

Marisa Rangel de Sousa

**PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO PARA UMA PEDREIRA DE  
CALCÁRIO – ESTUDO DE CASO**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande-PB  
2005

**Marisa Rangel de Sousa**

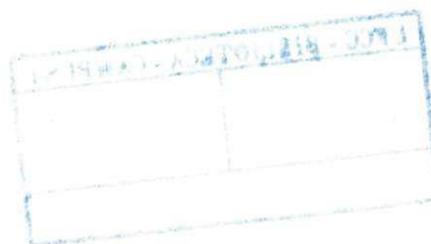
**PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO PARA UMA PEDREIRA DE  
CALCÁRIO – ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Campina Grande para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia de  
Minas

**Área de concentração: Lavra de Mina**

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo J.L. Bonates**

**Campina Grande – PB  
2005**





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S725p  
2005

Sousa, Marisa Rangel de.

Planejamento de curto prazo para uma pedreira de calcário – Estudo de caso. / Marisa Rangel de Sousa. — Campina Grande, 2005.  
63f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Jorge Lira Bonates.

1. Metodologia de Planejamento de Curto Prazo. 2. Clinquer. 3. Calcário e Argila. Diminuição dos Custos. 4. Melhor Aproveitamento da Reserva. I. Título.

CDU – 622.01(043)

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr Eduardo Jorge Lira Bonates - UFCG**

---

**Prof. Dr, Giorgio Francesco Cesare De Tomi – POLI/USP**

---

**Prof. Dr Vishwambhar Nath Agrawal, UFCG**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Jorge Lira Bonates; pelos ensinamentos que me foram passados.

Ao meu co-orientador Prof. M. Sc Arlindo José Bazante pelo auxílio a minha orientação, pelo apoio e por acreditar no meu trabalho.

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado e me ajudaram sempre que precisei.

A todos da Datamine Latin América pela ajuda e cooperação

Ao meu pai, por todo amor, dedicação, apoio e incentivo que sempre me deu em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos, pela ajuda em todos os aspectos.

A todos, que direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado.

**SUMARIO**

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
1.0 - INTRODUÇÃO .....	11
2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1 - Histórico .....	13
2.2 - Controle de Qualidade para Fabricação do Cimento .....	13
2.3 - Fabricação do clínquer .....	14
2.4 - Generalidades .....	17
2.5 - Otimização de Cavas .....	19
2.5.1 - Histórico .....	19
2.5.1.1 - Conceito - Lerchs-Grossmann .....	20
2.5.1.2 - Conceito Cones Flutuantes .....	22
2.6 - Programação Dinâmica .....	22
2.7 - Função Parametrização .....	23
2.8 - Planejamento de Curto Prazo .....	26
2.9 - Estacionarização de Parâmetros .....	28
3.0 - ESTUDO DE CASO .....	30
3.1 - Objetivo .....	30
3.2 - Localização da Mina .....	30
3.3 - Geologia Regional da área em Estudo .....	31
3.3.1 - Grupo Bambuí .....	31

	6
3.3.2 - Geologia Local .....	32
3.4 - Definição do Problema .....	34
4.0 - METODOLOGIA .....	35
4.1 - Modelo de Geológico .....	36
4.1.1 - Banco de Dados .....	36
4.2 - Criação do modelo de blocos em estudo .....	38
4.3 - Definição da Cava Final .....	39
4.4 - Sequenciamento de lavra .....	40
4.5 - Conceitos sobre o software "Estacio" .....	40
4.5.1 - Terminologia .....	42
4.6 - Característica da Pedreira .....	49
4.6.1 Equipamentos da Mina .....	49
4.7 - Dados de Entrada para simulação .....	50
4.7.1 - Características dos parâmetros usados para o seqüenciamento de curto prazo da pedreira .....	50
4.7.2 - Simulação para o mês de Fevereiro .....	50
4.7.3 - Simulação para o mês de Março .....	51
4.7.4 - Simulação para o mês de Abril .....	52
4.8 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS .....	53
4.9 - RESULTADOS GRÁFICOS .....	54
5.0 - CONCLUSÃO .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58

## RESUMO

Sousa, Marisa Rangel. Planejamento de curto prazo para uma pedreira de calcário – estudo de caso – Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 63 p.

O presente trabalho tem como objetivo implantar uma metodologia de planejamento de curto prazo para uma pedreira de calcário visando à diminuição do desvio padrão nos teores de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compostos presentes na matéria-prima básica da fabricação do clínquer, o calcário e a argila, até o britador. Com isso torna-se desnecessário a correção pós-britagem o que implica uma diminuição dos custos, e melhor aproveitamento da reserva. Para isto foram feitas simulações com um software de seqüenciamento de lavra, cuja técnica utilizada é estacionarização de parâmetros.

**Palavras-chave:** Metodologia de planejamento de curto prazo, clínquer, calcário e a argila, Diminuição dos custos, melhor aproveitamento da reserva.

### ABSTRACT

Sousa, Marisa Rangel. *Short-term planning for quarry limestone - case study* - Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 63 p.

This study aims to establish a methodology for short-term planning in a limestone quarry. The main objective is to reduce the standard deviation in the concentration of  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the ROM (Run of Mine). These are the components of the basic raw materials (limestone and clay) for the manufacture of clinker. This type of quality control results on mine reduced costs. This occurs by the elimination of actions to correct quimical quality after crushing. In consequence there is also a better use of the reserves. Many simulations have been done using a specific kind of mining software for mine sequencing. The technique used can be named of "parameters estacionarized".

**Keywords:** Methodology of short-term planning, clinker, limestone and clay, reduced costs, better use of the reserves.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1 – Reações químicas .....	15
Figura 1.2 – Composição do clínquer com as correções.....	15
Figura 1.3 – Composição final do cimento .....	16
Figura 1.4 - Distribuição da produção mundial de cimento em 2003.....	17
Figura 1.5 - Distribuição da produção nacional de cimento em 2003 .....	18
Figura 1.6 - Produtores de cimento no Brasil.....	18
Figura 2.1 - Matriz de lucro do depósito.....	21
Figura 2.2 – Definição dos limites econômicos da cava.....	21
Figura 2.3 – Cone de remoção.....	22
Figura 3.1 - Mina .....	30
Figura 4.0 - Fluxograma da cadeia de planejamento .....	35
Figura 4.1 - Fluxograma para sequenciamento de Longo prazo .....	39
Figura 4.2 - Dados de Entrada.....	49
Figura 4.3 - Configuração da Mina .....	50
Figura 4.4 - Blocos do mês de fevereiro .....	53
Figura 4.5 - Resultados da $\text{SiO}_2$ .....	54
Figura 4.6- Resultados do $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	54
Figura 4.7 - Resultados do $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	55
Figura 4.8 - Resultado do $\text{CaO}$ .....	55
Figura 4.9 - Gráfico de aderência ao plano mensal .....	55

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1 - Produção e Consumo de Cimento .....	11
Tabela 3.1 - Estratigrafia da Fácies Bambuí .....	32
Tabela 4.1 - Tipos de litologias .....	37
Tabela 4.2 - Dados de entrada para o sequenciamento /Fevereiro .....	51
Tabela 4.3 - Dados de entrada para o sequenciamento/Marco .....	52
Tabela 4.4 - Dados de entrada para o sequenciamento/Abril.....	53
Tabela 4.5 - Valores ponderados obtidos – Fevereiro/02 .....	54
Tabela 4.6 - Valores ponderados obtidos – Março/02 .....	54
Tabela 4.7 - Valores ponderados obtidos – Abril/02 .....	54

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Dentre os minerais não metálicos produzidos industrialmente, a indústria cimenteira constitui-se numa das mais importantes do país, com um grande campo de aplicação. As principais matérias-primas utilizadas para a fabricação do cimento são o calcário e a argila, que são extraídos normalmente em minas próximas à fábrica, visando minimizar custos relacionados ao transporte do material.

O consumo aparente de cimento, em 2002, registrou um decréscimo de 3% em relação ao ano anterior, passando de 39.029.542/t para 37.832.460/t. O consumo per capita de cimento no Brasil está na faixa de 267 kg/habitante. DNPM (2003). A Tabela 1.1 apresenta o consumo e a produção nacional do cimento entre os anos de 1997 a 2002.

**Tabela 1.1- Produção e Consumo de Cimento**

Ano	Produção (t)	Consumo (t)
1997	38.069.000	38.366.348
1998	39.941.000	40.353.797
1999	40.270.000	40.637.199
2000	39.208.213	39.151.900
2001	38.927.123	39.029.542
2002	38.027.310	37.832.460

Fonte: DNPM (2003) - Sumário Mineral

Atualmente existem no mercado softwares específicos para cada etapa dos processos de gerenciamento de mina. Nas áreas de planejamento de longo prazo e despacho, os programas são eficientes e amigáveis, utilizam tecnologia de ponta e estão sendo amplamente utilizados nas minerações. Na área de planejamento de curto prazo, existem alguns programas, mais o uso dos mesmos nas minerações ainda é pequeno, apesar da crescente procura por soluções que atendam as necessidades do curto prazo.

O presente trabalho faz parte do projeto OPTI-CQ, que tem como objetivo desenvolver uma metodologia específica para controlar a qualidade do material na lavra de calcário para cimento.

Dentro desse projeto OPTI-CQ os pontos principais aqui desenvolvidos foram:

- Implantação do planejamento de curto prazo;
- Acompanhamento dos resultados e possível refinamento da metodologia em estudo.

Com objetivo de minimizar o desvio padrão nos módulos controlados na lavra do argical<sup>1</sup>, o presente trabalho através do sequenciamento de lavra busca melhorar o aproveitamento do ROM.

Obter um mínimo desvio padrão nos componentes químicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ ) o que faz-se com que não seja necessário a correção do ROM pós britagem.

No estudo de caso apresentado, foi usada ferramenta que está disponível no mercado, enfocando de forma geral o controle de qualidade no planejamento de curto prazo

## 2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão primeiramente foi feita algumas considerações importantes sobre a indústria do cimento. Posteriormente foram abordados temas envolvendo técnicas de otimização de cava, e principalmente conceitos sobre parametrização e estacionarização. Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um software de sequenciamento de lavra cuja técnica utilizada é a estacionarização de parâmetros.

## 2.1 - Histórico

O cimento teve sua origem há 4.500 anos. Ao longo do tempo sofreu modificações e foi aprimorado. Através de pesquisas e estudos foram desenvolvidos diferentes tipos de cimento para as mais diversas aplicações. Atualmente, o cimento é um material bem definido e sua fabricação rigorosamente controlada, seguindo normas e técnicas. Dentre os diversos tipos de cimentos, o mais comum no mercado é o *Portland*.

A produção de cimento no Brasil teve início em 1926 com a fábrica Perus, em São Paulo - SP. O surgimento da maioria dos grupos produtores de cimento hoje existentes no país deu-se no período entre 1930 e 1960. Porém, entre 1970 e 1980, o grande desenvolvimento da indústria, a qual evoluiu de uma produção de 9,0 milhões/t em 1970 para 27,2 milhões/t em 1980. A partir de então, a recessão que se estendeu nesta década, fez com que em 1991 a produção retornasse ao nível de 1980, quando se atingiu novamente o patamar de 27,5 milhões/t. Em 1999 a produção brasileira foi da ordem de 40,27 milhões/t, representando 2,6% da produção mundial e no ano de 2002 essa produção teve um decréscimo de 3% em relação ao ano anterior com uma produção total de 37,83 milhões/t.

## 2.2 - Controle de Qualidade para Fabricação do Cimento

A fabricação do cimento é composta de várias etapas, que inicia na extração da matéria prima e termina no carregamento do cimento. Durante estas etapas é feito um rigoroso controle de qualidade, principalmente na fábrica.

Um dos principais problemas com relação ao controle de qualidade está na matéria prima, ou seja, na qualidade da mistura formada por calcário e argila, chamada argical. Este material é extraído da mina e britado para formar a pilha de pré-homogenização. A composição dessa pilha deve ter teores específicos de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , para que a farinha atenda as necessidades de fabricação do cimento.

Para controlar a qualidade do argical que forma a pilha de pré-homogenização algumas cimenteiras utilizam um medidor que aplica a técnica PGNAA (Prompt Gamma

Neutron Activation Analysis) para fazer medições contínuas e on-line do material que passa pelo britador, informando os valores químicos dos componentes de controle da pilha. Dessa forma, é possível monitorar os desvios da qualidade e dosar as correções na farinha.

Na maioria dos casos, as principais variáveis de controle são o FSC (Fator de Saturação do Cálcio), o MS (Módulo de Sílica) e o MA (Módulo de Alumina). Os valores das variáveis são especificados pela fábrica e para que os mesmos fiquem dentro dos padrões especificados, é necessário misturar os materiais de diferentes frentes de lavra.

O principal objetivo do controle de qualidade da matéria prima é reduzir a variabilidade do material fornecido à fábrica, diminuindo desta forma a adição de corretivos e custos, principalmente com o forno.

O FSC e outros fatores de qualidade podem ser controlados durante o planejamento de longo prazo, com a otimização da cava final respeitando estes parâmetros. O mesmo pode ser feito para o planejamento de médio e curto prazo. No caso do planejamento de curto

### **2.3 - Fabricação do clínquer**

Industrialmente, o processo de fabricação do clínquer Portland consiste na lavra e britagem das matérias-primas, seguindo-se a preparação adequada da mistura crua, denominada "farinha", com posterior queima por volta de 1.450°C em forno rotativo. O clínquer Portland é a denominação dada ao produto desse processo de sinterização.

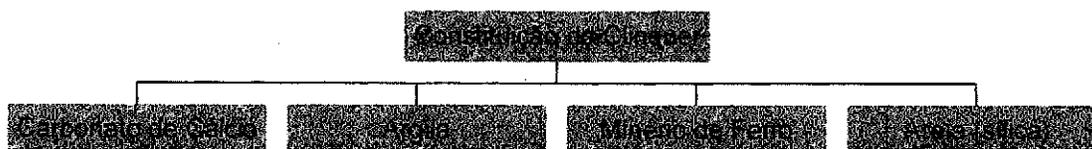
O clínquer é composto por uma mistura de calcário e argila na proporção 80% e 20% respectivamente. Mas devido a heterogeneidade da matéria-prima é necessário que haja correção durante o processo, facilitando a operação e adequando as reações químicas. Na Figura 1.1 podem ser analisadas essas reações, que ocorrem no interior do forno rotativo, quando a temperatura chega a 1.450° C.

TEMPERATURA	PROCESSO	CALOR TROCADO
100°C	Evaporação da água livre	Endotérmico
340°C	Decomposição do Carbonato de Magnésio	Endotérmico
550°C	Desidroxilação da argila e reação do $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3$ com o calcário	Exotérmico
305°C a 1000°C	Decomposição do carbonato de cálcio	Endotérmico
1000°C a 1200°C	Formação do $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ desaparecimento do $\text{SiO}_2$ livre	Endotérmico
1250°C a 1280°C	Início da formação de líquido	Endotérmico
1400°C a 1450°C	Complementação da formação de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .  Desaparecimento de CaO livre por reação com o $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , para formar o $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ .	Endotérmico

Fonte: Enciclopédia química, volume1 [www.cienciaquimica.hpg.com.br/interessante/cimento/cimento.htm](http://www.cienciaquimica.hpg.com.br/interessante/cimento/cimento.htm)  
Acesso em: 13 de Março de 2003

**Figura 1.1 – Reações químicas**

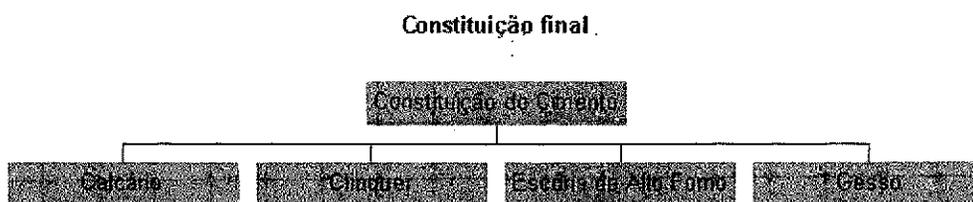
### Composição do Clínquer



1 Argical : mistura de calcário e argila – principal matéria prima para fabricação do cimento

**Figura 1.2 – Composição do clínquer com as correções**

. Após a produção do clínquer é necessária a adição de novos aditivos como calcário, escória de alto forno e gesso para enfim produzir o cimento, conforme ilustra a Figura 1.3.



**Figura 1.3 – Composição final do cimento**

O *clínquer* é o responsável pelo desempenho mecânico do cimento. Além dele, outro componente utilizado na fabricação do cimento é a gipsita, ou gesso, que é introduzido na fase de moagem. A finalidade deste componente é retardar o tempo de pega<sup>1</sup> do cimento. As escórias e pozolanas são adicionadas para aumentar a resistência mecânica. A composição do cimento *Portland* nacional é dada pela fórmula de Bougué a seguir:

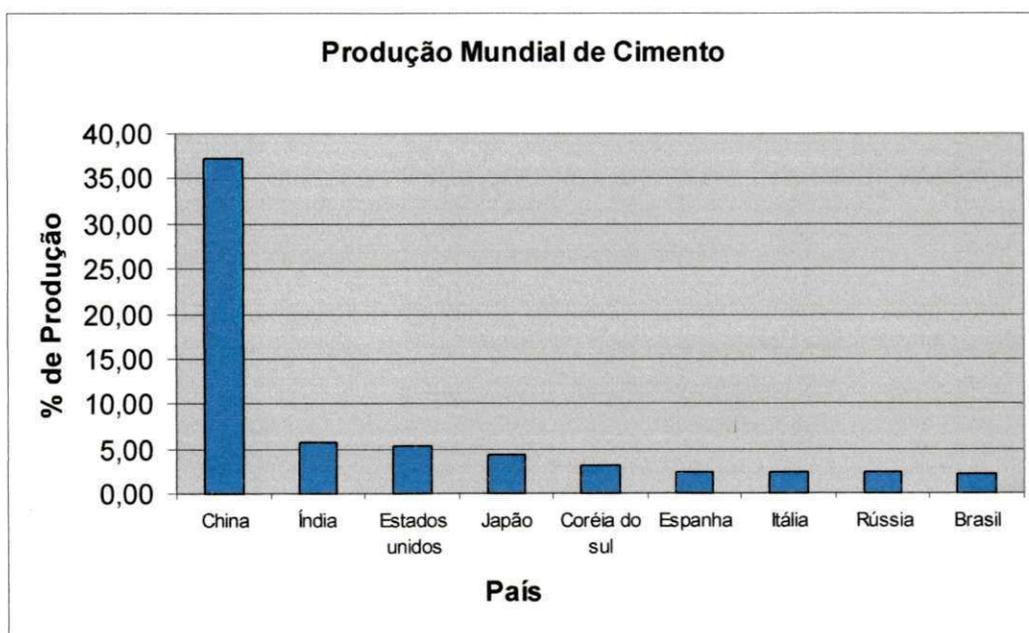
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C <sub>3</sub> S) – 18 a 66%
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C <sub>2</sub> S) – 11 a 53%
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(C <sub>3</sub> A) – 2 a 20%
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(C <sub>4</sub> AF) – 4 a 14%

Essa fórmula faz o cálculo teórico do teor de C<sub>3</sub>S no clínquer a partir dos teores de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e define o tipo de cimento Portland

<sup>1</sup> Tempo de Pega – tempo de endurecimento do cimento

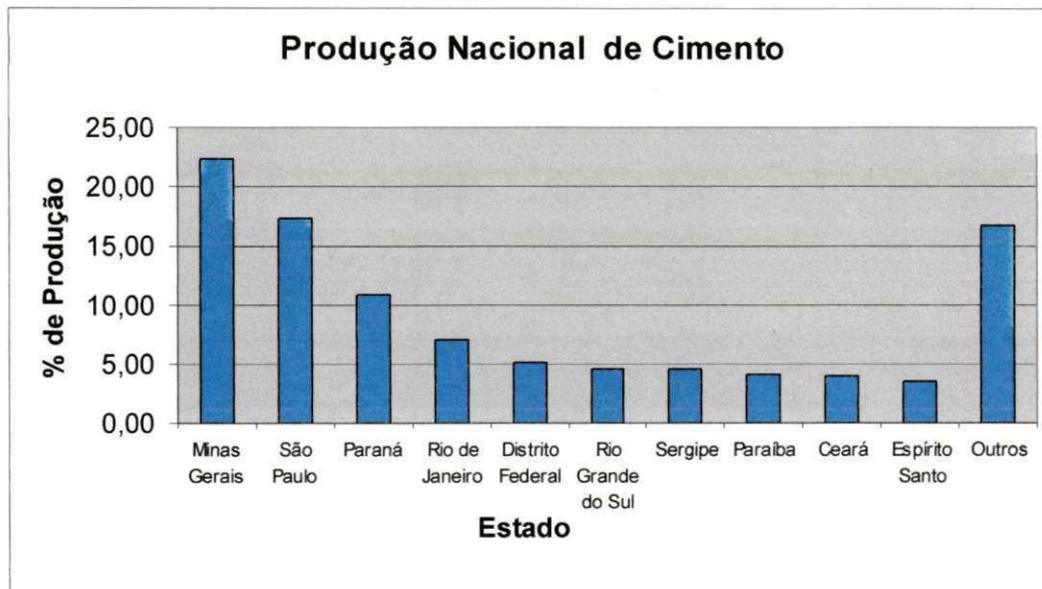
## 2.4 - Generalidades

O Brasil é responsável por 2,20% da produção mundial de cimento, ficando apenas atrás da China (37.2%), Estados Unidos (5.3%), Japão (4.4%), Coreia do Sul (3.1%), Espanha (2.3%) e Rússia (2.3%). A figura 1.4 mostra a distribuição da produção mundial de cimento no ano de 2003. A produção nacional sofreu uma redução de 3% com relação ao ano anterior, 37.832.460 t. O maior produtor nacional é o estado de Minas Gerais, responsável por 22,3% da produção. A figura 1.5 mostra a distribuição da produção nacional de cimento no ano de 2003.



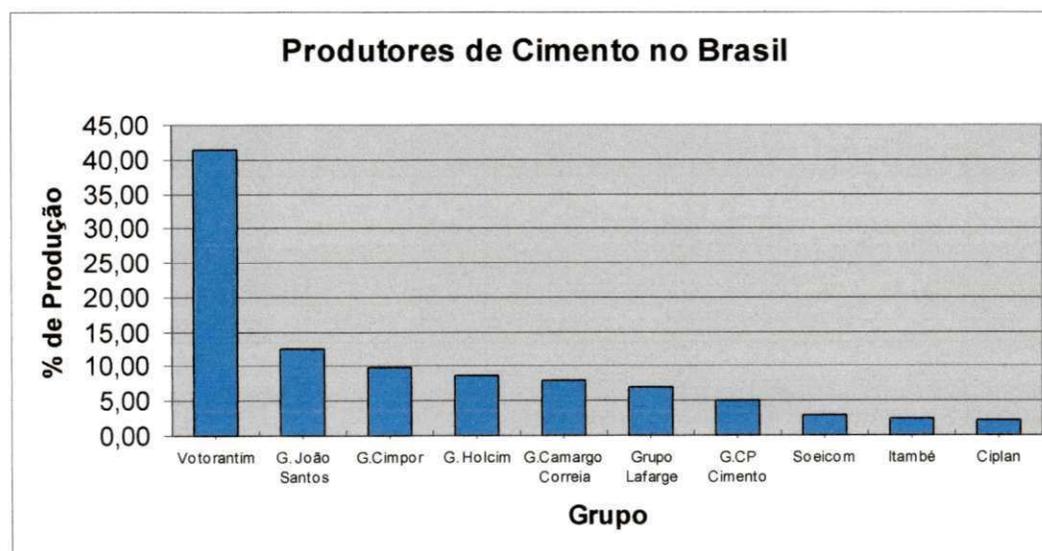
Fonte: Sumário Mineral 2003 – DNPM

**Figura 1.4 - Distribuição da produção mundial de cimento em 2003**



Fonte: Sumário Mineral 2003 – DNPM

*Figura 1.5 - Distribuição da produção nacional de cimento em 2003*



Fonte: Sumário Mineral 2003 – DNPM

*Figura 1.6 - Produtores de cimento no Brasil*

## 2.5 - Otimização de Cavas

### 2.5.1 - Histórico

Até a primeira metade da década de 60, todo o projeto de cava final das minas a céu aberto era feito manualmente. Os procedimentos para o estabelecimento das cavas eram baseados nos processos das tentativas e erros.

O estabelecimento ótimo de lavra tem que atender não somente o maior lucro possível, mas também restrições operacionais de lavra como ângulos máximos de talude, larguras mínimas de praça, movimentação mínima de frotas e estacionarização de teores na alimentação da planta, Girodo (2000).

O algoritmo de Lerchs-Grossmann, como descrito e provado por ambos, tornou-se a referência mundial como a solução matemática do problema de otimização de cavas (1965) Esse método é um dos mais aplicado na determinação dos limites da cava final e é baseado na técnica de programação dinâmica.

O primeiro passo do processo é dividir uma seção transversal da cava em blocos. O tamanho escolhido para os blocos é de tal forma que possua uma altura equivalente a altura do banco e espessura tal que a linha diagonal resultante através dos blocos forneça o talude final desejado.

O passo seguinte é designar valores aos blocos com base no teor e na economia da operação de sua remoção. Os blocos de estéril possuem um valor negativo, equivalente ao custo de extração do mesmo. Aos blocos de minérios são designados valores positivos, equivalentes ao lucro proporcionado pela sua extração, não incluindo o custo de remoção do estéril.

A técnica de Lerchs e Grossman é baseada na seguinte relação:

$$P_{ij} = M_{ij} + \text{Max } P_{(i+k, j-1)}$$

Onde,

$$K = -1, 0, 1$$

$M_{ij}$  = penalidade do lucro na extração de uma única coluna de blocos  $ij$  na sua base

$P_{ij}$  = lucro máximo que pode ser gerado pelas colunas de 1 a  $j$  dentro do cava e que contém  $ij$  nos seus limites.

Segundo Calder (2000) este método de modelamento não é aproximado. É uma técnica precisa para a definição dos limites da cava em uma seção transversal bidimensional, o qual dará o lucro máximo possível.

#### **2.5.1.1 - Conceito - Lerchs-Grossmann**

O método trabalha com um modelo de blocos criado a partir de um corpo geológico. Gradualmente são construídas matrizes de blocos relacionados que podem ou não ser lavrados. A última matriz define um contorno de cava que tem valor o máximo possível, considerando os requerimentos dos ângulos de talude da cava final. E esse contorno inclui todo o bloco lavrado, considerando o estéril removido para acessar o minério.

Esse algoritmo tem como objetivo maximizar o valor presente líquido. Cada bloco que pode ser potencialmente lavrado e marcado, podendo os mesmos ser ou não ativado várias vezes durante o processo de otimização.

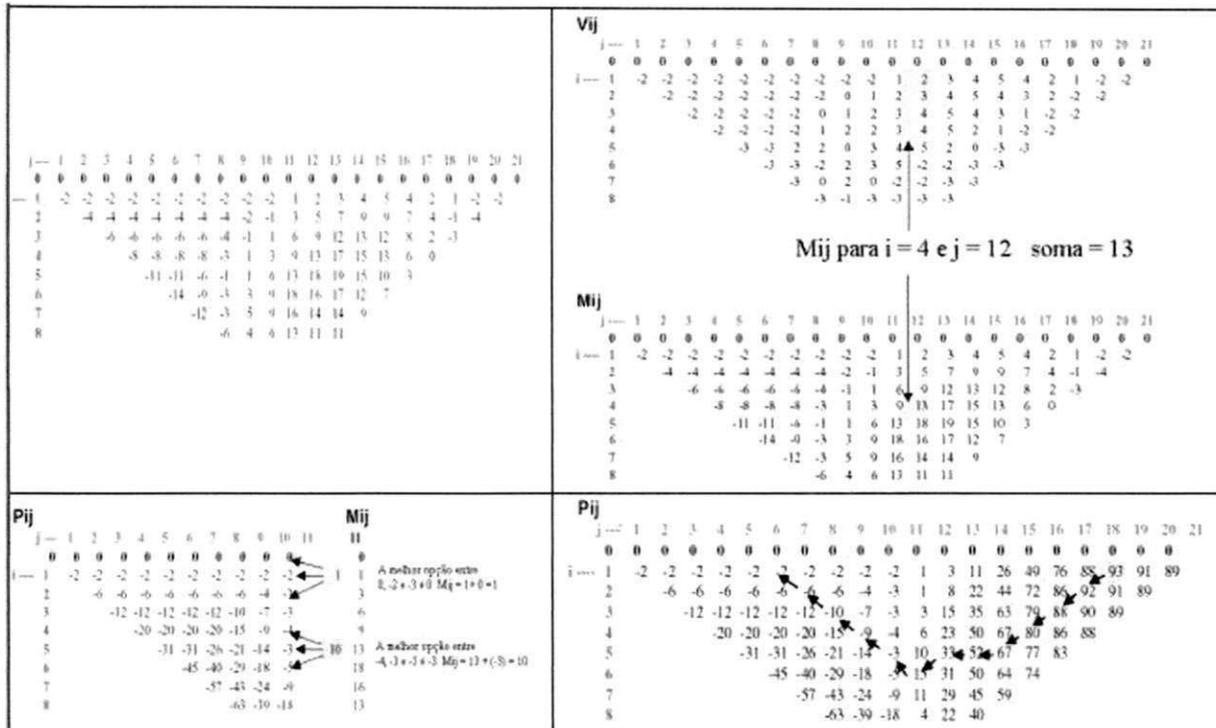


Figura 2.1 - Matriz de lucro do depósito

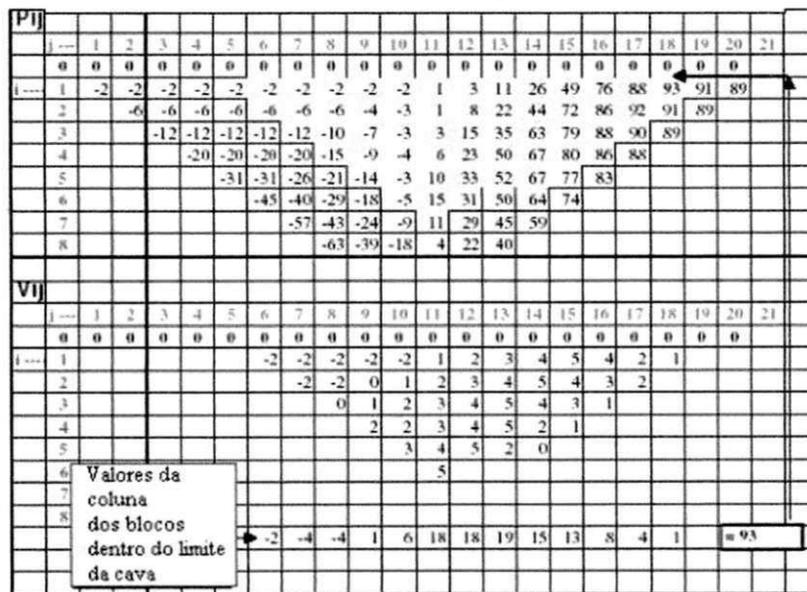
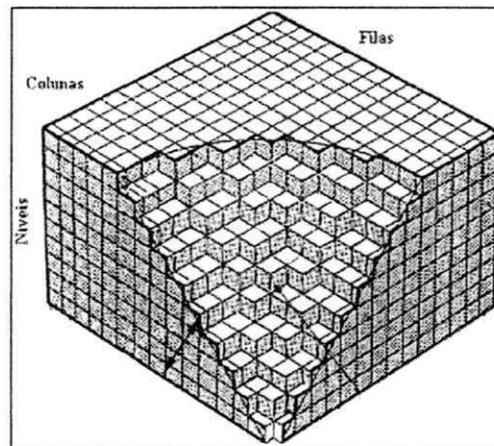


Figura 2.2 – Definição dos limites econômicos da cava

### 2.5.1.2 - Conceito Cones Flutuantes

A técnica dos cones flutuantes define o contorno ótimo de cava final pelo método das tentativas. Ele trabalha extraindo os blocos que podem ser retirados com lucro. Para isto ele faz uma varredura no modelo de blocos com um cone invertido, e seleciona apenas os blocos em que seu valor seja capaz de pagar sua retirada e a do material imediatamente acima do mesmo. Desta forma os cones positivos são adicionados um a um para formar o contorno da cava final. O mesmo procedimento deve continuar até o fim da seção considerada.

Na figura 2.3 pode ser vista o cone de remoção



*Figura 2.3 – Cone de remoção*

## 2.6 - Programação Dinâmica

A programação dinâmica é usada nos casos onde um problema é dividido em subproblemas e estes não são independentes. Desta forma existe uma necessidade de armazenar os resultados que serão compartilhados entre os subproblemas, evitando cálculos repetidos.

A programação dinâmica pode ser dividida em quatro passos:

1. Caracterização da estrutura de uma solução ótima
2. Definir recursivamente o valor de uma solução ótima
3. Cálculo do valor de uma solução ótima
4. Construção de uma solução ótima a partir da informação computada.

## 2.7 - Função Parametrização

A estacionarização de parâmetros é utilizada principalmente nos casos onde é necessário manter uma alimentação com teores constante na usina de beneficiamento. Rogado e sua equipe começaram em 1967 a estudar a estacionarização de parâmetros para resolver o problema de distribuição de material, para distintas usinas de beneficiamento de uma mina de ferro.

Com base em seus estudos, Rogado elaborou o “Teorema de exaustão de uma jazida”, que é aplicado na estruturação do modelo de estacionarização de parâmetros para lavra a céu aberto.

### *Teorema de Exaustão de uma Jazida*

Segundo Valente (1982), considere-se, no caso geral, a jazida dividida em blocos de lavra tomados como unidades de trabalho. A cada bloco  $i$  estão atribuídos vários parâmetros:  $E_i$ ,  $l_i$ ,  $t_i$ ,  $R_i$ , etc..

Admita-se, como é usual, que se pretende transportar caudal constante de minério tal qual lavrado na jazida:

$$e_o = \text{Cte.} \quad (1)$$

Onde  $e_o$ : massa por unidade de tempo a transportar da jazida.

Imponha-se, adicionalmente, a condição desejável de utilizar frota de transporte constante, compatível com a condição anterior, com plena utilização durante toda a vida da jazida (ou parte da mesma):

$$n_o = \text{Cte.} \quad (2)$$

Onde  $n_o$ : número total de unidades de transporte da frota.

Nestas condições, notando-se que

$$n_o = (v \cdot t_o \cdot e_o + \sum e_i \cdot \zeta_i) / v \cdot Q \cdot r \quad (2')$$

Onde  $n_o$ : número total de unidades de transporte da frota.

$v$ : velocidade média de ciclo das unidades de transporte;

$t_o$ : tempo dispendido por carga, descarga e manobras de cada unidade de transporte;

$e_o$ : massa por unidade de tempo a transportar da jazida;

$e_i$ : massa extraída do bloco  $i$  por unidade de tempo;

$\zeta_i$ : distância do centro de massa do bloco  $i$  ao ponto de descarga (ida e volta) medida sobre o traçado previsto para a estrada de acesso;

$Q$ : capacidade útil (em massa) da unidade de transporte;

$r$ : eficiência horária de utilização da frota.

A condição (2) implica

$$\sum e_i \cdot \zeta_i = K, \text{ com } K \text{ constante.} \quad (3)$$

Onde  $e_i$ : massa extraída do bloco  $i$  por unidade de tempo;

$\zeta_i$ : distância do centro de massa do bloco  $i$  ao ponto de descarga (ida e volta) medida sobre o traçado previsto para a estrada de acesso.

Num ato de lavra correspondente a tempo  $T$  as condições (1) e (3) traduzem-se em

$$T \cdot e_o = e'_o = \text{Cte.} \quad (1')$$

$$T \cdot \sum e_i \cdot \zeta_i = \sum e'_i \cdot \zeta_i = K', \text{ com } K' \text{ constante.} \quad (3')$$

Onde  $T$ : duração de um ato de lavra;  
 $e_o$ : massa por unidade de tempo a transportar da jazida;  
 $e'_o$ : massa total a transportar durante um ato de lavra;  
 $e'_i$ : massa do bloco  $i$  transportado durante um ato de lavra.  
 $e_i$ : massa extraída do bloco  $i$  por unidade de tempo;  
 $\zeta_i$ : distância do centro de massa do bloco  $i$  ao ponto de descarga  
(ida e volta) medida sobre o traçado previsto para a estrada de  
acesso.

A totalidade dos atos de lavra, conduzindo à exaustão da jazida traduz-se em  
(condições necessárias, mas nem sempre compatíveis com as restrições).

$$\Sigma e'_i \cdot \zeta_i = \Sigma E_i \cdot \zeta_i \quad (4)$$

Onde  $e'_i$ : massa do bloco  $i$  transportado durante um ato de lavra;  
 $\zeta_i$ : distância do centro de massa do bloco  $i$  ao ponto de descarga  
(ida e volta) medida sobre o traçado previsto para a estrada de  
acesso;  
 $E_i$ : reserva atual do bloco de lavra  $i$  (massa de minério).

A expressão (4) é equivalente a

$$m \cdot K' = \Sigma E_i \cdot \zeta_i \quad (5)$$

Onde  $m$ : totalidade de atos de lavra;  
 $\zeta_i$ : distância do centro de massa do bloco  $i$  ao ponto de descarga  
(ida e volta) medida sobre o traçado previsto para a estrada de  
acesso;  
 $E_i$ : reserva atual do bloco de lavra  $i$  (massa de minério).

Por outro lado,

$$m \cdot e_o = \Sigma E_i \quad (6)$$

Onde  $m$ : totalidade de atos de lavra;

$e_o$ : massa por unidade de tempo a transportar da jazida;

$E_i$ : reserva atual do bloco de lavra  $i$  (massa de minério).

Donde

$$K' = \sum e'_i; \quad \zeta = e'_o \cdot L \quad (7)$$

Onde  $e'_i$ : massa do bloco  $i$  transportado durante um ato de lavra

## 2.8 - Planejamento de Curto Prazo

Os modelos de planejamento de curto prazo se prestam à determinação do ritmo de lavra a ser implementado em cada frente de lavra, levando-se em consideração a qualidade do minério em cada frente, a relação estéril/minério desejada, produção requerida, características dos equipamentos de carga e transporte e as características operacionais da mina. A variação do período para a realizar o planejamento de curto prazo pode ser semanal, mensal ou, no máximo, anual.

O plano de lavra envolve a tarefa da melhor concretização dos serviços num curto espaço de tempo, pelo fato de que as etapas envolvidas neste processo têm limites físicos de capacidade. O planejamento de curto prazo se preocupa, principalmente, com as restrições operacionais. As variações que ocorrem na eficiência do sistema que resultam das mudanças nas condições do terreno ou nas práticas de lavra são extremamente importantes. Pelo fato de que o desempenho de alguns equipamentos é determinado pelas condições do material, acesso, tempo de carregamento e transporte, resistências de rolamento e de rampa, etc.

O plano de curto prazo ou operacional é uma programação dos primeiros períodos da operação, onde são definidos:

- Seqüências de desenvolvimento.
- Produção.
- Teor de corte.
- Relação estéril/minério.

A finalidade principal do planejamento de curto prazo é definir os passos intermediários para atender aos objetivos do longo prazo. Além disso, procura ajustar a operação de forma a atender aos requisitos estabelecidos, ou seja: contorno da cava, teor, relação estéril/minério, antecipando informações básicas sobre os lucros necessários para previsões de produções futuras e necessidade de novos equipamentos.

A preparação do plano de curto prazo consiste em obter um conjunto de seções horizontais do depósito, estabelecendo uma série de cortes propostos para a mina. A locação e extensão dos cortes refletem a análise do planejador para vários fatores operacionais envolvidos. Como normalmente acontece mais de um tipo de minério poderá ocorrer na cava e, mais de um cava poderá ser lavrada. Nesse caso um programa anual de lavra deve ser desenvolvido, para indicar a taxa de produção diária programada para cada minério.

A estratégia de lavra para qualquer um tipo de plano deve refletir os objetivos gerenciais e empresariais. Por exemplo, ao considerar o valor do dinheiro com o tempo, é óbvio que a seqüência de lavra com o melhor teor deve ser executada nos anos iniciais com a finalidade de maximizar os lucros no menor espaço de tempo possível. Entre as estratégias econômicas, duas delas resultam ser extremas. A primeira refere-se à taxa de retorno máxima, a qual defende a lavra do minério de alto teor, e a segunda é a recuperação máxima da reserva, a qual promove a extração de material não econômico utilizando benefícios provenientes da porção econômica da jazida.

Outra estratégia trata da relação com o limite final da cava para maximizar o benefício. Esta tem sido amplamente utilizada pela indústria mineral, a princípio com algumas modificações, como a determinação de um benefício mínimo para cada volume de material extraído.

Entretanto, a estratégia de lavar um teor uniforme pode ser adotada para se obter uma melhor recuperação no processamento mineral, aumentar a eficiência, além das considerações dos impostos e a previsão de exaustão.

Um planejamento adequado deve, também, refletir a estratégia operacional de outras minas. A palavra estratégia tem sido utilizada por milhares de anos, principalmente nos estudos militares, entretanto o conceito de estratégia na área de negócios e administração é recente.

A estratégia é um curso específico de ação que indica precisamente como uma empresa está utilizando os seus recursos com o fim de alcançar os seus objetivos preestabelecidos. A seqüência de desenvolvimento da mina pode ser outra variável operacional a ser investigada, ou seja, o quanto de avanço na remoção do material estéril deve

ser dado ou qual a porção do depósito que deve ser removido. Neste caso é importante estabelecer uma programação para a relação de remoção de estéril durante a vida da mina, de forma que ela não seja excessiva durante um determinado período, especialmente no início dos trabalhos de lavra. Bonates, (1999).

## 2.9 - Estacionarização de Parâmetros

As técnicas de otimização de cavas vêm sendo intensa e extensivamente empregadas no Brasil e no exterior. Por exemplo, uma lavra de calcário para cimento tem por objetivo proporcionar a manutenção dos denominados módulos do cimento (fator de saturação do cálcio, módulo de sílica e módulo da alumina) dentro de certas faixas bastante estritas no decorrer de toda a vida operacional do empreendimento. Normalmente as empresas consumidoras de minério de ferro demandam diversos tipos de produtos, desta forma não se pode aplicar a mesma metodologia de otimização para todas, já que as restrições impostas aos produtos não são as mesmas.

Para atender a necessidade de se produzir minério com características mais uniformes possíveis, Rogado (1967) desenvolveu uma técnica denominada Estacionarização de Parâmetros, empregada algumas vezes com sucesso, embora de maneira incipiente, eventualmente, por falta de recursos computacionais (hardware e software). Este procedimento ressurgiu no final do século XX com o objetivo de solucionar alguns problemas complexos e de grande porte no planejamento mineiro.

Contribuindo efetivamente para o melhor aproveitamento de diversos recursos minerais, além de proporcionar o objetivo principal do método que é o de produzir minérios para instalações de beneficiamento com as características de qualidade mais constantes possíveis. Convém ressaltar que a otimização e a estacionarização não leva ao mesmo resultado e assim, privilegiando-se, uma sacrifica-se á outra, Campos (2000)

A técnica de estacionarização de parâmetros teve sua origem em 1967, devido aos trabalhos de Rogado, quando condições precárias de tratamento de minérios nas jazidas de ferro de Cassinga, em Angola, foi necessário estudar a melhor maneira de dividir este minério, alocando-o a dois tipos de processamento: um correspondendo a uma simples lavagem, com eliminação da fração argilosa pobre e outro de concentração em meio denso

(especificamente tambores de meio denso para a fração mais grosseira e, para as frações finas).

A estacionarização de parâmetros foi aplicada pela primeira vez no Brasil pela MBR – Minerações Brasileiras Reunidas, no início da década de 80, por Costa et al (1983) e apesar dos bons resultados alcançados, a mesma foi deixada de lado, em face de inúmeras solicitações da indústria mineira. Esta técnica tem evoluído significativamente, quer sob o ponto de vista teórico onde ocorreram inúmeros avanços Girodo et al (1998), entre eles a extensão do teorema de Rogado, quer sob o ponto de vista prático como a aplicação da técnica em depósitos os mais diversos e de grande porte, como é o caso das minas de ferro N4E em Carajás, PA e Casa de Pedra, MG, na mina de calcário para cimento de Pedra do Sino, em Carandaí, do Cimento Tupi etc.

Embora os novos avanços representem sob o ponto de vista teórico e prático, os métodos usados continuam trazendo em sua essência os conceitos de economia de mercado, função de beneficiamento (*dressing function*) como as curvas de lavabilidade de carvões, relações entre o teor de concentrado e a recuperação nos processos de flotação de minérios metálicos, constrangimentos diversos que ocorrem nas operações de lavra etc.

Um procedimento combinado, bastante interessante, que pode ser levado em consideração reporta-se à estacionarizar uma determinada variável, por exemplo, o teor de concentrado e maximizar outra (por exemplo o rendimento ponderal no processo). Procedendo-se assim, obtém-se o maior lucro com a venda de concentrado, além de manter a qualificação constante do minério. Acrescenta-se que é muito mais interessante estacionarizar a qualidade do produto (teores de concentrado), pois estas são menos variáveis que a qualidade de minério.

É claro que é possível estacionarizar apenas uma variável e deixar as outras completamente livres. Pode-se também estacionarizar uma variável e manter as outras variando dentro da faixas mais ou menos extensas. É ainda possível estacionarizar algumas variáveis e otimizar outras. Todavia à medida que se vai impondo restrições cada vez mais fortes, o sistema de equações/inequações subjacentes, descritor dos objetivos, deixam de ter soluções Campos (2000).

Nesse trabalho a técnica para o sequenciamento de lavra de curto prazo usado foi o de estacionarização de parâmetros químicos CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

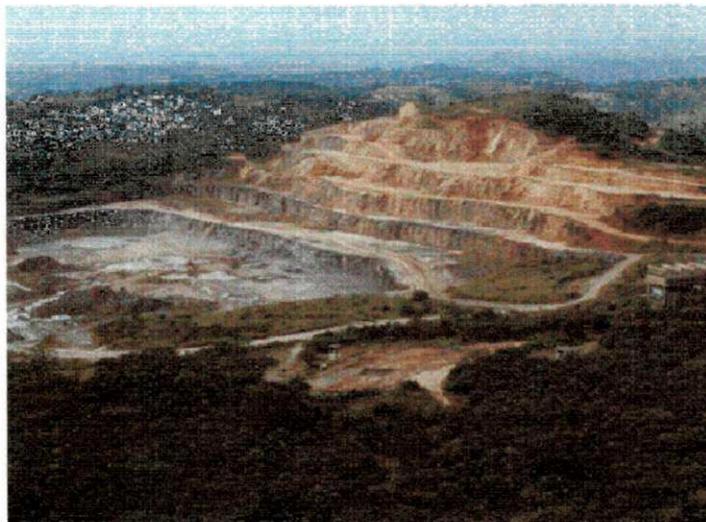
### 3.0 - ESTUDO DE CASO

#### 3.1 - Objetivo

Minimizar o desvio padrão dos componentes químicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ ) da matéria-prima básica para produção do clínquer, com objetivo de reduzir as correções pós-britagem. Diminuindo desta forma a adição de corretivos e custos, principalmente com o forno Para isso, foi feito um estudo de caso, usando um software de seqüenciamento de lavra, cuja técnica é a “*estacionarização*”.

#### 3.2 - Localização da Mina

O trabalho foi desenvolvido em uma pedreira de calcário, apresentada na Figura 3.1, que está localizada próximo ao trevo que liga a cidade de Vespaziano à Lagoa Santa (MG). O acesso à mina se dá através da Rodovia MG -10 km 30<sup>o</sup> em direção ao aeroporto de Confins.



*Figura 3.1 - Mina*

A Mina está localizada na formação geológica do grupo Bambuí.

### 3.3 - Geologia Regional da área em Estudo

#### 3.3.1 - Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí foi originalmente designado como “Série” por Rimann (1917) corresponde a uma extensa cobertura pelito-carbonatada do Neoproterozóico aflorante nos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais (*e.g.* Dardenne & Walde 1979, Mascarenhas *et al.* 1984).

Para a região centro-norte de Minas Gerais, assumem especial importância as divisões estratigráficas propostas por Branco & Costa (1961), às quais serviram de base para o modelo apresentado por Dardenne (1979) nas formações Jequitaiá (paraconglomerados de origem glacial), Sete Lagoas (seqüência margosa e pelítica com lentes carbonatadas), Serra de Santa Helena (folhelhos e siltitos, com intercalações de arenitos e calcários escuros), Lagoa do Jacaré (siltitos, margas, calcários oolíticos pisolíticos), Serra da Saudade (folhelhos, arenitos e siltitos verdes) e Três Marias (arcósios e siltitos verdes). A Formação Jequitaiá é considerada equivalente do Grupo Macaúbas e foi excluída do Grupo Bambuí (*e.g.* Karfunkel *et al.* 1985).

Segundo Oliveira (1989), a Formação Serra de Santa Helena é a principal unidade estratigráfica que ocorre adjacente à bacia do rio Macaúbas.

Tabela 3.1 - Estratigrafia da Fácies Bambuí

Grupo	Formação	Litologia
Bambuí	Serra da Saudade	Ardósias e siltitos calcíferos, esverdeados
	Três Marias	Siltitos cinzas esverdeados com lentes de arcóseos marrons
	Lagoa do Jacaré	Calcários, dolomitos, oólitos, siltitos e ardósias escuras
	Serra de Sata Helena	Siltitos, ardósias, filitos com lentes e camadas de calcário, mármore com quartzo e clorita
	Sete Lagoas	Calcário cinza preto, finalmente bandado, marmore com quartzo e clorita, dolomito e filito
	Carrancas	Conglomerado, arcóseos e filito

Fonte: Costa &amp; Branco (1961)

### 3.3.2 - Geologia Local

Pouco ao norte de Belo Horizonte, centro-sul de Minas Gerais, está uma das regiões brasileiras mais importantes em termos de paisagem cárstica carbonática e da história das ciências naturais do país: o *Carste de Lagoa Santa*. Esta região apresenta um denso conjunto de feições tipicamente dissolutivas em associação a uma hidrografia com componentes fluviais (subaéreos) e cársticos (subterrâneos), desenvolvidos em calcarenitos puros ( $\text{CaCO}_3 > 94\%$ ) da formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) cobertos, em sua maior parte, por formações pedológicas significativas. O relevo superficial (exocarste) evoluiu a partir da configuração primordial de redes hídricas subterrâneas (endocarste) e de uma dinâmica intensa na interface rocha-solo (epicarste), cuja integração favoreceu o aparecimento de múltiplos pontos de captura de águas superficiais segundo bacias primárias e secundárias (dolinas e uvalas).

Em paralelo, tem-se a conformação de um relevo rochoso encoberto fortemente irregular como atestam torres residuais e verrugas aparentes em áreas dissecadas. Outras

feições comuns são os grandes paredões lineares -geralmente resultantes da evolução das dolinas- *canyons*, vales cegos e dolinas de abatimento instalados em segmentos fluvio cársticos, bem como grandes planícies rebaixadas alagadas sazonalmente (*poljés*).

A trama de condutos subterrâneos, estruturalmente controlados, está hoje em grande parte diretamente conectada à superfície, constituindo centenas de cavernas. A este ambiente estão associados sítios paleontológicos de grande valor, com componentes da megafauna pleistocênica extinta e vestígios muito importantes da ocupação humana pré-histórica no Brasil, entre os quais, ossos de cerca de 12 mil anos descritos por Lund como o "Homem de Lagoa Santa". A implantação de uma Área de Proteção Ambiental (APA) tem procurado valorizar e conciliar o patrimônio natural e científico às condições de intenso desenvolvimento urbano e industrial próprias à região.

A região de Lagoa Santa, localizada nas adjacências da metrópole Belo Horizonte, centro-sul do estado de Minas Gerais, é um importante exemplar brasileiro de ambiente cárstico desenvolvido em rochas carbonáticas.

Em termos de suas características físicas, apresenta uma geomorfologia cárstica típica e diversificada, com algumas feições especialmente marcantes: i) grande quantidade de dolinas em variedade de tamanhos, formas e padrões genéticos, muitas vezes limitadas por paredões calcários lineares; ii) grandes maciços rochosos aflorantes ou parcialmente encobertos; iii) muitos lagos com diferentes comportamentos hídricos, associados às dolinas ou em amplas planícies rebaixadas, e iv) uma complexa trama de condutos subterrâneos, comumente conectados com o relevo superficial e, assim, acessíveis ao homem. Todo esse conjunto de grandes feições dissolutivas expostas, agregado às pequenas formas que esculpem os afloramentos rochosos (*lapiás*) e à vegetação que lhe é peculiar, marca uma paisagem que tem um mérito cênico, e portanto, turístico.

Além do aspecto paisagístico, as propriedades físicas do carste de Lagoa Santa têm uma importância acadêmica por representarem belos exemplos dos processos dinâmicos integrados de dissolução, transporte, deposição clástica, precipitação química e erosão, no âmbito da superfície do terreno (*exocarste*), no subterrâneo (*endocarste*) e na interface rocha-solo (*epicarste*).

O carste de Lagoa Santa também tem um significado especial para a história da ciência e da cultura do povo brasileiro. A região é considerada o berço da paleontologia, arqueologia e espeleologia. O pioneirismo das pesquisas é justificado, em princípio, por tratar-se da região do país onde atualmente se registra o maior número de cavernas por área. Essa aglomeração de grutas e abrigos guarda grande quantidade de fósseis pleistocênicos,

entre eles a chamada megafauna extinta, e “os vestígios mais importantes da ocupação humana pré-histórica no Brasil, que incluem painéis rupestres, utensílios e ossadas, cujos registros mais antigos são datados de aproximadamente 12.000 B.P.” (Prous et al., 1998).

Outra característica que é singular à Lagoa Santa, dentre as demais áreas cársticas do país, é a expressiva ocupação antrópica que implica em risco à sua integridade. A região sofre expansão demográfica e representa um pólo industrial e minerário de extrema importância econômica. Essa situação conflitante, com crescente comprometimento da água, vegetação e relevo, foi um fator decisivo para o estabelecimento de uma Unidade de Conservação, com atributo de Área de Proteção Ambiental (APA Carste de Lagoa Santa). A partir do seu zoneamento ecológico-econômico (Souza, 1998), espera-se que o desenvolvimento prossiga em coexistência harmônica ao patrimônio natural.

### 3.4 - Definição do Problema

Obter um ROM com menor variabilidade do módulo de sílica e fator de saturação até o britador

Através do seqüenciamento de lavra foram realizadas simulações utilizando um software, onde se buscou a estacionarização do Módulo de sílica e do Fator de Saturação

O módulo de sílica é dado por

(MS) módulo de sílica

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + FeO_3} \quad (2.1)$$

O módulo de sílica, normalmente, está situado entre 2 e 5%.

O fator de saturação do Cálcio (FSC) é dado por,

$$FSC = \frac{CaO \times 100}{2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

O fator de saturação, normalmente, está situado entre 120 e 160.

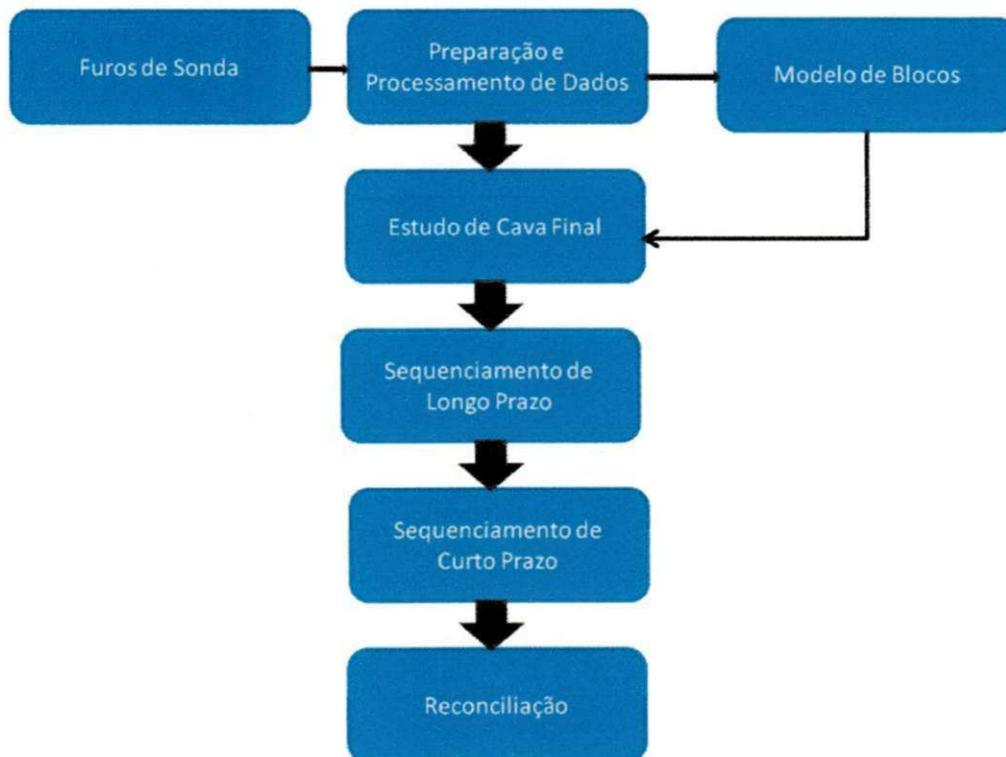
#### 4.0 - METODOLOGIA

O planejamento de curto prazo deve obedecer a uma seqüência pré-estabelecida.

A partir dos planos de longo prazo eram definidas as seqüências dos planos de curto prazo;

Eram simuladas várias combinações de áreas

A Figura 4.0 apresenta um fluxograma com as atividades desenvolvidas antes do seqüenciamento de curto prazo. Cada etapa será descrita a seguir



*Figura 4.0 - Fluxograma da cadeia de planejamento*

## 4.1 - Modelo de Geológico

### 4.1.1 - Banco de Dados

O banco de dados utilizado nesse trabalho é de uma pedreira de calcário, o qual é formado por furos de sonda e de perfuratriz. Os furos de sonda foram executados em seções verticais variando verticalmente entre 10 m e 100 m, enquanto os de perfuratriz foram apenas interpolados a partir dos resultados das análises químicas. Para fazer essas interpolações no modelo de blocos foi usado um processo denominado *GRADE* sendo usado o método do IQD. Todo o banco de dados foi preparado no Excel, sendo cadastrados 400 furos de sondagem e 820 de perfuratriz.

Para criação do modelo geológico da pedreira foram feitas interpretações das seções geológicas através dos furos de sondagens. Ao todo foram criadas cerca de 20 seções transversais aos eixos de coordenadas, com espaçamento variando desde 10 até 100 metros entre as mesmas. Esse espaçamento (não uniforme deve-se à variabilidade da malha de sondagem utilizada, uma vez que foram usados dados de várias campanhas diferentes, os quais tiveram critérios distintos de sondagem).

Após a verificação e validação dos dados de sondagens, iniciaram-se a construção das seções verticais e, posteriormente, as interpretações geológicas seção a seção, criadas com cores diferentes para cada litologia. As litologias usadas no modelo estão descritas na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 - Tipos de litologias

Litologia	Nome	Descrição
Argilas	<b>A</b>	Apresenta percentuais de Si altos (>50%) e de Ca baixos. Os teores de Fe e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> variam muito.
Argila Vermelha	<b>AVE</b>	Argila compacta de cor vermelho. Percentual de Ca e Fe acima de 5% e Al acima dos 15%.
Filito	<b>FIL</b>	Rocha amarelo claro estruturada. Baixos percentuais de Ca e valores de Al acima de 15%
Filito silicoso	<b>FILSI</b>	São ricos em níveis silicosos.
Calcário Calcítico	<b>CALCA</b>	Apresenta baixos teores de Mg e sílica (até ± 5%)
Calcário Magnésiano	<b>CALMG</b>	Apresenta percentuais de Mg variando entre 5 e 25% e sílica de 5 a 20%. Ocorre intercalado ao calcário calcítico
Calcário-filito-carbonoso	<b>FILCA</b>	Ocorre, normalmente na base do calcário calcítico/magnésiano. Os percentuais de Ca e Si são normalmente altos (10-60%)

O controle dos óxidos é normalmente realizado pelo cálculo dos módulos, ou fatores, que são relações assim definidas:

Após as interpretações das seções foram filtradas as *strings* da mesma litologia, para em seguida se iniciar a criação das superfícies de cada uma das camadas interpretadas.

Para o cálculo de interpolação foi usado o método IQD. Foram interpoladas os teores dos compostos químicos CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### 4.2 - Criação do modelo de blocos em estudo

Após a criação do modelo tridimensional do corpo geológico, foi construído o modelo de bloco da área da pedreira. A sua elaboração foi dividida em três etapas: criação do protótipo, definição das dimensões dos blocos e finalmente, interpolação dos teores.

A definição do protótipo tem por objetivo criar uma caixa com a origem, dimensão e número de blocos em cada direção. O modelo de blocos é definido pelas coordenadas (X, Y e Z) do corpo modelado. Definido o protótipo do modelo, o corpo pôde então ser preenchido por blocos com dimensões de X = 30, Y = 30 e Z = 15 largura, profundidade e altura respectivamente.

A área foi limitada pelas coordenadas em sistema local abaixo:

$$X = 29.136,71 \text{ e } Y = 20.900,79$$

$$X = 29.568,31 \text{ e } Y = 21.317,55$$

$$X = 30.818,70 \text{ e } Y = 20.022,70$$

$$X = 30.387,10 \text{ e } Y = 19.605,91$$

Com a coordenada Z variando de 700 e 820.

Outros dados utilizados para criação do modelo de bloco:

**DENSITY:** densidade específica do material. Para CALCA, FILCA e CAMG considerou-se densidade igual a 2.5, enquanto para A, AVE e FIL, FILSI, densidade igual 1.4.

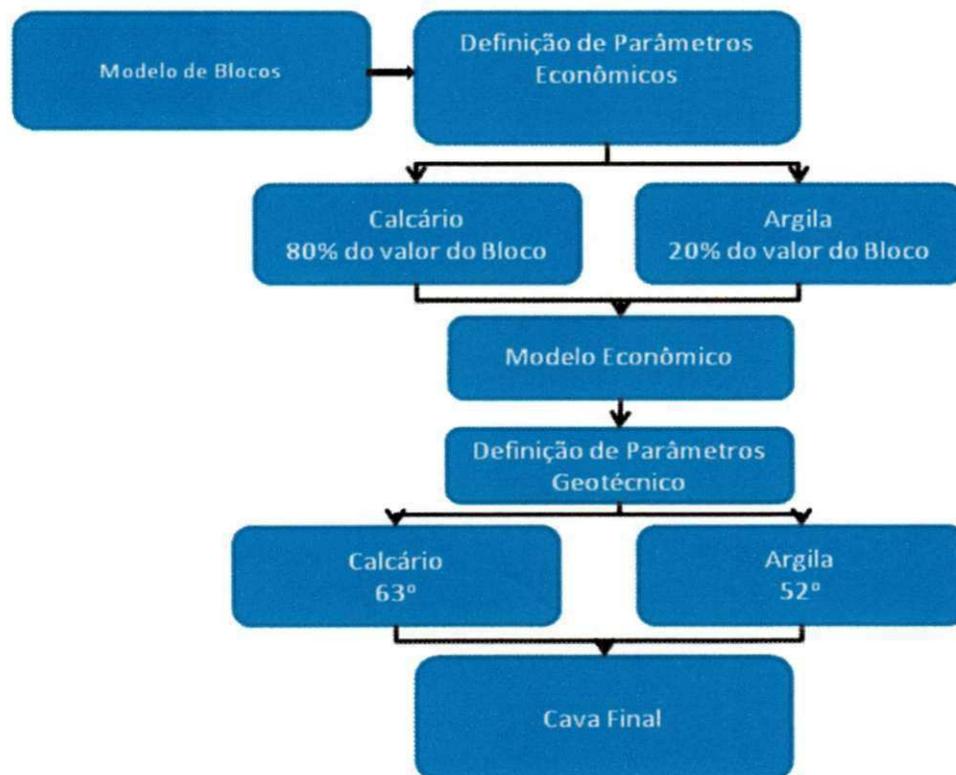
**VALUE:** função benefício definida a partir das proporções de calcário e de argila na produção do argical.

**TALUDE:** associa os campos em que são utilizados os mesmos taludes, uma vez que os ângulos dos taludes são diferentes para o calcário e para as argilas. Para CALCA, FILCA e CAMG, o TALUDE foi definido como 2 (63°); para A, AVE e FIL, FILSI como 1 (52°).

Foi criado um campo LITO de descrição litológica para os arquivos originais que possuíam dados de análises químicas, porém com dados de descrição geológica, usando as condições descritas anteriormente.

### 4.3 - Definição da Cava Final

A cava final foi definida pelo Software de otimização NPV *Scheduller*. A Figura 4.1 apresenta os parâmetros considerados para sua definição



*Figura 4.1 - Fluxograma para sequenciamento de Longo prazo*

#### 4.4 - Sequenciamento de lavra

O sequenciamento de longo prazo foi realizado no software *RM Scheduler*. O objetivo para tal foi obter uma seqüência ótima de extração. No caso específico do sequenciamento foi feito levando-se em consideração a qualidade do argilal (mistura de calcário e argila). O principal parâmetro de controle é o FSC (fator de saturação do cálcio).

Com os dados obtidos do sequenciamento de lavra de longo prazo deu-se início a preparação para seqüência o modelo de curto-prazo.

Usou-se as variáveis  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para controle no sequenciamento

A seguir segue o conceito do software utilizado para o sequenciamento de curto prazo, denominado “Estacio”

#### 4.5 - Conceitos sobre o software “Estacio”

Segundo Claret (2000) toda a metodologia está fundamentada no “teorema de exaustão de uma jazida” ou simplesmente “teorema de Rogado”, o qual pode ser assim enunciado:

“As condições de exaustão de uma jazida e manutenção da frota constante implicam que o centro de massa da jazida permaneça constante”. CLARET (2000)

O teorema foi, inicialmente, enunciado em termos de “**manutenção de frota constante**”, pelo fato de que foi aplicado a estacionarização da distância de transporte entre as frentes de lavra do minério e o ponto de descarga por exemplo, a britagem primária.

O mesmo raciocínio pode ser estendido a um teor e, nesse caso, a condição de exaustão será verificada se, e somente se, a mina for lavrada em seus teores médios, que nada mais é que o centro de “massa” em termos de teores. Como jazidas são, normalmente, modeladas em unidades discretas denominadas blocos tecnológicos, esses teores médios são obtidos pela combinação desses blocos, em sua totalidade e/ou parcialmente.

Em **Análise Combinatória (AC)**, o **Número de Combinações (NC)** de “N” elementos em grupos de “P” elementos é dado por:

$$NC = \frac{N!}{P!(N-P)!} \quad (4.5.1)$$

Supondo-se a existência de 400(N) blocos de minério, a serem combinados em grupos de 4 (P) blocos, tem-se :

$$NC = \frac{400!}{4!(400-4)!} = 1.050.739.900 \text{ combinações} \quad (4.5.2)$$

Quando se procede a análise combinatória pura e simplesmente dos elementos (ou blocos em uma jazida), não estão sendo consideradas certas particularidades da atividade mineira. Por exemplo, se for desejada a obtenção de um valor médio (distâncias, teores, recuperação, indicatrizes, etc.) para uma determinada combinação de blocos de lavra, há que se evitar as combinações onde todos os elementos que compõem o grupo P sejam ou menores ou maiores que o valor médio objetivo. Isso significa dizer que há combinações ditas **Autorizadas** e **Não Autorizadas**. Uma combinação é chamada **Não Autorizada**, quando não há como combinar os “P” elementos de forma a se atingir o valor médio objetivo, supondo ser esse o único dos vários constrangimentos aplicados à combinação. Vale dizer, não há como obter, por exemplo, um teor médio de 1,0% para uma determinada combinação, se todos os “P” elementos que compõem essa combinação forem menores ou maiores que 1.0% para o teor desejado. Nessa situação, tem-se que definir dois novos subconjuntos de blocos, quer sejam o **Número de Blocos do Setor 1 (NS1)**, que contém todos os blocos, cujo valor é menor ou igual ao valor médio objetivo e **Número de Blocos do Setor 2 (NS2)** para os restantes. É importante observar que  $N=NS1+NS2$ .

Assim, aplicando-se esse conceito ao “**Número de Combinações por Rogado (NCR)**”, a expressão (1) toma a forma:

$$NCR = \frac{N!}{P!(N-P)!} \frac{NS1!}{P!(NS1-P)!} \frac{NS2!}{P!(NS2-P)!} \quad (4.5.3)$$

Tomando-se o exemplo já apresentado anteriormente e assumindo-se que  $NS1=100$  blocos e  $NS2 = 300$  blocos, pois  $N=400$ , tem-se :

$$NCR = \frac{400! \dots 100!}{4!(400-4)! 4!(100-4)! 4(300-4)!} = 716.027.500 \text{ combinações} \quad (4.5.4)$$

As combinações não autorizadas totalizaram 334.712.400. Este número representa 31,85% de redução no número total de combinações a serem testadas que é, sem dúvidas, uma grande redução.

A seguir segue algumas terminologias do software para um melhor entendimento.

#### 4.5.1 - Terminologia

**Lavra banco a banco (LBB):** é a lavra, como o próprio nome indica, conduzida banco a banco. Tem como objetivo principal à garantia do máximo desenvolvimento do projeto e, como agravante, ser a metodologia de lavra de mais altos custos e, portanto, de pior Valor Presente Líquido (VPL). Adicionalmente, apresenta o inconveniente de dificultar a garantia de qualidade do fluxo de minério que alimenta a Instalação de Tratamento de Minérios (ITM), devido às menores opções de frente de lavra de diferentes materiais (menor rugosidade da superfície de lavra). **É um método de lavra que deve ser, necessariamente, evitado em modelos tridimensionais.**

**Lavra cava a cava (LCC):** é a lavra conduzida sobre o Espaço Convexo do Problema do Envelope de René Vallet. A determinação do conjunto de cavas imbricadas e seqüenciais é feita através do uso de técnicas de Análise Convexa, definida por G. Matheron. Nessa metodologia, promove-se a maximização da Quantidade de Metal (Q) e a minimização da Tonelagem Total (V=T+E, respectivamente, minério e estéril). Teoricamente, e se aplicada sobre bens minerais do tipo Reserva de Valor, por exemplo, ouro, a seqüência de lavra advinda das cavas seqüenciais irá garantir o maior NPV. Por essa razão, essa metodologia de seqüenciamento é também conhecida como a Lavra do Economista. Apresenta o inconveniente de ser uma lavra muito **ambiciosa**, levando a grandes aumentos de custos, nos últimos anos da atividade mineradora, que podem, eventualmente, finalizar o projeto antes do previsto com impactos negativos no NPV original.

**Lavra Estacionária (LE):** é a metodologia de lavra corretamente aplicável a bens minerais do tipo *commodity*, pois os reais compromissos da LE são a garantia da qualidade do fluxo de minério que alimenta a ITM e o máximo aproveitamento das reservas minerais, através da sua mistura ou “*blending*”. A LE situa-se, no Problema do Envelope de René Vallet, como uma linha, aproximadamente reta, entre as duas curvas que definem as LBB e LCC em um diagrama Quantidade de Metal (Q) e Tonelagem de Minério(T), tal que a relação Q/T seja mais ou menos constante, representando, pois, o parâmetro estacionário. Em vários exemplos práticos e também sobre jazidas simuladas, numericamente, mostrou-se que, dependendo das taxas de desconto, a LE conduz, sobre comodidades minerais, a NPV's maiores que os obtidos na LCC, em virtude do alongamento da vida do empreendimento mineral.

**Número de frentes de lavra (NF):** o número de frentes de lavra corresponde, exatamente, ao número de elementos P que irão compor a combinação. É melhor entendido se interpretado como sendo o número de equipamentos de carregamento (por exemplo, escavadeiras, pá carregadeiras, etc.) utilizados, simultaneamente, para a lavra do minério. Seu número varia de um mínimo de 2 (dois) até, teoricamente, um máximo qualquer.

**Ato de lavra (AL):** é a operação de lavra das NF frentes de lavra simultaneamente. Diz-se que um AL se encerra, quando um ou mais blocos que o compõem são lavrados a exaustão. Nessa situação, um ou mais de um equipamento de carregamento tem, necessariamente, que se movimentar para iniciar um novo ato de lavra.

**Fluxos horários máximos e mínimos (FMAX/FMIN):** são definidos como sendo as taxas horárias (t/h) a serem lavradas de cada um dos NF equipamentos de carregamento de lavra. O fluxo total será assumido como sendo a soma dos fluxos médios de cada um dos NF equipamentos de carregamento de lavra. Essa soma resulta em uma taxa horária (t/h) que será constante ao longo de todo o seqüenciamento obtido. Aqui, é importante observar que haverá a garantia de uma produção constante, além da qualidade estabelecida. Pode-se informar os valores de fluxos, máximo e mínimo, idênticos. Nessa situação, alguma tolerância deverá ser dada ao valor médio objetivo, sob pena de não ser identificada nenhuma combinação autorizada a seqüenciar.

**Variável Básica (VB):** a variável básica será aquela que irá “comandar” seqüenciamento de lavra. Usualmente, é a variável de maior importância ou dispersão que, uma vez controlada, estará, estatisticamente, colocando sob controle as demais variáveis associadas. Da mesma forma, a VB deve ser selecionada como sendo aquela variável que apresenta maiores dificuldades de trato. Pode-se atribuir ao valor médio objetivo da VB limite inferior e superior, de forma a se aumentar o número de combinações autorizadas (flexibilização), porém se respeitando a qualidade desejada. Sobre a VB, pode incidir ou não uma recuperação (leia-se também faixa granulométrica). Caso essa recuperação seja constante e igual a 100%, todas as variáveis passam a ter um caráter de **Aditividade**, sendo, apenas, ponderadas pelas massas. Caso contrário essas massas tomam o caráter **Não Aditivo**. Esse fato é de grande relevância, pois, em uma mesma seqüência, podem, simultaneamente, ser estacionarizadas variáveis que apresentam ambos os comportamentos. A título de exemplo, são consideradas, conforme já dito, variáveis **não aditivas** os teores contidos em faixas granulométricas ou sujeitos a recuperações. Como sendo **aditivas**, podem ser citadas as distâncias, as indicatrizes, as próprias recuperações ou faixas granulométricas e, para o caso de minas bidimensionais, as relações estéril/minério (REM).

**Variáveis Associadas (VA):** estas são as demais variáveis a serem estacionarizadas durante o seqüenciamento. Para a garantia de existência de **combinações autorizadas**, essas variáveis devem, **sempre**, ser informadas com alguma tolerância, sob pena de não haver combinações autorizadas a seqüenciar, restringidas pela qualidade. Seu número não tem, teoricamente, limitação. Da mesma forma que a VB, essas podem assumir o caráter **aditivo** ou **não**.

**Ângulo Operacional de Talude (AOT):** este conceito é de grande relevância para a operação de seqüenciamento. O processo de estacionarização parte de geometrias predefinidas, sejam de avanços de **Curtos, Médios** ou **Longos Prazos**. Para se informar esses avanços, especificamente em problemas tridimensionais, têm-se, obrigatoriamente, que serem informadas as topografias inicial e final dos avanços. Em aplicações de longo prazo, esse avanço pode ser representado por um projeto de **Cava Final**, que foi otimizada e operacionalizada com os máximos ângulos de talude. Ora, cumpre observar que, durante as operações de lavra, **nunca** se trabalha com esses ângulos em seus valores máximos, exceto quando a lavra é conduzida na “parede” final do talude da cava (quando são feitos todos e, de forma definitiva, os trabalhos de drenagem, acabamento e estabilização desses taludes), e sim

com um **ângulo operacional de talude**, usualmente, bem mais abatido por questões operacionais (trajetos de estradas) e de segurança (bermas e leiras). É fato que, quanto menor for o valor do AOT, menor será, probabilisticamente falando, o número de combinações autorizadas, pois o conceito implementado, no seqüenciamento, é o de que minério segura minério em um mesmo cone de extração (veja adiante explicação sobre lavra por cone de desmonte). Vale dizer que, para AOT muito abatido, tem-se algo como uma lavra banco a banco.

**Distância mínima entre escavadeiras (DmE)** : esta é a distância mínima a ser respeitada entre dois ou mais equipamentos de carregamento, durante um AL. Deve-se evitar misturar duas frentes de lavra que possuam auto-correlação ou covariância (definidas pelas amplitudes dos semi-variogramas, em direções ortogonais, para a referida VB em um dado jazimento). A observância da DmE irá garantir, além do bom desenvolvimento dos avanços de lavra, a variância mínima do fluxo de material que alimenta a ITM.

**Distância máxima entre escavadeiras (DME)**: esta é a distância máxima a ser respeitada entre duas ou mais escavadeiras durante um AL. A DME tem por objetivo evitar que frentes extremamente distantes sejam consideradas em um AL.

**Número máximo de escavadeiras por Nível (NMN)**: esta é uma condição de garantia de desenvolvimento operacional fino. O seu número máximo possível é igual à NF. Ora, se todas as frentes se concentrarem em, apenas, um nível de lavra, haverá um avanço muito acentuado dessa única bancada em relação às demais. Muitas vezes, é importante que duas ou mais bancadas de lavra sejam lavradas, concomitantemente, de forma a garantir avanços simultâneos e conseqüentes desenvolvimento fino da lavra.

**Distância mínima necessária para mudança de nível (DmN)** : todas as vezes que um equipamento de lavra tem que proceder a uma mudança de nível, sua movimentação não pode ser calculada, no Espaço Euclidiano, pela simples raiz quadrada da soma das diferenças ao quadrado das coordenadas de localização desses equipamentos, nas posições atual e futura. Para cada mudança de nível, equivalente a um  $\Delta z$ , há que ser considerada uma movimentação muito maior. Supondo-se rampas de 8% e um  $\Delta z$  de 10 metros, uma escavadeira, para proceder a essa mudança de nível, terá que se locomover em rampa por, pelo menos, 125 metros. Adicionalmente, terá, no mínimo, outros 100 metros, em plano, para

percorrer até atingir as coordenadas XY de sua posição anterior (obviamente, agora, 10 metros acima ou abaixo desse ponto XY no plano). Com isso, a escavadeira precisou movimentar-se, pelo menos, 225 metros para proceder a um deslocamento vertical de, apenas, 10 metros. É verdade que as rampas e plano nunca estão plenamente à disposição dos equipamentos, no momento de sua movimentação. Portanto, 225 metros é um número muitíssimo conservador para tal movimentação e precisa ser estudado caso a caso.

**Número mínimo de horas por ato de lavra (NmH)** : cada AL tem um tempo de duração que é ditado pelas taxas horárias lavradas de cada bloco ou frente de lavra e das massas originais disponíveis para lavra, no momento de início do AL. Muitas vezes, o volume residual de minério, em uma frente de lavra, é tão pequeno e a sua taxa horária é tão alta que o mesmo se esgota em curto espaço de tempo. Isso significa o encerramento de um AL e necessidade de movimentação de um ou mais equipamentos de lavra. Há situações de aplicação da estacionarização de curto prazo onde se deve evitar aqueles AL de curta ou curtíssima duração, como forma de se evitar a constante necessidade de movimentação dos equipamentos de carregamento, sejam escavadeiras ou mesmo pás carregadeiras. Em duas condições, esse valor mínimo de horas deve ser ignorado, quando do início de uma seqüência e quando o AL seguinte no sequenciamento é contíguo ao anterior. Nessa segunda situação, não há deslocamento dos equipamentos de carregamento, e sim o seu avanço no plano XY.

**Número mínimo de blocos com frente livre (NmFL)** : a lavra, em jazidas operadas a céu aberto, pode ser conduzida de duas maneiras distintas. Neste manual, a **Lavra por Face Livre (LFL)** refere-se à lavra de um bloco, cuja face se encontra livre para ser acessada tanto pelo equipamento de carregamento quanto pelos equipamentos de transporte (usualmente caminhões). A **Lavra por Cone de Desmonte (LCD)** refere-se à necessidade de lavra de um bloco, a partir da superfície, como na abertura de um novo nível em uma cava fechada (usualmente com auxílio de detonação e trator – lavra em caixão). A seqüência se dará, preferencialmente, pela LFL e somente passará a LCD se não houver nenhuma combinação autorizada, obtida por LFL. Assim, um grande número de blocos com face livre para lavra “significa”, de forma aproximada, um determinado volume de minério liberado para lavra ou o conceito de **minério liberado**. Como será tratado o número de blocos com face livre e não a sua massa, bem como não se prende ao fato de haver estéril no cone de extração desses blocos, com faces livres para lavra, o conceito de minério liberado não é exato. De acordo com a literatura, minério liberado é a massa de minério, com qualidade,

lavrada com REM igual a zero. Para responder, de forma precisa, a esse questionamento, o sistema desenvolvido tem uma opção específica (veja adiante a opção #4 definida em formas de seqüenciar).

### Sistema Desenvolvido – Características e Arquivos de Entrada

O sistema de Estacionarização de Parâmetros - encontra-se desenvolvido em FORTRAN 90 e possui as seguintes características básicas.

Números Máximo de Blocos Para Estacionarização	Números Máximo de Frentes de Lavra	Números Máximo de Variável por Bloco	Números Máximo de Blocos por Matrizes Topográficas	Número Máximo de Sequencia em uma única Estacionarização
NB	NF	NV	(NX x NY)	(NS)
120.000	6	11	400 x 400	999

Todas as características mencionadas anteriormente podem ser modificadas, exceto o número máximo de seqüências (999). Os 120.000 blocos incluem, além dos blocos de minério, os blocos mistos e de estéril.

É necessário um arquivo contendo todos os parâmetros para o seqüenciamento. O arquivo deve ter a configuração conforme figura 4.2:

PARÂMETROS DE ENTRADA DA SEQÜENCIA DE ESTACIONÁRIA	
<i>Versão : v-e155w - 01.03.01</i>	
2	<=> Método de otimização
<i>blocos.arq</i>	<=> Arquivo de Blocos
3	<=> Variáveis
180000.00	<-> Produção
180000.00	<=> Produção
2	<=> n. de frentes
s	<=> Confirma conferência de fluxo de escavadeiras
500.000	<=> Fluxo máximo da escavadeira 01
400.000	<=> Fluxo mínimo da escavadeira 01
13.0000	<=> Meta para variável SiO2
10.0000	<=> Teor mínimo para variável SiO2
50.0000	<=> Teor máximo para variável SiO2
42.0000	<=> Meta para variável CaO

20.0000	<=> Teor mínimo para variável CaO
60.0000	<=> Teor máximo para variável CaO
1.9314	<=> Meta para variável Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.0000	<=> Teor mínimo para variável Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
19.3918	<=> Teor máximo para variável Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.8492	<=> Meta para variável Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.0000	<=> Teor mínimo para variável Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
7.4100	<=> Teor máximo para variável Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
s	<=> Confirma limites topográficos
n	<=> Confirma não entrar com coordenadas XYZ
TOPO.MAT	<=> Arquivo Topografia inicial
MASC.MAT	<=> Arquivo Topografia final
(400i2)	<=> Formato de Leitura dos limites topográficos
5.00	<=> Dimensão dos blocos em XX
6.00	<=> Dimensão dos blocos em YY
15.00	<=> Dimensão dos blocos em ZZ
29330.00	<=> Origem dos blocos em XX
20340.00	<=> Origem dos blocos em YY
750.00	<=> Origem dos blocos em ZZ
126	<=> Número de blocos em XX
152	<=> Número de blocos em YY
5	<=> Número de blocos em ZZ
60.0000	<=> Ângulo de talude
n	<=> Confirma nova meta para seq. est.
29776.00	<=> Coordenada XX da escavadeira 01
20490.00	<=> Coordenada YY da escavadeira 01
816.00	<=> Coordenada ZZ da escavadeira 01
29607.00	<=> Coordenada XX da escavadeira 02
20657.00	<=> Coordenada YY da escavadeira 02
756.00	<=> Coordenada ZZ da escavadeira 02
30.00	<=> Distância mínima entre as escavadeiras
500.00	<=> Distância máxima entre as escavadeiras
1	<=> Número máximo de escavadeiras no mesmo nível
0.00	<=> Movimentação mínima nec. para mud. nível
0.00	<=> Número mínimo de horas por ato de lavra
0	<=> Número mínimo de blocos com frente livre

%%%%%%%%% <=> Fim do arquivo batch de entrada/saída

*Figura 4.2 - Dados de Entrada*

#### 4.6 - Característica da Pedreira

##### 4.6.1 - Equipamentos da Mina

É uma pedreira de porte médio, com produção mensal média de 200.000t de argil. Os equipamentos usados para essa produção são os seguintes:

05 caminhões traçado com capacidade de 34t,

01 escavadeira Liebherr 992,

01 carregadeira 988,

02 carregadeiras 980

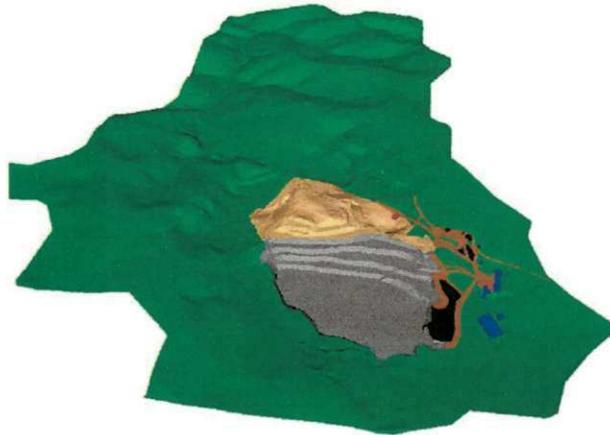
03 tratores sendo 01 D6 e 02 D8,

01 retroescavadeira

01 motoniveladora.

O britador é de martelo (conjunto de 96 martelos, sendo 48 de cada lado) com capacidade de 1200t/h.

A configuração da mina pode ser vista na figura 4.3



*Figura 4.3 - Configuração da Mina*

#### 4.7 - Dados de Entrada para simulação

##### 4.7.1 - Características dos parâmetros usados para o seqüenciamento de curto prazo da pedreira

Os parâmetros químicos usados para o seqüenciamento de curto prazo estão descritos na tabela 4.2.

##### 4.7.2 - Simulação para o mês de Fevereiro

O método de Otimização: **Método de Mínimo Movimento**

Ângulo de Talude: **60°**

Produção de Minério: 215.350 t (calcário puro e argical)

Coordenadas de Localização das Escavadeiras

Escavadeira1	Escavadeira2
X =29.905	X =29.435
Y =20.701	Y = 20.446
Z =817.5	Z = 742.5

A variável básica usada para o sequenciamento: **SiO<sub>2</sub>**.

Número de frentes: **02**

Produtividade média do equipamento: **800t/h**

Número de equipamento por banco: **01**

**Tabela 4.2 - Dados de entrada para o sequenciamento /Fevereiro**

Variável	Meta	Valor Máximo	Valor Mínimo
<b>SiO<sub>2</sub></b>	13,00%	50%	10%
<b>CaO</b>	42,00%	60%	20%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,85%	7,40%	0%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,94%	9,39%	0%

Dimensões dos blocos

X =10 m

Y = 3 m

Z = 15 m

Essas dimensões foram determinadas de acordo com a malha de furação usada para o desmonte da rocha.

#### 4.7.3 - Simulação para o mês de Março

Parâmetros químicos usados:

O método de Otimização: **Método de Mínimo Movimento**

Ângulo de Talude: **60°**

Produção de Minério: 200.000t (calcário puro e argical)

Coordenadas de Localização das Escavadeiras

Escavadeira1

Escavadeira2

X =29.853

X =29.857

Y =20.541

Y = 20.567

Z =788

Z = 756

A variável básica usada para o seqüenciamento: **SiO<sub>2</sub>**.

Número de frentes: **02**

Produtividade média do equipamento: **800t/h**

Número de equipamento por banco: **01**

**Tabela 4.3 - Dados de entrada para o seqüenciamento/Marco**

Variável	Meta	Valor Máximo	Valor Mínimo
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14,00%	50%	10%
<b>Cão</b>	43,00%	60%	20%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,40%	7,40%	0%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,50%	9,39%	0%

#### 4.7.4 - Simulação para o mês de Abril

Parâmetros químicos usados

O método de Otimização: **Método de Mínimo Movimento**

Ângulo de Talude: **60**

Produção de Minério: 110.000t (calcário puro e argical)

Coordenadas de Localização das Escavadeiras

Escavadeira1	Escavadeira2
X =29.853	X =29.857
Y =20.541	Y = 20.567
Z =788	Z = 756

A variável básica usada para o seqüenciamento: **SiO<sub>2</sub>**.

Número de frentes: **02**

Produtividade média do equipamento: **800t/h**

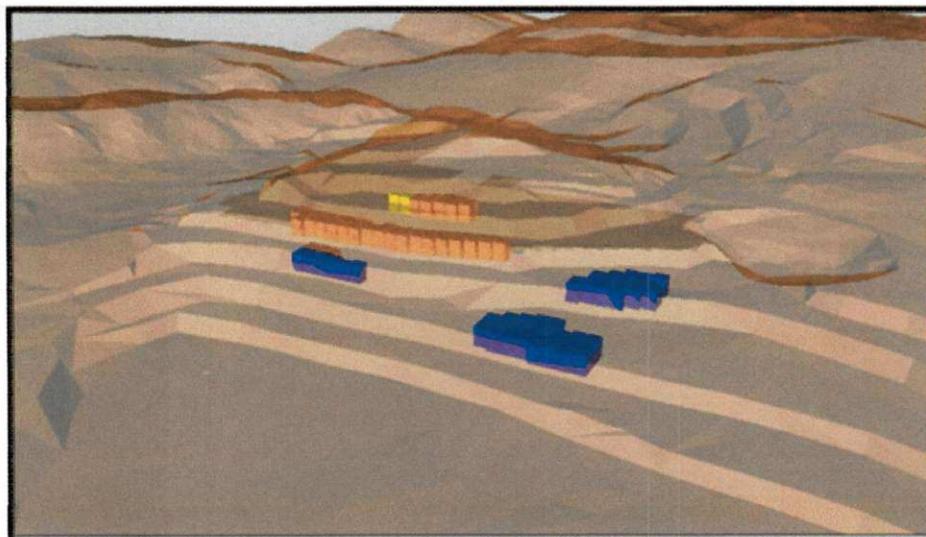
Número de equipamento por banco: **01**

**Tabela 4.4 - Dados de entrada para o sequenciamento/Abril**

Variável	Meta	Valor Máximo	Valor Mínimo
SiO <sub>2</sub>	14,00%	50%	10%
Cão	41,00%	60%	20%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,35%	7,40%	0%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,70%	9,39%	0%

#### 4.8 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

De acordo com a figura 4.4 podem ser vistos os blocos selecionados para o sequenciamento do mês de fevereiro.



*Figura 4.4 - Blocos do mês de fevereiro*

Tabela 4.5 - Valores ponderados obtidos – Fevereiro/02

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cão
14,413	3,351	1,352	44,324

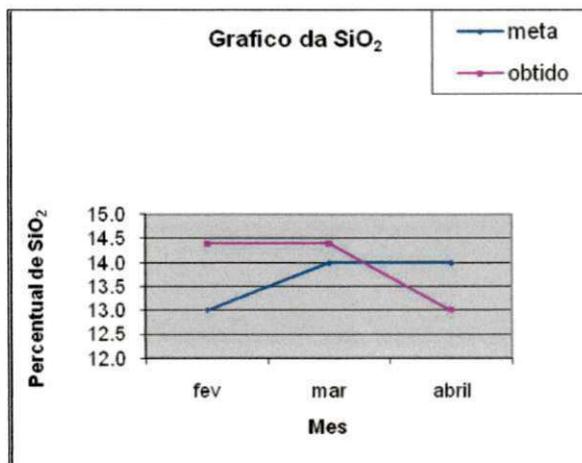
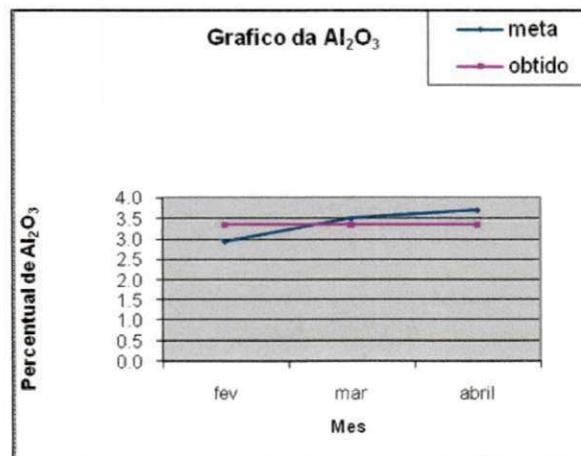
Tabela 4.6 - Valores ponderados obtidos – Março/02

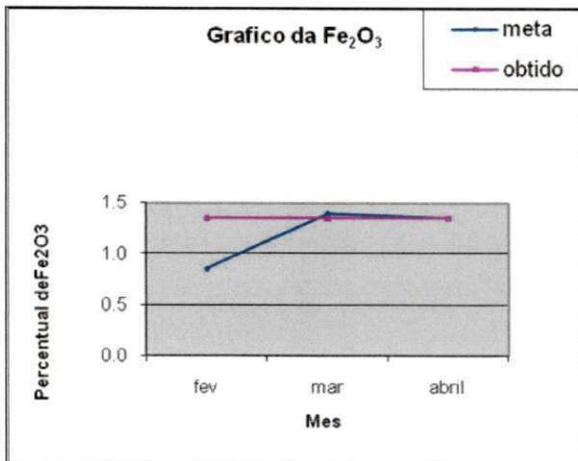
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cão
14,413	3,231	1,412	43,104

Tabela 4.7 - Valores ponderados obtidos – Abril/02

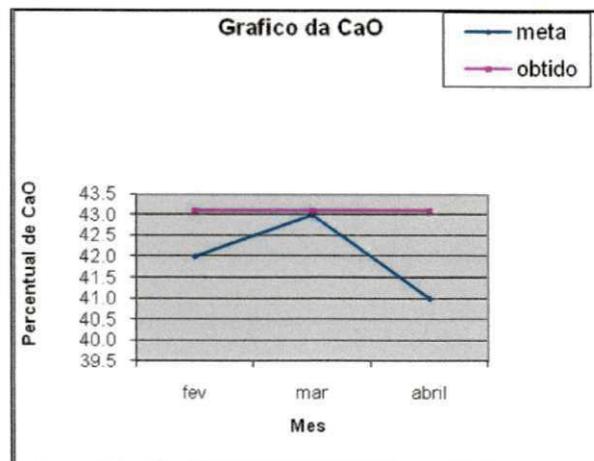
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cão
13	3,432	1,355	44,104

## 4.9 - RESULTADOS GRÁFICOS

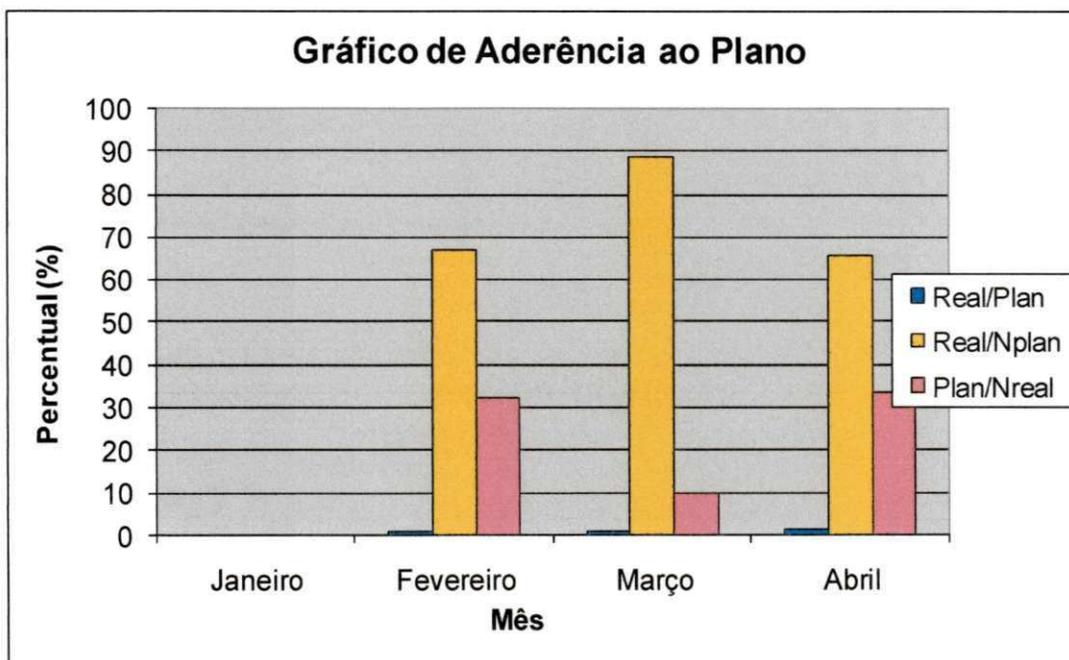
Figura 4.5 - Resultados da SiO<sub>2</sub>Figura 4.6 - Resultados do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



*Figura 4.7 - Resultados do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*



*Figura 4.8 - Resultado do CaO*



*Figura 4.9 - Gráfico de aderência ao plano mensal*

## 5.0 - CONCLUSÃO

Avaliação dos resultados obtidos de acordo com o objetivo propostos neste trabalho:

O gráfico de aderência ao plano mensal mostrou-se bastante baixo com relação às áreas planejadas e executadas. Isto pode ser explicado por alguns fatores:

- A implantação de uma nova metodologia requer ajustes;
- Diferença entre os valores obtidos no modelo de blocos e com os resultados analisados em laboratórios quando esses mesmos blocos eram lavrados;
- Problemas operacionais entre outros;
- Adaptação do software para os parâmetros de controle usado para o sequenciamento.

Foi observado nas figuras 4.6, 4.6, 4.7 e 4.8 que embora todos os resultados não tenham ficado dentro da meta desejada, os mesmos ficaram dentro do limites máximos e mínimos.

Mesmo com baixo índice de aderência houve um acréscimo de aderência a cada mês conforme observado na figura 4.9.

Deve se considerar que os resultados foram satisfatórios, pois a implantação de uma nova metodologia requer tempo e ajuste para que atenda o objetivo.

Observou-se durante as simulações no software usado para esse trabalho, que quando o sequenciamento era realizado para um menor volume de material o resultado nem sempre era satisfatório. Sempre era necessário entrar com uma meta um pouco maior da meta real para o software alcançar a qualidade desejada.

Recomendações para continuação dos estudos:

A diferença entre os resultados obtidos no modelo de blocos com os obtidos das análises de do laboratório e um fator relevante que requer um estudo mais detalhado. Desde a forma que e feita a coleta das amostras na mina para análise em laboratório ate o método considerado para fazer a interpolação desses dados no modelo de blocos.

- O número de das amostras coletadas por frentes de lavra e sua representatividade;
- Ajustes nos parâmetros usados no software de sequenciamento.
- Foi observado que nas as áreas que tinham maior concentração de material argiloso havia poucas informações. Nesse caso existe uma necessidade de melhorar o nível de detalhes dessas áreas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F.F., BRITO NEVES, B.B., ALVES, J.A.C. 1993. **Arcaouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão.** In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (ed.) 1993. O Cráton do São Francisco. Reunião Preparatória para o II Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco. SBG/SGM/CNPq. Salvador. p.45-62

ALMEIDA, F.F.M. e HASUI, Y. (org.). 1984. **O Pré-Cambriano do Brasil.** São Paulo, Edgard Blücher Ed.

ALOISE, D. J.; CRUZ, J. S. Departamento de Informática e Matemática Aplicada. **Teoria dos Grafos e Aplicações**, 2001. [http://www.dimap.ufrn.br/~dario/arquivos/Cap2\\_Grafos-2001.pdf](http://www.dimap.ufrn.br/~dario/arquivos/Cap2_Grafos-2001.pdf)

AULER, A.S. 1994. **Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil.** Western Kentucky, 110p. (Master of Science, Faculty of the Department of Geography and Geology).

AULER, A.S. 1995. **Lakes as a speleogenetic agent in the Karst of Lagoa Santa, Brazil.** Cave and Karst Science, 21(3):105-110.

BASILIO, F. A. – **Cimento Portland. Estudo Técnico.** 5<sup>a</sup> ed. São Paulo, ABCP, 1983.

BEATO, D., BERBERT, M.L.C, DANDERFER, A. e PESSOA, P.F.P. 1992. Avaliação preliminar do Carste de Sete Lagoas-Lagoa Santa e riscos ao meio ambiente antrópico - Projeto VIDA. In: **SIMPÓSIO DA SITUAÇÃO AMBIENTAL E QUALIDADE DE VIDA NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE E MINAS GERAIS, 2. Belo Horizonte, 1992. Anais. Belo Horizonte:ABGE, p.56-59.**

BERBERT-BORN, M., HORTA, L.S., DUTRA, G.M. 1998. **Levantamento Espeleológico.** In: **APA Carste de Lagoa Santa - Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural.** Belo Horizonte, CPRM/IBAMA. 71p, anexos e mapas. (Série APA Carste de Lagoa Santa, volume III).

CAMPOS, A.B. 1994. Relações entre as características faciológicas e estruturais das unidades do Grupo Bambuí e a morfologia cárstica na região de Lagoa Santa-Pedro Leopoldo (Minas Gerais). Belo Horizonte, UFMG/FAPEMIG, 21p. (**Relatório final de pesquisa - aperfeiçoamento. Programa de Pesquisa “Estudos ambientais e proposta de manejo na região do carste no Planalto de Lagoa Santa, M.G.”**).

CARTELLE, C. ABUHID, V., FERREIRA, MA.A., FERREIRA, R.L. 1998. **Levantamento paleontológico. In: APA Carste de Lagoa Santa - Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural.** Belo Horizonte, CPRM/IBAMA. 9 p., anexos e mapas. (Série APA Carste de Lagoa Santa, volume III)

CETEC-Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1987. **Estudos da dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos.** Belo Horizonte, CETEC. 38p. *Relatório técnico.*

CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 1994. **Caracterização geomorfológica da região cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG).** Belo Horizonte, CPRM/CETEC. 37 p., 1 mapa (6 folhas). (Projeto VIDA VIDA - Programa Gestão e Administração Territorial).

CLARET A. C., Girodo, A. C. e Valente, J. – Otimização de cavas ou estacionarização de parâmetros: Qual o caminho a seguir? - Congresso Brasileiro de Mina a céu aberto & II Congresso Brasileiro de mina subterrânea. Belo Horizonte MG 2002.

BONATES, E.J.L. – **Notas de Aula** – Universidade Federal da Paraíba, UFPB, 1999

BAZANTE, A. J. e Bonates, E. J. L., - **Aplicação de simulação no modelamento do sistema Escavadora/caminhões da Mina Cana Brava.** S. A. Mineração de Amianto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1997

CAMPOS, A. C. A., GIRODO, A.C., VALENTE, J. **Otimização de Cavas ou Estacionarização de parâmetros: Qual caminho a seguir,** I Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & I Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea – Belo Horizonte, 2000.

DE TOMI, G. F. C. **Projeto Opti-cq: Otimização do Controle de Qualidade na Lavra em Minas de Calcário para Cimento**. Relatório Científico. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DE TOMI G., Chausson, D. S., Silva, N. S. - **Otimização e Sequenciamento de lavra para minas de calcário para cimento**. Belo Horizonte: UFMG, 1998. Simpósio Mineral-Metalúrgico da Universidade Federal de Minas Gerais, 9. Anais Belo Horizonte :

DE TOMI, G., et al., - **Controle de parâmetros de qualidade otimiza planejamento de mina**. Minérios e Minerais. Março 2000. UFMG, 1998.

DESSUREAULT, S., Scoble, M. e Dunbar, S. - **Intelligent production management in mining systems**. Department of Mining and Mineral Process Engineering, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada. Dinis da Gama, C. A. J. V., - Metodologia de controle do lucro na mineração. Publicação IPT /1661 – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. 1986.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. **Sumário Mineral 2003**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/sm2002.html>>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. **Sumário Mineral 2002**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/sm2002.html>>.

FARIAS, S.L.T. **Controle de qualidade na lavra em minas de calcário para cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Faculdade de Engenharia de Minas, EPUSP, São Paulo, 2002.

GEOROM. **Estacionarização de Parâmetros**, Manual de Utilização, Versão E219W, GOMES, M.C.A., PILÓ, L.B. 1992. As minas de salitre: a **exploração econômica das cavernas em Minas Gerais** nos fins do período colonial. São Paulo, SBE. Espeleo-Tema, 16:83-93.

HARTMAN, H. L., - H. L., - **Introductory mining engineering**. The University of

Alabama. Tuscalooca, Alabama. 1987. 622p. United States of America.

HREBAR, M. J. e Dagdalen, K. – **Equipment selection using simulation of dragline stripping methods. Applications of computers and Operations Research in the mineral industry.** 16 th. International symposium. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. New York, New York – 1979.

LERCHS, H.; GROSSMANN, L. **Optimum Design of Open-Pit Mines.** In: C.I.M. Vol. LXVIII. 1965.

MATHERON, G. **Le Parametrage des Contours Optimaux.** C.G.M.M., Fontainebleau, France. 1975a.

MATHERON, G. **Le Parametrage Tecnhiqe des Reserves.** C.G.M.M., Fontainebleau, France. 1975b.

SILVA NETO, P. S. Projeto e Análise de Algoritmos. **Programação Dinâmica.**

VALENTE, J. (1982). Geomatematica – Lições de Geoestatística, **Vol. V. Fundação Gorceix 1989, Ouro Preto, Brasil.**

QUEIROZ, W. P., **Registros da Glaciação Macaúbas Na Região de Couto de Magalhães de Minas, Nordeste da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 1997.

YAMATOMI, J., Mogi, G., Akaike, <sup>a</sup>, and Yamaguchi, U.; **Selective Extraction Dinamic Cone Algorithm for Three-Dimensional Open Pit Design,** Technical proc, APCOM XXV 1995.

JAWED, M. 1993, **“Optimal Production Planning in Underground Coal Mines Through Goal Programming – A Case study From an Indian Mine,”** *24th International Symposium on the Application Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM) Proceedings*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 43-50.

- KHARCHENKO, V. A. – **Long-term planning of mining operations at existing mines.**  
King, B. – **Transparency in Cut-off Grade Optimization 'Clear-cut'.** Strategic Mine Planning Conference, 2001. Perth, WA, 26-29. March 2001.  
Tuscalooca, Alabama. 1987. 622p. United States of America.
- OISHI, T.; SENHORINHO, N.; DE TOMI, G. **Técnicas de Modelagem e Pesquisa Operacional Aplicadas a Minas de Calcário para Cimento.** In: Anais do 5o Congresso Brasileiro de Cimento, ABCP, São Paulo, Novembro 1999.
- SENHORINHO, N. C. S. **Otimização de cavas em mina de calcário para cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Faculdade de Engenharia de Minas, EPUSP, São Paulo, 2001.
- SCHÖLL, W.U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 29. Ouro Preto, 1976. Anais..SBG, 2:207-231.
- SOUZA, H.A. (org.) 1998. **Zoneamento ambiental da APA Carste de Lagoa Santa.** Belo Horizonte, CPRM/IBAMA. (Série APA Carste de Lagoa Santa).
- TAYLOR, H.F.W. **Enciclopedia de La Química Industrial - La Química de Los Cementos.** Volume 1. Ed. URMO. Bilbao-Espanha 1967.
- TULLER, M.P., RIBEIRO, J.H., DANDERFER FILHO, A. 1991. **Geologia da região cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG).** Belo Horizonte, CPRM. (Projeto Vida - Programa Gestão e Administração Territorial). *Inédito.*
- VIANA, H.S., TAVARES, V.P., KOHLER, H.C., 1998. **Síntese da geologia, recursos minerais e geomorfologia.** In: APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico. Belo Horizonte, CPRM/IBAMA. 21 p., anexos e mapas (Série APA Carste de Lagoa Santa, volume I).
- WIESEL, H.; DE TOMI, G. F. C. **Optiseq2: Otimização e Sequenciamento de Lavra.** In: Anais do 9º. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SICUSP, São Paulo, 2001.

WHITTLE, D. - **Strategic Mine Planning and a Decision-making**, Strategic Mine Planning Conference, North American, Colorado, August 2000.

WHITTLE, J., Wharton, C., 1995b. **Optimizing cut-offs over time**, 25th international symposium application of computers and mathematics in the mineral industries, 1995b, Australia, pp. 261-265.

VALENTE, J, Campos, A. C. A. - **Sequenciamento na lavra a céu aberto: A "Via estacionária" também é a ótima no "Fluxo de Caixa"** II Congresso Brasileiro de Mina a céu aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte – MG. 11 a 13 de setembro 2002.