

**RODRIGO CAPEL PASQUA**

**IMPACTO DO CONTROLE DE QUALIDADE E DE CUSTOS NO PLANEJAMENTO DE  
LAVRA DE LONGO PRAZO**

São Paulo  
2012

**RODRIGO CAPEL PASQUA**

**IMPACTO DO CONTROLE DE QUALIDADE E DE CUSTOS NO PLANEJAMENTO DE  
LAVRA DE LONGO PRAZO**

**Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.**

**Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi**

**São Paulo  
2012**

TF-2012

P264i

Syno 2448437

H2012h

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009739

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Pasqua, Rodrigo Capel**

**Impacto do controle de qualidade e de custos no planejamento de lavra de longo prazo / R.C. Pasqua. -- São Paulo, 2012. 32 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1. Mineração (Planejamento, Qualidade; Custos) 2. Controle da qualidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é apenas mais um degrau em minha vida universitária, mas sim o passo que selará a conclusão de uma das mais importantes etapas da minha vida. Estes últimos anos na Escola Politécnica me transformaram no homem que serei daqui em diante. Agradeço, portanto, às seguintes pessoas:

- Meu orientador e amigo Prof. Dr. Giorgio de Tomi, que desde o início de minha carreira na mineração contribuiu para meu desenvolvimento quando necessário, sem nunca medir esforços para tal;
- Meus pais e irmão, os quais sempre me apoiaram tanto em minha vida profissional quanto na pessoal;
- Minha noiva por ser sempre tão compreensiva com o nível de exigência e ausência requerido pela Engenharia de Minas sem nunca deixar de me apoiar.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

## RESUMO

O mercado competitivo dos dias de hoje impõe que as minas trabalhem em constante regime de otimização. Para a extração ótima do minério foram desenvolvidos inúmeros métodos de otimização e controle de qualidade do produto os quais nem sempre são capazes de abranger toda a complexidade de uma mina.

Os principais problemas estão em algumas das atividades básicas do planejamento de lavra de longo prazo: i) a escolha da qualidade ótima que se quer aplicar à extração do material, ii) a composição simplória de custos de lavra e iii) a definição exata do que é minério e como essa definição pode mudar ao longo do tempo.

O trabalho em questão apresenta uma análise crítica dos principais métodos de otimização e controle de qualidade utilizados hoje pelo mercado mineiro e propõe alguns ajustes para estas práticas clássicas.

**Palavras-chave:** Planejamento, Longo Prazo, Qualidade, Otimização, Custos.

## **ABSTRACT**

Today's competitive market implicates that mines work on optimized routines at all times. Various methods have been developed in order to optimize the ore extraction and its quality control but these methods are not always capable of dealing with the mining cycle complexity.

The main problems are in some of the basic activities of the long term mine planning: i) how to choose the optimum quality to be applied to the mined material, ii) the simplified mining cost composition and iii) the exact definition of ore and how this definition changes over time.

This work presents a critical analysis of the most common quality control and economical optimization methods used in the mining industry nowadays and recommends a few adjusts to the known methods.

**Key words:** Planning, Long Term, Quality, Optimization, Costs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Etapas de um Projeto de Mineração .....	12
Figura 2: Ciclo de vida de um projeto (Project Management Institute, 2008) .....	12
Figura 3: Impacto de Mudanças no Projeto (Project Management Institute, 2008) .....	13
Figura 4: Otimização de Recursos no Planejamento de Longo Prazo .....	14
Figura 5: Desenho de Mina Subterrânea .....	15
Figura 6: Sequenciamento Operacional em Mina de Ouro a Céu Aberto .....	15
Figura 7: Análise de Investimento para Mina de Ouro (Accenture, 2009) .....	17
Figura 8: Fases da Otimização pelo Método de Lerchs-Grossman .....	20
Figura 9: Diluição e Perda de Minério. Modificado de (Breedt, 2010) .....	22
Figura 10: Diferentes Estratégias de Diluição/Recuperação .....	23
Figura 11: Processo de Otimização com Diferentes Custos .....	28
Figura 12: Furos de Sonda Otimizados e Classificados por Tipo de Minério .....	29



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Comparação Diferentes Tamanhos de Frota .....	26
Tabela 2: Tipos de Minério .....	27

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	9
OBJETIVO .....	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
GERENCIAMENTO DE PROJETOS .....	11
1.1 O QUE É UM PROJETO?.....	11
1.2 PROJETOS DE MINERAÇÃO .....	11
2. PLANEJAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO .....	12
3. CONTROLE DE CUSTOS.....	16
4. QUALIDADE E PRODUTIVIDADE.....	18
ANÁLISE CRÍTICA.....	19
1. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA.....	19
1.1 ESCASSEZ DE OPÇÕES .....	19
1.2 SIMPLICIDADE DOS MODELOS ECONÔMICOS .....	21
2. MÉTODOS DE CONTROLE DE QUALIDADE .....	22
ALTERNATIVAS PROPOSTAS .....	25
1. ESCOLHA DA QUALIDADE ÓTIMA DO MINÉRIO.....	25
1.1 O MÉTODO.....	25
1.2 RESULTADOS ESPERADOS .....	26
2. CONTROLE DE CUSTOS NA OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA .....	27
1.1 O MÉTODO.....	27
1.2 RESULTADOS ESPERADOS .....	29
CONCLUSÕES .....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31

## INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios na mineração atualmente é o controle de custos operacionais, para fazer frente à competitividade internacional e ser capaz de alimentar o mercado atual, o qual demanda níveis produtivos cada vez maiores; as empresas preocupam-se cada vez mais com redução de custos e controle de qualidade.

Diversas minas trabalharam durante vários anos em regime de maximização da produção para atender contratos de venda que na última década atingiram, em muitos casos, níveis recordes históricos. No entanto, o grande número de novas operações por todo o mundo está exigindo que os gerentes de mina atuem com maior foco no controle de custos operacionais para assegurar a competitividade da produção de suas minas.

Contudo, qualquer que seja a forma de atuar no controle de custos operacionais, os mesmos gerentes de mina precisam assegurar também que a qualidade do minério produzido atenda às especificações dos seus clientes. Para isso, para a maioria das minas em operação, não basta reduzir custos atendendo às metas de especificação, mas também é necessário desenvolver metodologias e inovações tecnológicas para aprimorar a qualidade geral de toda a operação de lavra<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> (Pasqua, A importância da gestão da operação de minas no controle da qualidade de lavra, 2009)

## **OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo evidenciar os impactos do controle de qualidade de lavra e de minério no Planejamento de Lavra de Longo Prazo. O projeto analisará as alternativas utilizadas hoje pelo mercado e irá propor métodos para a redução do custo de produção das minas, incluindo:

- Método de escolha da qualidade ótima da lavra do minério;
- Alternativa de controle de custos através da recategorização do minério;

Por fim, serão tecidos comentários sobre os resultados gerados pelas alternativas propostas.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão expostos e referenciados na literatura os temas mais relevantes para o trabalho.

### GERENCIAMENTO DE PROJETOS

A literatura acerca de gerenciamento de projetos é extremamente vasta e abrange muitas teorias. Para o presente trabalho nos concentraremos em definir o que é um projeto, bem como seus diferentes níveis e fases.

#### 1.1 O QUE É UM PROJETO?

O projeto pode ser definido como um esforço temporário realizado com o propósito de se criar um produto, serviço ou resultado específico. A natureza temporária de um projeto indica que o mesmo tem início e fim definidos. O fim é atingido quando todos os objetivos são alcançados, quando os mesmos não podem ser alcançados ou quando o projeto não é mais necessário<sup>2</sup>.

#### 1.2 PROJETOS DE MINERAÇÃO

De acordo com Chaves e Kear podemos dividir os estudos de um empreendimento de mineração em três projetos: Projeto Conceitual, Projeto Básico e Projeto Executivo. No primeiro o estudo é realizado com baixo conhecimento geológico e reduzido investimento e, caso a opção se mostre favorável, passamos ao próximo nível, o qual consiste em um projeto mais detalhado e muito próximo da realidade da implantação. Aprovado no segundo nível, os engenheiros podem passar ao terceiro, onde todo o projeto corresponde exatamente com a realidade da mina a ser construída<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> (Project Management Institute, 2008)

<sup>3</sup> (Chaves, 2002)

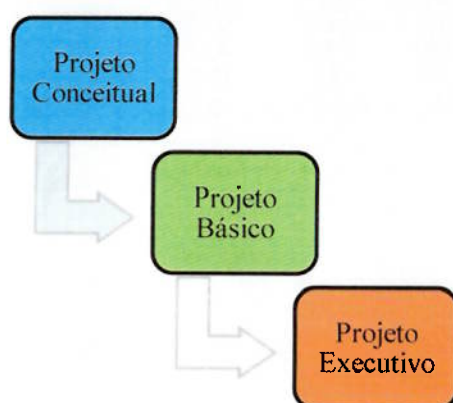


Figura 1: Etapas de um Projeto de Mineração

Além disso, segundo o Project Management Institute (PMI), o ciclo de vida de cada uma destas etapas é constituído de quatro fases bem definidas.

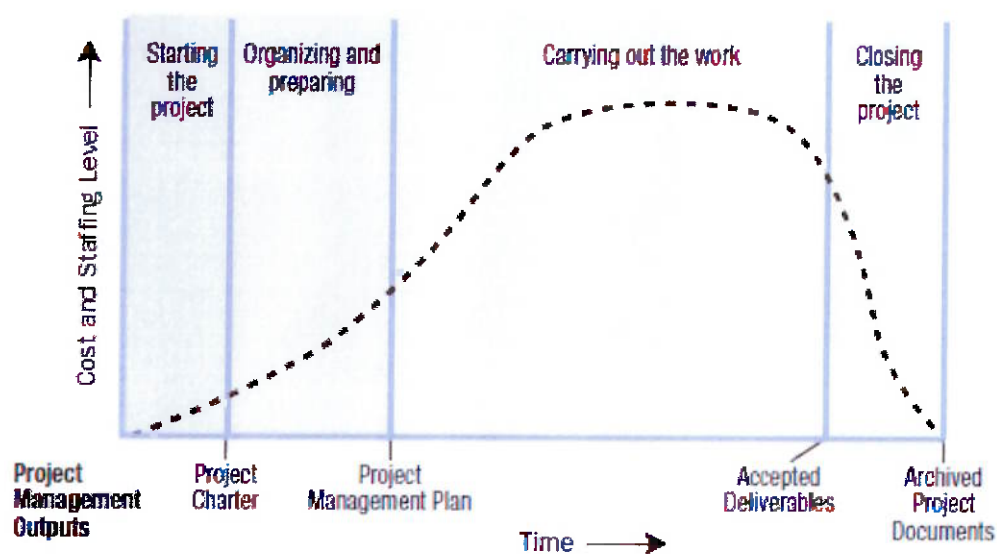


Figura 2: Ciclo de vida de um projeto (Project Management Institute, 2008)

## 2. PLANEJAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO

O planejamento de longo prazo é realizado em diferentes níveis de detalhe em todas as etapas do estudo de um empreendimento mineiro definidas por Chaves. Além dos estudos

realizados antes da implantação do projeto, são necessárias revisões periódicas do plano de toda a vida da mina, quando o plano de lavra deve ser refeito.

Através do gráfico abaixo podemos concluir que conforme o projeto é desenvolvido, nossa capacidade de mudança do projeto diminui, o que torna as primeiras etapas muito mais significativas para o resultado final que as últimas.

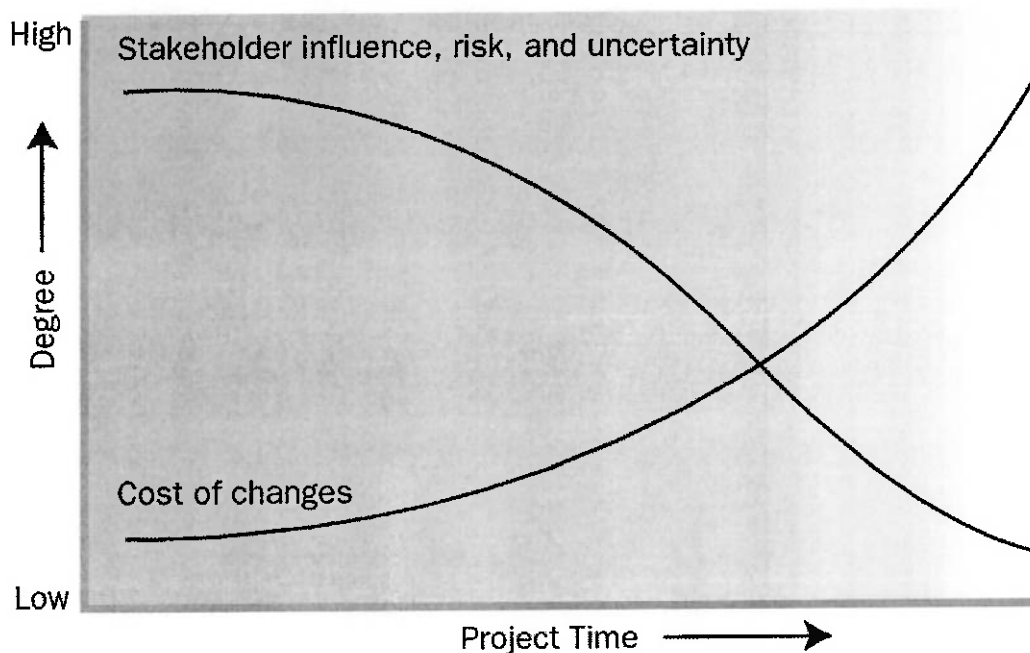


Figura 3: Impacto de Mudanças no Projeto (Project Management Institute, 2008)

É durante o Projeto Conceitual<sup>4</sup> que são realizados os estudos mais importantes para a minimização de custos de lavra. O estudo é extremamente complexo, uma vez que trabalha com inúmeras incertezas como dados estimados, longos períodos de abrangência e deve-se assumir informações econômicas futuras.

Determinar a forma de exploração mais rentável de um depósito é um objetivo desafiador e envolve diversas tarefas<sup>5</sup>. Na fase inicial, é determinado:

<sup>4</sup> (Chaves, 2002)

<sup>5</sup> (Mintec Inc., 2009)

- Áreas economicamente lavráveis do depósito a diferentes preços da commodity e custos operacionais;
- Melhor sequenciamento de lavra: local onde a lavra terá início e direção de avanço até os limites do minério;
- Custos capitais e operacionais estimados em distintos cenários, de maneira a obter os vários fluxos de caixa, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Após isto as opções são analisadas e a melhor é escolhida. Os diferentes casos são calculados variando:
  - Taxa de produção
  - Teor de corte
  - Preço do produto

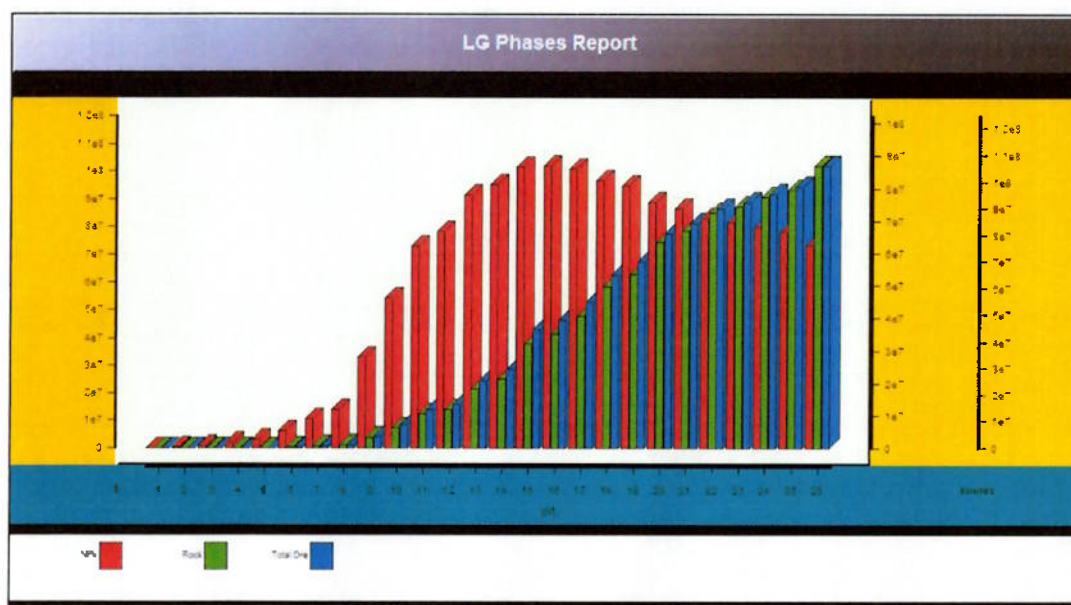


Figura 4: Otimização de Recursos no Planejamento de Longo Prazo

Ao final do Projeto Conceitual, o qual pode ser realizado com pouquíssima informação geológica e custos reduzidos, decidimos prosseguir ou não para um estágio mais detalhado do projeto que envolverá um investimento muito maior.

Na próxima etapa do projeto, considerada o Projeto Básico<sup>6</sup>, realizamos as seguintes atividades a fim de refinar os resultados obtidos anteriormente:

- Definição dos parâmetros operacionais da mina.
- Desenho da mina, pilhas de estéril, barragem de rejeitos e estradas são projetados;

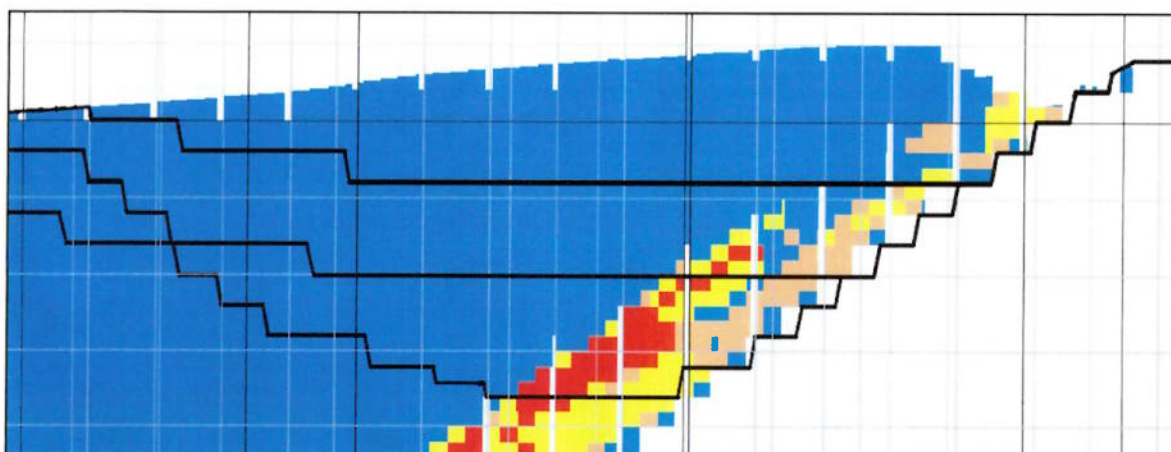
<sup>6</sup> (Chaves, 2002)





**Figura 5: Desenho de Mina Subterrânea**

- Cálculo de recursos e reservas baseados nos layouts adotados;
- Desenvolvimento do sequenciamento de lavra detalhado utilizando fatores mais próximos da realidade como teores, tonelagem, capacidade das pilhas, custos de transporte baseados nos tempos de ciclo, melhor taxa de produção, teor de corte ótimo, recuperações, preços, além de custos de capital e operacionais detalhados;



**Figura 6: Sequenciamento Operacional em Mina de Ouro a Céu Aberto**

- Dimensionamento de frota;
- Cálculo dos fluxos de caixa descontados.

Finalizada a segunda etapa, os resultados são formalizados e o projeto levemente adaptado a alguma mudança que pode ocorrer durante a compra de equipamentos. Na terceira etapa do planejamento, denominada Projeto Executivo, são produzidos inúmeros documentos técnicos, incluindo plantas de situação da mina ano a ano.

Uma vez que o projeto é finalizado e a mina é iniciada não existem mais atividades de projeto, mas sim trabalho operacional. Essas atividades apresentam similaridades:(a) são realizadas por indivíduos;(b) limitadas por restrições;(c) planejadas, executadas e monitoradas;(d) realizadas para atingir objetivos organizacionais ou planos estratégicos. Contudo, apesar das semelhanças, é importante notar que o trabalho operacional não acaba quando os objetivos são alcançados e é repetitivo, o que lhe difere de projetos.

O planejamento de lavra de longo prazo também é executado durante o trabalho operacional, já que são necessárias revisões periódicas de todo o projeto, regularmente realizadas a cada ano. São incorporados os preços e custos mais atuais, além das estratégias da empresa e um novo plano é gerado.

### **3. CONTROLE DE CUSTOS**

Segundo o Food and Agriculture Department of the United Nations (FAO), os custos são importantes para qualquer indústria e podem ser divididos em dois tipos básicos: custos absolutos e custos relativos. Custo absoluto é o prejuízo ou lucro total de uma determinada empresa, enquanto custo relativo é o custo de oportunidade, ou seja, a comparação entre diferentes alternativas em um projeto.

Comparar alternativas a fim de escolher a melhor requer um estudo profundo de cada uma delas e a habilidade de estimar custos. Para isto, registros de históricos financeiros são essenciais, contudo, em um ambiente como o da mineração, onde preços e custos variam muito, são de pouca valia se não quebrarmos e detalharmos toda informação. Portanto, devemos saber como é feita toda a composição de preços e os fatores que alteram cada item para podermos estimar custos de cada alternativa.

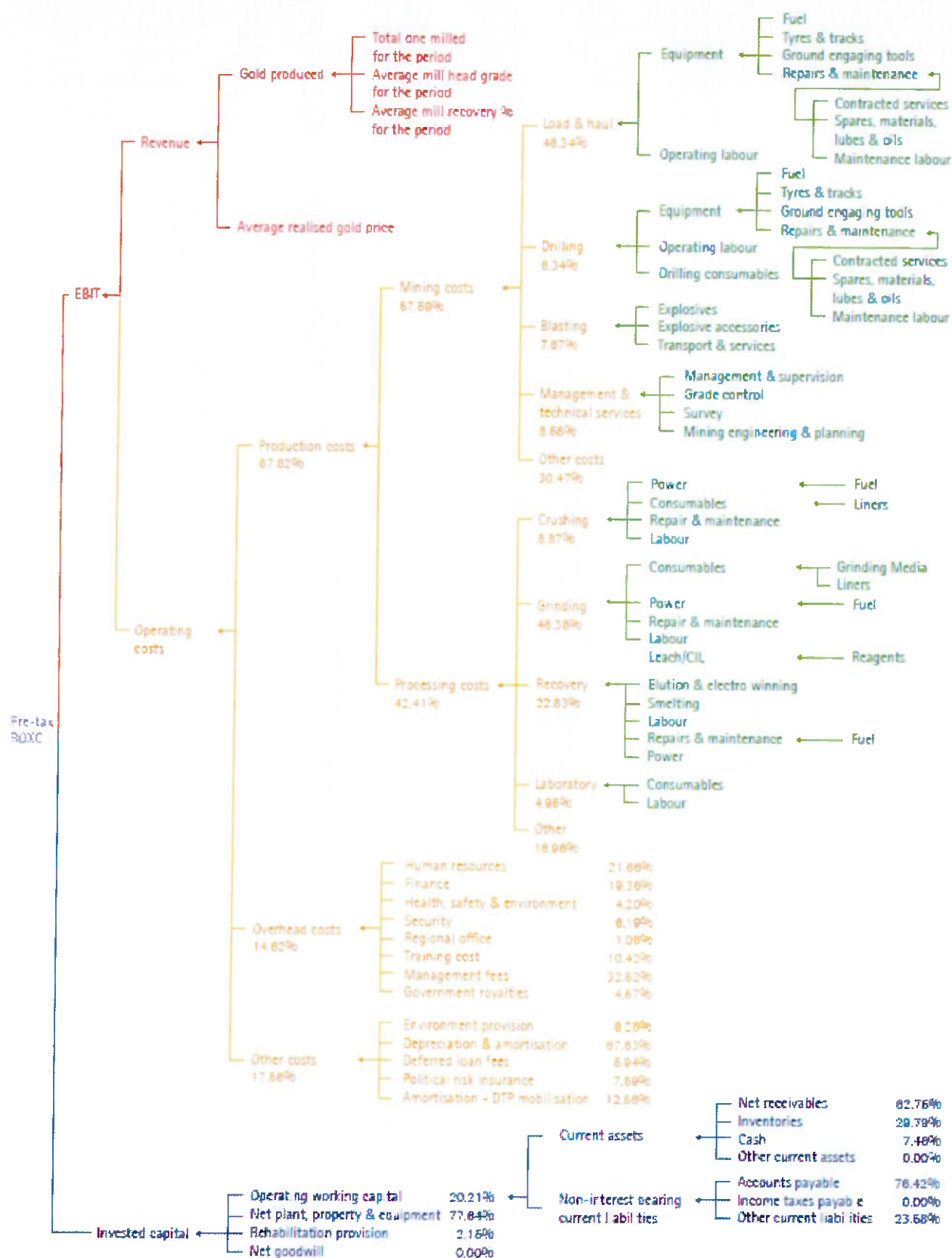


Figura 7: Análise de Investimento para Mina de Ouro (Accenture, 2009)

Para análises de diferentes alternativas podemos nos valer de diferentes métodos. Citaremos aqui dois entre os mais importantes: breakeven e custo mínimo.

A análise de breakeven consiste em determinar o ponto em que certa alternativa supera outra na realização de determinado objetivo. Basicamente, é o ponto em que a função custo de um método se iguala à do outro.

Por outro lado, a análise de custo mínimo visa encontrar o ponto em que a combinação de diferentes variáveis da alternativa resulta no custo mínimo total<sup>7</sup>.

#### 4. QUALIDADE E PRODUTIVIDADE

“Um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo às necessidades do cliente”, (Campos, 1992). Ou seja, segundo Campos, para atingirmos a qualidade, devemos produzir segundo especificações, sem defeitos, a baixos custos, fornecendo confiança e prazos ao cliente.

Atingir a qualidade não seria um desafio se não envolvesse a necessidade de produção à baixos custos. Devemos, portanto, nos preocupar também com a produtividade. A definição básica de produtividade é apresentada por Campos:

$$Produtividade = \frac{Output}{Input}$$

O autor defende ainda uma relação intrínseca entre produtividade e qualidade:

$$Produtividade = \frac{Qualidade}{Custos}$$

---

<sup>7</sup> (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992)

## ANÁLISE CRÍTICA

Nesta seção iremos expor uma análise crítica das ferramentas utilizadas atualmente na indústria mineira para minimização de custos produtivos e maximização da qualidade do produto.

A mineração trabalha com enormes incertezas geológicas e de mercado, e estas realidades estão em constante alteração com inclusão de informações, sejam elas novas amostragens geológicas, sejam preços e custos operacionais atuais. Isto torna a repetitividade do Planejamento de Longo Prazo uma característica inerente ao próprio processo. Ao analisarmos a estrutura clássica de projetos de mineração e a revisão periódica dos planos feita após a abertura da mina, esta repetitividade fica ainda mais evidente.

Por muito tempo planejadores de lavra tiveram enormes dificuldades em reproduzir um plano tão complexo em curtos períodos de tempo. O processo se tornava extremamente caro e, em muitas vezes, impossível de ser realizado. Esta realidade mudou após a inserção de métodos computacionais, o que abriu uma enorme gama de oportunidades no ramo de planejamento de mina.

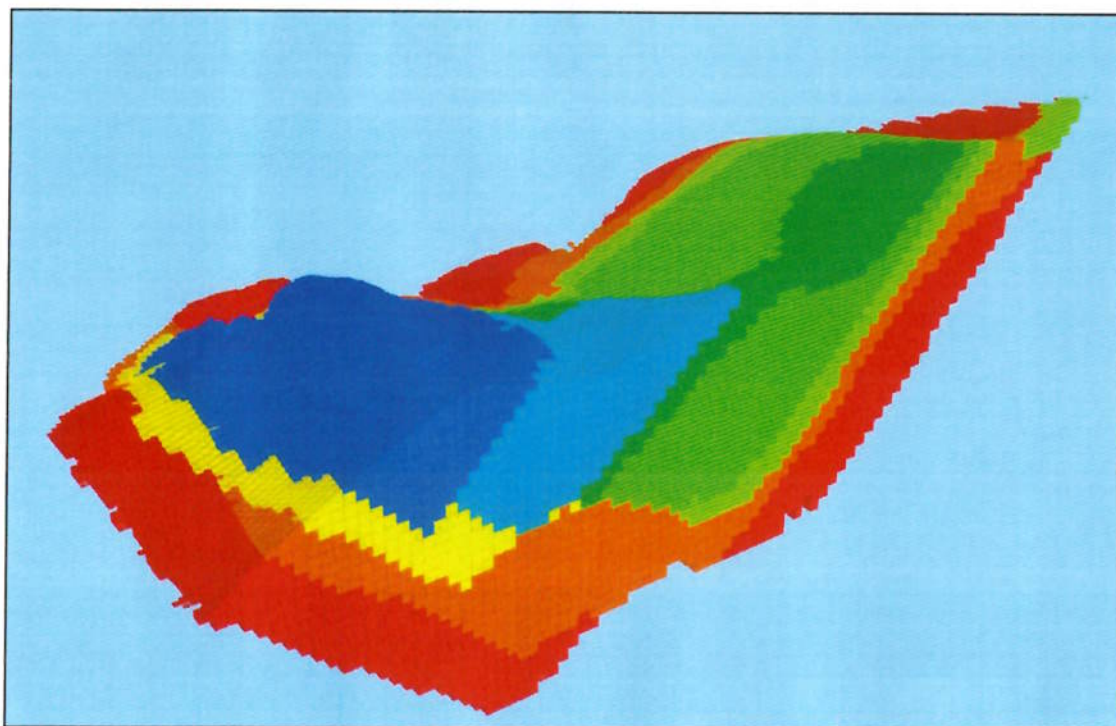
Encontramos hoje no mercado uma grande variedade de softwares voltados ao planejamento de lavra. A grande maioria, contudo, apresenta as mesmas funções, com roupagens diferentes. A seguir faremos uma análise crítica dos métodos de otimização econômica e controle de qualidade de minério mais utilizados pela indústria hoje e, posteriormente, serão apresentados métodos teóricos alternativos.

### 1. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA

#### 1.1 ESCASSEZ DE OPÇÕES

Atualmente, o setor mineiro carece de alternativas para a determinação dos limites econômicos de extração dos depósitos. Teorias antigas foram adaptadas para algoritmos computacionais, mas não houve muita evolução neste campo nas últimas décadas, especialmente para minas subterrâneas.

Para minas a céu-aberto, com extração realizada através de cavas, existem dois métodos reconhecidos internacionalmente: o método do cone flutuante<sup>8</sup> e o Lerchs-Grossman<sup>9</sup>, sendo o segundo mais comumente utilizado para cálculos oficiais de reservas.



**Figura 8: Fases da Otimização pelo Método de Lerchs-Grossman**

No caso das minas a céu-aberto com extração pelo método da lavra em tiras é difícil utilizar os algoritmos citados acima, pois os resultados não são operacionais. Neste caso específico ainda não há no mercado uma tecnologia amplamente aceita e conhecida para a otimização de recursos. Há alguns casos de depósitos de carvão e bauxita em que cada furo de sonda é otimizado individualmente obtendo a melhor seção do mesmo a ser lavrada. Após isso, modela-se a lente do minério a ser lavrado com base nas seções otimizadas<sup>10</sup>.

Já para minas subterrâneas, não temos, atualmente, nenhum método de otimização econômica reconhecido pela comunidade acadêmica internacional. Algumas poucas tentativas apareceram nos últimos tempos, a maioria sem sucesso. Contudo, podemos citar um exemplo de sucesso: a companhia australiana de pesquisa Amira vem, dentro do projeto PRIMO (Planning and Rapid Integrated Mine Optimization), desenvolvendo o “Stope Optimisation and Stope

<sup>8</sup> (Berlanga, Cardona, & Ibarra, 1988)

<sup>9</sup> (Lerchs & Grossman, 1965)

<sup>10</sup> (Annels, 1991)

Layout”, que deu origem a um algoritmo de otimização de realces, inclusive já sendo comercializado por empresas como a CAE Mining e Maptek.

Apesar do caso bem sucedido acima, o algoritmo ainda se encontra em estudo e cobre apenas uma parcela das minas subterrâneas – aquelas lavradas através de realces. Outros métodos como os de desabamentos ou mesmo pilar e salão ainda necessitam de técnica comprovadamente eficiente.

## 1.2 SIMPLICIDADE DOS MODELOS ECONÔMICOS

Outro fator que colabora negativamente para a qualidade dos resultados das otimizações é a simplicidade dos modelos econômicos adotados durante a otimização já que poucos fatores são considerados na composição de custos e a classificação de minério nem sempre é correta.

Nos softwares de otimização a entrada de parâmetros econômicos (preço do produto, custo de logística, custo administrativo, custo de lavra, custo de processo, etc) e operacionais (ângulo de talude, recuperação na lavra, diluição, recuperação metalúrgica, etc) é extremamente simples e não toma mais que alguns minutos. Isto pode dar uma falsa impressão acerca da complexidade de obtenção de todos estes dados. Custos capitais muitas vezes não são nem considerados nestes estudos.

Ademais, a classificação de minério também precisa ser minuciosamente estudada. Os métodos clássicos de otimização econômica visam a maximização do VPL dos projetos, contudo objetivos estratégicos da empresa nem sempre buscam tal objetivo. A estratégia da empresa deveria influenciar esta classificação tanto quanto a condição econômica do mercado. Se o objetivo da corporação é obter a maior TIR possível nos primeiros anos ou adiantar o Payback, o minério passa a ser apenas o mineral com menor custo unitário e não qualquer mineral economicamente lavrável. A clássica definição de minério “um mineral ou uma associação de minerais (rocha) que pode ser explorado economicamente”<sup>11</sup>, utilizada oficialmente pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, já não indica todo material que será lavrado e processado.

---

<sup>11</sup> (Branco, 2008)



## 2. MÉTODOS DE CONTROLE DE QUALIDADE

As alternativas para controle de qualidade do minério e da lavra são baseadas no aumento da seletividade de lavra. Basicamente, para aumentarmos a qualidade do minério, devemos diminuir a diluição.

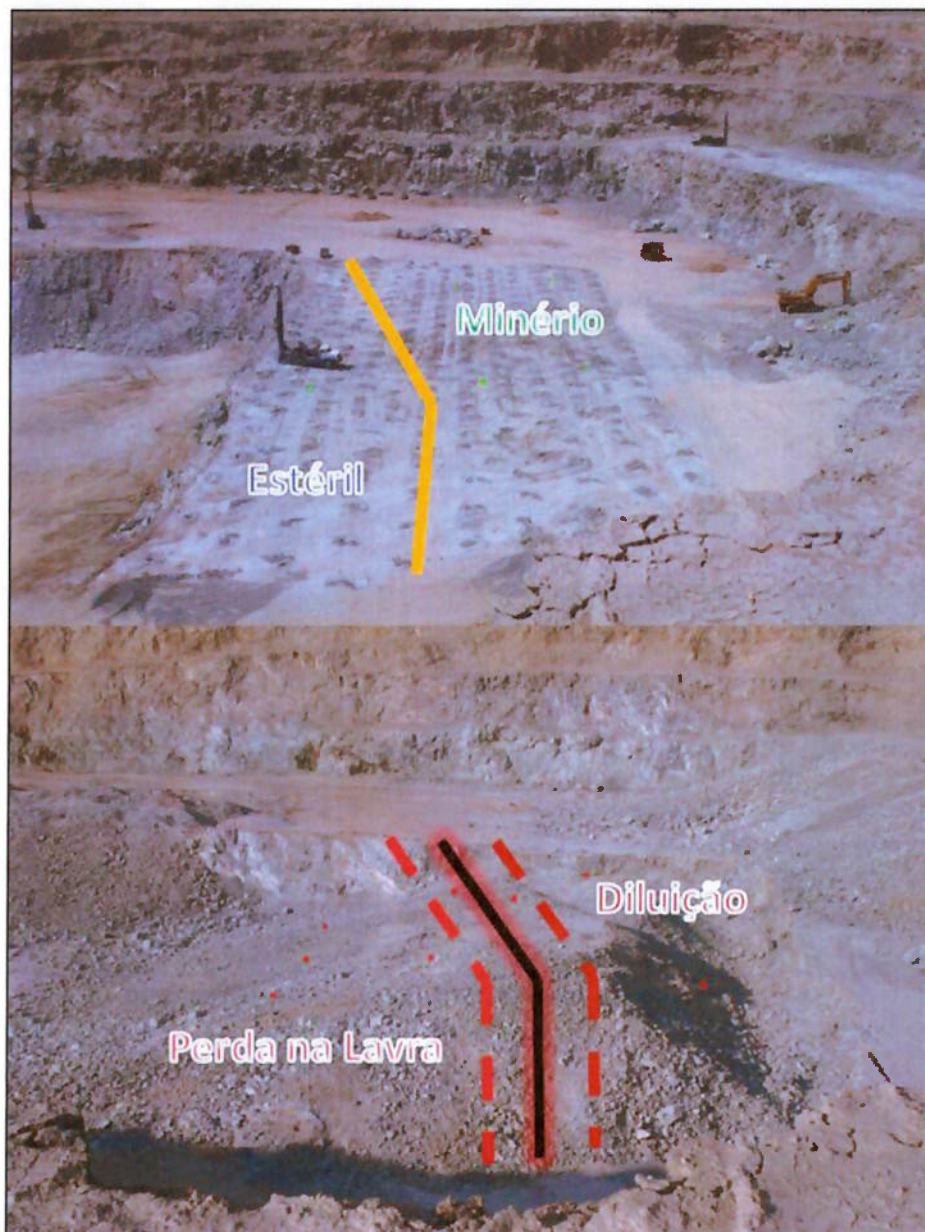
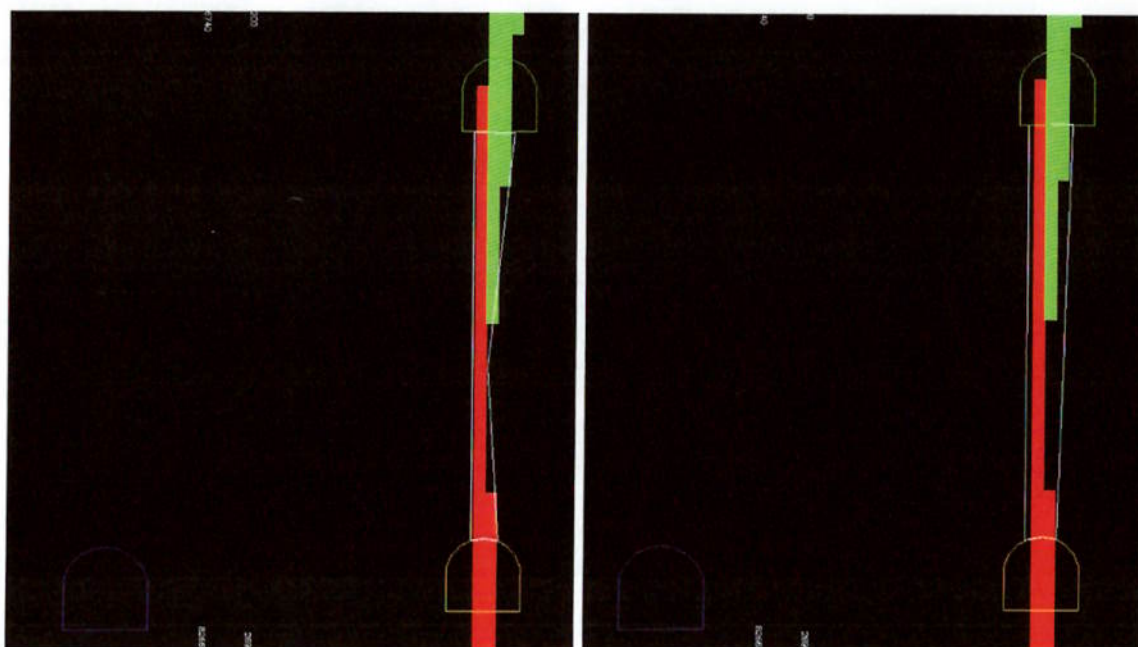


Figura 9: Diluição e Perda de Minério. Modificado de (Breedt, 2010)



Em busca deste objetivo, são utilizadas ferramentas em diferentes etapas do processo de lavra:

- Dimensionamento de frota: o equipamento escolhido para a lavra definirá, em grande parte, qual será o nível de diluição do material. Teoricamente, quanto maior o equipamento, maior a diluição imposta;
- Definição de polígonos de lavra e desenho de realces: baseado nas linhas de contato estéril-minério levantadas pela geologia, o planejador da mina deve decidir qual será o volume exato a ser detonado, podendo optar por estender os limites dos blocos de minério (aumentar recuperação) ou contraí-los (diminuir diluição);



**Figura 10: Diferentes Estratégias de Diluição/Recuperação**

- Controle do desmonte:
  - Após o desmonte por explosivos da rocha a ser lavrada, ocorre o que chamamos de deslocamento do material. Para a lavra a céu-aberto existem técnicas de controle de desmonte que incluem desde o sensoramento do fogo com radares, até a inserção de sensores de movimento no próprio maciço a ser desmontado. Uma vez que o fogo é estudado e se tem conhecimento dos seus vetores de deslocamento, marca-se em campo a linha mais próxima do contato minério-estéril para guiar o operador do equipamento de carga;

- Outra técnica aplicada tanto para minas a céu-aberto quanto subterrâneas, consiste no estudo de overbreak e underbreak de cada desmonte para determinar a carga exata de explosivos a ser utilizada e a distância precisa entre as últimas cargas e o limite do volume a ser desmontado;
- Carregamento: em muitas minas a céu aberto a furação segue o mergulho do corpo, de forma a “cortar” o bloco no exatamente no contato e os operadores dos equipamentos de carregamento são encorajados a escavar o material de forma a respeitar este ângulo de mergulho.

Apesar de serem muitas vezes eficientes, estes instrumentos de controle de qualidade são também custosos. O grande problema atual deste setor é a definição exata do grau de controle de qualidade a ser empregado em cada depósito e quais ferramentas utilizar para tal. Na seção a seguir discutiremos meios de escolher a melhor alternativa para cada caso.

## ALTERNATIVAS PROPOSTAS

É durante o Planejamento de Lavra de Longo Prazo que uma série de fatores fundamentais da mina são definidos. Os fatores são mais importantes nas fases mais iniciais do projeto, em especial no Projeto Conceitual e Básico e é por isso que devemos ter certeza das características dos produtos que queremos produzir.

Com base nas análises feitas na seção anterior, iremos propor agora novos modelos teóricos para resolução dos problemas intrínsecos às ferramentas mais aceitas hoje de controle de qualidade e otimização econômica.

### 1. ESCOLHA DA QUALIDADE ÓTIMA DO MINÉRIO

Vimos anteriormente que, diferente do que imaginamos normalmente, a produtividade é diretamente proporcional à qualidade. Infelizmente, a produtividade é também inversamente proporcional ao custo. O desafio é, portanto, aumentar a qualidade sem impactos negativos no custo.

#### 1.1 O MÉTODO

Aumentar a qualidade de um produto sem acrescer o custo é quase uma utopia. Este trabalho irá propor, portanto, uma metodologia teórica para a escolha correta da qualidade do minério de forma a obter-se o menor custo de lavra possível. Para tanto, trabalharemos inicialmente com o dimensionamento de frota baseado na qualidade de minério. Realizaremos um estudo de custo mínimo<sup>12</sup> alterando a frota e analisaremos seu impacto no custo final do produto da seguinte forma:

- Cálculo da diluição (%);
- Cálculo da recuperação na lavra (%);
- Cálculo de custos lavra por unidade de material lavrado (\$/uml);

---

<sup>12</sup> (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992)

- Cálculo de custos processo por unidade de material processado (\$/ump);
- Cálculo de produto final por tonelada processada (upf/ump)
- Cálculo de custos totais por unidade de produto final (\$/upf)

Cada diferente composição de equipamentos resultará em distintos valores das variáveis acima. As variáveis a serem calculadas irão variar da seguinte forma:

**Tabela 1: Comparação Diferentes Tamanhos de Frota**

<b>Equipamento</b>	<b>Maior</b>	<b>Menor</b>
<b>Diluição (%)</b>	Maior	Menor
<b>Recuperação na Lavra (%)</b>	Menor	Maior
<b>Custo de Lavra (\$/uml)</b>	Menor	Maior
<b>Custo de Processo (\$/ump)</b>	Igual	Igual
<b>Produto Final (upf/ump)</b>	Menor	Maior
<b>Custo Final (\$/upf)</b>	?	?

Entendemos, portanto que menores frotas, apesar de resultarem em um custo maior de lavra, produzem mais produto por tonelada processada, já que apresentam menor diluição e maior recuperação na lavra. Fica claro que, sem um estudo como este não é possível definir qual a qualidade ótima do minério a ser adotada para cada depósito específico.

Outros métodos de controle de qualidade podem sempre ser estudados após a determinação do tamanho de frota e escala de produção, de modo a refinar a qualidade do produto a ser processado. Para estes, uma simples análise de “custos X benefícios” é suficiente para definir acerca da viabilidade de implementação.

## 1.2 RESULTADOS ESPERADOS

Através do método de escolha ótima da qualidade de lavra do minério teremos otimizado a escolha da frota da mina e dos outros métodos alternativos de controle de qualidade obtendo, portanto, o menor custo por unidade de produto possível.

Ademais, teremos realizado um estudo capaz de obter os índices de operacionais (recuperação na lavra, diluição) a serem utilizados nas próximas etapas do planejamento com certaprecisão, o que irá deixar o plano mais próximo da realidade da mina.

## 2. CONTROLE DE CUSTOS NA OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA

Uma vez que os parâmetros operacionais forem definidos no estudo da qualidade do minério, podemos começar a otimização econômica do depósito. O algoritmo matemático a ser utilizado fica a critério do engenheiro, sendo possível a utilização desde métodos tradicionais como Lerchs-Grossman, como a utilização de furos de sonda para depósitos sedimentares.

### 1.1 O MÉTODO

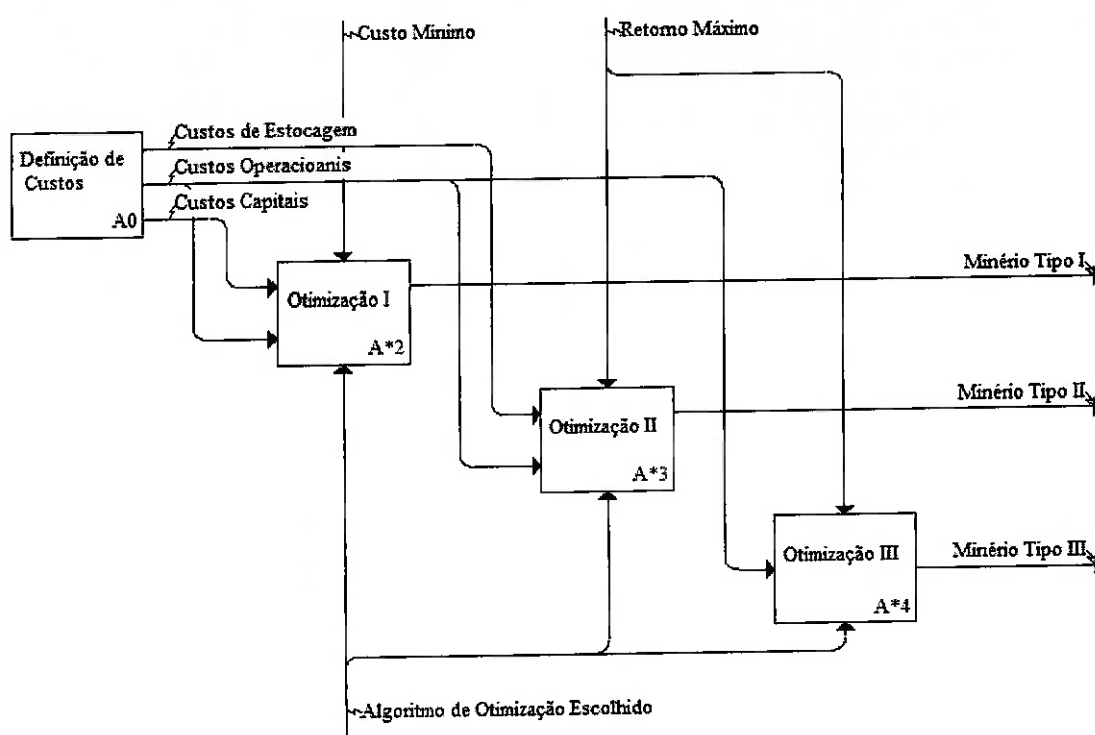
Iremos sugerir um método de novo de interpretação de custos e definição de minério que não seguirá o objetivo clássico de maximização de VPL com a consideração de apenas custos operacionais. Utilizaremos três diferentes composições de custos a fim de classificar o minério das seguintes formas:

Tabela 2: Tipos de Minério

<b>Materiais/Custos Incidentes</b>	<b>Operacionais</b>	<b>Capitais</b>	<b>Estoque</b>
<b>Tipo I</b>	X	X	
<b>Tipo II</b>	X		X
<b>Tipo III</b>	X		

Seja qual for o algoritmo utilizado, serão executados três cenários diferentes. O primeiro consiste em delimitar apenas o minério que, além de pagar seu custo de exploração, paga também os investimentos da mina. Para esta primeira otimização é recomendável que o limite econômico lavrável seja delimitado pela porção do depósito que, na média, oferecerá o menor custo de lavra por unidade de produto final e não maior retorno total.

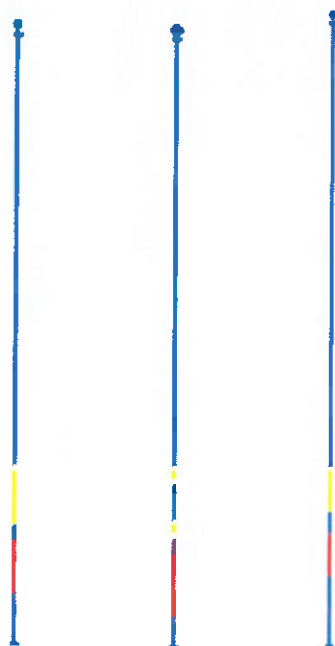
Após esta primeira fase, devemos rodar o processo novamente, mas desta vez encontrando o minério que, além de pagar seu custo de exploração, paga também o custo de estocagem. Por fim, rodaremos a otimização clássica definindo todo o minério que paga apenas seu custo de extração.



**Figura 11: Processo de Otimização com Diferentes Custos**

Ao final destas etapas teremos três tipos de minérios que deverão ser lavrados de uma forma específica:

- Inicialmente, o foco de lavra deve ser voltado para o minério Tipo I, o qual fornecerá o retorno mais rápido ao investimento, adiantando o Payback e aumentando a TIR no início do projeto;
- Caso minério do Tipo II deva ser removido por restrições operacionais antes do Payback, o mesmo deve ser estocado, de preferência perto do britador, em uma pilha que será retomada depois que o investimento for pago;
- Finalmente, o terceiro tipo de minério será tratado como estéril até o Payback, podendo depois ser processado.



**Figura 12: Furos de Sonda Otimizados e Classificados por Tipo de Minério**

## 1.2 RESULTADOS ESPERADOS

É evidente que teremos uma diminuição das reservas, já que parte do minério Tipo III será tratado como estéril nos primeiros anos de lavra, mas o empreendimento trará um retorno do capital investido mais rápido, baixando o risco do mesmo. Além disso, a produção a custos reduzidos nos primeiros anos alavancará o fluxo de caixa possibilitando, em alguns casos, um maior VPL do projeto em um intervalo de tempo menor.

Uma maneira de minimizar este “desperdício” de recursos naturais seria armazenar o minério de Tipo III em uma pilha separada e não destiná-lo diretamente à pilha de estéril. Como vimos, o Planejamento de Longo Prazo é um processo que não para de ser realizado até o fechamento da mina e em um estudo futuro o material em questão poderá ter algum valor comercial para a empresa.

## CONCLUSÕES

É evidente que as técnicas de controle de qualidade e de otimização econômica na mineração vêm evoluindo cada vez mais, especialmente depois da incorporação de métodos computacionais. Porém, muitos modelos ainda não comportam a complexidade da indústria mineral.

A qualidade do minério é normalmente analisada apenas durante estudos de curto prazo e é, contudo, extremamente importante e essencial em planos de lavra de todo e qualquer horizonte, já que é capaz de influenciar escolhas de grande magnitude como mesmo a seleção da frota da mina. Pensando nisso, este trabalho vem propor um método voltado para a escolha da qualidade ideal de minério a ser lavrado nos estágios iniciais do projeto da mina. A técnica apresentada é um tanto quanto simples e traz diversas vantagens como a minimização dos custos de lavra por unidade de produto final e encoraja o engenheiro a calcular minuciosamente os parâmetros operacionais de lavra a serem utilizados posteriormente na fase de otimização econômica.

É fato que, após a minimização de custos através da escolha da qualidade ótima do minério, devemos estudar os limites e sequência ótimos para extração do depósito mineral. Para isto, uma metodologia de reclassificação de minério e prioridade de lavra do mesmo foi proposta. A ferramenta traz a vantagem de retornar ao investidor o capital investido mais rapidamente, adiantando o payback do projeto e, como consequência, diminuindo o risco do empreendimento, o tornando mais atrativo.

Por fim, temos duas ferramentas que, combinadas, fornecem ao projeto a forma mais vantajosa de extração do mineral, tanto do ponto de vista dos custos empregados no controle de qualidade quanto da sequência de extração mineral que maximizará a rentabilidade da mina e produzirá o menor payback possível.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accenture. **Achieving High Performance in Mining**. 2009. Disponível em Accenture Website: [http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture\\_Mining\\_brochure.pdf](http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture_Mining_brochure.pdf)  
Acesso em 15 de Novembro de 2012.
- Annels, A. E. **Mineral Deposit Evaluation: A practical approach**. Chapman and Hall, United Kingdom: Kluwer, 1991.
- Azevedo, R. C. **Modelo de gerenciamento de informações na cadeia de valor de mineração e de petróleo**. Tese de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.
- Berlanga, J., Cardona, R., & Ibarra, M. **Recursive formulae for the Floating Cone Algorithm. Mine Planning and Equipment Selection**. Rotterdam, Netherlands, 1988.15-25p.
- Branco, P. d. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- Breedt, J. **CAE Mining Overview Presentation**. Apresentação da empresa. Johannesburg, Gauteng, South Africa, 2010. Não publicado
- Campos, V. F. **Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. Rio de Janeiro: Bloch Editores S.A, 1992.
- Chaves, A. P. **Gerenciamento de Projetos de Mineração**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 2002.
- Food and Adriculture Organization of the United Nations. **Cost Control in Forest Harvesting and Road Construction**. Forestry Paper 99, Forestry Department, Rome, 1992.
- Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. **Undergroung Mining Methods**. SME, 2001.
- Kear, R. M. **Mine Project Life Cycle**. Trabalho apresentado a Massmin - Santiago Chile, 2004.
- Klippel, A. F., Petter, C. O., & Antunes Jr, J. A. **La Aplicación de la Administración Lean en las industrias de minería**. Santiago, Chile: Dyna, 2008. 81-89p.
- Lerchs, H., & Grossman, I. **Optimum Design of Open Pit Mines**. Trabalho Apresentado a CIM Bull, 1964. 58, 47-54p.
- Marin, T. **Impacto da variabilidade operacional no plano de lavra**. Tese de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2009.
- Maximiano, A. C. **Introdução à Administração**. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2000.

Mintec Inc. **Long Term Planning for Open Pit Mines**. 2009. Disponível em <http://www.minesight.com/Portals/0/Whitepapers>. Acesso em 15 de Novembro de 2012.

Orace, K., Hossein, N., Soltani, M., & Amirafshari, M. **Productivity improvement from economic concept to an engineering tool**. Trabalho apresentado a 2010 Underground Coal Operators' Conference. Wollongong, 2010.

Pasqua, R. C.. **Projeto de Melhora da Qualidade de Lavra Através da Gestão Operacional de Mina (Projeto GQ-Lavra): Procedimento de Planejamento da Preparação de Frentes de Lavra**. Relatório Final de Iniciação Científica. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2010.

Pickering, R. **The optimization of mining method and equipment**. Apresentado a International Platinum Conference 'Platinum Adding Value'. Johannesburg: The South African, 2004.

Pinto, L. R., & Merschmann, L. H. **Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos**. Revista Escola de Minas, 2001.

Project Management Institute. **Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) - Global Standard**. Pennsylvania, USP: Project Management Institute, Inc, 2008.