

Fábio José Prati

**Geometria de Minas a Céu Aberto:
Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia**

**São Paulo
1995**

Fábio José Prati

**Geometria de Minas a Céu Aberto:
Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia**

**São Paulo
1995**

Fábio José Prati

**Geometria de Minas a Céu Aberto:
Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Mineral**

**Orientador:
prof. Dr. Antônio José Nagle**

**São Paulo
1995**

FICHA CATALOGRÁFICA

Prati, Fábio José

**Geometria de minas a céu aberto:fator crítico de sucesso da indústria mineral. São Paulo, 1995
44p.**

Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Mineração a céu aberto-Otimização de cavas 2. Mineração - Projetos - Avaliação econômica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas II. t

**Dedico está dissertação à minha
esposa, meus pais e familiares,
pelo incentivo e compreensão.**

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof.Dr. Antônio José Nagle e ao Prof.Dr. Eduardo Camilher Damasceno pelo constante incentivo e apoio.

À Serrana de Mineração Ltda. por ter acreditado no valor futuro do aperfeiçoamento técnico, disponibilizando parte de meu tempo .

Ao Eng. Jorge Manuel da Gama Pinto Valente pelos comentários positivos e que me permitiram avançar com segurança.

A todos que de alguma maneira colaboraram para a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de abreviaturas

Lista de símbolos

Resumo

"Abstract"

1. Introdução.	1
2. Técnicas para definição de Geometria de Lavra de Longo	
Prazo.	5
2.1. Método Floating Cones.	6
2.2. Método de Lerchs-Grossman.	7
2.3. Método da Parametrização Técnica de Reservas	9
3. Fatores Críticos de Sucesso .	12
3.1. Fatores Mercadológicos.	13
3.2. Fatores Geológicos	13
3.3. Fatores Geotécnicos.	14
3.4. Fatores Tecnológicos	17
3.5. Condicionantes Operacionais.	19
3.6. Fatores Economicos	20
3.7. Condicionantes Ambientais	21
4. Metodologia proposta para seleção de uma Geometria de Lavra de	
Longo Prazo	23
4.1 Consolidação dos fatores críticos de sucesso	23
4.2 Geração de geometrias otimizadas	25

4.3 Definição dos critérios de avaliação.	.	.	.	26
4.4 Sequência de lavra	31
4.5 Avaliação das geometrias otimizadas.	.	.	.	33
4.6 Operacionalização da cava selecionada	.	.	.	36
4.7 Processo de melhoria contínua	.	.	.	37
5. Considerações finais	.	.	.	39
Referências Bibliográficas	.	.	.	40
Bibliografia Recomendada	.	.	.	42

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1	Seção Transversal - corpo mineralizado homogêneo	2
Fig. 2	Seção Transversal - corpo mineralizado heterogêneo	3
Fig. 3	Floating Cones - Valoração dos cones invertidos	6
Fig. 4	Método de Lerch-Grossman - valoração dos blocos	7
Fig. 5	Valores acumulados definindo a matriz M_{ij}	8
Fig. 6	Valores acumulados de P_{ij}	8
Fig. 7	Superfície C envoltória de máximos convexos	10
Fig. 8	Conjunto de cavas otimizadas	11
Fig. 9	Variação do volume de estéril em função do ângulo de talude	15
Fig. 10	Altura de talude em função do ângulo e do fator de segurança	17
Fig. 11	Valor contido em função do volume total	27
Fig. 12	Valor Presente em função da taxa de juros	29
Fig. 13	Fluxo de caixa típico simplificado	30
Fig. 14	Sequências de lavra extremas	31
Fig. 15	Alternativas de sequência de lavra	32
Fig. 16	Etapas para avaliação das cavas notáveis	34
Fig. 17	Distribuição de probabilidade acumulada do custo de lavra	35

LISTA DE ABREVIATURAS

FCS :	Fatores críticos de sucesso
GLLP :	Geometria de lavra de longo prazo
Prob :	Probabilidade acumulada do custo de lavra
VC :	Valor contido de uma determinada reserva
VCMAX :	Valor contido máximo
VF :	Valor futuro de uma determinada reserva
VP :	Valor presente de uma determinada reserva
VPMAX :	Valor presente máximo
USL :	Unidade de Seletividade de Lavra

LISTA DE SÍMBOLOS

Δm :	Incremento da tonelagem de minério
Δe :	Incremento da tonelagem de estéril
Δq :	Incremento da tonelagem de metal recuperável
B :	Valor economico de um certo bloco de lavra
a :	Preço unitário de venda do metal ou concentrado
b :	Custo unitário de lavra
c :	Custo unitário de beneficiamento
Q :	Tonelagem de metal recuperável
T :	Tonelagem de minério contido no bloco de lavra
V :	Tonelagem total do bloco de lavra
2-D :	Bidimensional
3-D :	Tridimensional
m_{ij} :	Valor do bloco situado na linha i e coluna j
M_{ij} :	Valor acumulado dos blocos da coluna j desde a linha 1 até i
P_{ij} :	Valor acumulado lateralmente selecionando-se o máximo entre P_{i-1, j-1} ; P_{i, j-1} e P_{i+1, j-1}
K :	Função de valoração dos blocos utilizada no Algoritmo de Bongarçon
λ, θ	Parâmetros técnicos utilizados no Algoritmo de Bongarçon
S :	Superfície de cavas de máximo metal contido
C :	Superfície envoltória da superfície S
β :	Ângulo médio de talude
H :	Altura de talude
F_s :	Fator de segurança de taludes

RESUMO

O tema proposto nesta dissertação se insere no contexto de planejamento de empreendimentos da indústria mineral tanto na fase de estudo de viabilidade de implantação, quanto no replanejamento ou otimização de empreendimentos já existentes. Mais especificamente diz respeito a complexidade que envolve a definição de uma geometria de escavação, objetivo a ser atingido a longo prazo em minas a céu aberto .

Esta etapa é fundamental e estratégica para o planejamento de um empreendimento de mineração, pois a partir dela se define a reserva de minério realmente lavrável, razão de ser do próprio empreendimento, com implicação direta sobre os resultados economicos do negócio.

Devido sua complexidade e natureza, a definição da geometria de lavra de longo prazo deve ser entendida como uma função gerencial estratégica, que tem como missão atender às expectativas de diversos públicos dentre eles : acionistas, clientes internos e externos e a comunidade local.

Por inúmeros motivos estes conceitos e técnicas são praticados em poucas empresas de mineração no Brasil. Em geral apenas aquelas de grande porte, tem tido a oportunidade de usufruir dos benefícios da definição criteriosa da geometria de longo prazo de suas minas a céu aberto .

Esta dissertação propõe uma metodologia para o estabelecimento de uma geometria de lavra de longo prazo, tomando como base a Parametrização Técnica de Reservas e considerando o aprimoramento contínuo dos modelos adotados. O trabalho também dá ênfase ao impacto exercido pela geometria de longo prazo sobre a rentabilidade de empreendimentos de mineração.

ABSTRACT

This paper reports the complexity involved in the definition of long term open pit geometry, related to the planning of mining industry in feasibility study stage and the optimization of the already existing enterprises.

Long term open pit geometry is fundamental for mining industry, because it defines the true mineable ore reserves, the reason for the existence of the enterprise, with strong effect on profitability.

The definition of long term open pit geometry has to be understood as a strategic management function, whose core task is to meet the expectations of several publics among which shareholders, internal and external clients and local community.

For several reasons these concepts and techniques are rarely performed in Brazil, where only a few number of companies have had the opportunity to get better results through a criteriously defined long term open pit geometry.

This paper proposes a methodology to establish a long term pit geometry, based in the Technical Parametrization of Reserves considering the continuous improvement of the models adopted in the planning stage. The paper emphasises the effect caused by the open pit geometry over the business economic results .

1. Introdução

Uma Geometria de Lavra de Longo Prazo (GLLP), a ser atingida por uma mina a céu aberto, também denominada limite final de cava, cava ótima ou configuração final de lavra, tem como principal objetivo maximizar uma função de benefício adotada como critério de avaliação econômica .

Essa geometria fica definida através da lavra de porções selecionadas da jazida, estabelecendo-se portanto limites à escavação.

A aplicação correta das técnicas aqui discutidas exige quantidade e qualidade adequadas de informações, que devido a importância que representam para o empreendimento poderiam denominar-se Fatores Críticos de Sucesso (FCS) .

Essas informações somente estão disponíveis após o conhecimento dos condicionantes econômicos e mercadológicos, do detalhamento do modelo geológico-tecnológico da mineralização e do modelo geotécnico, neste último tanto da porção mineralizada do maciço rochoso, quanto daquela não mineralizada.

A título de ilustração do problema em questão a figura 1 mostra, de forma esquemática, seção transversal simplificada de um corpo mineralizado suposto homogêneo, com atitude sub-vertical encaixado em rocha estéril. Nessa mesma figura 1 também estão apresentadas diversas geometrias de escavação exequíveis, do ponto de vista operacional, e estáveis do ponto de vista geotécnico.

Como se observa na figura 1, à medida que se passa da opção 1 para as cavas mais profundas, ocorre um incremento Δm às reservas de minério lavráveis e, portanto, da vida do empreendimento, supondo-se uma determinada capacidade de produção. Este fato favorece a escolha de GLLP mais profundas, que implicam em maior volume de produto vendável incrementando, portanto, a receita global ao longo da vida útil.

Por outro lado, a escolha de cavas mais profundas também implica em elevação do custo, devido ao aumento da distância de transporte e ao incremento Δe no volume de estéril a ser removido, para liberar as reservas de minério e

garantir a estabilidade da escavação, contrapondo-se, assim, ao benefício do aumento das reservas de minério lavráveis.

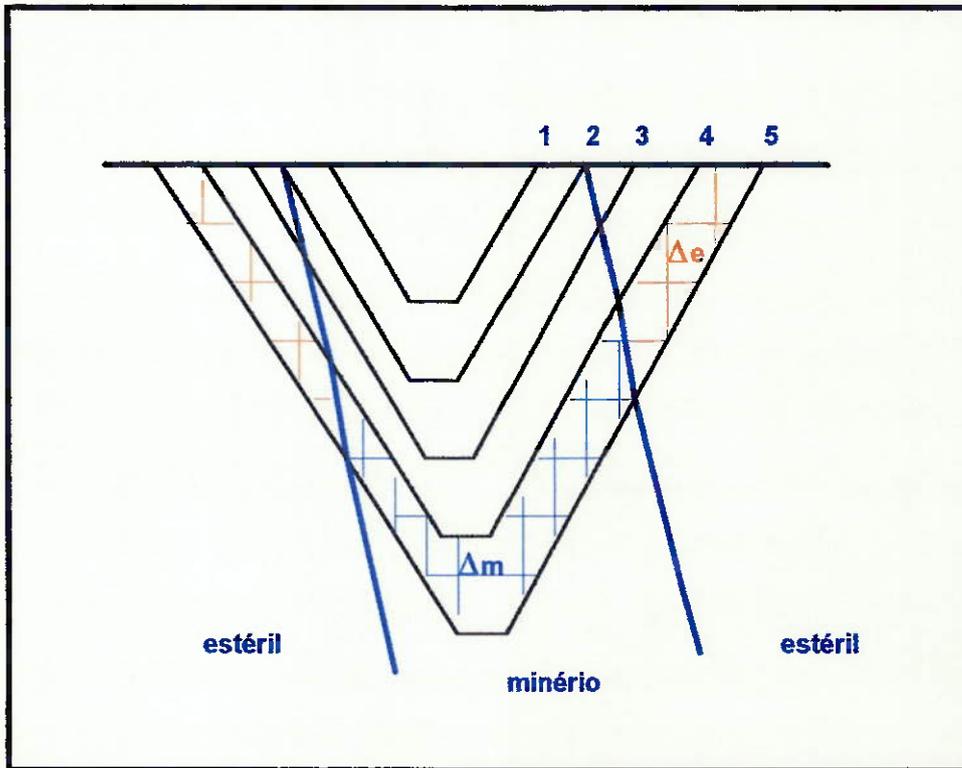


Fig.1 Seção Transversal - corpo mineralizado homogêneo

A figura 2 ilustra outra situação mais genérica, onde o corpo mineralizado não é homogêneo, apresentando variabilidade na concentração e recuperação dos minerais de interesse econômico.

Nesse caso da figura 2, mais complexo, a seleção da GLLP será afetada não apenas pelo aumento de custos decorrentes do aprofundamento da cava, como no caso da figura 1 mas, também, pelo balanço entre o incremento de receitas promovido pela quantidade adicional de metal recuperável Δq , e o incremento dos volumes de reservas com teores não econômicos, que devem ser removidas para possibilitar o acesso físico às porções com teores econômicos.

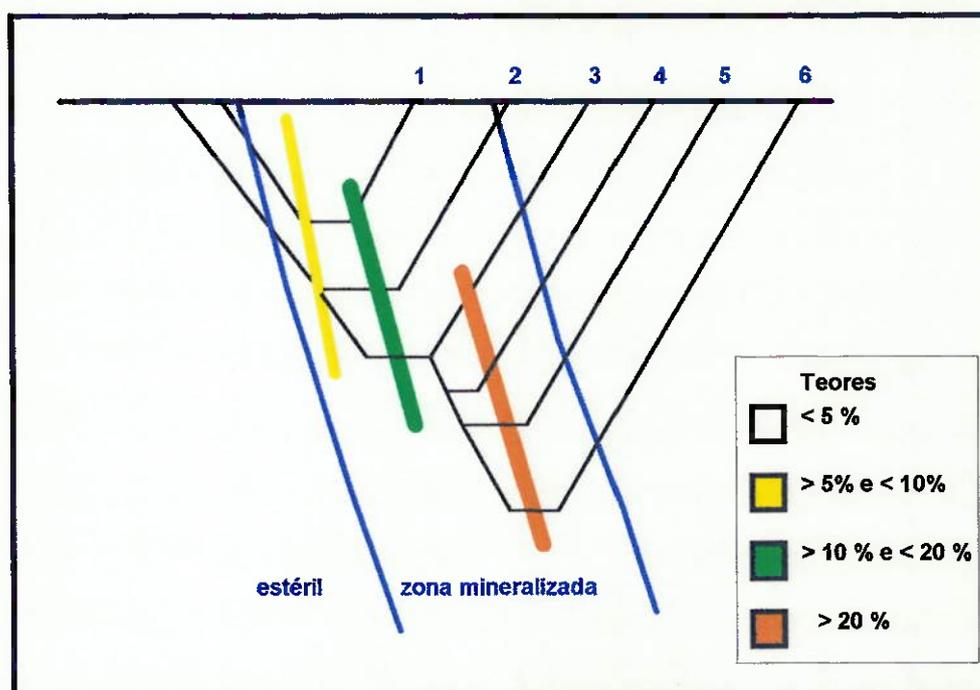


Fig. 2 Seção Transversal - corpo mineralizado heterogêneo

Dessa forma podem ocorrer parcelas do corpo mineralizado com teores baixos, que as receitas geradas, pela venda do produto final obtido, sejam insuficientes para pagar os custos de extração e beneficiamento, ou pelo menos arcar com os custos das etapas posteriores à lavra, não justificando economicamente sua extração como minério.

Existem casos onde o valor econômico não está necessariamente relacionado com a concentração de determinado mineral, mas sim com o atendimento ou não a determinadas especificações, exigidas pelos processos aos quais se destinam, como é o caso da maioria dos minerais não metálicos, (granito, gnaise, calcário, magnesita).

Também neste caso a definição da GLLP será afetada não apenas pelo aumento de custos pelo aprofundamento da cava e pelo incremento Δe de estéril, mas também pelo balanço entre o incremento de reservas dentro das especificações desejadas e o incremento de reservas fora das especificações, que deverão ser extraídas de forma a possibilitar o acesso físico, liberação, das reservas dentro das especificações.

Dessa forma, tanto no caso ilustrado pela figura 1, quanto o da figura 2, existe uma GLLP, dentre aquelas exequíveis tecnicamente, que maximiza o valor da função benefício econômico do negócio, para determinadas condições de contorno adotadas.

A utilização na prática dos conceitos e critérios referentes à definição de uma GLLP, apresenta benefícios que não se limitam à maximização da função benefício econômico, fornece também subsídios que norteiam o planejamento de curto e médio prazos, responsáveis pela garantia da liberação de reservas de minério em quantidade e qualidade necessárias, visando a otimização dos resultados operacionais, e agindo como elemento facilitador do planejamento financeiro do negócio.

2. Técnicas para definição de GLLP

Inúmeros especialistas tem se dedicado ao desenvolvimento de técnicas para definição de geometrias de lavra de longo prazo. Assim foram desenvolvidos algoritmos que permitem a geração automática de uma geometria de cava, dita, ótima. Os métodos mais conhecidos e universalmente empregados pela indústria mineral são : Floating Cones, Lerchs-Grossman e a Parametrização Técnica de Reservas .

As técnicas de otimização de cavas se propõe a selecionar uma geometria de lavra que maximize o valor de uma função benefício economico, previamente estabelecida como critério de avaliação de determinada reserva geológica, levando em consideração as condições de contorno geológico-geotécnicas, tecnológicas, econômicas, mercadológicas, ambientais e operacionais, além de outras que poderão existir em cada caso específico.

A aplicação dos métodos citados, por si só, não garante a viabilidade do empreendimento, por não considerar investimentos e nem o valor economico das reservas em função do tempo. Porém, podem garantir que a geometria otimizada, contenha o valor global contido maximizado, para determinado conjunto de premissas .

Com a maior facilidade de acesso aos recursos computacionais inúmeros sistemas foram desenvolvidos e estão hoje disponíveis para agilizar tanto os trabalhos de estimação, "geometrização" e cubagem de reservas como também, as avaliações de caráter financeiro.

Todos os modelos otimizantes exigem que a jazida seja discretizada em porções denominadas blocos cujas características são normalmente estimadas através de métodos geoestatísticos hoje universalmente reconhecidos como aqueles que minimizam os erros de estimação.

Cada bloco dependendo de sua posição espacial, dimensão, teor e tipologia terá um certo valor definido pela diferença entre receita oriunda da venda do

produto gerado a partir dele e do custo de sua transformação em produto comercializado, podendo ser expressa pela seguinte função:

$$B = aQ - bV - cT \quad (1)$$

onde B é o valor econômico do bloco, a é o preço unitário do metal, b custo unitário de extração, c o custo unitário de beneficiamento, Q é a quantidade de metal vendável, V é o volume do bloco (minério + estéril) e T a tonelagem de minério.

2.1. Método Floating Cones

É um método heurístico de simulação que não garante nenhum tipo de maximização. Baseia-se na avaliação de um conjunto de blocos, que foram previamente valorados por uma função benefício econômico, contidos em um cone invertido, como mostrado na figura 3, cujo vértice percorre todos os blocos da reserva geológica objeto de estudo, a partir do topo da jazida.

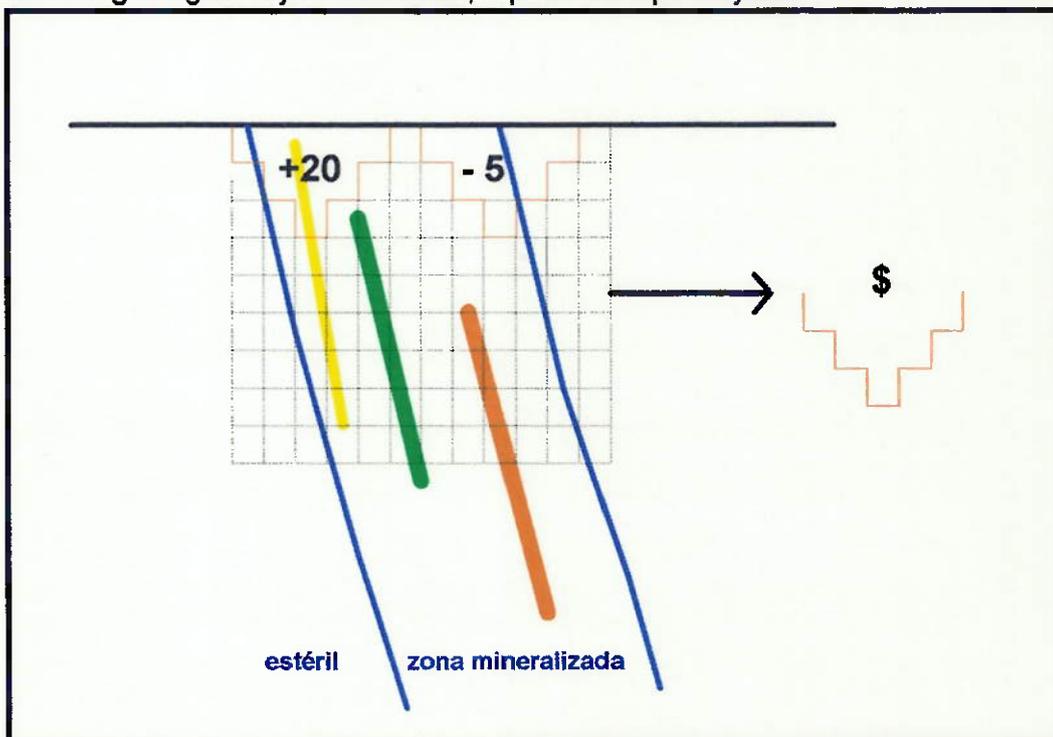


Fig. 3 Floating cones - Valoração dos cones invertidos

Cada vez que a soma dos valores dos blocos contidos num determinado cone é positiva o cone é lavrado, e a procura por novos cones de valores positivos

prossegue . Quando não forem mais encontrados cones positivos aqueles lavrados, até aquele estágio, constituem a cava final.

2.2. Método Lerchs-Grossman

Método otimizante desenvolvido em 1965 por seus criadores Lerchs e Grossman, originalmente em 2-D, foi modificado para ser utilizado em 3-D por Johnson e Sharp (1971), e posteriormente adaptado para admitir quaisquer ângulos de taludes. É o método mais utilizado na prática pela indústria mineral , podendo ser encontrado nos principais softwares comercializados para modelagem de jazidas e otimização de cavas.

Da mesma forma do método anterior, a otimização é realizada a partir do modelo de blocos economicamente valorados. Na figura 4 está apresentado o modelo de blocos valorados para a aplicação do algoritmo de Lerchs- Grossman.

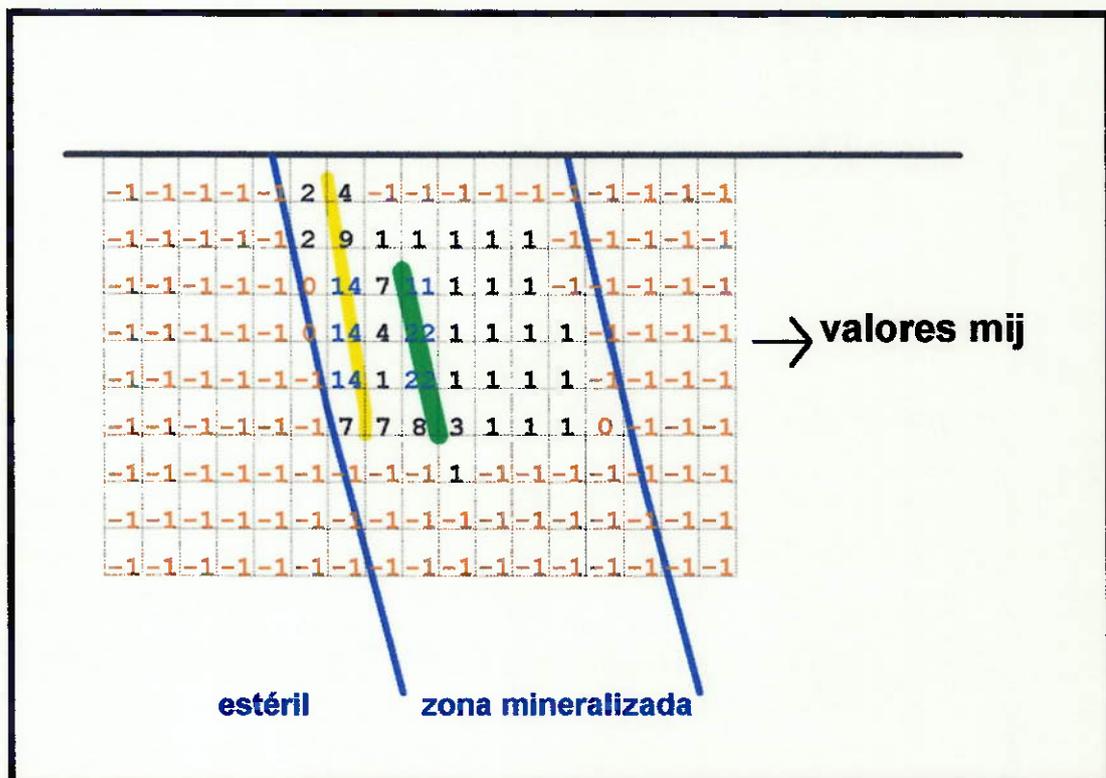


Fig. 4 Método de Lerchs-Grossman - valoração dos blocos

Tal algoritmo se desenvolve em 3 etapas principais:

- na primeira os valores dos blocos m_{ij} são acumulados nas respectivas

colunas j originando os valores M_{ij} apresentados na figura 5

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	2	4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-2	-2	-2	-2	-2	4	13	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2
-3	-3	-3	-3	-3	4	27	7	11	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	-4	4	41	11	33	2	2	2	-2	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	-5	3	55	12	55	3	3	3	-1	-5	-5	-5	-5
-6	-6	-6	-6	-6	2	62	19	63	6	4	4	0	-5	-6	-6	-6
-7	-7	-7	-7	-7	1	61	18	62	7	3	3	-1	-6	-7	-7	-7
-8	-8	-8	-8	-8	0	60	17	61	6	2	2	-2	-7	-8	-8	-8
-9	-9	-9	-9	-9	-1	59	16	60	5	1	1	-3	-8	-9	-9	-9

Fig. 5 Valores acumulados definindo a matriz M_{ij}

- na segunda etapa, mostrada na figura 6, a partir da matriz M_{ij} os valores

são acumulados lateralmente, da esquerda para a direita, seguindo-se a expressão:

$$P_{ij} = M_{ij} + \max (P_{i+1,j-1} \text{ ou } P_{i,j-1} \text{ ou } P_{i-1,j-1}) \quad (2)$$

0	0	0	0	0	0	2	7	15	29	48	74	100	131	140	142	143
-1	-1	-1	-1	-1	2	7	15	29	48	74	100	131	140	142	143	142
-2	-3	-3	-3	-3	3	16	30	49	75	101	132	141	143	144	142	141
-3	-5	-6	-6	-6	1	30	49	75	101	132	143	145	146	144	141	139
-4	-7	-9	-10	-10	-2	42	64	100	131	142	148	149	147	143	140	137
-5	-9	-12	-14	-15	-7	53	67	129	140	146	151	151	147	142	138	135
-6	-11	-15	-18	-20	-13	55	74	137	143	148	152	152	147	141	136	132
-7	-13	-18	-22	-25	-19	48	73	136	144	147	151	151	146	140	134	129
-8	-15	-21	-26	-30	-25	41	65	134	142	146	149	149	144	138	132	126
-9	-17	-24	-30	-35	-31	34	57	125	139	143	147	146	141	135	129	123

Fig. 6 Valores acumulados de P_{ij}

- na terceira etapa percorre-se o caminho no sentido inverso assinalando-se

os valores P_{ij} máximos que definem o contorno da cava otimizada, também

apresentado na figura 6.

Existem na verdade vários algoritmos para aplicação do método de Lerchs-Grossman, baseados na Programação Dinâmica, Teoria dos Grafos e Redes de Fluxo, eles se diferenciam pelo tempo de processamento demandado e pela capacidade de memória RAM necessária, porém conduzem a um mesmo resultado final.

2.3. Parametrização Técnica de Reservas

Foi concebido por G.Matheron, que separou a parametrização técnica da avaliação econômica: numa primeira etapa as geometrias são pré selecionadas e, posteriormente são avaliadas do ponto de vista econômico/financeiro. O algoritmo que permite a aplicação desta técnica foi concebido por Bongarçon e Marechal (1976) e é conhecido como Algoritmo de Bongarçon.

As técnicas clássicas apresentadas nos itens 2.1. e 2.2., tomam como informação para a otimização da geometria da cava o valor econômico de cada bloco, exigindo que a cada alteração dos fatores econômicos, que não são pouco frequentes, novos processamentos sejam realizados.

Ao contrário das técnicas de otimização clássicas a Parametrização Técnica trabalha a partir do conteúdo metálico recuperável de cada bloco de lavra e dos volumes de minério e estéril.

O modelo visa obter geometrias com diferentes volumes totais, maximizando seu conteúdo metálico em cada caso, ou seja num caso real é possível definir inúmeras cavas com mesmo volume V (minério + estéril), porém apenas uma delas maximiza a quantidade de metal contido recuperável.

Esse método adota a função:

$$K = Q - \lambda V - \theta T \quad (3)$$

para a valoração de cada bloco de lavra, onde Q é a quantidade de metal recuperável, V é o volume total (minério+estéril), T é o volume de minério e os dois

parâmetros técnicos λ e θ , que afetam a expressão, podem assumir valores quaisquer.

Segundo Dagdelen e Bongarçon (1982), os parâmetros λ e θ não devem ser entendidos como as relações entre custos e preços, mas como parâmetros de corte, fazendo com que a função K represente famílias de planos, tangentes à superfície formada pelas cavas de máximo metal recuperável.

A título de ilustração, a figura 7 mostra o universo de cavas de um depósito hipotético, onde cada cava é representada por seu volume total V e respectivo metal recuperável Q . A linha S representa as cavas de máximo metal recuperável, como aquelas de número 1,2,3,4 e 5, porém, somente as cavas 1,3 e 5 são otimizadas, pois encontram-se na envoltória convexa C , definida através variação dos parâmetros λ e θ .

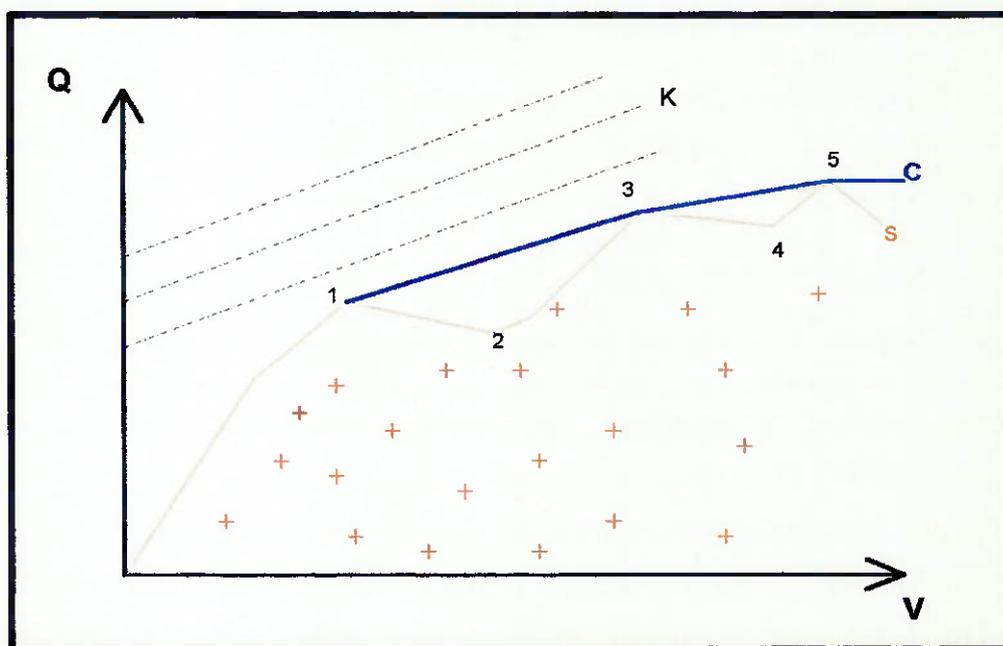


Fig. 7 Superfície C envoltória de máximos convexos.

Por outro lado, o valor de K conforme expresso em (3) tem todas as características de uma função benefício pois é inegável que é crescente com Q e é decrescente com V e T . Coléou (1989), chega a fazer analogia entre a expressão K

e a função benefício clássica, expressão (1) apresentada na introdução deste capítulo :

$$B = aQ - bV - cT$$

onde a é o preço unitário do metal, b custo unitário de extração e c o custo unitário de beneficiamento. Assim o parâmetro λ corresponderia aos possíveis valores a serem assumidos por b/a e θ corresponderia a c/a .

Seja qual for a interpretação dada aos parâmetros λ e θ , para cada par deles se estabelece uma cava otimizada, que é obtida pela aplicação do algoritmo de Lerchs-Grossman aos blocos de lavra valorados pela função K , ou pelo algoritmo de Bongarçon. Em qualquer dos casos obtém-se como resultado final um conjunto de cavas otimizadas subsequentes também denominados "nested pits", como aquelas mostradas na figura 8.

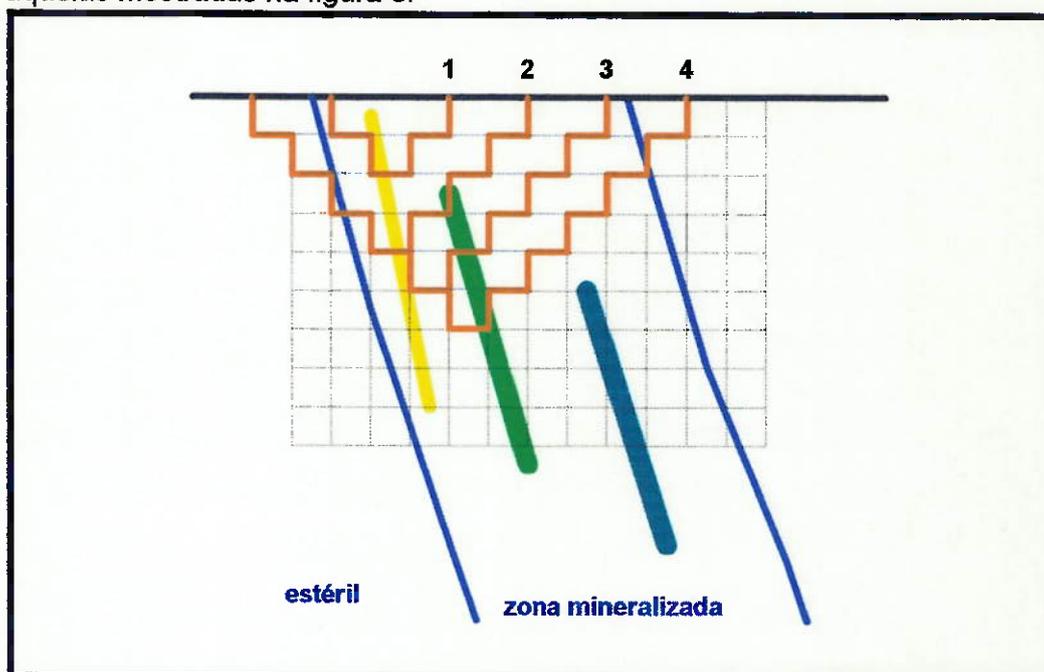


Fig. 8 Conjunto de cavas otimizadas .

Na etapa seguinte essas cavas otimizadas, de diferentes volumes V , serão avaliadas por critério econômico/financeiro finalizando assim a escolha da cava a ser seguida como meta de longo prazo .

3. Fatores Críticos de Sucesso

Como ocorre em outros casos similares, para a definição de uma GLLP otimizada não basta a aplicação de modelos matemáticos otimizantes. É de primordial importância a qualidade das informações de entrada, que representam os fatores que afetam o resultado a ser obtido. Como enfatizado no Capítulo 1 em função da influência que exercem sobre os resultados do negócio alguns desses fatores poderiam ser denominados Fatores Críticos de Sucesso (FCS) .

Fatores Críticos de Sucesso (FCS) é uma denominação utilizada para distinguir áreas ou atividades que são fundamentais para o êxito do empreendimento. Normalmente os FCS são caracterizados pela alavancagem que podem oferecer ao negócio caso nele sejam concentrados esforços, priorizando a aplicação, dos recursos em geral escassos. Este conceito se insere no ambiente do raciocínio estratégico visando colocar o negócio em vantagem competitiva .

Como nas demais atividades industriais, os FCS de empreendimentos mineiros são função de cada situação específica, porém, existe um conjunto de FCS básicos comuns à maioria das minerações, dentre eles se destacam os fatores : mercadológicos, geológico-geotécnicos, tecnológicos, econômicos e ambientais.

A escala de prioridade dependerá de cada situação particular em função do maior ou menor efeito sobre o desempenho do negócio, podendo ser alterada com o tempo, na medida que a sua dinâmica exigir a priorização de fatores que anteriormente eram secundários.

Especificamente, uma geometria de lavra de longo prazo pode, também, ser encarada como um FCS, na medida que permite à empresa definir diretrizes para o seu planejamento de curto, médio e longo prazo, com a especial particularidade que para sua definição se faz necessária a integração de informações dos demais FCS já citados.

3.1. Fatores Mercadológicos

O mercado consumidor é sem dúvida um dos fatores mais importantes em qualquer empreendimento; é dele que advem as necessidades dos clientes e portanto as oportunidades de produção e venda. Sem ele não há negócio, num caso extremo podemos até dizer que não há mina. Mesmo que tenha todas as demais condições favoráveis: teores elevados, relação estéril/minério reduzida, tecnologia de beneficiamento dominada, localização privilegiada, custos competitivos, pouco valem se não houverem condições de mercado favoráveis seja quanto a volumes, preços de venda, impostos e conformidade do produto quanto às especificações e expectativas dos clientes.

Por ser um fator de pouco controle agrega um certo grau de incerteza quanto a determinação de seus parâmetros, muitos dos quais baseados em cenários e projeções, sobre as quais não há garantia que se transformarão em realidade.

Tanto volume, preços e especificações são afetados pela dinâmica macroeconômica nacional e internacional. Portanto, espera-se que sofram variações significativas ao longo da vida da mina, sendo um dos motivos mais convincentes para que se façam planejamentos flexíveis, e que se entenda o planejamento como uma ferramenta que facilite a adaptação do empreendimento às condições externas que lhe são impostas.

3.2. Fatores Geológicos

A montagem do modelo geológico é uma das etapas mais importantes e básicas do estudo de definição de GLLP; é a partir dele que serão conhecidos os aspectos da mineralização de relevante importância para o bom desenvolvimento do negócio. Essas características devem ser intimamente relacionadas com os condicionantes do processo de beneficiamento visando obter produtos que atendam às necessidades e expectativas do mercado consumidor, com a máxima recuperação dos minerais de minério.

Depois de conhecidas as relações entre a mineralização e seu controle estrutural ou litológico, e entre os diversos tipos de minério e o processo de beneficiamento, estabelece-se um modelo que seria melhor denominado de **geo-tecnológico**, pela impossibilidade de se dissociar estes dois aspectos.

Este trabalho deve ser conduzido conjunta e simultaneamente, pelas equipes responsáveis pela elaboração do modelo geológico, pelo planejamento de lavra e pelo desenvolvimento do processo de beneficiamento. Nele deverão ser evidenciadas as relações entre as tipologias de minério e o processo de beneficiamento de forma a adaptá-lo a cada tipologia, já que o inverso não é possível.

Cuidados especiais com a integração citada no parágrafo anterior evitará a ocorrência de conflitos futuros entre as operações de lavra e beneficiamento, e perda de reservas e rentabilidade, quando comparadas com as premissas adotadas na fase de viabilidade e de planejamento.

O conhecimento detalhado da variabilidade espacial de cada tipo de minério seja do ponto de vista de concentração de elementos de interesse econômico contido, seja do ponto de vista de diferente comportamento perante um determinado processo de beneficiamento, é desenvolvido através de estimativas realizadas por meio de amostragens. Neste ponto a utilização de métodos geoestatísticos são de extrema valia, conduzindo a estimações otimizadas, e também a avaliação dos erros envolvidos.

É dispensável enumerar as possíveis consequências indesejáveis que poderão advir da definição de uma GLLP sem um certo grau de certeza do modelo geo-tecnológico, ou a partir de estimações imprecisas.

3.3. Fatores Geotécnicos

O modelamento geomecânico é, para determinados maciços rochosos, tão importante quanto o modelamento geológico. E deve através da previsão do

comportamento geomecânico do maciço rochoso, definir qual a inclinação média a ser adotada para a escavação dos taludes finais.

Esta inclinação deve minimizar os riscos de escorregamentos da escavação, que além de colocar em perigo vidas humanas e equipamentos, paralizariam a produção por determinado período de tempo, e ao mesmo tempo minimizar os volumes de remoção de estéril.

A medida que se eleva o ângulo de talude final, ocorre redução significativa do volume de rocha estéril a ser removida e portanto reduz-se os custos de extração de minério, elevando-se a competitividade do negócio. Por outro lado com a elevação do ângulo de talude final o fator de segurança da escavação fica reduzido. Existe neste caso, portanto, o compromisso entre custos e segurança.

Como mostra a figura 9 a medida que se eleva o ângulo de talude β ocorre redução significativa do volume de rocha estéril a ser removida e portanto reduz-se os custos de extração de minério, elevando-se a competitividade do negócio.

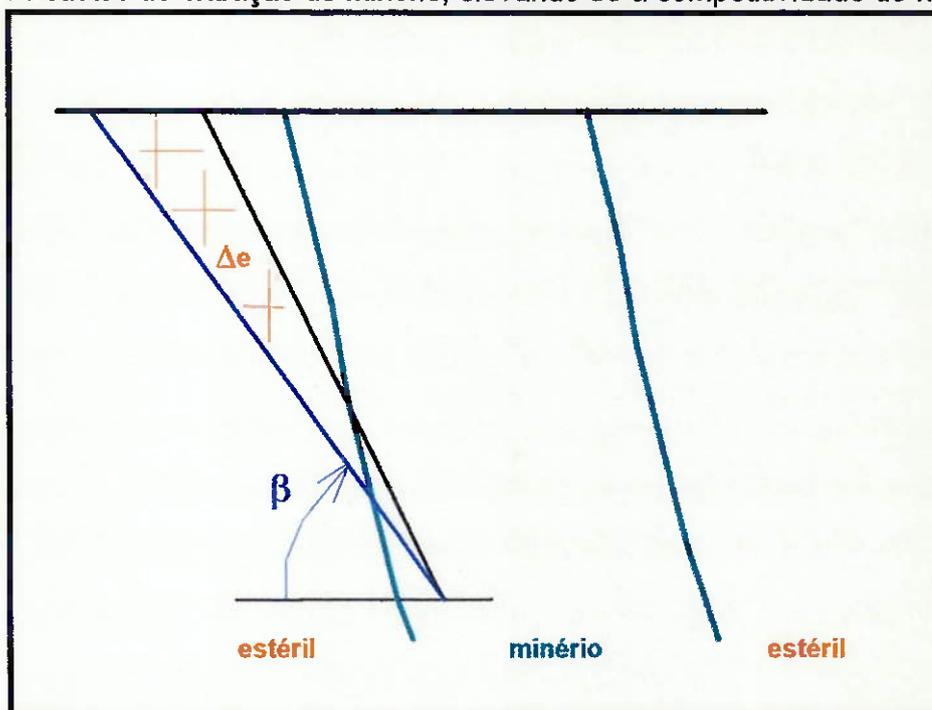


Fig. 9 Variação do volume de estéril em função do ângulo de talude

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.

A determinação do ângulo máximo e suficientemente seguro a ser praticado num talude final é objeto de estudos específicos que abrangem o entendimento do arcabouço estrutural do maciço, a caracterização geotécnica e o reconhecimento dos diversos tipos de maciços de acordo com o respectivo grau de alteração, fraturamento e condições de percolação da água subterrânea.

Dessa forma reúnem-se informações que permitem a estruturação de um modelo, capaz de representar o comportamento mecânico do maciço perante os esforços solicitantes, promovidos pela escavação nas diversas partes da mina.

Para a quantificação ou dimensionamento dos ângulos de taludes estão disponíveis no mercado inúmeros modelos matemáticos alguns determinísticos outros probabilísticos. Ambos baseados na teoria do equilíbrio limite, que relaciona esforços resistentes à mobilização do maciço com esforços mobilizantes, de forma a estabelecer um fator de segurança para uma dada geometria de talude. Como todo modelo matemático a representatividade do resultado final depende essencialmente da qualidade dos dados de entrada .

Normalmente numa mesma mina ocorrem porções de maciços com diferentes competências, as porções de maciço com comportamento mecânico semelhantes são agrupadas, dando origem a setorização dos taludes da mina.

A figura 10 apresenta um dos possíveis produtos finais de um estudo de dimensionamento de taludes onde está representada uma curva de estabilidade relacionando altura de talude com ângulo de talude e fator de segurança a ser adotado . Usualmente são adotados fatores de segurança entre 1,3 e 1,5 para taludes de minas porém estes valores podem sofrer variações de acordo com o grau de confiabilidade nas informações básicas.

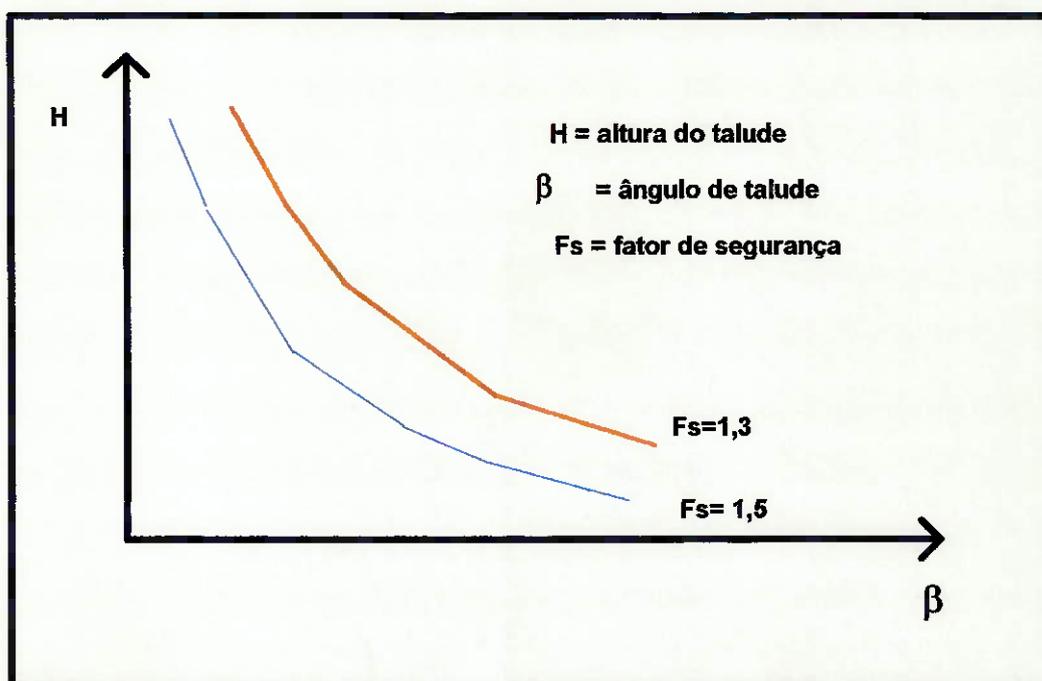


Fig. 10 Altura de talude em função do ângulo e do fator de segurança

Este trabalho deverá ter sua continuidade ao longo da vida da mina, quando o comportamento do maciço será melhor entendido através do monitoramento dos "ensaios" promovidos pela própria escavação, permitindo colher informações importantes para aprimorar o modelamento geomecânico.

3.4. Fatores Tecnológicos

O aspecto tecnológico é bastante amplo e afeta de diversas formas a competitividade do empreendimento mineiro, da mesma forma como em outros tipos de empreendimentos. Pelo menos três aspectos principais merecem destaque.

O primeiro diz respeito ao processo de beneficiamento que deve ser desenvolvido no sentido de maximizar a recuperação do mineral/is de interesse econômico e de forma a obter um concentrado que atenda às especificações do mercado consumidor. Sabe-se que nem todos os bens minerais se enquadram nesta situação, mas a grande maioria sem dúvida depende de algum tipo de beneficiamento, mesmo uma simples redução granulométrica.

Como já enfatizado no item 3.2., a prática tem demonstrado que o grau de conhecimento da relação entre os diversos tipos de minério que podem ocorrer numa mesma mina e o processo de beneficiamento mais adequado para obter-se um concentrado especificado, é um fator crítico de sucesso inquestionável. Essa importância se justifica não apenas pelo valor econômico das perdas de reservas que se supunha "vendáveis" mas, também, pela minimização de conflitos operacionais nas interfaces mina - usina de beneficiamento - clientes que acarretam desgastes cujos prejuízos são incalculáveis .

O segundo aspecto diz respeito à evolução tecnológica de equipamentos seja na lavra ou no beneficiamento. Neste ponto a história mostra que essa evolução traz frutos para indústria mineral, principalmente, quando o desenvolvimento é realizado em parceria com os fabricantes e adaptando-se os equipamentos às necessidades específicas.

Essa prática é normal em países do primeiro mundo onde existe uma forte relação de parceria entre mineradoras, fornecedores e centros de pesquisa, buscando soluções que minimizem custos de capital e operacional.

Aqui no Brasil, normalmente, perde-se mais tempo discutindo cláusulas contratuais, como prevenção contra futuros conflitos, do que realmente agindo no sentido de atender às necessidades dos clientes.

A formação de uma real parceria entre fabricantes, mineradores e centros de pesquisa, é fundamental para que sejam atingidos os padrões elevados de produtividade observados em outros países.

O terceiro aspecto relevante diz respeito à tecnologia de gestão que está intimamente ligada à cultura de cada empresa e ao seu estágio de maturidade. Nesse aspecto, a prática de técnicas de melhoria de produtividade/qualidade, fundamentada no treinamento, motivação e comprometimento de todos os níveis funcionais, trazem a médio/longo prazo melhorias contínuas dos resultados, dando

condições para que a empresa se mantenha competitiva, e para o crescimento humano de seus funcionários.

Cada vez mais as empresas tem priorizado os resultados de curto prazo em detrimento daqueles de longo prazo que são aqueles que mantem e garantem sobrevivência da empresa.

Quando uma empresa de mineração perde competitividade a ação dos gestores normalmente se faz no sentido de reduzir seus custos e os instrumentos mais imediatos são : lavrar minério com teores mais elevados implicando em redução do teor médio da reserva remanescente, e na redução da remoção de estéril , elevando a relação estéril/minério da reserva remanescente. Tais decisões devem ser tomadas prevendo-se a forma de reverter a situação num momento futuro e conduzidas dentro de um plano global que permita avaliar o acúmulo de necessidades futuras.

3.5 Condicionantes Operacionais

As restrições operacionais estão relacionadas com o espaço operacional exigido para que as operações de lavra sejam conduzidas com a segurança e produtividade com que foram projetadas, condicionadas pelo binômio: grau de seletividade necessário para o controle dos teores e porte dos equipamentos utilizados.

A definição de uma GLLP deve considerar a necessidade de manter-se bermas de largura mínima para permitir acesso de equipamentos para manutenção de drenagens e recomposição de pequenos escorregamentos, bem como permitir retomadas futuras destas paredes, ditas finais, em caso de alterações nos FCS.

Uma GLLP também deve prever espaço para as rampas de acesso aos diversos níveis de produção, que são dimensionadas de acordo com os equipamentos a serem utilizados, e desenvolvidas de forma a minimizar o momento de transporte entre as frentes de lavra e a britagem ou o bota-fora.

3.6. Fatores Economicos

Normalmente relacionado com os condicionantes de mercado, o preço do produto mineral vendável afeta de forma muito significativa a rentabilidade do empreendimento.

A elevação do preço, além de aumentar as receitas geradas a partir da mesma tonelagem produzida, também afeta o volume das reservas de minério, fazendo com que reservas com teores inferiores ou relação estéril / minério mais elevada, que não produziam resultados economicos, passem a produzi-los .

Os custos operacionais são fatores tão relevantes quanto o preço do produto final, porém, variam numa faixa mais estreita de valores e dependem mais das condições internas da empresa do que externas, o que facilita sua estimação . Entretanto guardam relação estreita com escala de produção, que por sua vez é vinculada ao mercado.

Da mesma forma como os fatores mercadológicos, os fatores economicos dependem de uma série de condições macroeconômicas, cujas evoluções futuras são de difícil previsão e normalmente estimadas a partir de informações históricas associadas a cenários macroeconomicos futuros .

São fatores de determinação incerta e de elevada sensibilidade do projeto, exigindo que não sejam encarados de forma determinística, sendo recomendável a realização de análises de sensibilidade, de acordo com os cenários esperados .

A escolha de critérios financeiros para a avaliação de uma GLLP, normalmente, afetados pelas taxas de juros do mercado financeiro e por prazos de retorno do capital investido definidos conforme as expectativas com relação aos riscos políticos e economicos futuros, tem grande influência na tomada de decisão podendo inclusive inviabilizar parte das reservas geológicas que seriam viáveis caso estes critérios fossem menos imediatistas.

Como nas demais atividades econômicas a carga tributária afeta diretamente a competitividade das empresas de mineração de um modo geral e

particularmente aquelas que competem no mercado internacional, sendo mais um elemento inviabilizador de reservas geológicas pela redução da receita unitária líquida.

3.7. Condicionantes Ambientais

É um aspecto relevante atualmente devido à grande divulgação e conscientização pública sobre a importância da preservação ambiental e da qualidade de vida, tendo como consequência o avanço das exigências de ordem legal, que foram impostas às atividades industriais e especificamente para a indústria mineral.

A indústria mineral tem sido responsabilizada por danos ao meio-ambiente em diversas partes da Terra, e em muitos desses casos até com a devida razão. De modo geral a mineração é vista pelo público, como atividade exploratória clandestina, sinônimo de garimpo, imagem que é reforçada pelos meios de comunicação.

Também tem contribuído para esta imagem, a demora de alguns empreendedores em mudar de posição e assimilar a necessidade de compatibilizar, a atividade mineral com os cuidados com o meio ambiente, principalmente aqueles que dizem respeito à mitigação de impactos sobre a comunidade vizinha.

Em termos estritamente econômicos, as adequações ambientais implicam em investimentos e custos operacionais adicionais, que devem obrigatoriamente ser incluídos nos estudos de viabilidade econômica e de definição da cava de longo prazo sob pena de não vir a representar a realidade futura.

Por outro lado não há dúvida que os custos ambientais, cada vez mais passarão a compor as planilhas de custos e conseqüentemente serão repassados para os preços dos produtos.

Um aspecto diretamente relacionado com a geometria de lavra de longo prazo diz respeito aos limites das áreas a serem atingidas pela escavação e portanto sujeitas a desmatamentos e posterior recuperação. Dependendo do comportamento

especial do corpo mineralizado e da variação temporal dos parâmetros que a definiram, esse perímetro afetado pela GLLP, pode sofrer expansões ou contrações, que devem ser explicitadas na elaboração do estudos de impacto ambiental.

4. Metodologia proposta para seleção de uma GLLP

O aproveitamento de um recurso mineral deve atender às necessidades de diversos públicos interessados no negócio, principalmente os acionistas que terão com certo grau de certeza o retorno sobre o capital aplicado, atendendo às suas expectativas. Assim uma metodologia que se destina a definir uma GLLP deve garantir pelo menos os seguintes aspectos:

- . Rentabilidade do negócio conforme expectativa dos acionistas.
- . Qualidade do produto desejada pelos futuros clientes
- . Estabilidade da escavação e segurança operacional
- . Flexibilidade perante mudanças de premissas
- . Maximização do aproveitamento das reservas geológicas
- . Mitigação dos impactos ambientais sobre a área de influência do projeto
- . Operacionalização da mina

As macro-etapas propostas, para o processo de definição de uma GLLP, a serem desenvolvidas são as seguintes:

- . Consolidação dos fatores críticos de sucesso - Modelagem
- . Geração de geometrias otimizadas
- . Definição dos critérios de avaliação
- . Definição da sequência de lavra
- . Avaliação das geometrias otimizadas por indicadores de desempenho
- . Operacionalização da cava selecionada
- . Aperfeiçoamento contínuo dos modelos adotados e reavaliação periódica

4.1. Consolidação dos fatores críticos de sucesso - Modelagem

Esta etapa tem como objetivo validar os modelos geológicos, geotécnicos, tecnológicos e economicos/mercadológicos. Normalmente realizada em conjunto

com especialistas /consultores de experiência comprovada em casos anteriores, não tem o caráter de auditoria, mas, sim de certificação e aprimoramento.

Pela natureza do problema é normal que existam diferenças entre os modelos e a realidade, porém, para passar-se às etapas seguintes de quantificação se faz necessário minimizar a chance de ocorrerem desvios importantes, que conduziram a resultados falsos e decisões equivocadas.

Nos casos em que persistirem dúvidas sobre determinados parâmetros deve-se lançar mão de análises de sensibilidade probabilísticas afim de avaliar a dimensão de seus efeitos, podendo em alguns casos, justificar investimentos para a minimização das incertezas. Os artigos de Nagle (1988) e Zhang et alli (1992) descrevem com detalhe este tipo de análise com enfoque de probabilidade de sucesso ou de fracasso de um empreendimento mineiro.

Dentre os inúmeros aspectos que devem ser avaliados alguns merecem destaque e são relacionados a seguir:

- método utilizado para estimação dos teores e demais características da mineralização, densidade e qualidade dos dados, distribuição dos erros de estimação, dimensões dos blocos estimados, recuperação dos testemunhos de sondagem, critérios de amostragem,

- relação entre recuperação do/s processo/s de beneficiamento e teores/ tipologias de minério/s, analogia com casos semelhantes, implicações sobre o método de lavra, representatividade das amostras utilizadas para ensaios de processo, qualidade do/s produto/s obtido/s, presença de contaminantes, características dos rejeitos tanto do ponto de vista de disposição final, quanto para a respectiva utilização futura, diluição esperada,

- coerência entre o modelo geomecânico, caracterização do maciço, modelo estrutural e os tipos de fenômenos de ruptura considerados, número de ensaios realizados em cada tipo de maciço e respectiva dispersão dos resultados, setorização dos diferentes maciços presentes, consideração quanto ao

comportamento da água e sua influência, plano de monitoramento, fatores de segurança adotados, sensibilidade da relação estéril/minério em relação ao ângulo de talude,

- compatibilidade entre premissas assumidas quanto ao trinômio escala - investimentos - custos, com cuidados especiais com as escalas não convencionais que podem levar a uma deseconomia de escala, em função de equipamentos fora de série e maiores prazos de implantação,

- considerações sobre a localização, infra-estrutura, investimentos x nível de detalhamento de projeto, investimentos em meio ambiente,

- cenários macroeconomicos da evolução dos preços e dos volumes a serem comercializados, comparação com valores históricos,

- restrições ambientais na área do projeto e proximidades, estimativa de custos ambientais principalmente aqueles de encerramento da atividade,

- consideração sobre processos de beneficiamento diferenciados com respectivos custos para cada tipo de minério,

- consideração sobre tecnologias de lavra redutoras de custos operacionais como a britagem móvel ou semi-móvel.

4.2. Geração de geometrias otimizadas

Nesta etapa de geração de geometrias, admite-se que os modelos básicos estão consolidados e que se dispõe de recursos computacionais (hardware e software) adequados; caso não se disponha destes recursos pode-se partir para alternativa de compra de serviços, que devem ser realizados com total supervisão do interessado.

Os softwares comerciais para modelagem e otimização devem ser utilizados como ferramenta de agilização e precisão, os conceitos envolvidos precisam ser de domínio do usuário de forma a permitir avaliação crítica e a análise da coerência dos resultados. Nesse ponto a experiência anterior em métodos convencionais (manuais

ou semi-automáticos) permitirá utilizar os recursos computacionais na sua plenitude, gerando com rapidez um número adequado de alternativas, reservando tempo ao planejador para analisar e avaliar os resultados obtidos.

Geometrias de lavra otimizadas podem ser obtidas por diversos métodos, conforme apresentado no capítulo 2; dentre eles se destaca a Parametrização Técnica de Reservas cujos conceitos apresentam vantagens inequívocas sobre as demais técnicas.

O rigor matemático do algoritmo de Bongarçon baseado na Análise Convexa, garante a obtenção de soluções de qualidade inquestionável, desde que as informações de entrada também o sejam.

A principal característica do método é a separação entre a análise técnica e a análise econômica. Como produto são obtidas várias geometrias de cavas notáveis, localizadas na envoltória convexa apresentada no Capítulo 2, mesmo que os parâmetros econômicos ainda não estejam totalmente definidos. Essa característica agiliza as reavaliações, decorrentes das mudanças no cenário econômico, pois as cavas otimizadas obtidas pela Parametrização Técnica não se alteram com as variações desses parâmetros.

O algoritmo está disponível em dois dos softwares comercializados para modelagem de jazidas; apesar dessa limitação a aplicação dos conceitos dessa técnica não exige que seja utilizado o algoritmo especificamente, que, sem dúvida apresenta vantagem sobre os demais devido a rapidez e rigor; assim é possível atingir os mesmos resultados utilizando-se o algoritmo de Lerchs-Grossman modificado, porém, com maior dispêndio de esforço e tempo.

4.3 Definição dos critérios de avaliação

Nessa outra etapa objetiva-se definir os critérios para avaliar, economicamente, as cavas previamente otimizadas pelo Algoritmo de Bongarçon.

Os critérios mais utilizados pela indústria mineral são : valor máximo do benefício econômico contido (VCMAX) e o valor presente máximo do benefício econômico (VPMAX); adicionalmente reservas e vida útil, também, são utilizadas como critérios de decisão.

O critério de VCMAX é definido pela somatória do valor da função benefício econômico de cada bloco incluso na geometria em análise; essa função deve ser definida para cada situação específica, pela expressão (1) :

$$B = aQ - bV - cT$$

onde **B** é o valor do benefício, **Q** é a quantidade de metal contido vendável, **V** é a tonelagem do bloco, **T** é a tonelagem de minério contida no bloco, **a** é o preço unitário do metal, **b** custo unitário de extração e **c** o custo unitário de beneficiamento. A figura 11 mostra a variação de VCMAX para cada cava em análise: nesse exemplo, por esse critério, a cava 4 seria a escolhida como GLLP.

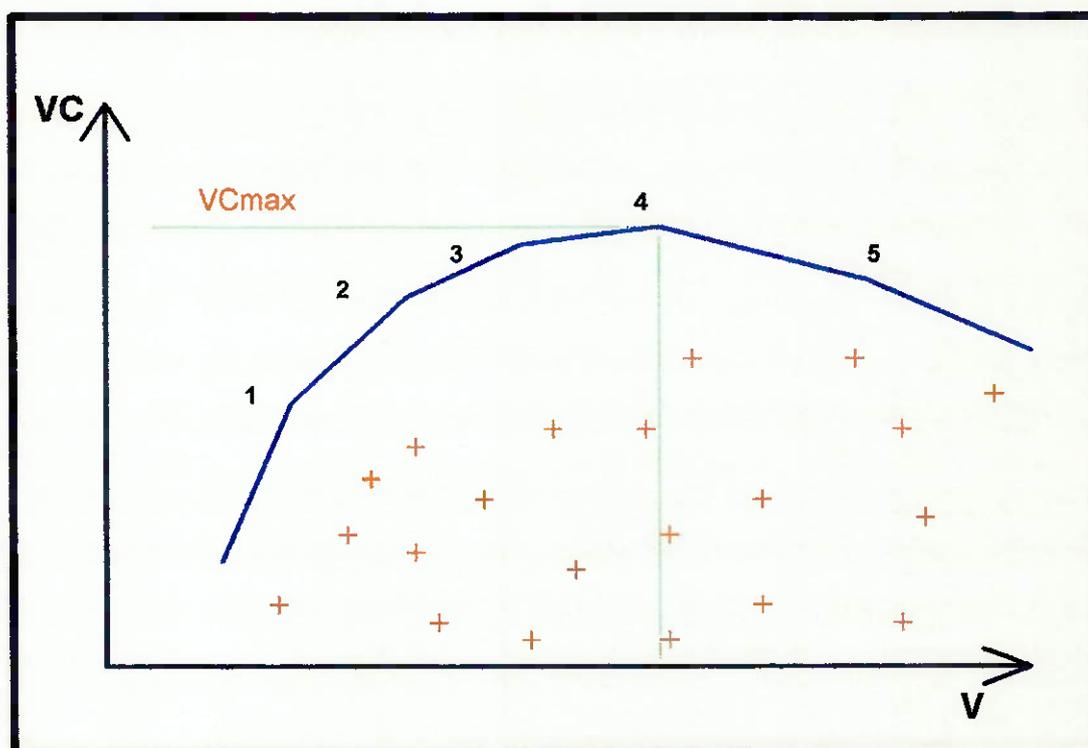


Fig. 11 Valor contido em função do volume total .

A cava de VCMAX deve ser entendida como aquela que maximiza a recuperação das reservas econômicas, ou seja reservas que se extraídas geram lucro. Sendo assim interessam tanto à empresa que detem os direitos minerários, quanto à sociedade como um todo, que se beneficiará com os impostos e empregos gerados pela sua extração; portanto, a cava de VCMAX deve ser aquela considerada como objetivo de longo prazo (GLLP).

Porém, o critério de VCMAX pode não garantir o retorno sobre o capital investido para implantação do empreendimento, pois equivale ao resultado obtido caso a lavra ocorresse instantaneamente ou ao critério VPMAX, com taxa de juros nula.

O critério VPMAX leva em conta o valor da moeda submetida a uma taxa de juros no tempo, e objetiva maximizar o valor presente dos fluxos de caixa gerados. A busca de aumento de rentabilidade a curtíssimo prazo e a elevação das taxas de juros reais, fêz deste critério o mais utilizado pela indústria mineral, e inclusive recomendado por autores como Whittle (1992).

O critério VPMAX, de maneira geral, é antagônico ao VCMAX. favorecendo cavas de menor volume e de teor médio mais elevado, pois os fatores de atualização de capital são decrescentes com o tempo, gerando valores presentes decrescentes dos fluxos futuros. Por exemplo, fluxos gerados após 10 anos à taxa de 10% ao ano, passam a valer apenas um terço de seu valor absoluto. Neste caso tem-se, como consequência, a perda das reservas remanescentes entre VPMAX e VCMAX, antes mesmo da lavra se iniciar.

O critério de VPMAX deve ser entendido e utilizado para definir as reservas que serão responsáveis pelo retorno do capital e pela consolidação do empreendimento e, não necessariamente a cava final. Especial atenção deve ser dispensada para a viabilização futura das reservas remanescentes entre VCMAX e VPMAX, pois seu valor econômico é positivo.

Além dos pontos ressaltados no parágrafo anterior, a aplicação correta do critério VP_{MAX} exige que os seguintes cuidados sejam tomados afim de tornar a análise mais próxima da realidade e não apenas um mero exercício de matemática financeira:

- definir a escala de produção e os respectivos investimentos, re-investimentos e custos operacionais, pois existe uma combinação ótima entre escala, investimentos e custos, para cada cava analisada.

- estabelecer a sequência de lavra de cada geometria em estudo, de forma a não interferir no resultado final e que seja exequível na prática, porque o resultado de VP é muito influenciado pela sequência de lavra, conforme descrito no item 4.4.

- considerar o custo de encerramento da atividade, principalmente, os ambientais referentes à recuperação de áreas degradadas e outros passivos ambientais, que podem atingir cifras significativas.

- como o valor presente é função da taxa de juros é importante avaliar seu comportamento, permitindo a análise mais detalhada dos resultados. A figura 12 ilustra situação onde a cava VP_{MAX} é muito sensível à taxa de juros selecionada.

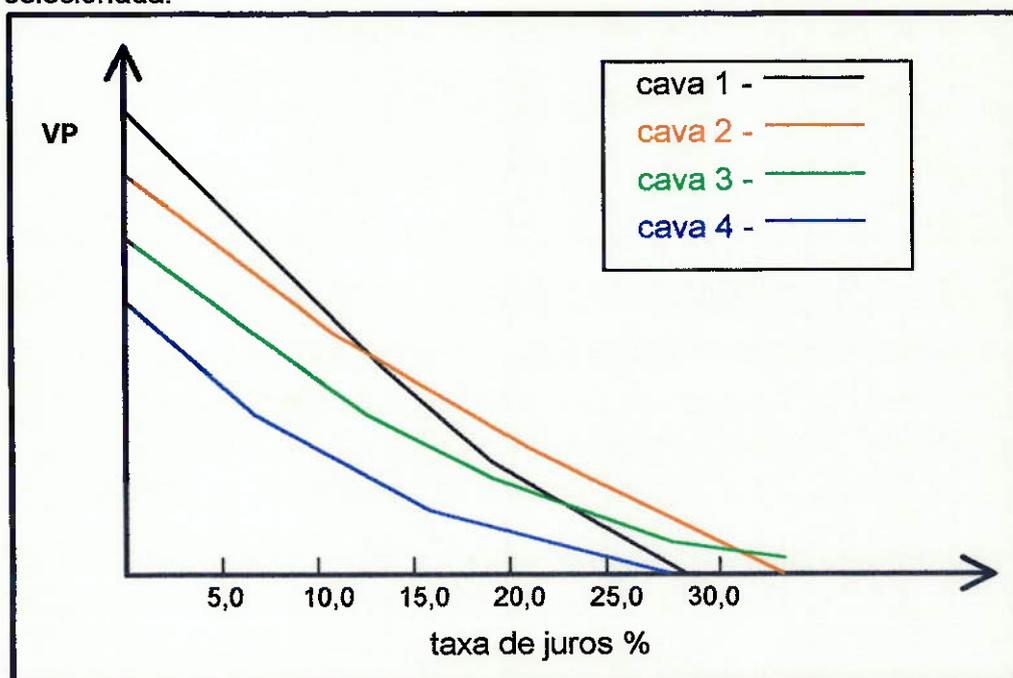


Fig. 12 Valor Presente em função da taxa de juros

Um indicador que também auxilia a tomada de decisão é o da rentabilidade média anual. Ele relaciona o fluxo líquido gerado anualmente e o montante de capital atualizado que ainda não retornou (Fluxo / Capital). Sendo definido dessa forma ele estima qual será a rentabilidade do capital aplicado remanescente a cada ano, permitindo analisar os resultados anuais discretizados da atividade, ao longo do tempo, sem o efeito da taxa de juros.

A figura 13 apresenta a composição de um fluxo de caixa típico, simplificado para o cálculo de VP para um caso hipotético analisado.

	ano 1	2	3	4	5	6	7
Parâmetros técnicos:							
1. Vendas (kg)				30000	36000	41400	46000
2. Produção de Minério (1000 t)				5000	6000	7000	8000
3. Teor Médio (%)				0,75	0,75	0,74	0,72
4. Remoção de Estéril (1000 t)		2000	2000	2000	3000	3000	4000
Fluxo de caixa:							
1. Investimentos (US\$ x 10 ⁶)	65	87	75				5
2. Receita líquida (US\$ x 10 ⁶)				200	240	276	306
3. Custos operacionais				92	108	122	119
4. Resultado operacional (2 - 3)				108	132	154	187
5. Depreciação				35	35	35	35
6. Lucro Tributável (4 - 5)				73	97	119	152
7. Impostos				40	54	65	84
8. Lucro líquido (6 - 7)				33	43	54	68
9. Recup. C.Giro e V.Resid.							
10. Fluxo de caixa (8 + 9 + 5 - 1)	-65	-87	-75	68	78	89	98
11. Capital remanescente				300	270	220	155
12. Fluxo / Capital (10 / 11)				0,23	0,29	0,4	0,63
13. Valor presente (15%)	-13						

Fig. 13 Fluxo de caixa típico simplificado

4.4 Sequência de Lavra

A sequência de lavra objetiva estabelecer a estratégia de escavação que garanta: o número de frentes em lavra simultaneamente de forma atender as exigências de produção, "estacionarização" de parâmetros (teores/tipologias de minério) para a planta de beneficiamento, remoção de estéril de forma a liberar reservas e, ao mesmo tempo, garantir espaço operacional adequado para manutenção das condições de segurança e produtividade.

Mais uma vez os conceitos da Parametrização Técnica de Reservas facilitam a definição de um critério para estabelecer a sequência de lavra, devido a subdivisão das reservas em porções, cavas notáveis, que podem servir de guia para a sequência.

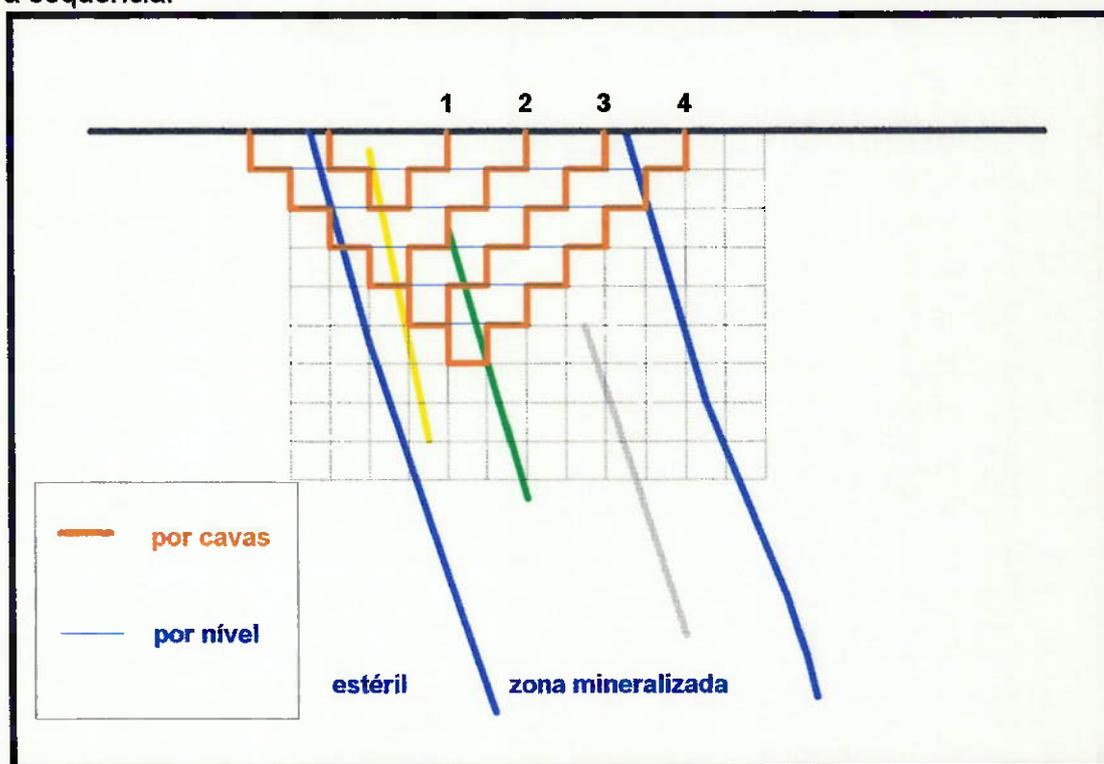


Fig. 14 Sequências de lavra extremas.

Como mostrado nas figuras 14 e 15 existem duas sequências extremas: a de número 1 que é definida passando-se por cada cava otimizada a partir da primeira, e a sequência 2 definida pela lavra por nível, onde cada nível é esgotado antes do início da lavra do nível subsequente. Essas duas estratégias diferem na velocidade

de remoção de estéril e evolução do teor médio, provocando diferenças sensíveis no fluxo de caixa do negócio.

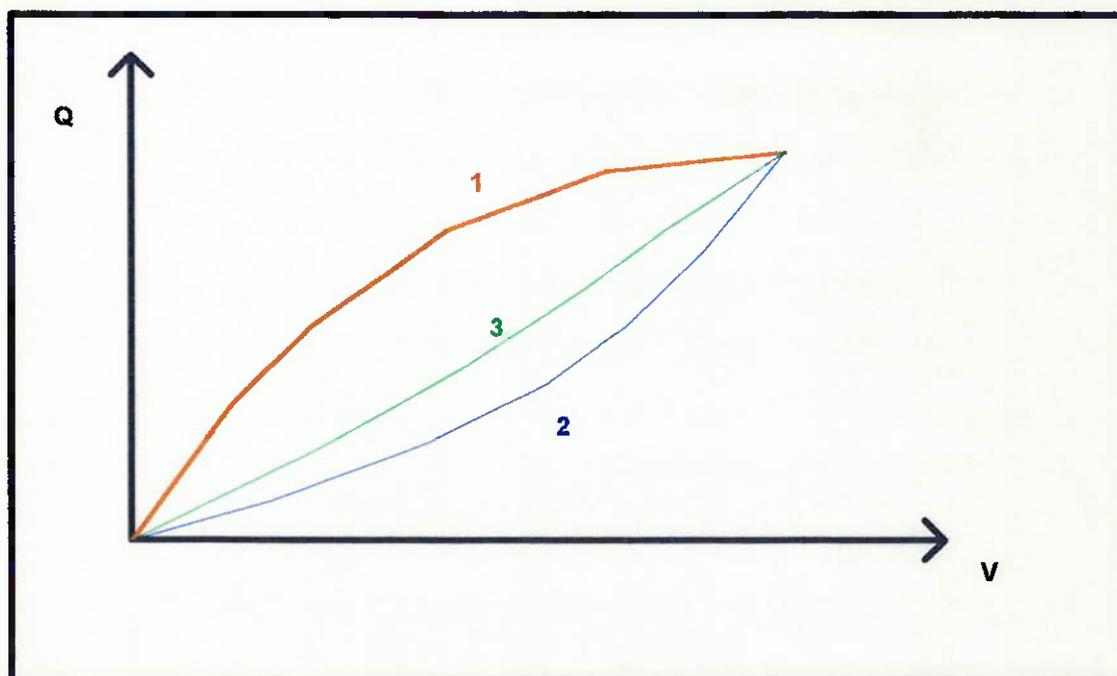


Fig. 15 Alternativas de sequência de lavra.

Do ponto de vista estritamente financeiro, a primeira estratégia apresenta melhores resultados pelo adiamento de custos de remoção de estéril e antecipação de resultados pela lavra com teores de corte decrescentes. Porém esse critério pode vir a ser conflitante com a necessidade operacional relativa ao número de frentes disponíveis com materiais distintos que permitam a manutenção da "estacionarização" conforme especificado pelo processo de beneficiamento e com as condições de espaço operacional para que os custos e a produtividade não sejam afetados negativamente. A complexidade do problema pode atingir maiores proporções se houverem tipologias diferentes perante às exigências de processo de beneficiamento .

O compromisso entre os diversos requisitos citados deve estabelecer uma sequência intermediária como, por exemplo, a de número 3 que atenda de forma satisfatória às necessidades operacionais sem comprometer o fluxo de caixa da

empresa . Um dos caminhos para sua definição é o de simulações, servindo-se das cavas otimizadas como guia para o sequenciamento da lavra.

4.5 Avaliação das geometrias otimizadas

Considerando-se os critérios de avaliação discutidos em 4.3 : VCMAX, VPMAX, reservas, vida útil, fluxo / capital, propõe-se uma sequência de etapas para a quantificação econômica das cavas em análise, apresentada na figura 16 onde destacam-se os seguintes pontos :

1. a partir de cenários de mercado estabelecer alternativas de escala de produção, e os respectivos investimentos, re-investimentos, custos operacionais, preços, cronogramas de implantação, curvas de aprendizado e valores residuais,
2. para cada alternativa citada no item 1 definir a sequência de lavra para cada uma das geometrias otimizadas.
3. montar o fluxo de caixa completo de cada geometria e calcular VC , VP em função da taxa de atratividade, evolução do indicador de rentabilidade média anual fluxo/capital.
4. calcular o VF ou VP das reservas remanescentes entre cada cava analisada e a cava VCMAX.

De posse dessas informações os decisores estarão em condições de decidir sobre a viabilidade do negócio, qual das geometrias escolher como GLLP e a respectiva escala de produção e nível de investimento. Essa decisão será fortemente influenciada pelo capital disponível e pela política da empresa quanto ao retorno do capital investido .

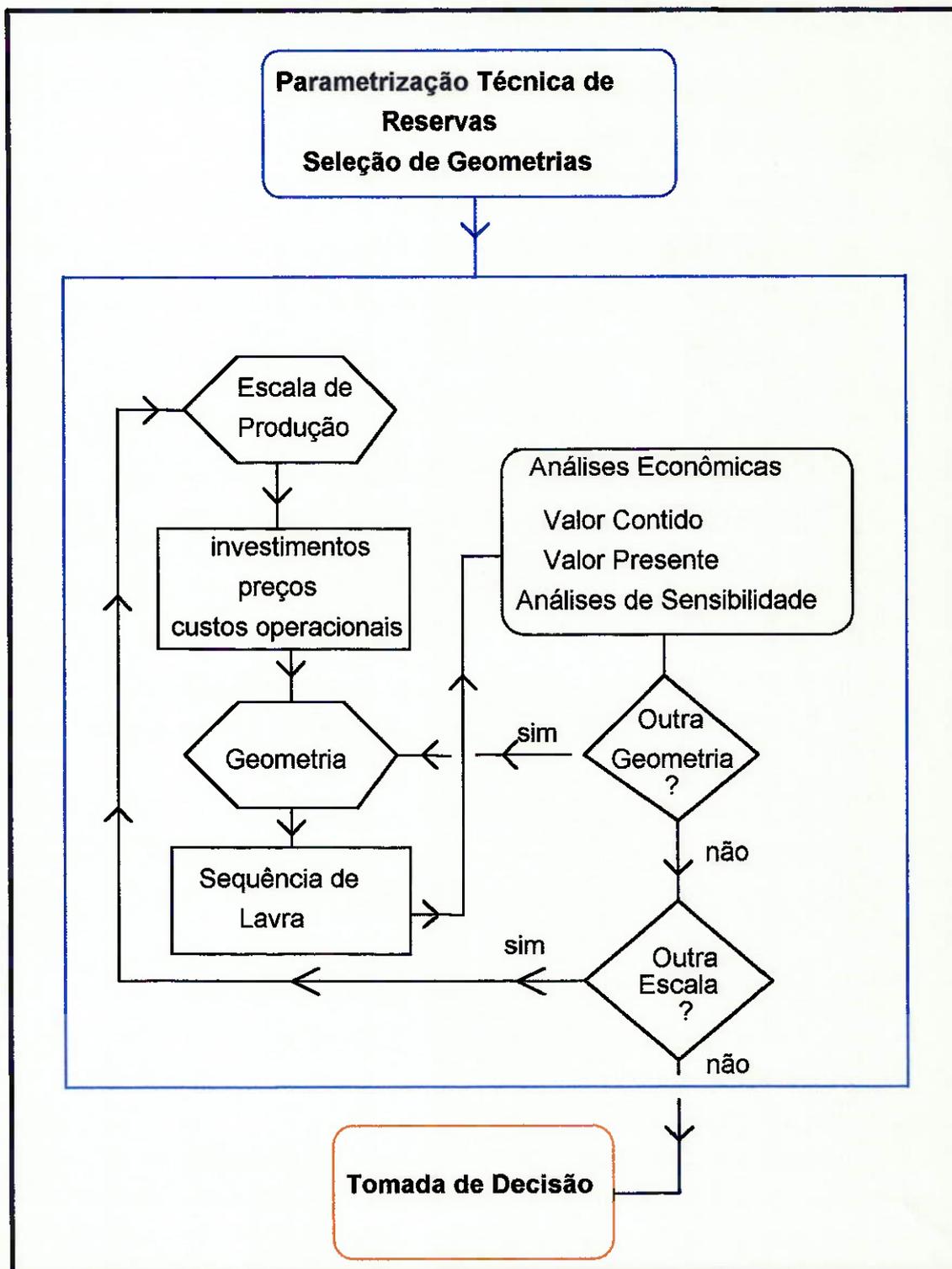


Fig. 16 Etapas para avaliação das cavas notáveis.

Além de submeter-se as cavas notáveis ao conjunto de critérios sugeridos no item 4.3 deste capítulo, é indicado que tanto os parâmetros econômicos quanto

os técnicos sobre os quais residirem incertezas ou faixas de variação, sejam submetidos à análise de sensibilidade, considerando-se a probabilidade de ocorrerem. Dessa forma será possível associar a cada indicador de desempenho uma curva de distribuição de probabilidade.

Para parâmetros que podem assumir valores pré-definidos, com a mesma chance de ocorrer, a análise de sensibilidade passará a ser determinística.

As análises de sensibilidade são normalmente realizadas através do método de Monte Carlo, que nada mais é do que submeter uma curva de distribuição de probabilidades acumulada a um sorteio randômico; a figura 17 mostra o caso de uma distribuição de probabilidade acumulada relativa aos custos de lavra.

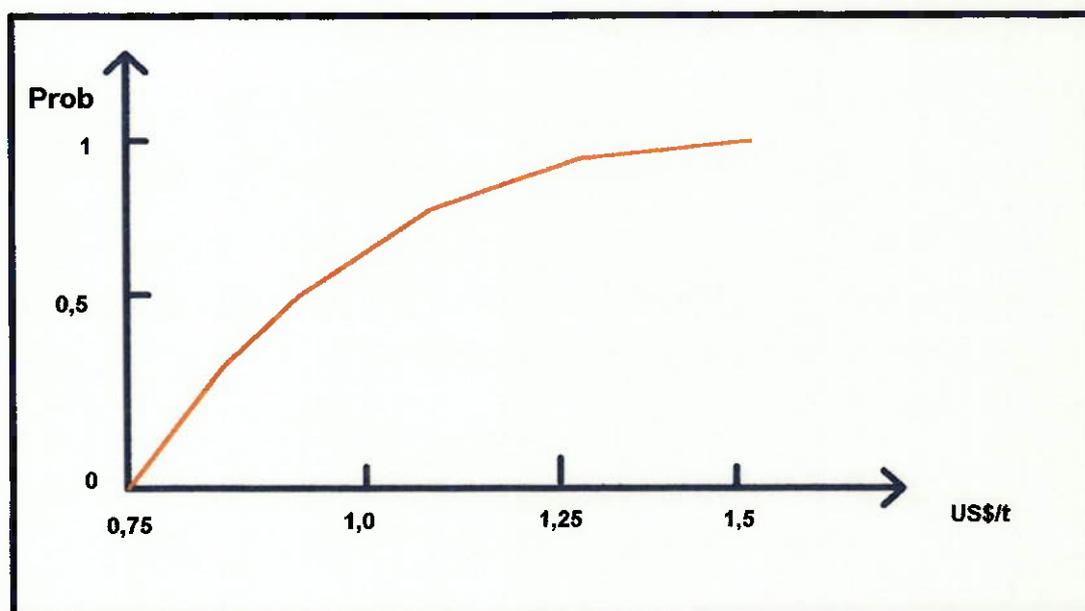


Fig. 17 Distribuição de probabilidade acumulada do custo de lavra

A análise de sensibilidade probabilística exige cuidados com : a escolha da distribuição de probabilidade para cada variável; o grau de desagregação da variáveis, pois quanto maior o desmembramento das variáveis maior a chance de ocorrer correlação entre elas, e a própria dependência entre variáveis que algumas vezes não é explícita. Por essas razões muitas vezes é dada preferência a análises

determinísticas avaliando-se a influência sobre os resultados provocada pela variação dos parâmetros críticos entre -20% e 20% .

Os resultados obtidos podem ser otimizados pela adoção de teores de corte para as geometrias em análise. Dessa forma os blocos mineralizados que tiverem valor econômico negativo devem ser reanalisados e verificada a viabilidade econômica de serem beneficiados. Caso não gerem receita suficiente para pagar os custos de beneficiamento, receita e custos de beneficiamento devem ser retirados do valor do bloco, incorrendo-se apenas no custo de extração .

Este procedimento eleva tanto o valor contido quanto o valor presente dos projetos, porém, os teores de corte a serem adotados devem ser aferidos e atualizados durante a operação, pois os preços, custos e teores podem num caso real variar significativamente com relação ao planejado.

A maior dificuldade na aplicação correta deste conceito está na estimação de teores dos blocos de lavra a nível da Unidade de Seletividade de Lavra (USL) , que corresponde ao volume sobre o qual é possível extrair-se separadamente diferentes tipologias de minério e estéril, considerando-se um determinado porte de equipamentos. O volume da USL é muito inferior ao volume dos blocos utilizados nos modelos de otimização de cavas, implicando na elevação dos erros de estimação.

Assim recomenda-se que a otimização de resultados econômicos através da adoção de teores de cortes seja realizada na etapa operacional utilizando-se as técnicas de pré-lavra, para reduzir-se os erros de estimação de teores.

4.6 Operacionalização da cava selecionada

Até essa etapa as geometrias analisadas não estão detalhadas no sentido de mostrar as bancadas de lavra, rampas de acesso , drenagens, locação de instalações de britagem e bombeamento de água . Isto significa que a cava escolhida deverá sofrer algumas modificações para permitir a implantação.

Essas alterações não influenciam significativamente os volumes envolvidos uma vez que a inserção de rampas e bermas é feita mantendo-se os ângulos médios de talude.

O traçado das rampas de acesso à britagem ou ao bota-fora deve ser de tal forma a minimizar o momento de transporte, ou seja as rampas operacionais devem passar o mais próximo possível do centro de massa de cada nível de lavra.

A largura das rampas e das bermas operacionais devem ser compatíveis com o porte dos equipamentos utilizados, e são vitais para atingir-se os níveis de produtividade e ,consequentemente, os custos projetados.

A largura das bermas finais estão relacionadas com o ângulo médio de talude definido por critério geotécnico, existindo em cada caso uma largura mínima que permite o acesso para a manutenção dos taludes e drenagens .

Cuidados devem ser tomados quando utilizam-se softwares para geração automática de rampas, pois alguns deles reduz o ângulo médio de talude elevando a relação estéril/minério.

4.7 Processo de melhoria contínua

Devido a própria natureza do problema, durante a lavra se faz necessário o acompanhamento das frentes em produção com a finalidade de confirmar ou aperfeiçoar as estimativas sobre as informações geológicas de interesse para o processo de beneficiamento e ao mesmo tempo avaliar o desempenho do processo. Neste item as técnicas de pré-lavra são ferramentas importantes para a estimação dos parâmetros de interesse, aperfeiçoando o modelo geo-tecnológico.

A escavação do maciço permitirá melhorar o conhecimento sobre seu comportamento geomecânico e aperfeiçoar o modelo geotécnico, confirmando ou não as premissas adotadas quanto ao grau de fraturamento, os condicionantes estruturais de instabilidade, e a setorização da mina.

Simultaneamente, os custos operacionais devem ser medidos da forma mais precisa possível evitando-se rateios, ou seja, que cada operação tenha seus custos e produtividade alocados corretamente, não dando margem a distorções que acabariam por impedir tanto a localização de desvios com relação ao planejado, quanto as ações de redução de custos.

Com relação aos parâmetros de mercado resta aprender a agir de forma a minimizar os riscos provenientes da redução de volumes e preços , e maximizar os benefícios do aumento destes parâmetros, sem prejuízo das reservas de minério e, conseqüentemente, da vida do empreendimento. Para isso se faz necessário que se estabeleçam políticas de planejamento de lavra coerentes com a GLLP e levando-se em consideração as variações de mercado, garantindo-se a rentabilidade no curto prazo, sem prejuízo do valor futuro das reservas remanescentes .

5. Considerações finais

A viabilização técnica e econômica de um projeto de aproveitamento de um depósito mineral, é função de um universo de aspectos mais amplo e complexo, daqueles considerados na análise de viabilidade de empreendimentos de outros ramos da atividade econômica.

No caso de um depósito mineral essa análise apresenta complexidade adicional, intimamente relacionada com a origem da acumulação mineral, que condiciona a variabilidade de feições naturais, que podem, por sua vez, impor incertezas a uma parcela significativa dos FCS.

Para redução dos efeitos dessas incertezas exige-se que as estimativas dos parâmetros naturais sejam feitas através de técnicas apropriadas de estimação, e que a integração de informações das diversas disciplinas envolvidas seja realizada de forma coordenada entre as equipes participantes do projeto.

A metodologia proposta para definição da GLLP proporciona a minimização dos riscos envolvidos levando à tomada de decisão consciente e baseada em critérios objetivos e quantificáveis. Esse resultado é obtido simulando-se as condições nas quais o empreendimento estará submetido, e fornecendo um elenco de cavas alternativas com seus respectivos indicadores de desempenho.

Salienta-se que na etapa de execução é necessário o acompanhamento operacional da lavra, das condições de mercado e demais FCS, atualizando-se os modelos adotados na fase de planejamento e permitindo a correção de rumo no caso de alteração significativa das premissas assumidas.

Finalizando espera-se que os conceitos e métodos discutidos neste trabalho venham a ser aplicados e complementados nos seus diversos aspectos uma vez que foram abordados dentro de uma visão global e estratégica.

Referências Bibliográficas

Cavender, B. **Determination of optimum lifetime of a mining project using discounted cash flow and option pricing techniques.** Mining Engineering p. 1262-1268, out.1992

Coléou, T. **Paramétrage technique des réserves et optimisation d'un projet minier.** Fontainebleau, 1987. 118 p. Tese (Doutorado) - Centre de Géostatistique.

Coléou, T. **Technical parameterization of reserves for open pit design and mine planning.** in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 21. , Las Vegas, 1989 , Application of computers and operations research in the mineral industry. Littleton, AIME, 1989. p.485-494 .

Dagbert, M. **Cut-off grades:statistical estimation and reality.** CIM Bulletin , Montreal, Fev-1987

Dagdelen, K. ; François-Bongarçon, D. **Towards the complete double parametrization of recovered reserves in open pit mining.** in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 17. ,New York, 1982 , Application of computers and operations research in the mineral industry. SME,AIME, 1982. p.288-296.

François-Bongarçon, D. ; Guibal, D. **Algorithms for parametrizing reserves under different geometrical constraints.** in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 17. ,New York, 1982 , Application of computers and operations research in the mineral industry. SME,AIME, 1982. p.297-309.

François-Bongarçon, D. ; Maréchal, A. **A new Method for Open-Pit Design : Parametrization of the Final Pit Contour .** in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 14. 1976 , Application of computers and operations research in the mineral industry. SME,AIME, 1976. p.573-583.

Johnson, T.B. ; Sharp, W.R. **A Three-Dimensional Dynamic Programming Method for Optimal Ultimate Open Pit Design.** Washington, U.S.Department of the Interior, Bureau of Mines, 1971. (U.S.Bureau of Mines. Report of Investigations,7553) .

Kim, Y.C. **Computerized Mine Design & Planning** p.118-130

Kim, Y.C. **Ultimate Pit Limit Design Methodologies Using Computer Models- The State of the Art .** Mining Engineering p.1454-1459, oct-1978

Lizotte, Y. **The economics of computerized open pit design.** International Journal of Surface Mining p.59-78, 2(1988)

Nagle, A.J. **Avaliação da rentabilidade em projetos de mineração.** Revista Brasil Mineral, n.58, p.101-106, set.1988.

Ohmae, K. **O estrategista em ação: a arte japonesa de negociar.** São Paulo, Pioneira, 1985.p.1-86.

Valet, R. **Optimisation Mathématique de L'exploitation d'une Mine à Ciel Ouvert ou le Problème de L'enveloppe.** Annales des Mines de Belgique. 1976. p.113-136.

Valente, Jorge M.G.P. **Geomatemática: Lições de Geoestatística.** Ouro Preto, Fundação Gorceix, 1982. v. 5.

Whittle, J. ; Rozman, L.I. **Open Pit design in the 90's .** in: Mining industry Optimisation Conference. Sydney, 1991. p.13-19 .

Whittle, J. **Short course on the use of optimization in open pit design.** Fev.-1992.

Zhang, S. ;Mc Allister, J. ; Dorricott, M.G. **Probabilistic Analysis of Risk in Mining Projects .** in: Third Large Open Pit Mining Conference. 1992. p.455-459 .

Bibliografia Recomendada

Barnes, R. J. **Automated Methods of Final Pit Limit Determination**. Unpublished lecture notes - Colorado School of Mines

Barnes, R. J. **Master's Thesis**. Mining Engineering Department - Colorado School of Mines

Barnes, R. J. ; Johnson, T.B. **New ideas in the Optimum Ultimate Pit Limit Problem: Bounding the Optimum** . Proceedings of the Mining Computer Applications Symposium, Moscou Out- 1980

Barnes, R. J. ; Johnson, T.B. **Bounding Techniques for Ultimate Pit Limit Problems**. 17 th APCOM p.263-273, 1982

Cai, W.L. **Application of Network Flow and Zero-One Programming to Open Pit Mine Design Problems**. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson AZ, 1989

Carlson, T.R. ; Erickson, J.P. et al. **Computer Techniques in Mine Planning**. Mining Engineering, vol.18, n.5, p.53-56, 1966

Chen, T. **3-D Pit Design with Variable Wall Slope**. 14th APCOM p.615-625, 1976

Crawford, J.T. **Open Pit Limit Analysis - Some Observations on Its Use**. 16th APCOM p.625-634, 1979

François-Bongarçon, D. **Le Parametrage D'es Contours Optimaux D'Une Explotation A Ciel Ouvert**. These de Docteur-Ingeneieur, L'institut Natonal Polytechnique de Lorraine, 1978.

François-Bongarçon, D. ; Guibal, D. **Open Pit Optimization by Parameterization of the Final Pit Contour: New Advances and Applications**. Proceedings of Mining Computer Applications Symposium, Moscou Out-1980

François-Bongarçon, D. ; Guibal, D. **Parameterization of Optimal Designs of Open Pit: Beginning of a New Phase of Research**. Annual AIME Meeting Chicago Fev-1981

Gershon, M. **An Open Pit Production Scheduler : Algorithm and Implementation** Mining Enginnering, vol 39, ago-1987

Guibal, D. ; Touffait, Y. **L'Estimation des Reserves Recuperable**. Confidential Report - Centre de Geoestatistiques Fontainebleau - France

Hanson, J. **A Modified Network Flow Approach to Determine Economic Open Pit Limits**. Master Thesis, Montana Tech.,Butte Montana 59701, 1986

Huttagosol, P. ; Cameron, R.E. **Modified Tree Graph Algorithms for Ultimate Pit Limit Analysis**. SME Annual Meeting, Las Vegas, n.89-24, 1989

Iles, C.D. ; Pery, G.A. **Sierrita Incremental Pit Design System**. Mining Engineering , vol 35, n.2, p.152-155, 1983

Johnson, T.B. ; Mickle, D. G. **Optimum Design of an Open Pit, An Application in Uranium** . 9 th APCOM , jun-1970

Johnson, T.B. **A Comparative Study of Methods for Determining Ultimate Open-Pit Mining Limits** . 11 th APCOM , abr-1973

Johnson, T.B. **Optimum Pit Mine Production Scheduling**. University of California , Berkeley, CA, 1968

Journel, A. ; Sans, H. **Ore Grade Control in Sub-Horizontal Deposits**. Transaction Institute of Mining and Metallurgy , Sect. A : Min.Industry, 83, A79-84, 1974

Kim, Y.C. ; Cai, W.L. **Long Range Mine Sequencing Using 0-1 Programmng**. 22 th APCOM, Berlin, W.Germany, set-1990

Koborov, S. **The Influence of Parameters of a Block Model upon the Optimal Open Pit Limits**. 12 th APCOM , 1974

Koenigsberg, E. **The Optimum Contours of an Open Pit Mine: An Application of Dynamic Programming** . Unpublished paper, School of Business Administration , University of California, Berkeley - California 1979

Koenigsberg, E. **The Optimum Contours of an Open Pit Mine: An Application of Dynamic Programming** . 17 th APCOM , abr-1982

Lemieux, M. **A different Method of Modeling a Mineral Deposit for a Three-Dimensional Open Pit Computer Design Application**. 14 th APCOM , out-1976

Lerchs, H. ; Grossman I.F. **Optimum Design of Open Pit Mines** . Transactions, C.I.M. vol LXVIII, p. 17-24, 1965

Lipkewich, M.P. ; Borgman, L. **Two and Three-Dimensional Pit Design Optimization Techniques**. A decade of Digital Computing in the Minerals Industry, SME/AIME, p.505-523, N.York 1969

Marino, J.M. ; Slama, J.P. **Ore Reserve Evaluation and Open Pit Planning**. 10 th APCOM p.139-144, 1973

Matheron, G. **Le Parametrage des Contours Optimaux** . Technical Notes 401 and 403, Centre de Geostatistique et de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, France, 1975

Matheron, G. **Le Parametrage Technique des Reserves**. Technical Note 453, Centre de Geostatistique et de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, France, 1975

Mathieson, G.L. **Open Pit Sequencing and Scheduling**. SME/AIME, n.82-368, 1982

Pana, M.J. **The Simulation Approach to Open Pit Design** . 5 th APCOM . mar-1965

Picard, J.C. **Maximal Closure of a Graph and Applications to Combinatorial Problems**. Management Science, vol.22, n.11 p.1268-1272

Rychkum, E.A. ; Chen, T. **Open Pit Mine Feasibility Method and Application at Placer Development** . Computer Methods for 80's in Mineral Industry SME/AIME, p.304-309, 1979

Robinson, R.H. **Programming the Lerchs-Grossman Algorithm for Open Pit Design**. 13 th APCOM, 1975

Royle, A.G. **Optimization of Assay-Cut-Off Orebodies** . Transaction Institute of Mining and Metallurgy, Sect. A :Min.Industry, 90, A55-60, 1981

Ross-Brown, D.M. **Analytical Design** . Open Pit Mine Planning and Design SME/AIME p.161-184, 1979

Taylor, J.B. **Incorporation of Access Roads into Computer Generated Open Pits**. 9 th APCOM p.339-343 ,1970

Williams, C.E. **Computerized Year-by-Year Open Pit Mine Scheduling**. Society of Mining Engineers Transactions, vol 256, dez-1974

Wilke, F.L. et al. **Ultimate Pit and Production Scheduling Optimization**. 18 th APCOM p. 29-38, 1984

Zhao, Y. ; Kim, Y.C. **A new Graph Theory Algorithm for Optimal Ultimate Pit Limit Design**. SME Annual Meeting, Salt Lake City, Ut, n.90-9, fev-1990