assim, de acordo com Carmo (2001) cada bloco dentro dos domínios do modelo pode ser caracterizado por:

- ✓ Renda (R): valor da parte recuperável e vendável do bloco.
- ✓ Custos Diretos (CD): custos que podem ser atribuídos diretamente ao bloco, como custos de perfuração, detonação, carregamento, transporte, etc.
- ✓ Custos Indiretos (CI): custos gerais que não podem ser atribuídos individualmente a cada bloco. Tais custos dependem do tempo, sendo que, entre estes incluem-se, por exemplo, os custos relativos a salários, custos de pesquisa, manutenção, depreciação de equipamentos, etc.

Considerando-se estes parâmetros, o valor econômico do bloco (VEB) pode ser definido através da Equação 2.1 (CARMO, 2001):

$$VEB = R - CD \quad (2.1)$$

Vale salientar que a Equação 2.1 não contempla lucro ou prejuízo. Neste caso, os custos indiretos (CI) devem ser considerados, como mostra a Equação 2.2 (CARMO, 2001):

$$Lucro \text{ (ou prejuízo)} = \sum_{j=1}^n (VEB)_j - CI \quad (2.2)$$

Onde:

$j = 1, 2, 3, \dots n$.

$n =$ número de blocos.

Blocos de estéril normalmente terão VEB negativos, já que a renda do estéril, na maioria dos casos, é zero e os custos de lavra continuam existindo. Blocos de minério ou blocos que contenham minério e estéril poderão apresentar VEB menor que zero, igual a zero ou maior que zero, dependendo da quantidade e da qualidade (teor médio do bloco) de minério contida em tais blocos.

O critério de otimização para o problema de projeto dos limites da cava pode então ser definido pela Equação 2.3 (CARMO, 2001):

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j=1}^n (VEB)_j \quad (2.3)$$

Para obtenção deste valor máximo devem ser respeitadas restrições relacionada a lavra, estabilidade de taludes e limites físicos da própria mina, tais como áreas de preservação permanente (APP), ações de recuperação ambiental e áreas de interesse da comunidade (FLORES, 2008).

De acordo com Carmo (2001) os principais custos atribuídos a cada bloco são normalmente calculados em relação à uma tonelada de material movimentado. Dentre estes pode-se citar os custos de extração, custos de processamento, custos de reabilitação da área, além dos custos de venda, calculados para cada unidade de produto produzido.

Os custos de mineração incluem:

- ✚ Amostragem e ensaios de geologia;
- ✚ Limpeza do terreno e remoção do solo fértil;
- ✚ Rebaixamento do lençol freático da cava;
- ✚ Perfuração e desmonte de rochas;
- ✚ Mão de obra;
- ✚ Carregamento e transporte;
- ✚ Serviços necessários a mina, como: serviços geológicos, controle de teores, supervisão da mina e manutenção.

Os custos de processamento incluem:

- ✚ Britagem, moagem e separação do minério;
- ✚ Controle de teores;

- ✚ Reagentes da planta de tratamento;
- ✚ Manutenção e pessoal.

Os custos de reabilitação incluem:

- ✚ Reabilitação de áreas correspondentes a pilhas de estéril e depósito de rejeitos;
- ✚ Medidas de drenagem ácidas e tratamento das águas da mina;
- ✚ Revegetação.

Os custos de venda do produto incluem:

- ✚ Transporte do minério;
- ✚ Seguros;
- ✚ Comércio.

A receita atribuída a um determinado bloco está ligada ao teor deste bloco, ao preço de venda do minério no mercado e as recuperações na lavra e no beneficiamento. Já os custos são definidos de acordo com a classificação do bloco, podendo este ser minério ou estéril. Segundo Fontes (2016) para os blocos de minério, os principais custos são: custos de lavra, beneficiamento, movimentação dos produtos, transporte rodoviário e/ou ferroviário, administração, meio ambiente, porto (caso houver) e despesas relacionadas à venda do minério. Por sua vez, os custos relativos aos blocos de estéril são: extração, remoção e disposição nos depósitos de estéril.

2.2.3 Teor de Corte

O teor de corte, ou *cutoff grade*, marca o limite econômico que diferencia o que é minério e o que é estéril em uma mina. Assim, blocos que possuam teor médio acima do teor de corte definido para o empreendimento são considerados como minério. Por outro lado, blocos com teor médio inferior ao teor de corte são classificados como estéril. Esta distinção serve de base para o cálculo do valor econômico dos blocos, através aplicação da função benefício.

Segundo Ganguli et al. (2011) em minas a céu aberto, identifica-se dois valores de teor de corte diferentes. Um define se um bloco livre (ou seja, não recoberto por estéril) deve ser lavrado ou não. O outro determina se o bloco lavrado deve ser levado para a usina e beneficiado, ou se deve seguir para o depósito de estéril. O primeiro é normalmente tratado como teor de

corte da cava final e é definido pelo valor de teor que representa o ponto limite (*breakeven*) em que os custos de lavra, custos de beneficiamento e custos de refino se equivalem ao valor do bloco, em termos de preço de mercado e recuperação do minério. Assim, o teor de corte da cava final ($Cutoff_1$) pode ser expresso através de Equação 2.4.

$$Cutoff_1 = \frac{Custos_{lavra} + Custos_{Beneficiamento}}{(Preço - (Custos_{Refino} + Custos_{Marketing}) \times Recuperação)} \quad (2.4)$$

O segundo é tratado como teor de corte do beneficiamento ($Cutoff_2$) e refere-se ao valor de teor que representa o limite (*breakeven*) em que os custos de beneficiamento e custos de refino se equivalem ao valor do bloco, em termos de preço de mercado e recuperação do minério.

$$Cutoff_2 = \frac{Custos_{Beneficiamento}}{(Preço - Custos_{Refino} + Custos_{Marketing}) \times Recuperação} \quad (2.5)$$

O cálculo do segundo teor de corte não considera os custos de lavra, pois este se aplica àqueles blocos considerados “selecionados para serem lavrados”, definidos pelo primeiro valor teor de corte.

Assim, tem-se que o primeiro teor de corte serve para garantir que o material lavado seja capaz de pagar por todos os custos associados com a extração do metal contido no bloco. O segundo teor de corte por sua vez tem função de garantir que todo o material que possua contribuição positiva, descontados os custos de beneficiamento, refino e marketing, seja enviado para a usina.

Analisando-se as Equações 2.4 e 2.5 observa-se que o teor de corte pode sofrer alterações ao se variar os custos ou o preço de mercado do minério. Lane (1988) defende que minério é, portanto, uma definição econômica, e assim sendo, depende de preços de mercado e dos custos de capital investidos na sua extração. Por consequência, mudanças no cenário econômico de um país ou de um determinado mercado alteram os limites da jazida. A massa que antes era considerada como minério e poderia ser lavrada, passa a não ser. Por outro lado, volumes de rochas mineralizadas com teores que atualmente não permitem a lavra, podem vir a ser com o aumento do preço de *commodities* ou outras mudanças que viabilizem a sua exploração.

De forma análoga, o teor de corte torna-se também um parâmetro sensível a flutuações do mercado e demais oscilações de custo presentes na lavra. De acordo com Bazante (2004) variações no teor de corte resultam em aumento ou diminuição da quantidade de minério ou estéril, alterando também a relação estéril/minério, assim como mostra a Figura 2.2.

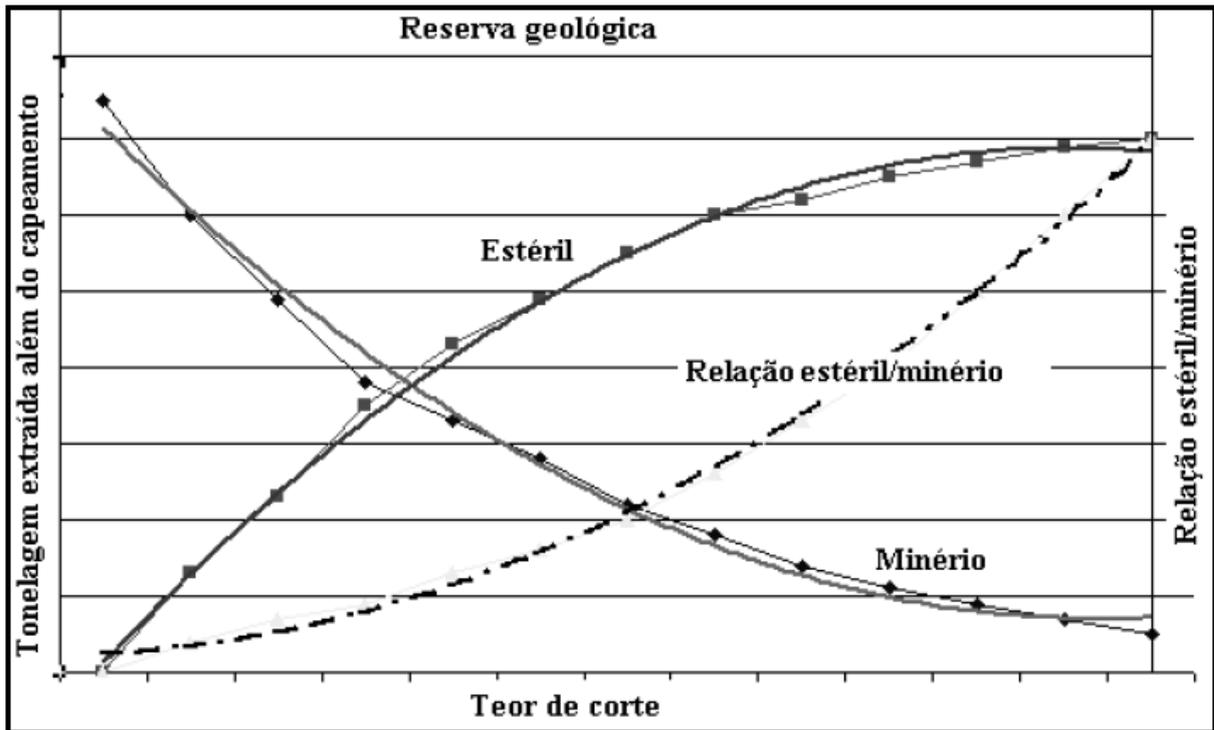


Figura 2.2 - Variações da quantidade de minério, estéril e da relação estéril/minério em função do teor de corte. Fonte: Bazante (2004, p. 62).

De acordo com Rendu (2014) o teor de corte define a lucratividade e a vida útil de um projeto de mineração. Analisando a Figura 2.2 observa-se que com a diminuição do teor de corte, aumenta-se a quantidade de minério a ser lavrado e diminui a de estéril. Como resultado, a vida útil da mina é estendida. Por outro lado, valores mais altos de teor de corte podem ser utilizados para aumentar a lucratividade e o VPL do empreendimento a curto prazo. Tal prática pode ser interessante quanto se deseja de fornecer um maior retorno financeiro em curtos períodos de tempo para acionistas, como forma de atrair novos investimentos externos. No entanto, Rendu (2014) comenta que aumentar o teor de corte pode encurtar a vida útil da mina, reduzindo oportunidades futuras que dependem do tempo, tais como ciclos de preço do minério.

2.2.4 Otimização da Cava

A determinação da geometria e dos limites da cava final ótima é um dos grandes desafios do planejamento de uma mina a céu aberto, tendo impacto direto no sucesso do empreendimento mineral. De acordo com Flores e Cabral (2008) o limite da cava final pode ser entendido como o contorno resultante da extração do volume de material que maximize o benefício (lucro) do empreendimento, obedecendo as restrições operacionais, ambientais e de segurança de taludes. Desta forma, os contornos finais da cava definem o tamanho e a forma de uma mina a céu aberto no final de sua vida útil, representando a extensão da reserva lavrável e a quantidade de estéril a ser retirada até se chegar ao *pit* final (CARMO et al., 2006).

A definição dos limites finais da cava é útil não somente para obtenção do potencial econômico de uma jazida, mas também para definição com segurança da localização de plantas de beneficiamento, pilhas de deposição de estéril, barragens de rejeito, escritórios e outras obras de engenharia que não podem ser movidas e devem, portanto, ser instaladas fora dos limites da cava final (SILVA, 2008).

Peroni (2002) comenta que muitos esforços têm sido empregados na determinação da cava ótima, sendo que o ótimo seria resultante de um algoritmo que apresentasse os seguintes critérios:

- Máxima lucratividade;
- Maior valor presente líquido;
- Maior aproveitamento dos recursos minerais.

Diante deste cenário diversos algoritmos foram desenvolvidos com o objetivo de se atingir a cava final ótima, sendo que o mais conhecido e utilizado atualmente é o algoritmo desenvolvido por Lerchs e Grossmann (LERCHS; GROSSMANN, 1965).

2.2.4.1 Algoritmo de Lerchs-Grossmann

Lerchs e Grossmann (1965) desenvolveram dois métodos numéricos para delimitação da cava final ótima:

- i. Um algoritmo de programação dinâmica para otimização de cavas em duas dimensões (2D);

- ii. Um algoritmo baseado na teoria dos grafos voltado para soluções em três dimensões (3D).

O objetivo era “desenhar o contorno de uma cava de forma a maximizar a diferença entre o valor total do minério extraído e os custos totais de extração de minério e estéril” (LERCHS; GROSSMANN, 1965, p. 47). Neste caso, o desenho da cava é realizado tendo-se como única restrição os ângulos de talude, os quais podem variar de acordo com variações na geologia e com a profundidade da cava.

2.3 Fatores que Influenciam a Cava Final

A definição dos limites da cava final é um processo complexo, que envolve um grande número de variáveis, muitas das quais difíceis de se prever. Algoritmos como o de Lerchs-Grossmann são capazes de fornecer uma solução ótima para os contornos da cava, no entanto Carmo (2001) comenta que apenas a aplicação de modelos matemáticos otimizantes não é o suficiente para definição da cava final ótima, sendo primordial também a qualidade das informações de entrada que representam os fatores que influem diretamente no resultado final.

Assim como os demais setores da indústria, os empreendimentos mineiros são função das condições específicas nas quais foram desenvolvidos, no entanto Prati (1995, apud Carmo, 2001) afirma que existe um certo conjunto de fatores críticos básicos que é comum à maioria das minerações, dentre os quais pode-se destacar os fatores geológicos, geotécnicos, operacionais, tecnológicos, mercadológicos, econômicos e ambientais.

2.3.1 Fatores Geológicos

Segundo Prati (1995, apud CARMO, 2001) a construção do modelo geológico é uma das etapas mais importantes na definição da cava final, pois é a partir dele que serão conhecidos os aspectos da mineralização determinantes para o bom desenvolvimento do projeto de mineração. O conhecimento destas características permite relacionar as diferentes mineralizações presentes na jazida com os seus respectivos controles estruturais e litológicos, além da relação entre os diferentes tipos de minérios e os processos de beneficiamento que melhor se adequam a estes, resultando em modelo denominado de modelo geotecnológico.

Neste modelo devem constar as relações entre as tipologias de minério e o processo de beneficiamento, de forma que este possa ser adaptado a cada tipologia, uma vez que o inverso

não é possível. O conhecimento da variabilidade espacial dos diferentes tipos de minério, seja do ponto de vista da concentração de elementos de interesse econômico contido, seja do ponto de vista de diferentes comportamentos frente a um determinado processo de beneficiamento, é desenvolvido por estimativas por meio de amostragens. Neste ponto a utilização de métodos geostatísticos são de grande valia, pois conduzem a estimativas otimizadas e permitem a avaliação de erros envolvidos (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

2.3.2 Fatores Geotécnicos

Assim como o modelo geológico, o modelo geomecânico de uma cava tem papel fundamental no bom desenvolvimento da atividade mineradora. Este modelo descreve o comportamento mecânico dos diferentes horizontes de solos e tipos de rochas que fazem parte dos taludes da cava. Prati (1995 apud CARMO 2001) comenta que a construção do modelo geomecânico parte de estudos que visam o conhecimento do arcabouço estrutural do maciço, a caracterização geotécnica e o reconhecimento dos diversos tipos de maciços de acordo com o seu respectivo grau de alteração, fraturamento e percolação de água subterrânea. Estas informações reunidas dão origem a um modelo capaz de representar o comportamento mecânico do maciço na presença dos esforços solicitantes, resultantes das escavações realizadas na cava.

Através do modelo geomecânico é possível definir a inclinação adequada para os ângulos individuais de face das bancadas, bem como o ângulo geral de talude da cava. Esta inclinação deve ser tal que se possa minimizar os riscos de ruptura dos taludes que, além de colocar em perigo vidas humanas e equipamentos, modificam o ritmo de produção da mina por um determinado período de tempo, ao mesmo tempo em que seja possível minimizar também os volumes de estéril retirado (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

À medida que se aumenta o ângulo geral de talude, o volume de rocha estéril a ser retirada diminui significativamente, reduzindo conseqüentemente os custos de extração do minério, e aumentando a competitividade do empreendimento mineiro. Entretanto, o aumento do ângulo geral de talude provoca a diminuição do fator de segurança da escavação. Segundo Candido (2012) a sensibilidade dos custos de extração com relação ao ângulo de talude final pode ser muito elevada, chegando em alguns casos a significar alguns milhões de dólares para poucos graus de variação. Isto faz com que seja necessário encontrar um valor de inclinação que atenda tanto os requisitos de custo de extração quanto a segurança dos taludes.

Atualmente, o dimensionamento dos ângulos de talude pode ser realizado através de modelos matemáticos, determinísticos ou probabilísticos. Ambos se baseiam na teoria do equilíbrio limite, a qual relaciona esforços resistentes à mobilização do maciço com esforços mobilizantes, de forma a estabelecer um fator de segurança para uma dada geometria de talude. Em casos onde a cava atinge grandes profundidades, análises de tensão-deformação também podem ser utilizadas para verificar o comportamento do maciço e a possibilidade de ocorrência de rupturas.

2.3.3 Fatores Operacionais

A definição da cava final deve ser feita considerando-se as restrições operacionais relacionadas ao espaço necessário para que as operações de lavra possam ser conduzidas com a segurança e produtividade para as quais foram projetadas, respeitando o grau de seletividade necessário para o controle dos teores e o porte dos equipamentos utilizados.

Deve também ser considerada a necessidade de se manter bermas com largura mínima de forma que se permita o acesso de equipamentos para manutenção de drenagens, recomposição de escorregamentos, bem como permitir retomadas futuras dos bancos, caso os limites da cava final sejam alterados. Por fim, a cava final também deve levar em consideração o espaço necessário para construção de rampas de acesso aos diversos níveis de produção, dimensionadas de acordo com os equipamentos utilizados na lavra e desenvolvidas de forma a minimizar a distância média de transporte (DMT) entre as frentes de lavra e a britagem ou as pilhas de estéril (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

2.3.4 Fatores Tecnológicos

O desenvolvimento de novas tecnologias que minimizem custos e melhorem os resultados de processos são de grande importância para garantir a competitividade do empreendimento mineiro. Diante disto, dois aspectos principais devem ser destacados.

O primeiro está relacionado ao processo de beneficiamento, o qual deve ser desenvolvido visando a máxima recuperação do bem mineral de interesse, de forma a se obter um produto final que atenda as especificações e necessidades do mercado consumidor. O conhecimento da relação entre os diferentes tipos de minério presentes na mina e os processos de beneficiamento que melhor se adaptam a estes é fator crítico para o sucesso do

empreendimento, podendo evitar prejuízos relacionados à perda de reservas e conflitos entre a mina, a usina de beneficiamento e os clientes (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

O segundo aspecto está relacionado à evolução tecnológica de equipamentos na lavra e no beneficiamento. O desenvolvimento de equipamentos em parceria com fabricantes, adaptando-os as características específicas da mina, pode ser uma prática benéfica para o empreendimento, contribuindo com a diminuição de custos, aumento de recuperação e melhoria geral de processos (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

Bazante (2004) comenta ainda que a busca constante por novas tecnologias é fator preponderante para garantir a competitividade do empreendimento de mineração ao longo de sua vida útil, uma vez que o dinamismo necessário para se manter uma posição competitiva no mercado requer investimentos contínuos no desenvolvimento tecnológico.

2.3.5 Fatores Mercadológicos

De acordo com Prati (1995, apud CARMO, 2001) o mercado consumidor é com certeza um dos fatores mais importantes para qualquer empreendimento. É dele que partem as necessidades dos clientes e, portanto, as oportunidades de venda e produção. Pode-se dizer que, mesmo que todas as demais condições sejam favoráveis (teores elevados, REM reduzida, localização privilegiada, domínio das tecnologias de beneficiamento, custos competitivos), pouco valem se as condições de mercado não forem favoráveis, seja quanto ao preço de venda, volume de produção, impostos e conformidade do produto final de forma a atender as expectativas dos clientes.

Os fatores mercadológicos são afetados diretamente pela dinâmica macroeconômica nacional e internacional, o que faz com que seus parâmetros sejam de difícil controle e possuam um alto grau de incerteza. Mudanças no cenário econômico podem alterar o volume da produção, preço de mercado e especificações do produto. Este é um dos motivos mais convincentes para que se façam planejamentos flexíveis, permitindo que o empreendimento mineiro possa se adaptar ao longo da sua vida útil às condições externas impostas a ele, tais como as flutuações do mercado.

2.3.6 Fatores Econômicos

Os fatores econômicos relacionados a um empreendimento mineiro têm potencial de afetar significativamente a sua rentabilidade. O preço do produto vendável, o qual está

normalmente vinculado às condições mercadológicas, é um destes fatores. Segundo Whittle (2011) o preço de mercado de uma *commodity* é a variável mais importante que afeta as decisões críticas relacionadas ao planejamento, influenciando diretamente na definição da taxa de produção ótima, nos limites da cava final e no grau de flexibilidade das operações da mina. A elevação do preço de mercado, além de aumentar as receitas para uma mesma tonelagem de minério lavrada, também afeta as reservas, fazendo com porções da jazida com teores inferiores ou elevada REM, que não eram economicamente lavráveis, passem a ser.

Os custos operacionais são também fatores tão relevantes quanto o preço de mercado do produto final, porém possuem uma faixa de variabilidade mais estreita e dependem principalmente das condições internas da empresa, sendo assim mais fáceis de serem estimados. Vale lembrar, no entanto, que os custos estão intimamente relacionados à escala de produção, a qual está vinculada ao mercado.

Desta forma, tanto os fatores mercadológicos quanto os econômicos são afetados por uma série de condições macroeconômicas, cujas evoluções futuras são difíceis de se prever, sendo normalmente estimadas através de projeções baseadas em informações históricas associadas a cenários econômicos futuros. Diante disto, análises de sensibilidade podem ser aplicadas como forma de prever os efeitos dos cenários esperados na cava final.

Os critérios financeiros utilizados para a avaliação de uma cava final são diretamente influenciados pelas taxas de juro do mercado e pelos prazos de retorno de capital investido, definidos conforme as expectativas com relação aos riscos econômicos e políticos futuros. Prazos curtos exigirão que a lavra seja realizada em porções mais ricas da jazida, podendo inviabilizar partes da reserva geológica que seriam viáveis, caso estes critérios não tivessem caráter imediatista. As taxas tributárias também podem contribuir para que algo semelhante ocorra. Tais taxas, principalmente no caso de empresas que competem no cenário internacional, podem diminuir o VPL da cava, resultando na inviabilização de parte das reservas (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

2.3.7 Fatores Ambientais

A preservação do meio ambiente tem cada vez mais se tornado um tópico de grande relevância para a sociedade, sendo amplamente discutido e abordado por meios de comunicação e reforçado por órgãos regulamentadores através da criação de leis mais exigentes, impostas às atividades industriais e especificamente para a indústria mineral.

A mineração é comumente mal vista quando se trata de assuntos relacionados ao meio ambiente. Essa visão é devida ao fato de que até pouco tempo atrás, muitos empreendimentos mineiros eram conduzidos sem a devida preocupação com os impactos que a atividade infringia no meio no qual estava inserida. Apesar de atualmente as preocupações com relação à preservação do meio ambiente terem ganhado força, muitos empreendimentos ainda resistem em se adequar as novas práticas de compatibilizar a atividade mineral com o meio ambiente, principalmente aquelas que dizem respeito à mitigação de impactos sobre a comunidade vizinha. Tal fato, combinado com a imagem reforçada pelos meios de comunicação, contribuem para que mesmo nos dias de hoje a mineração ainda seja vista como uma atividade predatória.

Em termos econômicos, as adequações ambientais implicam em investimentos e custos operacionais os quais devem ser considerados nos estudos de viabilidade econômica e definição dos limites da cava final. Além do aspecto econômico, os contornos da cava também estarão condicionados à disponibilidade física de áreas para possíveis expansões, uma vez que certas áreas tais como APPs não poderão ser utilizadas (PRATI, 1995 apud CARMO, 2001).

2.4 Análise de Sensibilidade

Projetos de mineração normalmente envolvem grandes investimentos e acumulam um elevado número de incertezas, fazendo com que a tomada de decisões não seja um processo trivial. Flores (2008) comenta que o risco sempre estará presente nestes casos, principalmente quando as decisões envolvem projeções de eventos econômicos futuros. Em situações como esta, algumas ferramentas como análises de sensibilidade podem ser aplicadas para avaliar e de alguma forma quantificar estes riscos.

Nas análises de sensibilidade são avaliados os efeitos de uma variável, seja ela custo de operação, preço do minério, teor, reserva, ângulos de talude, entre outras, sobre parâmetros que medem a rentabilidade do projeto, como por exemplo o VPL. O gráfico da Figura 2.3 ilustra a relação entre as variações no preço de venda e custos operacionais no VPL do empreendimento.

Considerando um cenário hipotético onde os custos operacionais sofrem um aumento de 10%, e todos os demais parâmetros permanecem inalterados. Ao analisar a Figura 2.3 observa-se que tal aumento nos custos provocaria uma diminuição de aproximadamente \$5,2 milhões no VPL. Por outro lado, caso o preço de mercado sofra um aumento de 10%, sem que nenhum outro fator se altere, resultaria em um aumento de aproximadamente \$5,8 milhões no VPL do empreendimento.

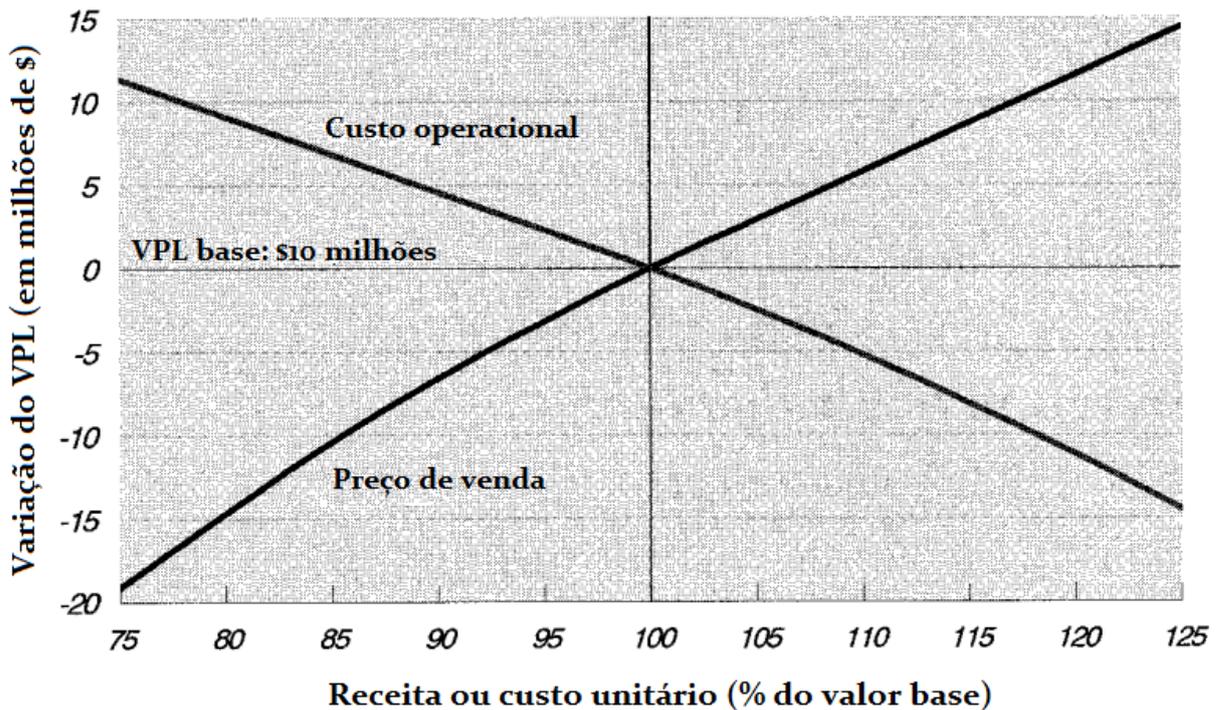


Figura 2.3 - Análise de sensibilidade: VPL. Fonte: Adaptado de Runge (1998, p. 136).

De acordo Whittle (1990) análises deste tipo são provavelmente a parte mais valiosa do planejamento pois inevitavelmente conduzem a um melhor entendimento da jazida e suas atribuições econômicas.

No entanto, esta metodologia possui certas limitações. Segundo Runge (1998) as duas principais dificuldades em relação a análises de sensibilidade são:

- i. A análise em si não fornece nenhuma informação da probabilidade do acontecimento das variações estudadas;
- ii. Análises de sensibilidade funcionam com base na suposição de que todo o resto permanece inalterado (*ceteris paribus*). Esta é provavelmente a maior limitação deste método, uma vez que projetos de mineração sofrem mudanças constantes ao longo do tempo devido a fatores interno e externos.

Mesmo assim, ainda de acordo com Runge (1998) as análises de sensibilidade ainda são uma ferramenta útil para o planejamento estratégico de mina, podendo ser utilizadas de maneira produtiva para realçar as diferenças relativas entre alternativas de projeto, além de fornecer informações que podem ser usadas para investigações mais específicas, como análises probabilísticas e análises de sensibilidade relativa.

2.5 Sequenciamento de Lavra

A partir do modelo de teores definiu-se para cada bloco um valor de benefício, sendo este positivo ou negativo. Tendo como base este valor e através da aplicação de um algoritmo de otimização foi possível definir a extensão das reservas lavráveis, delimitadas pelos contornos da cava final ótima. No contexto do planejamento de mina, o próximo passo consiste em estabelecer uma sequência lógica e adequada para a lavra dos blocos contidos nos limites da cava final.

O problema fundamental do sequenciamento consiste, portanto, em encontrar a sequência em que a lavra dos blocos selecionados maximiza o lucro, normalmente representado pelo VPL resultante da extração destes blocos (TOLWINSKI; UNDERWOOD, 1996). Tal condição, no entanto, só pode ser satisfeita se obedecer a um conjunto de restrições que permitam os trabalhos da lavra de forma segura e de acordo com a premissas do planejamento de longo prazo. As principais restrições a serem seguidas são:

- Restrições geotécnicas, referentes ao ângulo geral de talude que deve ser mantido nas condições de segurança adequadas conforme a qualidade do maciço da cava;
- Restrições tecnológicas, referentes à manutenção do teor médio do minério para pilhas de estocagem e usina de beneficiamento dentro das especificações adequadas;
- Restrições operacionais, relacionadas à largura mínima necessária para operação dos equipamentos de carregamento e transporte nas praças de trabalho, além de fornecer a produção necessária para alimentar a planta de beneficiamento e atingir as metas de produção estabelecidas no plano de lavra estratégico realizado para o longo prazo.

Segundo Wetherelt e Wielen (2011) os avanços operacionais da lavra são realizados em fases denominadas *pushbacks* ou *cutbacks*. Estes avanços definem a sequência em que os blocos devem ser lavrados à medida que o *pit* é expandido. Do ponto de vista do planejamento de minas, os *pushbacks* devem ser executados visando a obtenção do maior retorno financeiro através da extração os blocos. Isto significa que não se deve levar em consideração apenas o teor dos blocos, mas todos os custos de desenvolvimento, lavra, beneficiamento e marketing. A Figura 2.4 mostra as principais diferenças entre os dois tipos de *pushbacks*.

A principal diferença entre os dois tipos de *pushback* expostos na Figura 2.4 está na progressão horizontal da lavra. No *pushback* convencional a lavra é concentrada em um único nível horizontal até que este seja completamente lavrado. Por outro lado, o *pushback* sequencial

divide a operação em diferentes níveis horizontais, o que faz com que este geralmente seja mais complexo de ser planejado.

Entretanto, de acordo com Wetherelt e Wielen (2011), a divisão em vários níveis de operação do *pushback* sequencial possui pontos positivos, como maior flexibilidade nas operações de lavra, permitindo maior controle sobre a produção e um número maior de opções para realização da blendagem do minério. Outro ponto a favor da utilização de *pushbacks* sequenciais é a segurança na lavra. Como vários bancos se encontram em operação em diferentes níveis horizontais, o ângulo geral do talude que está sendo lavrado se torna menor do que o ângulo geral de talude definido para a cava final, o que favorece a estabilidade.

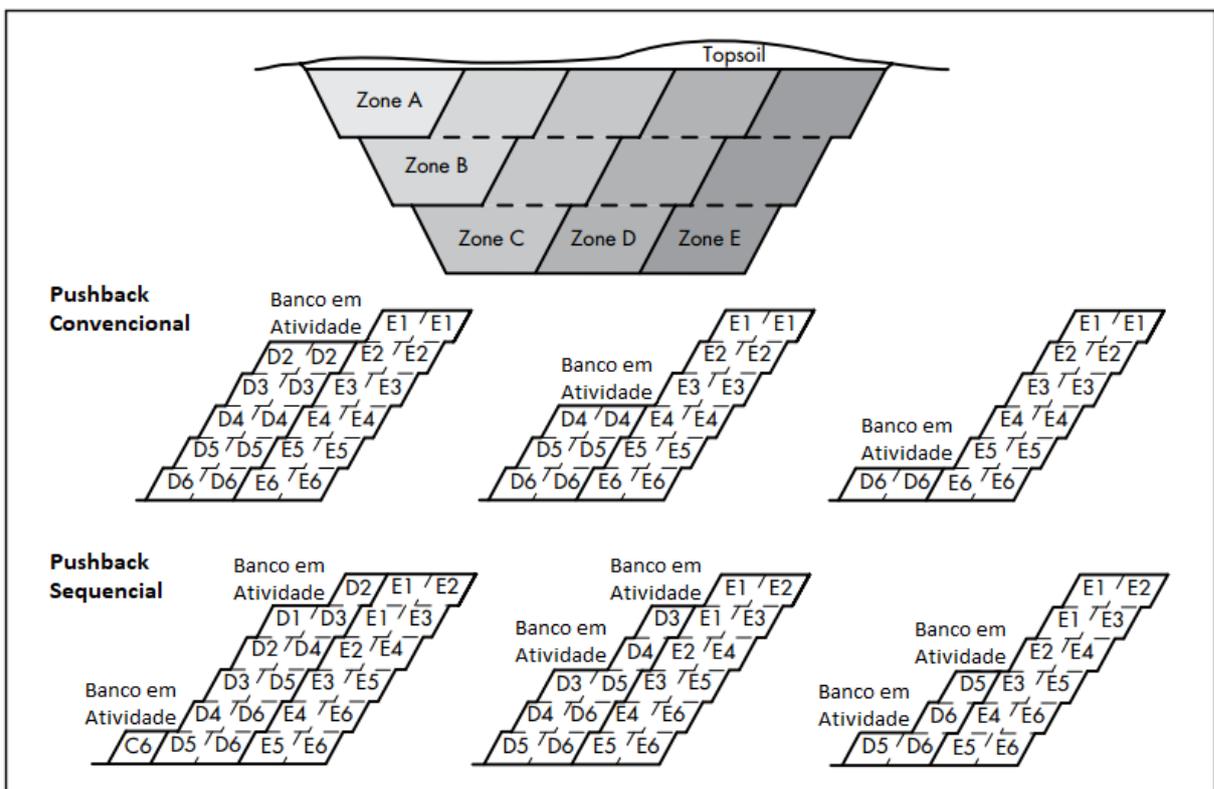


Figura 2.4 - Representação das diferenças entre *pushbacks* convencionais e sequenciais. Fonte: Adaptado de Wetherelt e Wielen (2011, p. 862).

O *pushback* convencional, no entanto, é significativamente menos complexo de ser planejado se comparado ao sequencial, além de oferecer uma área útil maior para as operações de lavra, permitindo que mais faces sejam lavradas ao mesmo e em um mesmo nível. Por outro lado, é menos flexível com relação a sequência de lavra e as opções de blendagem do minério, estando também susceptível a problemas operacionais, graças ao seu caráter mais restrito de operação. Fontes (2016) comenta que a utilização de *pushbacks* sequenciais é mais comum em

minas de grande porte, enquanto que o *pushbacks* convencionais são mais utilizados em minas com escalas de produção menores ou em corpos de minérios mais rasos.

2.5.1 Programação da Produção

Segundo Bohnet (1990) o objetivo da programação da produção é maximizar o valor presente líquido e o retorno de investimento provenientes da extração, concentração e venda de um determinado *commodity* de um depósito mineral. A otimização da produção, portanto, não possui uma solução simples uma vez que a definição do método e da sequência de extração, teor de corte e estratégia de produção dependem de diferentes fatores tais como:

- i. Localização e distribuição espacial do minério (topografia, elevação);
- ii. Composição mineralógica, características físicas e distribuição de teores;
- iii. Custos diretos relacionados a extração e preparação do minério para venda;
- iv. Custos iniciais e de substituição de capital para iniciar e manter a operação;
- v. Custos indiretos tais como impostos e *royalties*;
- vi. Fatores de recuperação e valor da *commodity*;
- vii. Mercado e restrições de capital;
- viii. Considerações políticas e ambientais.

Dentre as várias técnicas de se desenvolver o sequenciamento da lavra, a mais comum é gerar um conjunto de cavas ótimas aninhadas (*nested pits*) com diferentes valores de teor de corte. De um ponto de vista prático, estas cavas são obtidas através da aplicação de um algoritmo de otimização para diferentes modelos econômicos, obtidos variando-se o preço de mercado da *commodity* que é extraída. A cava final é normalmente definida utilizando-se o preço mais provável. Para preços menores que este, são geradas cavas sucessivamente menores. A tendência é que estas cavas migrem para as regiões de maior teor e/ou valores menores de relação estéril/minério (HUSTRULID et al., 2013). De acordo com Flores (2008) as cavas aninhadas geradas podem ser utilizadas como guia para definição da sequência de extração do minério e estéril, contidos dentro dos limites da cava final ótima.

Assim, cabe ao sequenciamento definir a ordem em que os trabalhos de lavra devem ser executados de forma a garantir a maior lucratividade ao longo da vida útil do empreendimento. De acordo com Bazante (2004) o sequenciamento de lavra, além de assegurar o melhor aproveitamento da jazida, também tem por objetivo controlar a qualidade da produção, garantindo que o minério atenda às exigências da usina de beneficiamento ou do mercado consumidor.

2.6 Geometria da Cava

A geometria da cava de uma mina a céu aberto está relacionada a diversos fatores inerentes a qualquer empreendimento de mineração. De acordo com Armstrong (1990), os principais fatores que influenciam no desenho da cava são: a geologia do depósito, distribuição de teores, extensão do corpo de minério, topografia, taxa de produção, ângulos de talude, custos de lavra e beneficiamento, recuperação do minério, teor de corte, entre outros. A maior ou menor relevância de cada um deles dependerá do projeto analisado. Entretanto, é importante que estes fatores sejam bem compreendidos para que possam ser incorporados no planejamento de mina.

Considerando-se apenas os parâmetros geométricos, de uma forma geral, a cava de uma mina a céu aberto pode ser descrita pelos seus ângulos de talude e pela largura de suas bermas. A Figura 2.5 mostra os principais elementos que o compõe um talude típico de uma cava, tais com: bermas operacionais e inativas; a face do talude, cristas e pés dos taludes, além dos ângulos de face e do ângulo geral de talude.

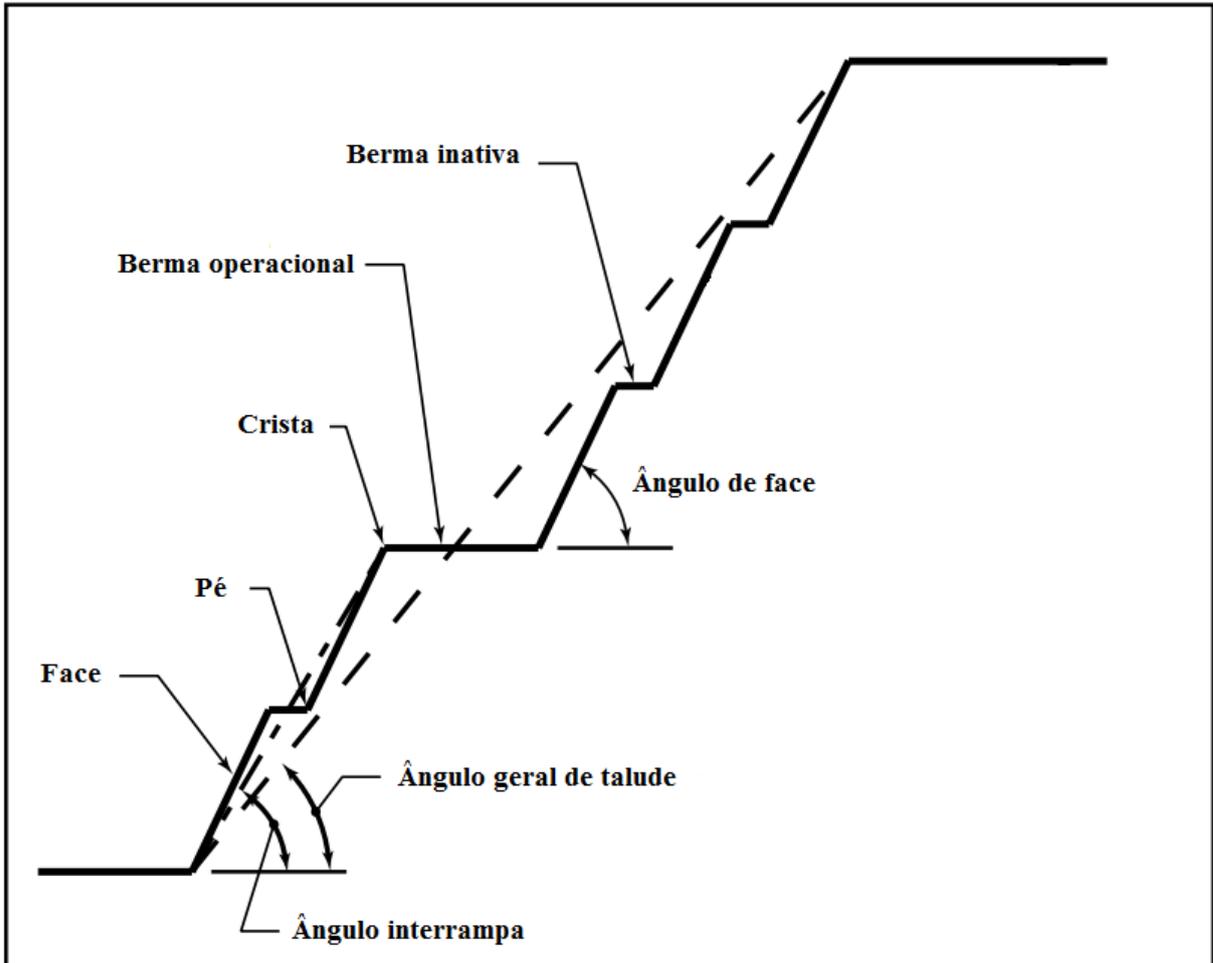


Figura 2.5 - Representação dos principais elementos de um talude. Fonte: Modificado de Kliche (2011, p. 497).

2.6.1 Altura dos Bancos

Segundo Armstrong (1990) a altura da bancada corresponde a distância vertical entre cada nível horizontal da cava. De uma forma geral, recomenda-se que todos os bancos sejam da mesma altura, a não ser que alterações nas condições geológicas da cava não permitam que isto seja aplicado. Curi (2014) comenta que a altura dos bancos é determinada com base nas dimensões dos equipamentos de perfuração e desmonte, nas características físicas do maciço e na dimensão dos blocos de lavra.

Devido aos avanços tecnológicos, os equipamentos de perfuração não são mais um limitante da altura da bancada. Assim, atualmente a altura da bancada é normalmente definida com base na altura máxima de escavação do equipamento utilizado na operação de carregamento (CURI, 2014).

Em termos práticos, o ideal seria que a altura dos bancos fosse a maior possível, respeitando-se as limitações de segurança e do equipamento de carregamento. De acordo com Curi (2014) as principais vantagens de se aumentar a altura dos bancos são:

- Melhoria do rendimento na operação de perfuração, reduzindo os tempos de deslocamento dos equipamentos;
- Maior produtividade a cada desmonte de rocha;
- Menor número de bancos na lavra, favorecendo a concentração dos trabalhos;
- Menor custo na construção dos acessos.

Por outro lado, a utilização de bancos menores traria os seguintes benefícios:

- Melhorias na segurança;
- Melhor controle nos desvios dos furos;
- Melhor controle na fragmentação da rocha;
- Menores cargas de explosivo por furo, resultando em uma diminuição das vibrações geradas pela operação de desmonte;
- Aumento na seletividade da lavra;
- Maior facilidade na construção de rampas e vias de acesso;
- Descentralização dos trabalhos.

Conforme Armstrong (1990) o valor escolhido para a altura dos bancos pode variar de acordo com o minério lavrado, podendo chegar a 15 metros para minas de grande porte, ou ser de até 1 metro, para minerações onde a seletividade da lavra é essencial.

2.6.2 Largura da Bancada

Segundo Curi (2014) a largura da bancada deve ser calculada com base nos espaços necessários para permitir a movimentação dos equipamentos que operam simultaneamente na frente de lavra. A Figura 2.6 ilustra uma bancada em operação, dividindo-se os seus espaços de acordo com os equipamentos que nela operam.

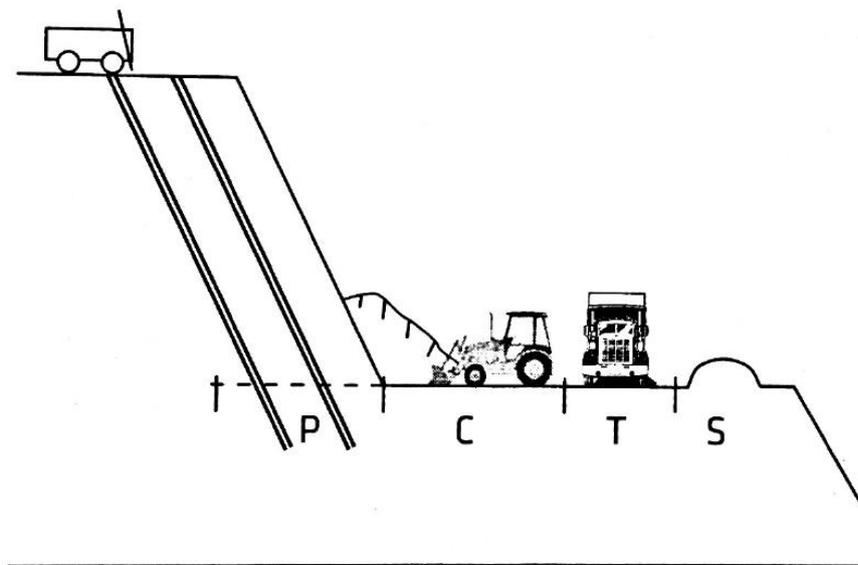


Figura 2.6 - Relação entre o tamanho dos equipamentos e a largura da bancada. Fonte: Curi (2014, p. 109).

O valor de P corresponde ao comprimento do furo na bancada, e depende da orientação e mergulho do mesmo. O comprimento C representa a zona reservada para operação e manobra dos equipamentos de carregamento, o qual deve ser de no mínimo 1,5 vezes o comprimento da máquina de carga, considerando-se também o seu alcance máximo. A zona T corresponde a largura do equipamento de transporte enquanto que a zona S representa a leira de segurança (CURI, 2014).

2.6.3 Ângulo Individual de Talude

O ângulo de talude entre bermas (ou bancos de lavra) é definido como o ângulo que a face do banco faz com um plano horizontal. Este ângulo pode ser definido com aquele formado entre uma linha imaginária, de menor comprimento, que ligue o pé e a crista da bancada, e uma linha horizontal que a intercepte (CURI, 2014).

Segundo Curi (2014) a definição dos ângulos individuais de talude irá depender principalmente da altura dos bancos e da qualidade do maciço. Maciços rochosos de má qualidade, principalmente aqueles com a presença de fraturas e/ou descontinuidades, além da possível presença de água, devem ser tratados com maior cautela, uma vez que estes fatores podem comprometer a estabilidade. Neste caso, ângulos mais suaves devem ser adotados de forma a garantir a segurança e evitar possíveis rupturas.

2.6.4 Ângulo Geral de Talude

De acordo com Armstrong (1990) os ângulos de talude são um dos principais elementos que afetam a geometria da cava de uma mina a céu aberto. O ângulo geral de talude pode ser definido como sendo o ângulo que uma reta que passa pelo pé do banco mais profundo e pela crista do primeiro banco faz com o plano horizontal. Dependendo da variabilidade das condições geológicas dentro da cava, faz-se necessário trabalhar com mais de um ângulo geral de talude. A Figura 2.7 mostra uma representação de uma cava contendo diferentes ângulos de talude, definidos de acordo com cada setor da mina.

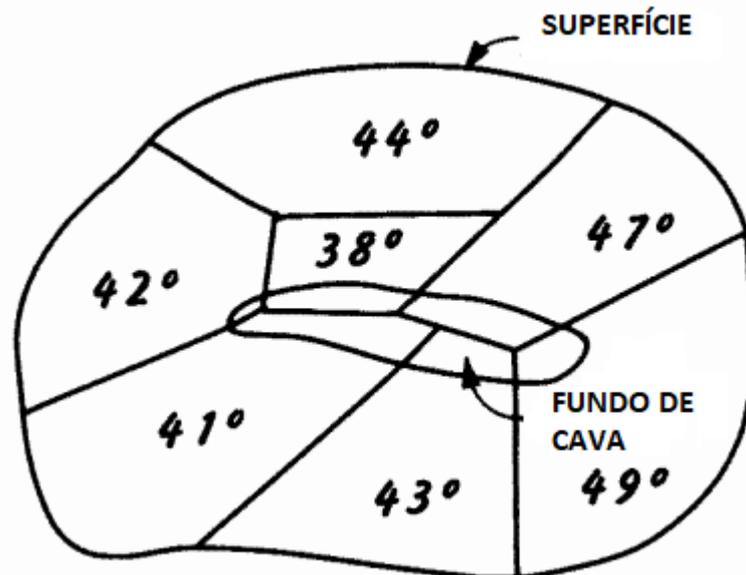


Figura 2.7 - Diferentes ângulos gerais de talude aplicados a diferentes setores da cava. Fonte: Adaptado de Armstrong (1990, p. 459).

A definição do ângulo geral de talude para os diferentes maciços que compõe a cava deve, portanto, ser feita de acordo com dados obtidos através de estudos geológicos e geotécnicos detalhados. Curi (2014) comenta que a definição correta do ângulo geral de talude apresenta-se como o primeiro grande desafio na definição dos parâmetros geométricos da cava. Esta definição pode tornar-se ainda mais complexa quanto mais heterogêneo for o maciço, especialmente quanto a presença de fraturas e descontinuidades.

De um modo geral, o objetivo é encontrar um valor para o ângulo geral de forma que o talude permaneça estável durante toda a vida útil da mina, permitindo a continuidade das operações de lavra nos diferentes níveis da cava. Outro ponto importante a se considerar diz respeito à construção de rampas e vias de acesso. Segundo Oliveira (2016) a inclinação do ângulo geral deve ser tal que permita a introdução de um sistema de rampas e estradas conectando os vários níveis de operação dentro da cava, sem que isso implique em uma maior quantidade de estéril removida para se chegar ao fundo da cava.

De um ponto de vista econômico, o ideal seria que o ângulo geral de talude fosse o mais íngreme possível. Isto porque, quanto maior o ângulo, menor é a quantidade de blocos estéril que se deve remover para que seja possível a lavra de um bloco de minério. Tal fato têm implicações diretas no custo unitário de lavra, o qual considera, além de outros fatores, o custo de remoção de estéril. Curi (2014) afirma, portanto, que a definição correta do ângulo geral de talude, além de garantir a segurança na lavra, constitui um dos condicionantes essenciais da rentabilidade do empreendimento de mineração.

2.7 Considerações Geotécnicas

A realização da escavação de uma cava gera um desequilíbrio no estado de tensões do maciço rochoso. Com isso, o fluxo de tensões horizontais pré-existentes tende a se rearranjar, sendo forçado a passar por baixo do fundo da cava e contornando os limites do *pit* final. As tensões verticais também tendem a diminuir devido a retirada do material contido na cava. Isto resulta no surgimento de uma zona de alívio de tensões localizada entre as linhas de fluxo de tensão horizontais e os limites interiores da cava. Este alívio nas tensões favorece que estruturas como juntas e fraturas se alarguem, diminuindo consequentemente as forças de coesão e atrito das rochas do maciço. À medida que a cava se aprofunda, esta zona de alívio tende a aumentar, aumentando também a severidade de possíveis rupturas no maciço (HUSTRULID et al., 2013). A Figura 2.8 mostra a redistribuição do fluxo de tensões devido a escavação da cava.

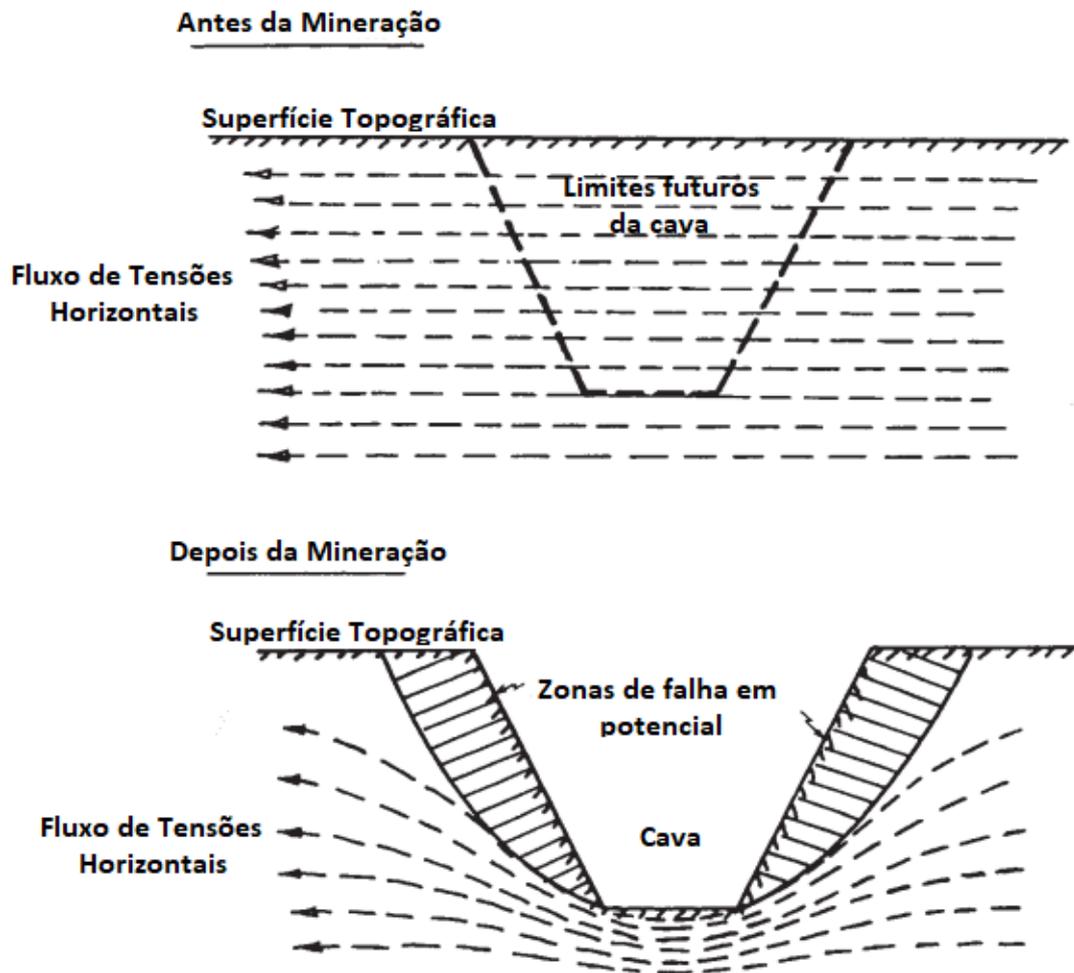


Figura 2.8 - Redistribuição das tensões horizontais devido a escavação da cava. Fonte: Adaptado de Hustrulid et al. (2013, p. 333).

A estabilidade de taludes é um dos pontos principais na segurança operacional de uma mina. Conforme a lavra avança para partes mais profundas da cava, novos domínios geológicos, estruturas (fraturas, juntas, falhas) e zonas de fraqueza são expostas, aumentando o nível de complexidade do maciço. Por esta razão, o mapeamento geológico e geotécnico da cava é fundamental para obtenção de dados a respeito das diversas famílias de descontinuidades presentes na cava. Estes dados permitem a realização de análises cinemáticas, resultando na identificação dos tipos de ruptura mais prováveis para os diferentes setores da cava.

Outro fator de grande importância na segurança dos taludes de uma mina é a presença de água nos taludes da cava, o que é significativamente desfavorável à sua estabilidade. A presença de água dentro da cava também pode dificultar ou, em certos casos, até inviabilizar as operações de lavra. Isto serve para reforçar a necessidade de se conduzir estudos hidrogeológicos os quais devem ser sempre atualizados através de dados de monitoramento,

permitindo-se assim avaliar a necessidade de instalação e o correto dimensionamento de poços de rebaixamento, garantindo que a segurança dos taludes não seja comprometida pela presença de água.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar os efeitos da variação do preço de mercado do minério fosfático nos limites da cava final ótima. Deste modo, para cada cenário de preço gerado foram analisados os valores de volume de minério, estéril e a REM referentes a cada cava. Uma análise econômica baseada no VPL de cada cava também foi conduzida como forma de verificar a influência do preço no valor do empreendimento, bem como a relação entre o critério econômico e os volumes de minério e estéril contidos na cava.

3.1 Estudo de Caso

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados de topografia, limite de propriedade e o modelo de blocos de uma mina de fosfato, destinado para produção de fertilizantes. A mina está localizada no estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil. A Figura 3.1 mostra uma seção E-W (Leste-Oeste) do modelo de blocos limitado pela superfície topográfica. Nesta seção é possível identificar as diferentes tipologias de minério e estéril que compõe o modelo.

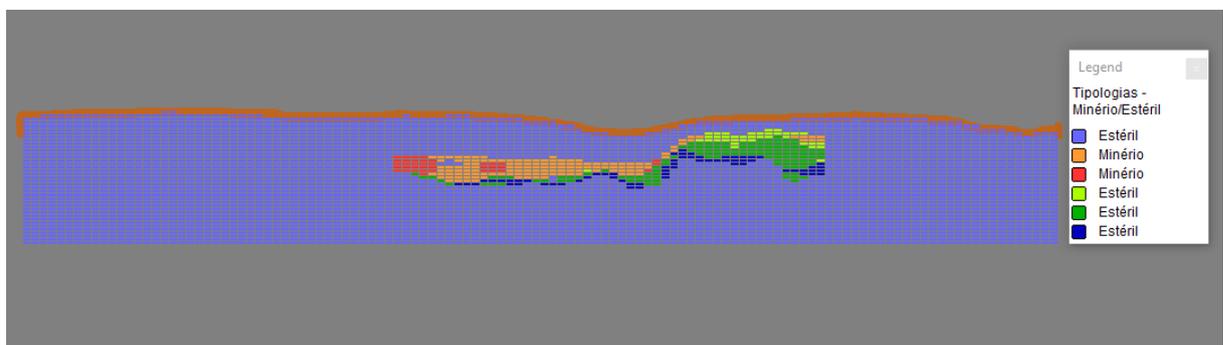


Figura 3.1 - Seção E-W do modelo de blocos mostrando as diferentes tipologias de minério e de estéril.

3.2 Histórico de Preços

O preço de mercado de um determinado bem mineral é uma variável muito complexa e que tem grande impacto na lucratividade do empreendimento. Esta complexidade se deve ao fato de que o preço está sempre condicionado a um conjunto de diversos fatores, normalmente externos ao empreendimento, os quais envolvem principalmente cenários

econômicos e mercadológicos de nível e nacional e até mundial. Whittle (2011) comenta que o preço pode variar significativamente de acordo com mudanças na economia, condições do mercado, desequilíbrios entre oferta e procura, ciclos de investimento, influência de especuladores de mercado, entre outros.

Estas condições evidenciam a grande dificuldade que é a previsão de forma precisa do comportamento do preço ao longo dos anos. Segundo Whittle (2011) mesmo que projeções de cenários futuros para o preço de mercado sejam realizadas, estas quase sempre estarão erradas.

A Tabela 3.1 apresenta o comportamento do preço de mercado do fosfato, expresso em US\$ por tonelada de minério, a partir do ano de 2012 até o último valor de preço antes da conclusão deste trabalho.

Tabela 3.1 - Variação do preço de mercado do fosfato nos últimos 5 anos.

Histórico de Preços do Fosfato (US\$/t) - Últimos 5 anos						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Janeiro	202,50	179,00	102,20	115,00	118,00	99,00
Fevereiro	192,50	170,00	103,00	115,00	115,00	98,00
Março	192,50	170,00	108,00	115,00	115,00	98,00
Abril	188,13	168,75	108,00	115,00	115,00	96,00
Mai	175,00	165,00	111,40	115,00	115,00	93,00
Junho	175,00	165,00	110,00	115,00	115,00	-
Julho	180,00	157,00	110,00	115,00	115,00	-
Agosto	185,00	145,00	110,00	115,00	111,00	-
Setembro	185,00	127,50	115,00	121,00	110,00	-
Outubro	185,00	120,60	115,00	123,00	110,00	-
Novembro	185,00	108,50	115,00	123,00	104,00	-
Dezembro	185,00	101,00	115,00	122,50	103,00	-

Fonte: Adaptado de Global Economic Monitoring (GEM) Commodities, World Bank Group.

Analisando-se os dados da Tabela 3.1 tem-se que a variação do preço de mercado, considerando um horizonte de tempo de janeiro de 2012 até janeiro de 2017, foi de -51,11%. Isto significa dizer que o preço caiu mais da metade durante este período. Esta análise, no entanto, não fornece uma ideia de como o preço se comportou ao longo dos anos no âmbito de tempo escolhido. Neste caso pode-se utilizar os valores médios anuais como guia para se realizar a mesma análise.

O gráfico da Figura 3.2 mostra a variação da média de preços do fosfato de 2012 até 2016. O ano de 2017 foi excluído desta análise uma vez que, até a data de conclusão deste

trabalho, não são conhecidos todos os seus valores de preço. Assim, a análise dos valores médios anuais foi realizada dentro de um intervalo de cinco anos, o qual compreende as médias de preço de 2012 até 2016.

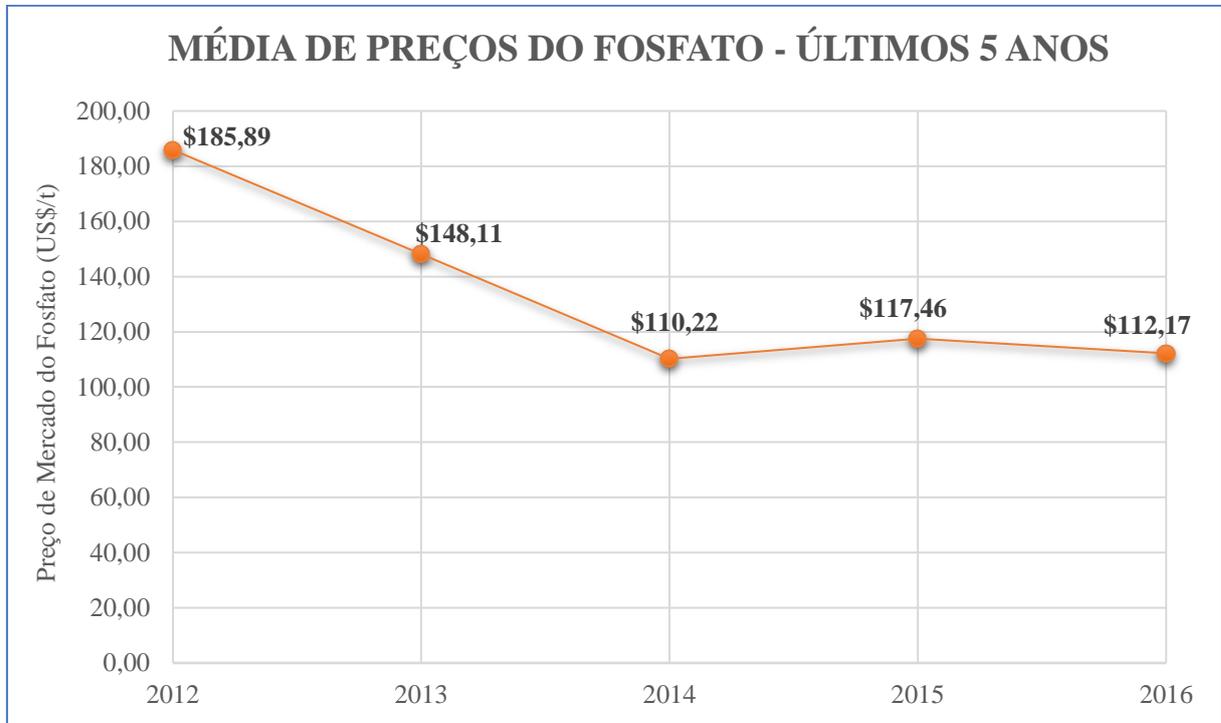


Figura 3.2 - Média anual do preço de mercado do fosfato nos últimos 5 anos. Fonte: Adaptado de Global Economic Monitoring (GEM) Commodities, World Bank Group.

O gráfico da Figura 3.2 mostra que a variação das médias de preço anuais de 2012 para 2016 foi de -39,66%. Este valor é inferior ao valor encontrado quando se comparou os preços entre os meses de janeiro de 2012 até janeiro de 2017. Isto indica que flutuações do preço ao longo de cada ano suavizaram a sua variação média no longo prazo. No entanto, o valor encontrado ainda se mostrou bastante significativo, visto que uma oscilação de aproximadamente 40% no valor de venda do principal produto de qualquer empreendimento certamente terá um impacto considerável na sua lucratividade.

A escolha de um horizonte de tempo de cinco anos para realização desta análise se deve ao fato de que este é um período que permite a realização de decisões de caráter estratégico por parte do planejamento de mina, oferecendo tempo necessário para que ajustes e adaptações sejam inseridas na elaboração de novos planos, mais flexíveis e capazes de se adequar, por exemplo, a mudanças futuras do preço de mercado.

Isto é importante tendo em vista que, mesmo que o preço tenha flutuações significativas em um horizonte de tempo curto, mudanças nos limites da cava final, por exemplo, não podem ser realizadas em tal prazo. Bazante (2004) afirma que os limites da cava final devem ser estudados e definidos de forma cuidadosa e criteriosa, considerando que expansões ou retrações na lavra são possíveis de ocorrer diante de mudanças nas condições econômicas e de mercado, sem que isso implique em um gasto financeiro suplementar.

3.3 Análise de Sensibilidade

Análises de sensibilidade são uma ferramenta simples, porém eficaz quando se deseja verificar a influência de uma variável em um determinado parâmetro de interesse de um projeto, como por exemplo a sua rentabilidade. No presente trabalho buscou-se fazer uma análise de sensibilidade do preço de mercado do fosfato nos limites da cava final ótima.

Analisando-se os dados do histórico de preço para os últimos cinco anos, foi possível identificar a variação nominal (-51,11%) e a variação das médias anuais (-39,66%) do preço dentro deste período. Estes valores serviram de guia para estabelecer o *range* de análise adotado na análise de sensibilidade, visando contemplar mudanças que possam ocorrer no preço para os próximos cinco anos.

Assim, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade com um *range* de variação de 50%, o qual, segundo os dados do histórico de preços, seria suficiente para avaliar os efeitos da variação do preço nos últimos cinco anos. Em seguida, estipulou-se um valor base para o preço do fosfato como sendo de US\$ 100,00 a tonelada. Este valor é diferente daquele correspondente à média anual para o ano de 2016, o qual seria um valor base mais representativo para o estudo. Contudo, para fins de simplificação, optou-se por utilizar o valor de US\$ 100,00 a tonelada. A partir deste valor base, o preço foi então variado dentro de um intervalo definido, limitado pelo alcance da análise.

As variações no preço foram realizadas através de incrementos percentuais de 10%, partindo-se do valor base, considerado como 100%. O preço foi então modificado até um máximo de 50%, para mais e para menos, obtendo-se valores de 50% até 150%, correspondentes à cada cenário a ser estudado. Os dados completos referentes a todos os cenários de preço avaliados podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros da análise de sensibilidade do preço de mercado do fosfato.

Análise de Sensibilidade - Preço de Mercado do Fosfato		
Cavas	Preço do Fosfato (US\$/t)	Δ (%)
1	50,00	-50
2	60,00	-40
3	70,00	-30
4	80,00	-20
5	90,00	-10
6	100,00	0
7	110,00	+10
8	120,00	+20
9	130,00	+30
10	140,00	+40
11	150,00	+50

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se dois *softwares*, o NPV Scheduler e o Studio OP, ambos da empresa DATAMINE.

A primeira etapa da metodologia adotada consistiu na preparação do modelo de blocos e na subsequente valoração do mesmo. Para isto, o modelo de blocos da mina estudada foi inserido no *software* Studio OP. Em seguida, através de uma função benefício já existente, os blocos foram avaliados de acordo com um critério econômico, recebendo valores de benefício positivo, ou negativos. Foi nesta etapa que foram realizadas as modificações no valor do preço de mercado do minério para geração dos diferentes cenários estudados.

Vale ressaltar que o único parâmetro modificado na função benefício foi o preço de mercado, ou seja, todos os demais parâmetros foram mantidos constantes durante os testes realizados neste trabalho. A próxima etapa consistiu em inserir o modelo já valorado pela função benefício no *software* NPV Scheduler. Após a inserção do modelo foram selecionadas as variáveis de trabalho, definindo quais as tipologias eram correspondentes ao minério e quais eram de estéril. Em seguida foi gerado um modelo econômico baseado no benefício de cada bloco.

A definição do modelo geotécnico foi realizada ao inserir os dados de ângulo de talude para uma ou mais regiões definidas dentro do modelo de blocos. Neste trabalho, apenas uma região global de ângulos de talude foi utilizada, adotando-se para esta um ângulo de 45°, definido como valor do ângulo geral de talude da cava.

A cava matemática foi gerada aplicando-se o algoritmo de Lerchs-Grossmann para obtenção dos contornos que maximizam o lucro, expresso na forma da somatória dos fluxos de caixa (FC) descontados, resultando no VPL da cava. Uma taxa de desconto de 12% e uma produção média de 3.200.000 de toneladas de minério ao ano foram utilizadas para todos os testes realizados. Em seguida foram adicionadas restrições físicas relacionadas aos limites referentes a áreas de propriedade ou de arrendamento e restrições de cota para o fundo de cava. Após a inserção destes parâmetros o *software* fornece os contornos da cava final otimizada.

Posteriormente à geração das cavas finais, obteve-se os valores de volume de minério, estéril, REM, além do VPL da cava. A vida útil do empreendimento também foi calculada através da razão entre o volume de minério e a produção anual estipulada anteriormente. Estes dados foram registrados para posterior comparação com os valores dos outros testes. Ao completar todas as etapas previamente descritas o processo foi repetido para os demais valores de preço de mercado do fosfato analisados, até serem concluídas todas as simulações.

A metodologia exposta na Tabela 3.2 e descrita em detalhes anteriormente foi aplicada a dois cenários distintos. Para o Cenário I realizou-se uma análise de sensibilidade considerando os limites de propriedade da mina estudada, além de um limite de cota para o fundo da cava. Já para o Cenário II a mesma análise foi realizada sem qualquer restrição física, tanto de limite de área quanto de cota para o fundo de cava. Com isso, foram geradas ao todo 22 cavas matemáticas, sendo 11 para cada cenário.

O Cenário I representa uma situação comum aos empreendimentos de mineração, os quais estão normalmente limitados por uma poligonal que define os seus limites de propriedade. Devido à rigidez locacional relacionada aos depósitos minerais, nem sempre é possível alterar estes limites com o intuito de ampliar o volume das reservas lavráveis. Em muitos casos o empreendimento é desenvolvido próximo a áreas urbanas, áreas de interesse da comunidade ou áreas de preservação ambiental. Nestas situações a expansão dos limites de propriedade muito dificilmente será possível.

O Cenário II contempla uma outra realidade que também é possível de ser observada na mineração. Casos onde dois ou mais empreendimentos de mineração são vizinhos e exploram a mesma área mineralizada podem permitir que os limites de propriedade sejam alterados, mediante acordo entre ambas as partes, e de forma que seja benéfico para os dois lados.

Por fim, a Figura 3.3 ilustra um fluxograma contemplando todos os passos referentes à metodologia utilizada neste trabalho, aplicados para ambos os cenários avaliados.

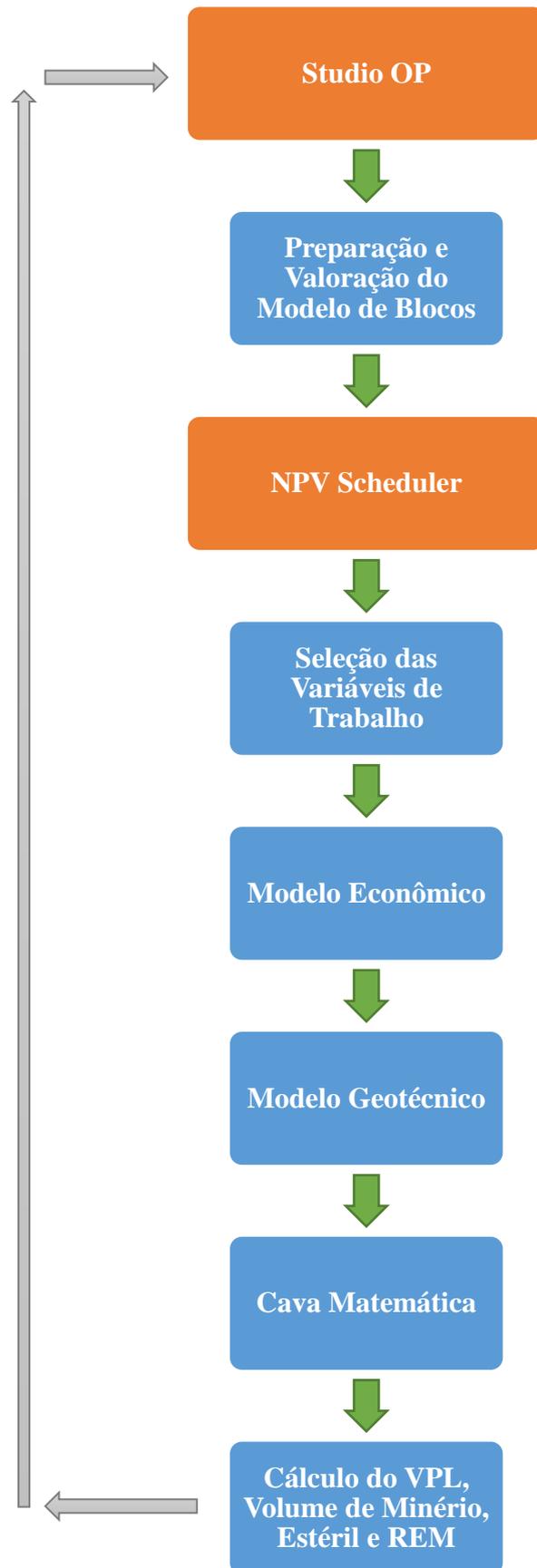


Figura 3.3 - Fluxograma representativo da metodologia adotada no trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de todos os passos descritos no capítulo anterior, referente à metodologia, foram obtidos os resultados das análises de sensibilidade para os dois cenários avaliados. Para cada valor de preço de mercado foram calculados os valores de volume de minério, volume de estéril, relação estéril/minério, teor médio da cava, valor presente líquido da cava e vida útil do empreendimento.

4.1 Cenário I - Cava Final Com Limites Físicos

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as cavas referentes ao Cenário I, geradas dentro do limite de propriedade e com limitação de cota para o fundo de cava.

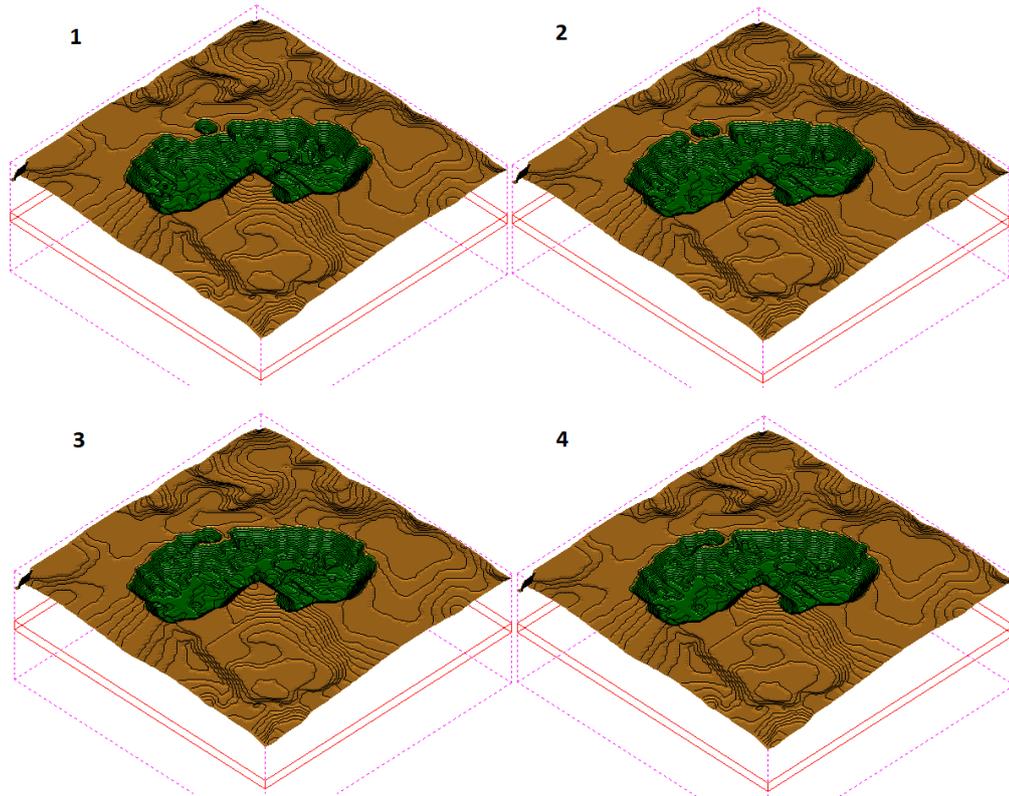


Figura 4.1 - Cavas matemáticas 1-4 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler.

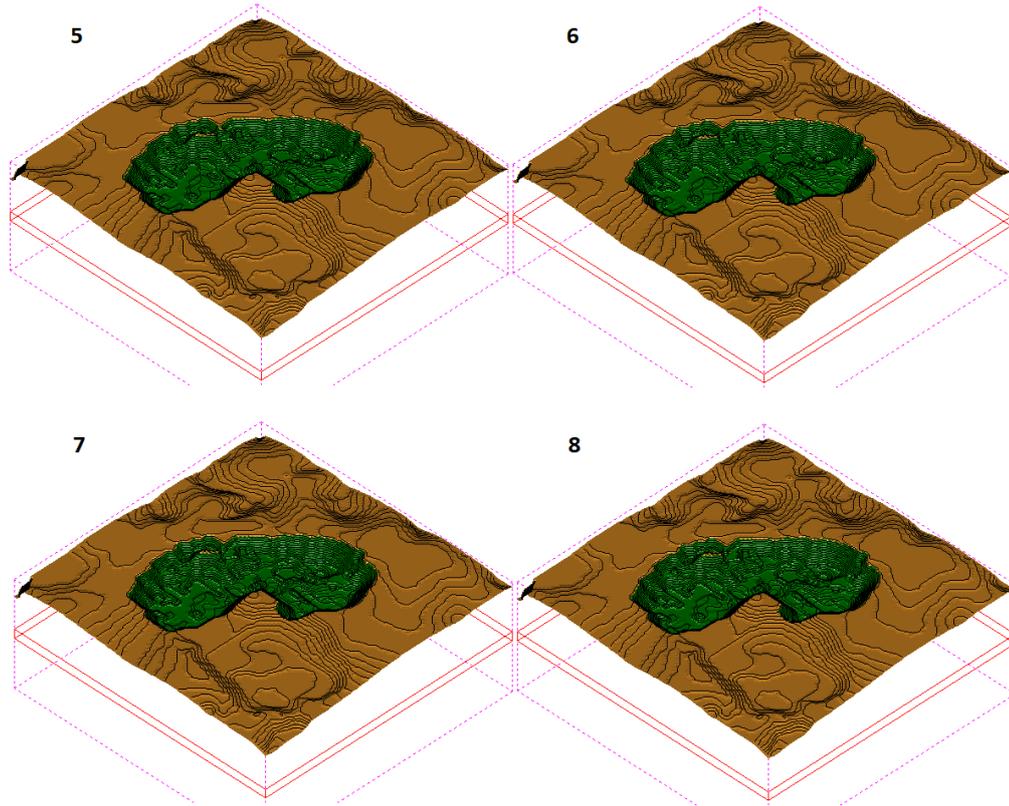


Figura 4.2 - Cavas matemáticas 5-8 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler.

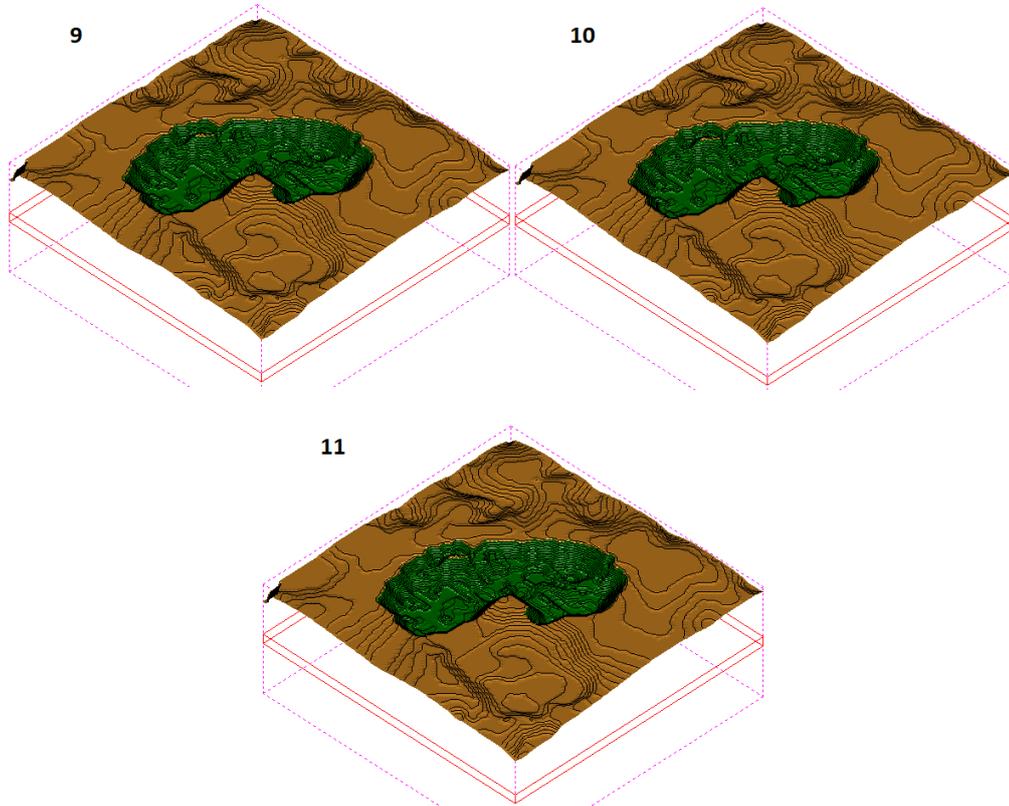


Figura 4.3 - Cavas matemáticas 9-11 referentes ao Cenário I, geradas no NPV Scheduler.

A partir das cavas mostradas pelas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 obteve-se os dados necessários para realização das análises para os diferentes valores de preço. A Figura 4.4 mostra o gráfico da relação entre os valores de tonelagem de minério, tonelagem de estéril e o VPL da cava, para cada valor de preço estudado dentro do Cenário I. Os valores de tonelagem de minério e estéril foram obtidos multiplicando-se o volume encontrado por um valor de densidade igual a 2 t/m³, adotado como padrão para ambos os materiais.

Analisando-se a Figura 4.4 é possível observar que a cava 1, a qual corresponde ao valor de preço mais baixo, é a que possui o menor valor de tonelagem de minério. Este comportamento já era esperado, uma vez que para valores menores do preço de mercado, o benefício de alguns blocos com teores mais baixos poderá ser negativo, mesmo que o teor esteja acima do teor de corte. Isto faz com que blocos que deveriam ser considerados como minério sejam tidos como estéril, já que a lavra não é mais economicamente viável. Esta situação provoca uma diminuição nas reservas lavráveis, reduzindo consequentemente os limites da cava final.

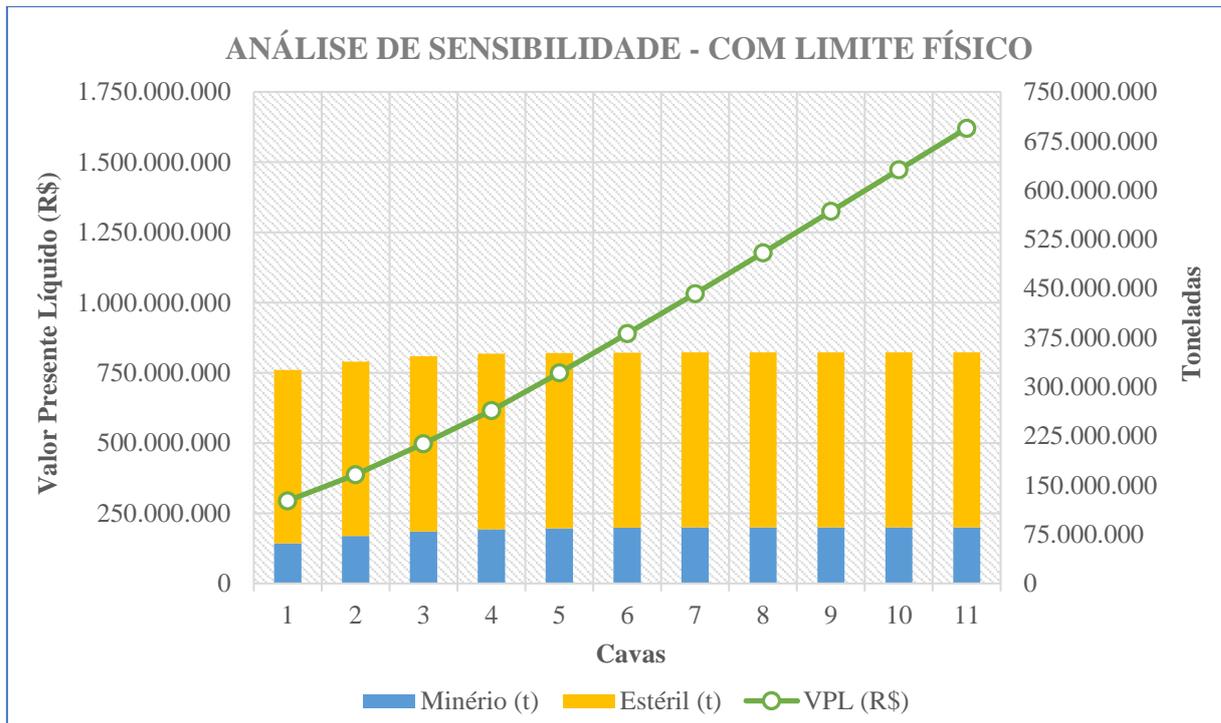


Figura 4.4 - Comparativo das 11 cavas geradas para o Cenário I, em relação aos valores de tonelagem de minério, estéril e VPL da cava.

Ainda de acordo com a Figura 4.4, ao contrário do que se esperava, não foi possível observar um aumento significativo nos valores de tonelagem de minério entre as cavas 6 e 11.

Para efeito de comparação, a cava 11, gerada com o maior preço de mercado, apresentou um aumento de apenas 0,6% na massa de minério em relação a cava 6, gerada a partir do valor base de preço de mercado. Por outro lado, a diferença entre o valor base e a menor cava (cava 1) foi de 27,77%. A principal justificativa neste caso é de que, para o valor base (cava 6), os limites da cava final já estavam muito próximos dos limites de propriedade e de cota para o fundo de cava adotados. Sendo que, mesmo com aumentos no preço, os contornos da cava foram muito pouco alterados. Nota-se também que a partir da cava 8 não existem incrementos no valor de tonelagem, tanto de minério quanto de estéril. Isto indica que a partir deste ponto a cava final não pode mais sofrer expansões, estando restrita aos limites impostos nas condições de contorno da análise realizada.

Os valores de tonelagem de estéril também pouco variaram no decorrer dos testes. O menor valor foi observado na cava 1, a qual também apresenta a menor quantidade de minério. A partir desta, o valor da massa de estéril aumentou até atingir o seu máximo na cava 4. Deste ponto em diante os valores decresceram até atingir um mínimo na cava 8. Este valor mínimo se manteve constante para as demais cavas até a última, seguindo a mesma tendência que os valores de minério. A justificativa para este comportamento se assemelha àquela aplicada para o minério, com a diferença de que neste caso a massa de estéril permaneceu praticamente constante, mesmo para a menor cava. Isto indica que, apesar dos limites da cava terem se retraído, a quantidade de estéril contida na cava aumentou na mesma proporção, devido a diminuição do preço de mercado. Assim, tem-se que a variação entre o valor base e o menor valor de tonelagem de estéril, correspondente a cava 1, foi de apenas 1,03%.

A análise de acordo com o critério econômico foi realizada através do VPL das cavas geradas. De acordo com a Figura 4.4, o comportamento do VPL para os diferentes testes seguiu a tendência esperada. Observa-se que para valores mais altos de preço, obteve-se também um maior VPL. Neste caso, o valor máximo de VPL encontrado coincidiu com aquele do maior valor de preço. Isto mostra que independentemente dos contornos da cava, o preço tem grande significância na lucratividade do empreendimento. Assim, comparando-se o valor base referente à cava 6 com o menor valor, referente à cava 1, obtém-se uma diminuição no VPL da ordem de 66,91%. Por outro lado, ao se comparar o valor base com o maior valor de VPL, encontra-se um ganho de 82,11%.

A Tabela 4.1 expõe os demais parâmetros analisados após a realização dos testes.

Tabela 4.1 - Variação do teor médio, REM e vida útil para as cavas geradas no Cenário I

Análise de Sensibilidade - Com Limite Físico				
Cava	Preço (US\$)	P₂O₅ (%)	REM (t/t)	Vida Útil (anos)
1	50,00	13,09	4,30	19,20
2	60,00	12,43	3,66	22,71
3	70,00	12,03	3,38	24,72
4	80,00	11,80	3,24	25,87
5	90,00	11,70	3,17	26,34
6	100,00	11,64	3,14	26,58
7	110,00	11,61	3,12	26,71
8	120,00	11,60	3,12	26,75
9	130,00	11,60	3,12	26,75
10	140,00	11,60	3,12	26,75
11	150,00	11,60	3,12	26,75

De acordo com os dados da Tabela 4.1 observa-se que os valores de teor médio de P₂O₅ decrescem à medida que o preço passa do seu valor mínimo até o seu valor máximo. A explicação para este comportamento está no fato de que, para cavas menores, geradas com preços mais baixos, a lavra tende a buscar as porções mais ricas da jazida. Neste caso, apenas blocos com teores mais elevados serão economicamente viáveis de serem lavrados, elevando assim o teor dos blocos de minério da cava. Esta tendência também faz com que a quantidade de blocos de minério seja reduzida em comparação com os blocos de estéril, uma vez que apenas aqueles blocos com teores mais altos são tidos como minério. Como resultado, nestes casos a REM será maior.

Outro ponto a se discutir está relacionado à quantidade de material movimentado. Para preços mais baixos sabe-se que a cava será conseqüentemente menor. No entanto, para preços mais altos os limites da cava se expandem, aumentando-se as reservas lavráveis. Se for considerada uma taxa de produção constante ao longo dos anos, assim como foi feito neste trabalho, a vida útil do empreendimento tende a aumentar à medida que o preço aumenta.

4.2 Cenário II - Cava Final Sem Limites Físicos

Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.6 são apresentadas as cavas referentes ao Cenário II, geradas sem considerar limitações de cota para o fundo de cava e limite de propriedade.

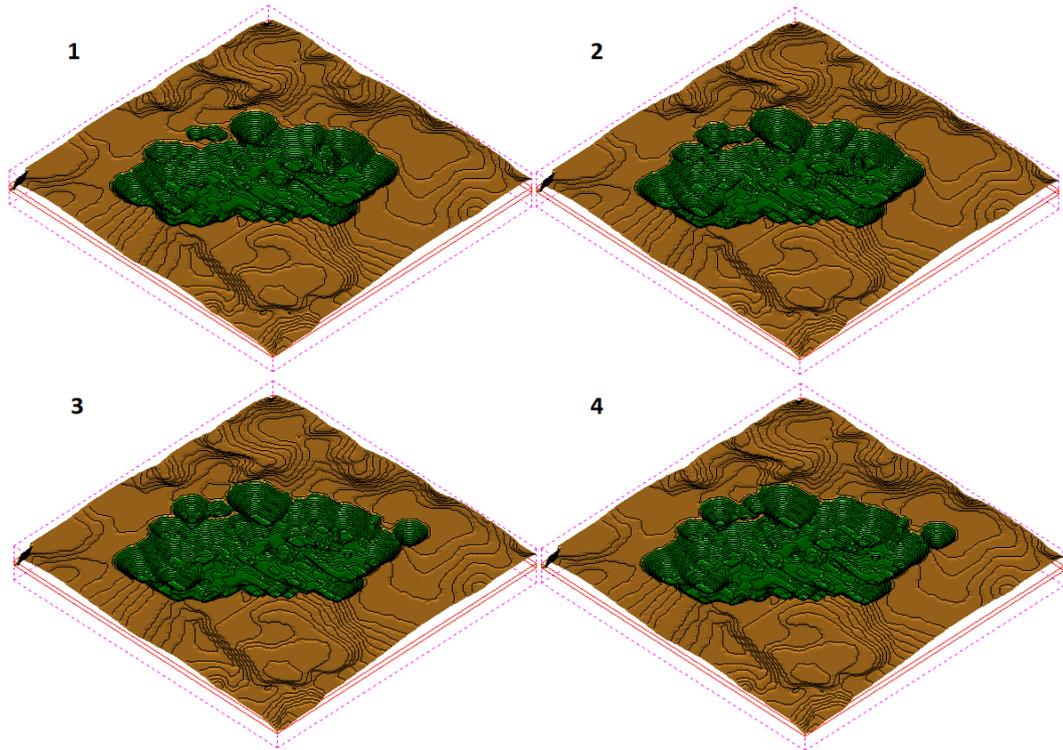


Figura 4.5 - Cavas matemáticas 1-4 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler.

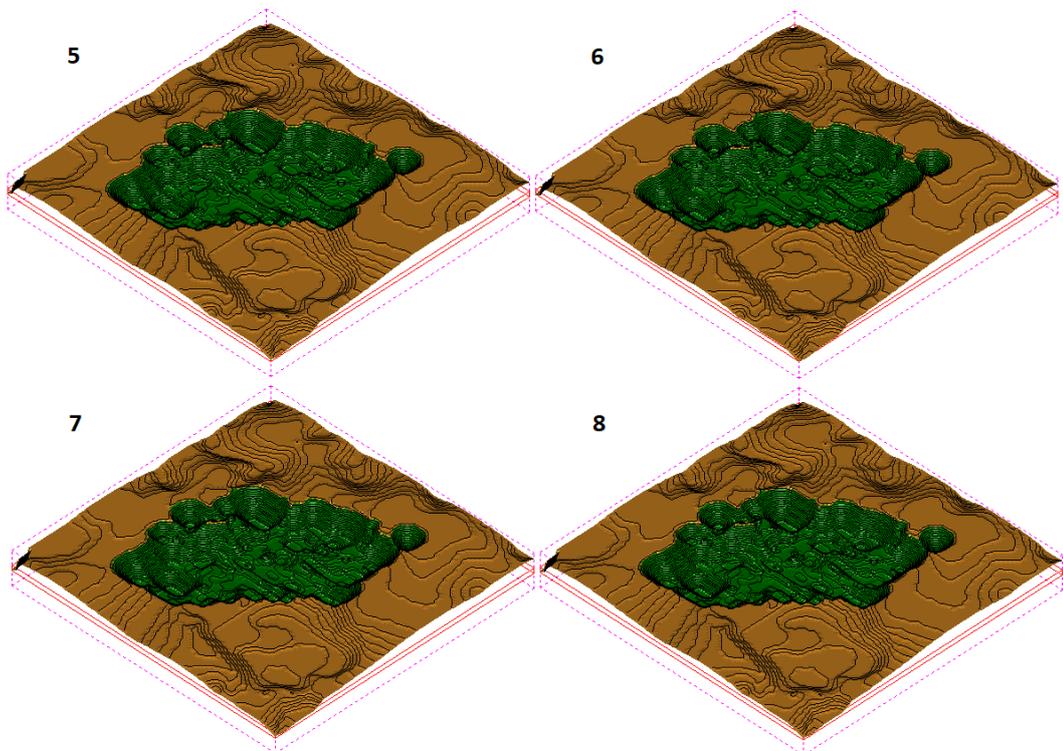


Figura 4.6 - Cavas matemáticas 5-8 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler.

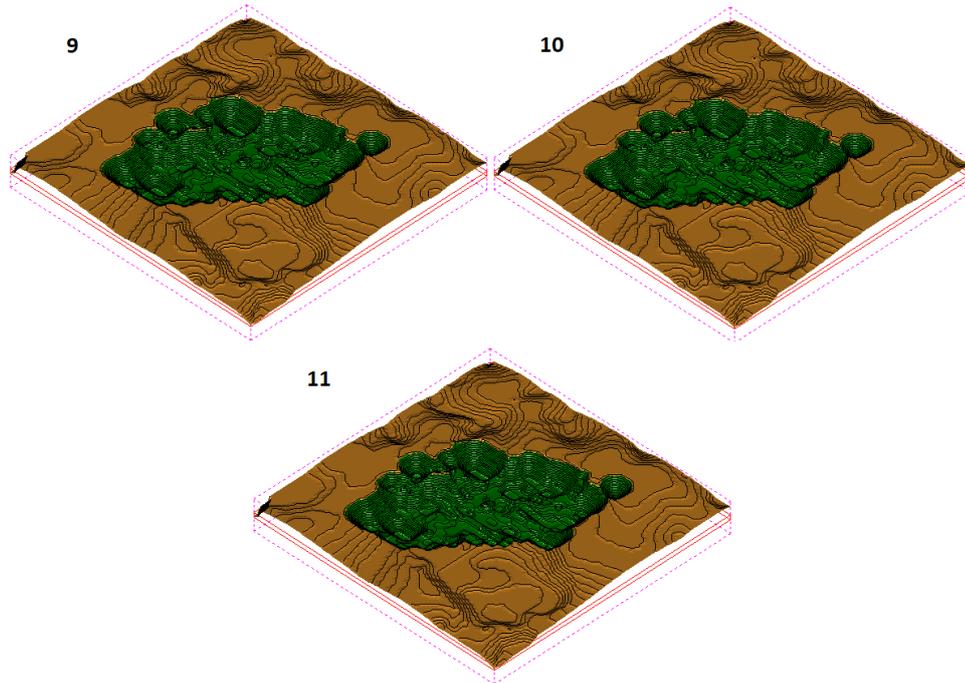


Figura 4.7 - Cavas matemáticas 9-11 referentes ao Cenário II, geradas no NPV Scheduler.

A Figura 4.8 mostra o gráfico da relação entre os valores de tonelagem de minério, tonelagem de estéril e o VPL da cava, para cada valor de preço estudado dentro do Cenário II.

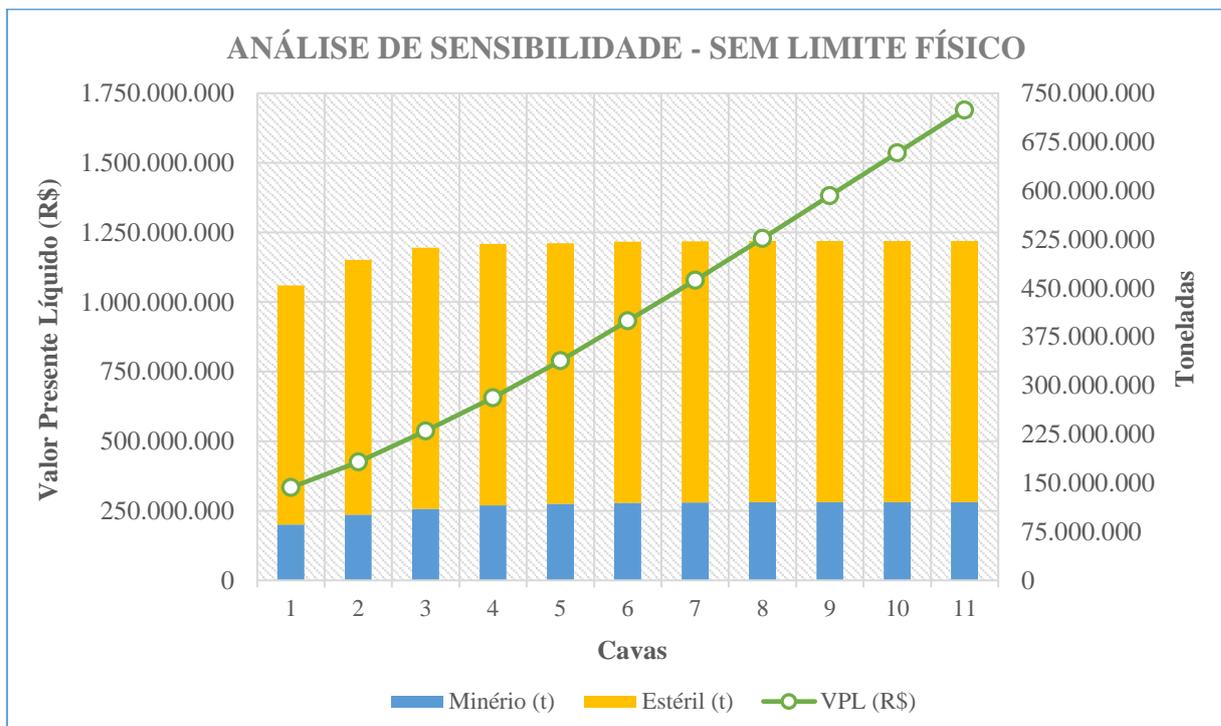


Figura 4.8 - Comparativo das 11 cavas geradas para o Cenário II, em relação aos valores de tonelagem de minério, estéril e VPL da cava.

O gráfico da Figura 4.8 é semelhante ao gráfico da Figura 4.4, entretanto, algumas diferenças também podem ser observadas. A principal delas está no volume de material, tanto estéril quanto minério. Com a ausência de restrições físicas de limite de propriedade e de fundo de cava, as cavas geradas para o Cenário II são maiores e mais profundas do que as do primeiro cenário, conseqüentemente possuem valores maiores de estéril e minério.

O comportamento individual dos valores de tonelagem de minério e estéril, no entanto, permaneceu mesmo. A única diferença neste caso é que os valores a partir da cava 8 permaneceram constantes devido à exaustão das reservas lavráveis, e não devido as limitações físicas. Assim, ao se comparar o valor base para o minério (cava 6), por exemplo, com os valores máximos (cava 11) e mínimos de preço (cava 1), obtém-se respectivamente 0,67% e 28,09%.

Isto mostra que, enquanto as cavas geradas para valores abaixo do valor base possuem relativamente menos minério, as cavas geradas para valores de preço acima do preço base pouco sofrem alterações com os aumentos de preço. O mesmo raciocínio também vale para os valores de tonelagem de estéril, onde a variação entre o valor base (cava 6) e o maior valor de preço (cava 11) foi de apenas -0,06%.

Em termos de ganho econômico, a mesma tendência observada para o VPL no Cenário I se repetiu no Cenário II, sendo que os valores deste último foram, em média, 6,32% maiores do que os do primeiro cenário. A principal explicação para este fato é de que, como no Cenário II não foram impostas restrições físicas para o algoritmo de otimização, este foi capaz de, conforme os dados de cada modelo econômico inserido, encontrar os contornos que gerariam a máxima lucratividade do empreendimento.

Por fim, a Tabela 4.2 ilustra os demais parâmetros analisados para o Cenário II.

Tabela 4.2 - Variação do teor médio, REM e vida útil para as cavas geradas no Cenário II.

Análise de Sensibilidade - Sem Limite Físico				
Cava	Preço (US\$)	% P₂O₅	REM (t/t)	Vida Útil (anos)
1	50,00	13,38	4,29	26,84
2	60,00	12,65	3,89	31,57
3	70,00	12,22	3,65	34,39
4	80,00	11,96	3,48	36,12
5	90,00	11,84	3,40	36,88
6	100,00	11,77	3,37	37,32
7	110,00	11,74	3,35	37,52
8	120,00	11,73	3,34	37,57
9	130,00	11,73	3,34	37,57
10	140,00	11,73	3,34	37,57
11	150,00	11,73	3,34	37,57

Nota-se que os valores de teor médio e REM são bem semelhantes aos valores observados na Tabela 4.1, referente ao Cenário I. Os valores referentes à vida útil do empreendimento, no entanto, são maiores para o Cenário II, uma vez que neste obteve-se cavas maiores e mais profundas.

5 CONCLUSÕES

A determinação dos limites da cava final é um dos grandes desafios do planejamento de uma mina a céu aberto, tendo impacto direto no sucesso do empreendimento mineral. Diversos fatores podem influenciar estes limites sendo que o preço de mercado do minério é talvez o mais significativo deles. Neste sentido, análises de sensibilidade são uma ferramenta importante e muito útil para o planejamento, uma vez que permitem avaliar os efeitos das variáveis mais importantes ao projeto.

Neste trabalho foram realizadas duas análises de sensibilidade considerando dois cenários diferentes, com restrições físicas e outro sem. Quando os testes foram realizados com um limite de cava definido, sendo que esse limite não poderia ser ultrapassado, observou-se um aumento do ganho econômico na forma do aumento do VPL da cava, no entanto, o aumento de preço não propiciou um aumento significativo de volume de minério e estéril neste caso. Isso ocorreu pois para o valor estabelecido como base, a cava já se aproximava dos limites que restringiam os contornos da cava final.

Já para o cenário sem limitações, analisado visando-se observar o quanto a cava aumentaria sem restrições de cota e limite de arrendamento, observou-se que tanto o VPL quanto as quantidades de minério e estéril aumentaram, até atingir um valor máximo estabelecido pelas próprias condições do modelo geológico de blocos, de forma que mesmo que o preço aumentasse para além dos limites estabelecidos pela análise de sensibilidade, mudanças no volume de minério e estéril não ocorreriam.

A utilização do Cenário II também serviu para se conhecer os limites verdadeiros da cava final, uma vez que nenhuma restrição ou imposição de área ou cota foi feita na escolha dos contornos ótimos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, A. D.; OSANLOO, M.; SHIRAZI, M. A. **Ultimate Pit Limit (UPL) Determination Through Minimizing Risk Costs Associated with Price Uncertainty**. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, Kraków, v. 24, n. 4/2, p. 157-170, 2008.

AMARAL, M. **Modelos Matemáticos e Heurísticos para o Auxílio ao Planejamento de Lavra em Minas à Céu Aberto**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ARMSTRONG, D. Definition of Mining Parameters. In: KENNEDY, B. A. **Surface Mining**. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1990. p. 459-464.

ASCARZA, B. F et al. 2008 apud CHIMUCO, J. P. J. **Metodologia de Planejamento de Mina para Retomada das Operações de Lavra das Jazidas de Kassinga Norte - Angola**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BAZANTE, A. J. **A Interação Entre o Planejamento e Controle de Qualidade na Maximização da Função Benefício de um Empreendimento Mineral**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BOHNET, E. L. Optimum Production Scheduling. In: KENNEDY, B. A. **Surface Mining**. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1990. p. 476-479.

CAMUS, P. J. **Management of Mineral Resources: Creating Value in the Mining Business**. Michigan: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2002. 120p.

CANDIDO, M. T. **Impacto de Diferentes Algoritmos e Geometria de Depósitos Mineraiis no Planejamento de Longo Prazo**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CARMO, F. A. R. **Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas**. 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

CARMO, F. A. R.; CURI, A.; SOUSA, W. T. **Otimização Econômica de Explorações a céu Aberto**. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 59, n. 3, p. 317-321, jul./set. 2006.

COSTA, J. F. C. L. et al. 1998 apud GAMBIN, F.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. **Estratégia de Controle de Qualidade de Minérios na Lavra Utilizando Simulação Geostatística**. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 58, n. 3, p. 193-200, jul./set. 2005.

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

DAGDELEN, K. **Open Pit Optimization - Strategies for Improving Economics of Mining Projects Through Mine Planning**. In: International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 17., 2001, Ankara. **Annals...** Ankara: The Chamber of Mining Engineers of Turkey, 2001, p. 117-122.

DAVID, M. **Geostatistical Ore Reserve Estimation**: 1. ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977. 364 p.

FLORES, B. A.; CABRAL, I. E. **Análise de Sensibilidade na Otimização Econômica de uma Cava**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 61, n. 4, p.449-454, out./dez. 2008.

FLORES, B. A. **Planejamento de Lavra Estratégico e Tático de Morro da Mina - Conselheiro Lafaiete/MG**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

FONTES, M. P. **Influência do Nível Freático no Sequenciamento de Lavra Aplicado ao Planejamento Estratégico de Lavra**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GAMBIN, F.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. **Estratégia de Controle de Qualidade de Minérios na Lavra Utilizando Simulação Geoestatística**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 58, n. 3, p. 193-200, jul./set. 2005.

GANGULI, R.; DAGDELEN, K.; GRYGIEL, E. Systems Engineering. In: DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 839-856.

Global Economic Monitoring (GEM) Commodities, World Bank Group. Disponível em: <<http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-commodities>>. Acessado em: 05 de junho de 2017.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 584 p.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open Pit Mine Planning & Design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 1308 p.

KLICHE, C. A. Slope Stability. In: DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 495-526.

LANE, K. **The Economic Definition of Ore: Cut-Off Grades in Theory and Practice**. 1. ed. London: Mining Journal Books, 1988. 149 p.

LERCHS, H.; GROSSMANN, I. F. **Optimum Design of Open-Pit Mines**. Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, v. 58, n. 633, p. 47-54, jan. 1965.

OLIVEIRA, B. J. A. L. **Avaliação Geométrica do Ângulo de Talude na Delineação da Cava Final- Estudo de Caso: Mina F4, Vale Fertilizantes**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

OLIVEIRA, D. P. R. **Planejamento Estratégico: Conceitos, Metodologias, Práticas**. 23. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 331 p.

PERONI, R. de L. **Análise da Sensibilidade do Sequenciamento de Lavra em Função da Incerteza do Modelo Geológico**. 2002. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

PRATI, F. J. 1995 apud CARMO, F. A. R. **Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas**. 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

RENDU, J. M. **An Introduction to Cut-Off Grade Estimation**. 2. ed. Eaglewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2014. 168 p.

ROSSI, M. R.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. Dordrecht: Springer, 2014. 332 p.

RUNGE, I. C. **Mining Economics and Strategy**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1998. 316 p.

SILVA, N. C. S. **Metodologia de Planejamento Estratégico de Lavra Incorporando Riscos e Incertezas para Obtenção de Resultados Operacionais**. 2008. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 2008.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2004. 400 p.

TOLWINSKI, B.; UNDERWOOD R. **A Scheduling Algorithm for Open Pit Mines**, IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, v. 7, n. 3, p. 247-270, jul. 1996.

WETHERELT, A.; WIELEN, K. P. V. D. Introduction to Open-Pit Mining. In: DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011. p. 857-876.

WHITTLE, D. Open-Pit Planning and Design. In: DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011. p. 877-902.

WHITTLE, J. Open Pit Optimization. In: KENNEDY, B. A. **Surface Mining**. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1990. p. 470-475.