

RODRIGO CÉSAR DE OLIVEIRA LISBÔA

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE FRENTES DE LAVRA DA
MINA DO SOSSEGO**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Especialista em
Engenharia**

Carajás

2003

RODRIGO CÉSAR DE OLIVEIRA LISBÔA

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE FRENTES DE LAVRA DA
MINA DO SOSSEGO**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Especialista em
Engenharia**

**Área de Lavra:
Engenharia de Minas**

**Orientador:
Dr. Wilson Miola**

**Carajás
2003**

RESUMO

Este trabalho tem como proposta desenvolver uma metodologia simplificada para tomada de decisão do técnico de planejamento juntamente com o técnico de mina nas rotinas operacionais de carregamento e transporte do dia a dia, visando a maximização da produtividade de seus equipamentos com uma produção dentro das especificações pré-determinadas, sem desvios e variações dos teores alimentados, isto é, manter um teor médio da alimentação uniforme.

A uniformização ou estacionalização dos teores de alimentação está diretamente interligada aos quantitativos ideais dos diferentes *blends* das frentes de lavra, sem interferir ou restringir na utilização das capacidades máximas dos equipamentos de lavra evitando as perdas nos processos de beneficiamento.

Para que os cenários simulados tenham confiabilidade, as informações utilizadas necessitam estar disponível com um alto grau de representatividade em tempo hábil, pois a escolha do melhor cenário sempre estará baseado na sua integridade e veracidade.

ABSTRACT

This report has the purpose to develop a simplified methodology to help the planning and the mine technicians to make correct decision concerning every day loading and haul operation routine, with the intention of the equipments productinty maximization according to the pre determined specificatons without deviation and variation of the meals grade, it means, to keep the average grade of the uniform loadind.

The standardization of the loading grade is directly connected to the ideal quantitatives of the different blends of the mine, without interfering or restricting the maximum capacity of the mine equipaments, avoiding loss in the beneficed process.

For the confiability of the simulated situation, the information must be avalable with a high degree of representability in time, because the selection of the best situation will always be based in its entirety and truthfulness.

SUMÁRIO

INDICE DE FIGURAS	2
INDICE DE TABELAS	2
CAPÍTULO 1	3
1.1. Informações Gerais	4
1.2. Projeto Sossego	4
1.2.1. Localização	5
1.2.3. Geologia	8
1.2.4. Operação de Mina	10
1.2.5. Tratamento de Minérios	10
1.2.5.1. Britagem Primária	11
1.2.5.2. Pilha de Minério Britado	11
1.2.5.3. Moagem	11
1.2.5.4. Flotação e remoagem	12
1.2.5.5. Espessamento do Concentrado	12
1.2.5.6. Filtragem, Estocagem e Carregamento do Concentrado	13
1.2.6. Resumo dos dados de processo	14
CAPÍTULO 2	14
2.1. Introdução	15
2.2. Metodologia	16
2.2.1. Modelo Geólogo / Modelo de Blocos	18
2.2.2. Análise do Pó de Perfuração:	21
2.2.3. Resultados da Usina de Beneficiamento:	22
2.2.3.1. Características da Alimentação	23
2.2.3.2. Características do Concentrado	24
2.2.3.3. Desempenho do Processo	27
CAPÍTULO 3	27
3.1. Operacionalização do Sistema	27
3.2. Planejamento de Mina / Estacionalização de teores	31
CAPÍTULO 4	31
4.1. Modelo de Simulação de Blendagem de Lavra	33
4.2. Tipos de Modelos	33
4.2.1. Modelos de Simulação	34
4.2.2. Modelos de Otimização	34
4.3. Necessidade do Modelo	34
4.3.1. Aplicação na Lavra de Mina	35
4.4. Técnicas de Modelagem	36
CAPÍTULO 5	36
5.1. Entrada das Variáveis de Controle	36
5.1.2. Variáveis Químicas de Controle	37
5.1.3. Distância Média de Transporte	38
5.1.4. Percentual de Participação de cada Frente de Lavra	38
5.1.5. Escala de Produção	39
5.1.6. Índices Operacionais	40
5.1.6.1. Disponibilidade Física	40
5.1.6.2. Utilização	41
5.1.7. Período de simulação	42
CAPÍTULO 6	42
6.1. Análise de Resultados	46
CAPÍTULO 7	46
7.1. Conclusão	46
7.1.1. Sensibilidade do Modelo	46
7.1.2. Conclusão Final	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Localização	5
Figura 2 : Seção Mineralizada Sequeirinho	6
Figura 3 : Seção Mineralizada Sossego	7
Figura 4: Número de furos amostrados	20
Figura 5: Pontos de avaliação na Usina	22
Figura 6. Recuperação x teor de cobre, Sequeirinho	25
Figura 7. Recuperação x teor de cobre, Sequeirinho	26
Figura 8: Macro fluxo da metodologia de otimização de frente de lavra	30

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 : Seção Mineralizada Sossego	8
Tabela 2: Ângulos de inclinação para maciço cava sequeirinho	9
Tabela 3: Reserva lavrável	10
Tabela 4: Resumo do Processo	13
Tabela 5: Quadro teor dos blocos	18
Tabela 6: Quadro teor dos furos	20
Tabela 7 : Composição Mineralógica dos Minérios de Sequeirinho e Sossego	23
Tabela 8 : Composição Química dos Minérios de Sequeirinho d Sossego	23
Tabela 9 : composição Química Típica do Concentrado de Cobre de Sossego	24
Tabela 10 : Recuperações médias de Cu e Au	24
Tabela 11. $Rec\ Cu = 1.5821 * \ln(C) + 95.302$	25
Tabela 12: $Rec\ Cu = 97.24 * (1 - \exp(-10.64 * C))$	26
Tabela 13: Tipos de minério	29
Tabela 14 : Variáveis Químicas	37
Tabela 15 : Distância Média de Transporte	38
Tabela 16: Prioridade de alimentação das frentes de minério	38
Tabela 17: Escala de Produção	39
Tabela 18: Índices Operacionais	40
Tabela 19: Período de simulação	41
Tabela 20: Valores fixados na simulação	42
Tabela 21: Percentual igualmente distribuído	42
Tabela 22: Percentual distribuído de maneira desigual	43
Tabela 23: Evolução do Teor da Mistura (Blendagem)	44
Tabela 24: Evolução da Produção a cada Frente de Lavra	44
Tabela 25: Evolução da Produtividade a cada Frente de Lavra	45
Tabela 26: Evolução do percentual de participação a cada Frente de Lavra	45

CAPÍTULO 1

1.1. Informações Gerais

A Companhia Vale do Rio Doce já detectou ocorrência de cobre nos depósitos do Salobo, Gameleira e Pojuca, na denominada faixa norte, enquanto na faixa sul, denominada Cinturão de Cobre Sul, estão localizados os depósitos do Alvo 118, Sequeirinho, Sossego, Serra Dourada e Cristalino. O Projeto Sossego que compreende os depósitos de Sequeirinho e Sossego será o primeiro a ser implantado na região.

O Projeto Sossego, em Canaã dos Carajás, no Sudeste do Pará, irá propiciar a maior produção de concentrado de cobre do Brasil. Atualmente, só existe uma mina de cobre em atividade, a Mineração Caraíba Metais S/A, com reservas limitadas.

O Estado do Pará, graças à Província Mineral de Carajás - uma das maiores do planeta - passa a ser o maior produtor nacional de minério de ferro, ouro, cobre, bauxita (o minério básico da indústria do alumínio), caulim (mineral básico na indústria de celulose), manganês, além de ter gigantescas reservas de pedras preciosas, titânio, fosfato e calcário, entre outros bens minerais.

A produção de concentrado de cobre do Projeto Sossego será destinada, basicamente à exportação.

Para produzir 150 mil toneladas anuais de cobre e 3,5 toneladas de ouro, serão investidos R\$ 985 milhões (US\$ 385 milhões). Este investimento se destina a obras civis, infra-estrutura, equipamentos e tecnologias de última geração.

Tanto para Mina quanto para Usina, foram selecionados processos e equipamentos “update”, exigindo pessoal bem qualificado para as mais novas tecnologias disponíveis. Todo o processo possuirá um gerenciamento de controle, fazendo com que as atividades se tornem otimizadas e flexíveis ao mesmo tempo.

Para o controle e otimização das atividades operacionais dos equipamentos de carregamento e transporte na mina, o Despacho Eletrônico será a ferramenta a ser utilizada, auxiliando nas decisões do dia a dia com foco na maximização da produtividade dos equipamentos, sem penalizar a qualidade do produto.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia simplificada para avaliar e simular o programa de produção diária, minimizando os desvios dos teores de cobre e ouro alimentados na Usina, maximizando a produtividade das operações de carregamento e transporte. Será desenvolvida em planilha Excel utilizando ferramenta

Solver, definindo o ritmo ótimo de produção das frentes de lavra disponíveis levando em consideração as restrições de qualidade do minério alimentado na Usina de Beneficiamento, bem como os índices operacionais dos equipamentos de lavra.

1.2. Projeto Sossego

1.2.1. Localização

O Projeto Sossego está localizado na margem sul da Bacia Amazônica, centro norte do Brasil, sudeste do Estado do Pará, micro região de Parauapebas e município de Canaã dos Carajás.

A área que cerca o projeto está caracterizada por morros de pequenas altitudes (como o morro do Sossego, cuja elevação é 275 metros acima do nível do mar), cercada por uma bacia de drenagem com elevação de aproximadamente 200 metros acima do nível do mar. A topografia local possui terrenos em declive adequados para a locação da usina de beneficiamento e para a construção de barragem de rejeitos.

Os rios Sossego e Sequeirinho cortam a área do projeto e desaguam no rio principal, o Rio Parauapebas. O lençol de água situa-se entre 1 e 15 metros abaixo da superfície, na porção intemperizada do perfil do solo. Estudos de água subterrânea mostraram que, nas rochas vulcânicas e granitos não porosos, o escoamento e a permeabilidade ocorrem através de um sistema de fraturas.

A área é caracterizada por duas estações distintas, de chuva e seca. A estação de seca estende-se de maio a outubro. As chuvas ocorrem durante todo o ano, mas aproximadamente 80% ocorrem nos meses de novembro a abril, sendo 50% durante os meses de janeiro, fevereiro e março.

As áreas dos depósitos de Sequeirinho e de Sossego já foram desmatadas pelos pecuaristas locais e plantadas com capim. Em geral, a ocupação do terreno foi feita com queimadas, que causaram a destruição da floresta e espantaram a fauna local.

O Projeto Sossego está situado nas vizinhanças da Floresta Nacional de Carajás – FLONACA, uma área de preservação federal. Embora parte da concessão mineral esteja dentro desta área de preservação, a área de servidão do Projeto Sossego está fora de seus limites e não interfere com a FLONAC.

Sossego Project Location

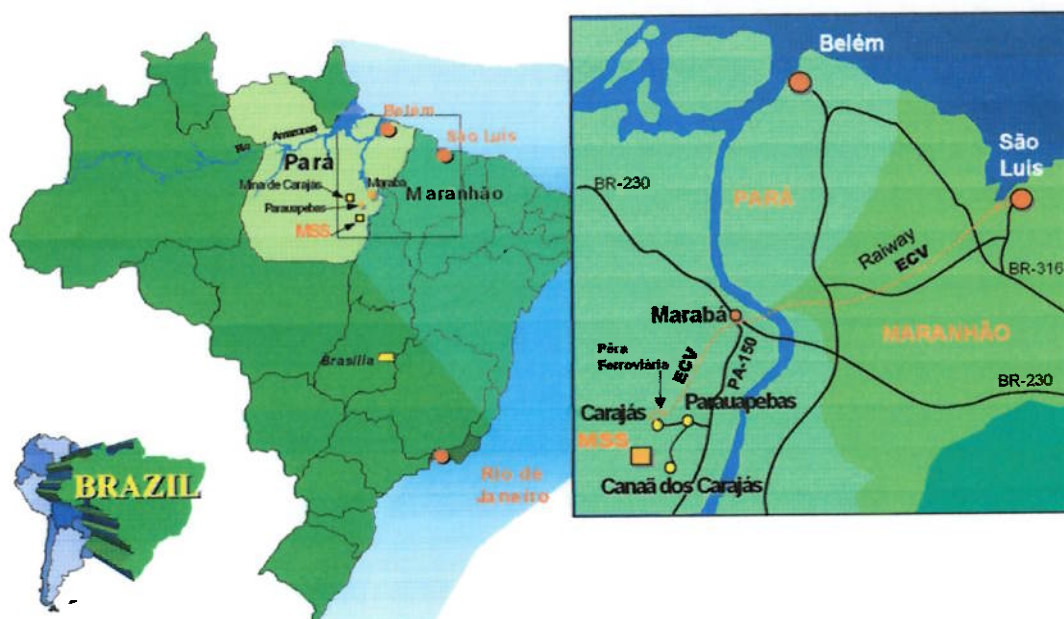


Figura 1: Mapa de Localização

1.2.3. Geologia

O Projeto Sossego tem dois depósitos principais: Sequeirinho e Morro do Sossego. Estes depósitos estão situados na porção sul do sigmóide de Carajás, ao longo de uma estrutura de cisalhamento regional, de direção oeste/noroeste – leste/sudeste, e mergulho forte para sul. Neste amplo cinturão de cisalhamento, conhecido como “Cinturão Sul de Carajás”, estão encaixados uma série de depósitos de cobre associado a ouro de teor $> 1\%$ Cu que foram descobertos em 1997 pela MSS, Phelps Dodge e CVRD.

O depósito do Sequeirinho é o maior e mais importante para o Projeto Sossego. Ele consiste de uma única zona mineralizada contínua, de aproximadamente 2000 metros ao longo de sua direção, com mineralização adicional, de menor teor de Cu, estendendo-se por mais 1 000 metros, em direção a oeste. Este depósito está situado cerca de 700 metros a sudoeste do Morro do Sossego e aflora como um morro proeminente, 40 metros acima do relevo médio local.

A mineralização geralmente ocorre com uma série de corpos sub-paralelos com espessuras acumuladas que variam de 25 metros até a quase 300 metros. Os mergulhos são geralmente mais acentuados nas extremidades, variando de 70° até sub-vertical.

No Sequeirinho, a mineralização é controlada estruturalmente cortando as vulcânicas félsicas, os granitos e gabros encaixantes. Estas últimas sofreram alteração hidrotermal

com enriquecimento em actinolita-magnetita. A maior parte da capa é um granito/tonalito apresentando diques ou fragmentos de rochas máficas. A lapa é definida por um contato brusco que separa a zona mineralizada da biotita xisto alterado da seqüência vulcânica Carajás (vulcânicas félsicas, regionalmente). Os limites da lapa podem ser acompanhados grosseiramente por uma interrupção topográfica ao norte do Sequeirinho, que é caracterizada por uma queda repentina no teor de calcopirita-actinolita-magnetita e um aumento no de escapolita-biotita.

Segue abaixo seção representativa da região mineralizada padrão na mina de Sequeirinho, bem como o limite final da Cava.

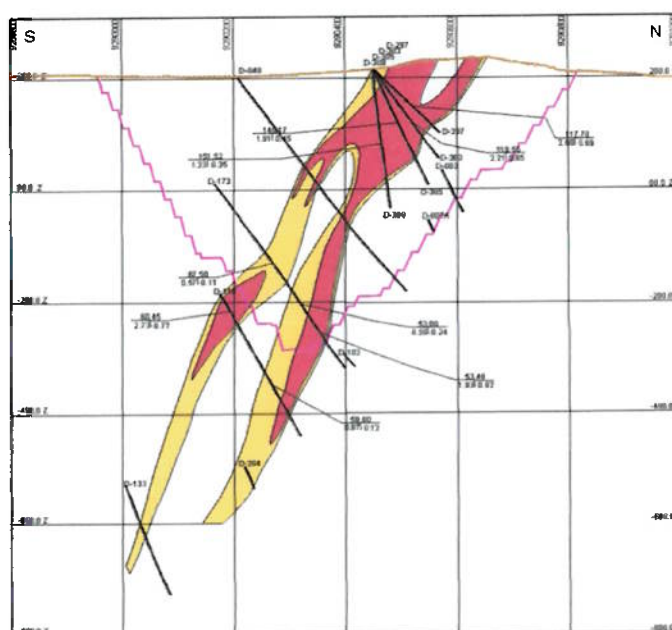


Figura 2 : Seção Mineralizada Sequeirinho

A mineralização sulfetada de alto teor ocorre nas brechas, que geralmente são mais ricas em Cu e Au nas proximidades dos contatos da lapa (footwall) e capa (hanging wall) do corpo mineralizado, mas também, nas zonas cortadas transversalmente. As brechas têm uma matriz calcopirítica com clastos de magnetita, anfibólio e outros fragmentos líticos. Também são comuns *stockworks* (rede entrelaçada de pequenos veios portadores de mineralização) e mineralização disseminada. O flúor está presente na forma de fluorapatita com um teor médio de 772 ppm F no minério. No entanto, a fluorapatita, não é carregada para o concentrado final.

O depósito do Morro do Sossego faz parte de uma grande feição circular, com cerca de 600 metros de diâmetro que se eleva a uns 60 metros acima da topografia média local. O núcleo da estrutura circular é formado por um granito rosado a cinza escuro, de

granulação média a grossa, cortada regionalmente por diques de gabro. No contato com as vulcânicas félsicas do Carajás, o granito apresenta textura fina (granofírica), formando um granófiro, que atinge até 200 metros de largura, caracterizado por intercrescimento de quartzo e feldspato potássico. Geralmente, este granófiro faz um contato transicional com o granito, indicando que a textura fina está relacionada a uma face da extremidade. Tudo isto é cortado por dois corpos cilíndricos de brecha principais com abundância de calcopirita, chamados de brecha Morro do Sossego e brecha Curral. O Morro do Sossego apresenta uma zona oxidada, com 10 a 20 metros de espessura, na qual ocorre pseudo-malaquita, crisocola e brochantita visíveis nas fraturas, *stockworks* e disseminações, onde regionalmente os teores de Cu atingem até 2,0%.

Segue abaixo seção representativa da região mineralizada padrão na mina de Sossego, bem como o limite final da Cava.

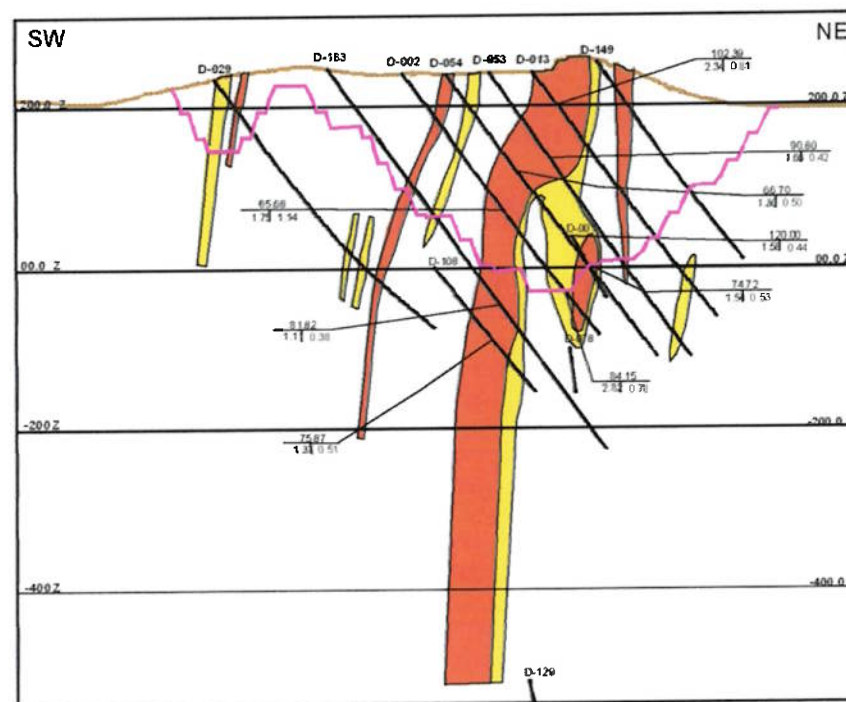


Figura 3 : Seção Mineralizada Sossego

A mineralização ocorre em três zonas: a Brecha do Sossego, aproximadamente circular, com 200 metros de diâmetro, na porção norte da área mineralizada; a Brecha Curral, alongada com 80m por 400m, ao sul; e a Zona Venulada, que é formada por veios irregulares, situadas entre as brechas Curral e Sossego. As brechas do Morro do Sossego e Curral são heterolíticas, sustentadas por fragmentos de granitóides, granófiros, gabros e fragmentos mineralizados, cimentados por uma matriz quartzo-carbonática. A alteração

hidrotermal nessas brechas é intensa e sua composição é de feldspato vermelho, calcita e proporções variáveis de clorita, magnetita, apatita e calcopirita. As brechas heterolíticas também ocorrem dentro de fraturas irregulares de largura variável (desde uns poucos centímetros a até, aproximadamente 20 metros) que, freqüentemente, se ramificam e terminam em veios de calcopirita quase pura; também estão presentes *stockwork* e mineralização disseminada. O contato entre a mineralização de alto teor e o material estéril é abrupto. O principal mineral minério é a calcopirita.

Os principais trabalhos e estudos efetuados foram: mapeamento geológico-geotécnico geral da área, para identificação e caracterização superficial da ocorrência e distribuição dos diferentes tipos de solo, afloramentos rochosos, áreas alagadas, feições erosivas, nascentes, etc

O mapeamento geológico-geotécnico realizado na área do Projeto Sossego, em conjunto com as sondagens e com o monitoramento de campo, permitiram a identificação e a caracterização dos diferentes tipos de solos .

Quase toda a área tem cobertura de solos sobre o maciço rochoso, que consiste de rochas graníticas, metavulcânicas e xistos.

O maciço rochoso aflora em alguns pontos da área, notadamente nas áreas das cavas e na região sudoeste da área do projeto.

Tipo de Solo	Cobertura	Laterítico	Aluvionar	Coluvionar	Residual (*)	Saprolítico (**)
Espessura Máxima	0.1 a 1.2 m	4.0 m	10.0 m	5.0 m	27.0 m	27.0 m
(*)	Este horizonte compreende os solos eluvionar e residual maduro.					
(**)	Este horizonte compreende o saprolito e o solo residual jovem.					

Tabela 1: Seção Mineralizada Sossego

1.2.4. Operação de Mina

A lavra do Projeto Sossego centraliza-se nos depósitos Sequeirinho e Sossego, que foram considerados como os melhores depósitos dentre as várias descobertas feitas na fase de exploração. O Sequeirinho fornecerá a maior parte do minério enquanto que o Morro do Sossego complementar a produção na maioria dos anos do plano de lavra. Ambas as minas serão lavradas a céu aberto, fazendo uso de equipamento de grande porte para carregamento e transporte.

As cavas finais foram subdivididas em sete fases de lavra para o Sequeirinho e três para o Sossego, para uso no programa de produção. Todas as referidas fases foram projetadas a fim de assegurar que haja mais praticidade para o acesso e a operação dos equipamentos. Foram verificados vários cenários (através do uso dos programas *Whittle Four-X* e *OptiCut*) dentro dos limites da cava final para obter-se o melhor sequenciamento de lavra e a melhor progressão de fases.

Os mesmos critérios de projeto usados para a cava operacional final, também foram aplicados ao projeto das fases. Foi considerado que a largura mínima de uma fase seria de 70 metros.

Todas as operações de lavra terão o suporte de um sistema de despacho computadorizado para todos os equipamentos principais. Este sistema também interagirá com o sistema de planejamento de lavra de curto prazo.

A taxa máxima de movimentação de material (minério e estéril) para que se mantenha a alimentação da planta, será de 82 milhões de toneladas ao ano. A escala de produção de cerca de 15 milhões de toneladas por ano de minério alimentado na Usina, irá representar 200 a 250 mil toneladas de minério por dia.

Os bancos foram dimensionados com 16 metros de altura e 10 metros de berma, sendo que os ângulos do talude irão variar dependendo do tipo de rocha e da orientação das paredes. As rampas terão 10% de inclinação 30 metros de largura em Sossego e 35 metros de largura em Sequeirinho, similares à dos acessos operacionais.

Ângulo	Grupo granito	Grupo biotita-xisto	
		entre azimutes ~ 285° a ~ 075°	entre azimutes ~ 240° a ~ 285° e ~ 75° a ~ 120°
Banco	75°	65°	60°
Entre rampas	61°	56°	54°
Geral	52°	52°	50°

Tabela 2: Ângulos de inclinação para maciço cava sequeirinho

Os equipamentos a serem utilizados são de grande porte, com alta produtividade horária. As frotas de perfuração e carregamento foram selecionados pela combinação de alta produtividade e baixo custo por unidade.

Serão utilizadas perfuratrizes elétricas rotativas de 12 ¼” e 9 7/8” de polegadas de diâmetro. As escavadeiras são elétricas a cabo com capacidade de 73 yd³ e 28 yd³. Com o objetivo de aumentar a flexibilidade da alimentação na Usina, a frota de carregamento é acrescida de uma carregadeira diesel de capacidade de 22 yd³.

Caminhões com capacidade de 240 st foram selecionados para transportar os diferentes tipos de materiais existem na mina, minério e estéril.

As cavas finais foram subdivididas em seis fases de lavra para o Sequeirinho e três para o Sossego, para uso no programa de produção. Todas as referidas fases foram projetadas a fim de assegurar que haja mais praticidade para o acesso e a operação dos equipamentos

Com base no projeto final da cava, foram feitas estimativas das reservas lavráveis usando-se 0,33 % de cobre equivalente como o teor de corte mínimo para concentração e flotação. As reservas lavráveis encontram-se resumidas na tabela a seguir:

Reserva	Minério para Planta			Estéril	REM	Total
Lavrável	Ton x 1000	% Cu	G/t Au	Ton x 1000		Ton x 1000
	242.605	0,98	0.28	933.548	3.8	1.188.866

Tabela 3: Reserva lavrável

1.2.5. Tratamento de Minérios

O start-up da Usina do Sossego está previsto para abr/2004 com um programa de alimentação de 8,65 Mt. O ramp-up ocorrerá entre os meses de abr-jul/2004. Neste período a taxa de alimentação e os teores foram pré-definidos com a área de processo, de maneira a terem um comportamento crescente ao longo da fase de ajuste operacional da usina.

A alimentação será efetuada prioritariamente pelo minério oriundo diretamente da mina e será complementada pelo minério oriundo do estoque. A blendagem será necessário para o ajuste dos teores nos primeiros quatro meses e para maximização dos teores de alimentação nos meses subseqüentes.

1.2.5.1. Britagem Primária

O minério (ROM) será descarregado por caminhões com capacidade de 240 toneladas e será britado por um britador giratório de 1.524 x 2.260 mm (60” x 89”). O minério britado será transportado para uma pilha cônica, adjacente à Usina de

Concentração, através de um sistema de transportadores de correia com extensão total de 4.045 metros de comprimento.

1.2.5.2. Pilha de Minério Britado

A pilha de minério britado será cônica, descoberta e terá capacidade útil de 41.000 toneladas (correspondente a cerca de 24 h). A retomada da pilha, para alimentar a moagem SAG, será feita através de três alimentadores de placas, de velocidade variável, posicionados em linha, em um túnel sob a pilha.

1.2.5.3. Moagem

O circuito de moagem será constituído por uma única linha de moagem SAG com rebitagem de pebbles, seguida de dois moinhos de bolas em paralelo, que irão operar, em circuito fechado, com ciclones.

A capacidade nominal de alimentação nova será de 1.841 t/h, base seca. Está previsto um moinho SAG de 11,6 m (38 ft) de diâmetro e 5,8m (19 ft) de comprimento efetivo (EGL), com motor de 20 MW, do tipo “wrap around” – acionamento “gearless”, de velocidade variável.

A classificação da descarga do SAG será via trommel/peneira vibratória. O retido na peneira será conduzido para o sistema de rebitagem de pebbles, e, depois de rebitado, retornará ao moinho SAG. O passante no trommel/peneira vibratória será bombeado para o circuito de classificação (ciclones de 838 mm-33”). O underflow destes ciclones alimentará a moagem de bolas, constituída por dois moinhos de 6,70 m (22 ft) de diâmetro e 9,14 (28 1/2 ft) de comprimento, cada um com 6.800 kW de potência instalada.

A descarga dos moinhos de bolas retorna para a ciclonagem (circuito reverso), cujo overflow alimenta o circuito de flotação. Estão previstos equipamentos para manutenção (pontes rolantes e talhas elétricas), sistemas para manuseio e alimentação de bolas nos moinhos e equipamentos para manuseio dos revestimentos dos moinhos.

1.2.5.4. Flotação e remoagem

O produto da moagem (P_{80} de 210 μ m) será alimentado à flotação rougher (2 linhas de 7 células de 160 m³). O rejeito rougher será descartado, por gravidade, para a barragem, sem espessamento. O concentrado rougher constituirá a alimentação nova do circuito de remoagem e será bombeado para alimentar a ciclonagem (ciclones de 380 mm -15”). O

underflow da ciclonagem irá alimentar dois moinhos verticais (VTM 1.500), que irão operar com bolas de aço, em circuito fechado com a ciclonagem.

O produto da remoagem, com P_{80} de 44 μm , será submetido à flotação de cleaner (seis colunas de 4,27 m de diâmetro e 10 m de altura). Será dosado leite de cal no circuito de limpeza para garantir a seletividade do processo. O rejeito das colunas irá alimentar a flotação scavenger do cleaner (1 linha de 7 células de 70 m^3), cujo concentrado será reunido ao concentrado rougher, na alimentação da remoagem, constituindo a carga circulante do circuito de flotação. O rejeito scavenger do cleaner é rejeito final e será descartado para a barragem, juntamente com o rejeito rougher.

O concentrado das colunas de flotação será o concentrado final e encaminhado para o espessamento. Os reagentes de flotação (coletores, espumantes e cal) serão dosados nos pontos de aplicação. Não está prevista a cobertura da flotação/remoagem. A manutenção será feita com guindaste móvel.

1.2.5.5. Espessamento do Concentrado

O concentrado final da flotação será alimentado, por gravidade, a um espessador de 20 m de diâmetro.

O overflow será reutilizado no processo e o underflow será bombeado para a filtragem. Será dosado floculante no espessador.

1.2.5.6. Filtragem, Estocagem e Carregamento do Concentrado

O underflow do espessador será bombeado para o tanque de alimentação da filtragem. Está prevista a instalação de uma peneira de proteção, antes do tanque, para evitar a entrada de materiais estranhos no circuito de filtragem. Do tanque, o concentrado será alimentado aos filtros de placas cerâmicas (5 unidades de filtros CC-45).

O filtrado será bombeado para o espessador e a torta filtrada, com umidade média de 8,5-9,0 %, será estocada em uma pilha cônica, com cerca de 5.250 t (3 dias de produção), em galpão fechado, com umidade controlada.

O concentrado será retomado da pilha, por meio de pás carregadeiras e carregado em caminhões com caçamba de 35 t, que irão transportar este produto até Parauapebas. O carregamento e o transporte de concentrado serão contratados de terceiros.

1.2.6. Resumo dos dados de processo

Os principais dados do processo, que embasaram o Estudo de Viabilidade, estão sumarizados a seguir:

Capacidade da Planta	15 milhões t/ano	
Teor médio da alimentação	0,75-1,62 % Cu	0,345 ppm Au
Recuperações médias	93,5 % Cu	80,0 % Au
Teor médio do concentrado	30 % Cu	8 ppm Au
Média da Produção de concentrado de acordo com a capacidade do projeto	540.000 t/ano – base seca (teor de alimentação = 1,16 % Cu)	

Tabela 4: Resumo do Processo

CAPÍTULO 2

2.1. Introdução

Independente da escala de produção, a extração de bens minerais deve ser feita obedecendo a esquemas racionais de operação. Daí caracterização de lavra, conjunto de operações para o aproveitamento econômico de uma jazida.

O propósito de um planejamento de lavra tem sido prover subsídio para o engenheiro de minas decidir sobre a capacidade de minerar porções do depósito mineralizado a partir de teores estimados. O Planejamento de Lavra se apresenta, assim, como um roteiro para as operações que se desenvolverão na mina, desde a sua preparação para início da produção até o seu término, quando a mina se torna exaurida.

Cumprindo a finalidade para um bom roteiro das operações mineiras, o planejamento de lavra se baseia em planos diferenciados pelas suas finalidades, horizontes e naturezas. Em termos gerais, estes planos se classificam em planos a longo, médio e curto prazo.

O plano de produção diário e mensal é considerado um plano a curto prazo, elaborado com a finalidade de atender a viabilidade da meta de produção proposta, prever necessidades operacionais com a antecedência, programar trabalhos indispensáveis a serem realizados antes de se iniciar a produção propriamente dita e prover condições para que esta se inicie e se processe sem sofrer interrupções. O nosso tema proposto se prende, somente ao plano de produção diário/mensal.

Assim, este plano representa a ligação entre as atividades operacionais com direcionamento técnico/estratégico da mina. Assim, desde a operacionalização dos acessos projetados que fazem a ligação das frentes de serviço ao britador primário e as áreas de deposição de estéril.

A escolha de se lavar neste ou naquele momento uma determinada frente de serviço, esta diretamente ligada ao seu teor metálico expresso em percentual (0,85% Cu, 1,0 % Cu e > 1,0 % Cu). Este fator qualitativo é de maior importância na mineração, o qual procura encontrar e extrair minérios que permitam o máximo de extração do respectivo metal, por tonelada bruta extraída. De uma maneira simplista, para épocas de preço alto do cobre se prioriza minérios de baixo teor e o inverso para épocas de preços em baixa.

As frentes de lavra exibem variabilidade de teores, composição mineralógica, tamanho, forma nas suas estruturas mineralizadas. Em outras palavras, não existe homogeneidade nas variáveis qualitativas de uma determinada porção mineralógica a ser

lavrada. Existem inúmeros métodos utilizados com o objetivo de minimizar os efeitos desta variabilidade dos corpos mineralizados, o que não é foco de nosso trabalho, mas certamente influenciam a veracidade de um modelo geológico/modelo de blocos.

Um Planejamento de Lavra é essencialmente dinâmico, isto é, à medida que a mina vai sendo lavrada, novas informações vão se tornando disponíveis, obrigando a uma constante adaptação e reavaliação do plano. Conseqüentemente, estas sucessivas reavaliações minimizam a variabilidade do corpo mineralizado, gerando uma lavra cada vez mais direcionada e precisa.

A simulação diária de produção é um campo de análise de decisão, determinado a melhor utilização dos recursos disponíveis. É a solução a todo dinamismo das operações mineiras, possuindo diferentes respostas a medida que a lavra desenvolve, variações do teor de lavra e aspectos operacionais. O principal objetivo é maximizar os lucros por meio da minimização das perdas operacionais relativas à classificação e escolha errônea de blocos de lavra. Simulação, como o próprio nome indica, é uma técnica que permite avaliar o mais próximo possível, uma realidade futura de lavra.

Na resolução de qualquer problema é necessária experiência do homem e, quanto mais complexo e estruturado for o problema, mais o homem terá de contar com o auxílio de técnicas e métodos que permitam aumentar o grau da decisão.

Para escolher a atitude perfeita que mais se aproxima do objetivo ideal, é necessário visualizar as conseqüências mais prováveis de cada alternativa escolhida. Criar modelos que permitam analisar as alternativas escolhidas antes da implementação de qualquer uma delas, com liberdade e flexibilidade com relação à escolha da ação mais conveniente, podendo criar diferentes cenários futuros e testá-los.

Estes modelos estarão vinculados ao plano de liberação de frentes de lavra diário, semanal e mensal, embasados nas informações obtidas nas análises do pó de perfuração e informações geológicas (modelo de blocos).

2.2. Metodologia

A produção de uma seqüência de lavra de uma cava é um procedimento que reflete as condições de exploração ao longo da vida útil da mina. Estas condições são determinadas pelas características geológicas do depósito, condições de lavra e tecnologias de processamento, além dos parâmetros econômicos. Do ponto de vista tecnológico a seqüência ótima de lavra está diretamente relacionada com dois aspectos – espaço e tempo.

A simulação diária de produção sempre estará vinculada ao plano de lavra semanal e mensal elaborado todo começo do mês, respeitando os limites de avanço, os quantitativos e qualitativos pré-estabelecidos, bem como as capacidades máximas das frotas de transporte, carregamento e perfuração.

A proposta de elaboração da planilha de otimização do Blendagem de lavra, está totalmente embasada nas informações do Modelo Geológico/Modelo de blocos, das amostras de pó de perfuração e dos resultados apontados na Planta de Beneficiamento.

2.2.1. Modelo Geólogo / Modelo de Blocos

Um dos problemas freqüentemente enfrentados por geólogos e engenheiros de minas é o problema da definição dos limites do corpo mineral assim como avaliar a quantidade e a qualidade dos parâmetros de interesse. Existe uma série de métodos disponíveis para definir os limites de um dado corpo mineral. O método mais utilizado atualmente é a representação de um modelo de blocos, discretizando o corpo mineral em um conjunto de pequenos blocos conceituais, a prática atual de planejamento de lavra começa com o modelo de blocos e envolve a determinação de:

- i. Decisão se um bloco do modelo deve ser minerado ou não;
- ii. Se for minerado quando será minerado;
- iii. Uma vez minerado então quando deverá ser enviado ao processo.

Pode-se considerar o bloco de lavra como sendo a unidade de lavra sobre o qual se exercerá o critério de aproveitamento ou rejeição. Se a quantidade de metal contido no bloco pagar os custos de lavra e de beneficiamento, este é enviado para o britador, se não, é enviado para as pilhas de minério marginal e para as pilhas de estéril, se possível não interferir na sequência da lavra, pode-se deixar no lugar de origem.

A reserva explorável ou lavrável de uma jazida é dependente dos teores dos blocos que a constituem. A parametrização otimiza o aproveitamento ótimo da jazida, não apenas na definição da unidade de lavra e a determinação do teor de corte como auxilia na identificação dos parâmetros que influenciam na lavra e no beneficiamento.

Um dos grandes problemas existentes no planejamento de mina é a determinação do teor de corte, uma das grandes contribuições da geoestatística é a possibilidade de

definição concreta e precisa do modo de escolha do teor de corte de uma jazida, quantificando o que se perde ou o que se ganha variando aquele teor.

O teor de corte definido para os primeiros cinco anos de operação é de 0,50% CuEq e a partir do sexto ano passará a ser de 0,34% CuEq. Diante disso, o minério sulfetado de baixo teor, nos primeiros cinco anos, será considerado como estéril. Todo sulfetado de baixo teor será estocado em separado para aproveitamento a partir do sexto ano de operação da usina.

Nenhuma decisão de se lavrar uma jazida é tomada sem elaborar a melhor estimativa de todos os parâmetros geológicos, técnicos e econômicos que irão influenciar na rentabilidade da futura mina. Trabalhos de reconhecimento geológicos (sondagens, poços, galerias e outros) conduzirão à estimativa das reservas, em quantidade e qualidade.

Furos de sondagens, mapeamento de campo, modelamento geológico dos tipos de minério, estudos geoestatísticos e estimativas de teores são informações que sustentam a base de informação do empreendimento mineiro.

O resultado da manipulação destas informações é o modelo geológico, representação em três dimensões do comportamento da geologia.

Com o apoio da geologia de mina, o conjunto de operações que qualificam e quantificam o corpo mineralizado no decorrer dos trabalhos de desenvolvimento e de lavra, o modelo geológico passa por periódicas atualizações, onde são reanalisados teores, dimensões da mina, volumes/tonelagens, quantidade de metal e outros.

Para as atualizações deste modelo, são necessárias constantes campanhas de amostragem e mapeamento das frentes de lavra, redefinindo o comportamento da geologia. O mapeamento geológico e coleta de amostras de frente de lavra não é uma atividade específica da produção diária, mas esta diretamente proporcional ao sucesso das atividades de lavra, principalmente no que se refere à qualidade do produto final.

É de vital importância que o resultado de um bom mapeamento de campo e uma boa análise físico-química das amostras de frente de lavra, representem de forma fidedigna o comportamento geológico da região lavrada.

Ainda não podemos definir qual a melhor periodicidade destas atualizações, mas inicialmente o modelo geológico será atualizado semanalmente, período que deve proporcionar um bom grau de confiabilidade, servindo de base para a re-krigagem do modelo de blocos, próxima atividade a ser realizada. Modelo de blocos é a representação numérica do modelo geológico, formatado em cubos com dimensões predefinidas e individualmente identificados com um tipo de rocha, densidade e teores.

Podemos definir re-krigagem como sendo a reavaliação ou re-estimação dos teores dos elementos de controle de lavra, calculada pelo método de estimativa de variáveis regionalizadas.

Operacionalmente, não será possível executar a re-krigagem semanalmente, e sim uma a duas vezes por mês. Apesar do modelo de blocos estar defasado três a duas semanas em relação ao modelo geológico, estas informações serão utilizadas para elaboração das simulações diárias de produção.

A seleção do número de blocos que irá fazer parte da simulação está diretamente interligada ao tipo de equipamentos de carregamento e na tonelagem a ser lavrada no intervalo de tempo estipulado.

O tamanho do bloco possui 10 metros de largura, 10 metros de comprimento e 16 metros de altura, o que corresponde a 1600 metros cúbicos. Considerando que a densidade média do minério é de 2,8 t/m³, cada bloco possui cerca de 4480 toneladas. Se o equipamento de carregamento possui uma produtividade de 1800 t/h e o tempo de produção para a primeira simulação fosse de 8 horas, teríamos que escolher 3,2 (4) blocos para serem lavrados.

A média do teor dos quatro blocos a serem lavrados corresponde a média total desta frente de lavra. Exemplificando, a escavadeira com uma produtividade de 1800 t/h estará posicionada numa frente com 17.920 toneladas com teor médio de 1.1 % de cobre.

Bloco	Tonelagem	Teor Cu
1	4480	1.29
2	4480	0.83
3	4480	1.35
4	4480	0.92
Total	17920	1.10

Tabela 5: Quadro teor dos blocos

2.2.2. Análise do Pó de Perfuração:

Além das informações provenientes do modelo geológico e do modelo de blocos, a decisão de se lavar determinada frente de lavra também será vinculada às informações obtidas do pó da perfuração, para os furos de desmonte do minério.

A análise do pó e ou lamas provenientes das perfurações para desmonte é cada vez comum, tanto na lavra a céu aberto quanto na lavra subterrânea, pois se comparado a outros controles é muito barato, requerendo apenas manuseio e análise das amostras.

O fato de se tratar de amostras de pó de perfuração em nada difere de amostras de sondagem, exceto em termos de suporte amostral.

As amostras do pó de perfuração, gerado ao longo do furo serão analisado de acordo com o plano de fogo, espaçamento e afastamento dos furos. A altura do banco possui 16 metros, sendo cada furo composto de 2 amostras ou seja, a cada 8 metros uma amostra.

O sucesso deste processo depende do tempo de resposta da análise química do laboratório. O intervalo de tempo entre o fim da perfuração, coleta e análise das amostras e a liberação da frente de lavra, tem que ser suficiente para auxiliar a tomada de decisão na lavra, da elaboração do melhor Blendagem de alimentação, do envio para estoque ou até mesmo redirecionar para o depósito de estéril.

De posse dos avanços do plano mensal de lavra e do plano de perfuração, serão definidos com o auxílio das seções geológicas atualizadas as regiões críticas onde serão amostrados e analisados os pós de perfuração.

Em média cerca de 40 mil toneladas de minério serão perfurado diariamente, o que representa cerca de 20 furos/dia, quantidade suficiente de amostras para complementar as informações provenientes do modelo de blocos. Estas informações serão de vital importância na alimentação da tabela de simulação diária e na decisão do melhor cenário de produção.

A seleção do número de furos que irá fazer parte da simulação está diretamente interligada ao tamanho da malha de perfuração, ao tipo de equipamento de carregamento e na tonelagem a ser lavrada no intervalo de tempo estipulado.

A malha padrão para minério é de 8 metros de afastamento, 8 metros de espaçamento e 18 metros de profundidade, o que corresponde a 1152 metros cúbicos por furo. Considerando que a densidade média do minério é de $2,8 \text{ t/m}^3$, a detonação de cada furo irá gerar cerca de 3225 toneladas.

A malha total perfurada é de cerca de 20 furos, o que corresponde a 64.512 toneladas de minério perfurados e amostrados.

Se o equipamento de carregamento possui uma produtividade de 1800 t/h e o tempo de produção para a primeira simulação fosse de 8 horas, poderíamos direcionar a escavadeira para lavra uma região com área de influência de cinco furos (14.400 toneladas).

A média do teor dos cinco furos a serem lavrados corresponde a média total desta frente de lavra. Exemplificando, esta escavadeira com uma produtividade de 1800 t/h estará posicionada numa frente de 14.400 toneladas com teor médio de 1.04 % de cobre.

Furo	Tonelada	Teor Cu
1	3225.6	0.67
2	3225.6	0.98
3	3225.6	1.65
4	3225.6	1.02
5	3225.6	0.88
Total	16128	1.04

Tabela 6: Quadro teor dos furos

Na prática, o número de amostras a serem analisadas por dia é proporcional à capacidade da frota de perfuração, da frota de carregamento e do tempo de processamento (análise físico-química).

Para que a lavra seja executada com informação segura e confiável, é necessário que a amostragem esteja no mínimo três dias na frente da operação de carregamento, o que significa que serão necessárias cerca de 50 amostras coletadas, analisadas e processadas diariamente e atualizadas no banco de dados.

Caso o rendimento da frota de perfuração aumente, o número de amostras disponíveis também aumenta, diminuindo o número de dias críticos, caso o rendimento da frota de perfuração diminua, o número de amostras disponíveis também diminui, aumentando o número de dias críticos. Em uma frente de lavra serão executado 18 furos de perfuração, para a lavra:

•seis furos no estéril; •nove furos no minério; •três furos na zona de contato;

Serão analisados 11 furos, os furos localizados no minério e os furos de contato, com o objetivo de garantir a precisão o controle de lavra, definindo com mais clareza a zona de diluição.



Figura 4: Número de furos amostrados

2.2.3. Resultados da Usina de Beneficiamento:

O ROM, com granulometria máxima de aproximadamente 1,2 m, será transportado por caminhões de 240 t e descarregado diretamente na moega de alimentação do britador primário (500 t de capacidade, correspondente a 2 caminhões), que estará localizado em uma posição intermediária entre as cavas de Sossego e Sequeirinho.

O produto britado menor que 150 mm será recolhido em uma moega de 500 t de capacidade, posicionada sob o britador. Um alimentador de placas de velocidade variável irá alimentar o transportador de minério britado de longa distância, passando por um transportador de sacrifício de 51,7 metros de comprimento. O alimentador de placas permitirá uma alimentação regular para o sistema de transporte de longa distância.

O transportador de correia de sacrifício será equipado com um extrator de sucatas e um detector de metais, para a remoção de sucatas metálicas e proteção do transportador de longa distância, além de uma balança, para controle da produção. O transportador de longa distância terá um comprimento de aproximadamente 4,1 km, com 1219 mm (48") de largura e irá transportar o minério britado até uma pilha de estocagem.

A alimentação do minério na britagem terá uma taxa de 2.280 t/h para a planta concentradora do minério sulfetado, tem como objetivo principal à produção de concentrado de cobre. O concentrado terá 30 por cento de cobre e 8 g/t de Au. Portanto, as informações da usina, tais como, massa de minério alimentada e teor de cobre e ouro são fundamentais no processo de verificação e controle. A massa alimentada na usina concentradora será obtida a partir da balança localizada na sua saída e o teor de cobre e ouro informado a partir do resultado obtido da alimentação da flotação.

O constante acompanhamento da performance da usina de beneficiamento, bem como da qualidade do produto gerado farão parte da elaboração dos diferentes estudos e cenários a serem propostos. O desvio máximo e mínimo do teor do produto final será diretamente proporcional às variáveis de restrição dos teores alimentados da mina e ao ritmo dos quantitativos alimentado no britador.

De acordo com os resultados dos teores do concentrado gerado na usina, haverá necessidade da atuação imediata nas variáveis operacionais da mina, ou seja, a manipulação das variáveis críticas, como por exemplo, o redirecionamento da lavra, o que representa na escolha de diferentes frentes de lavra, adição ou eliminação de uma frente

específica ou mesmo na mudança da produtividade dos equipamentos de lavra alterando o ritmo de alimentação.

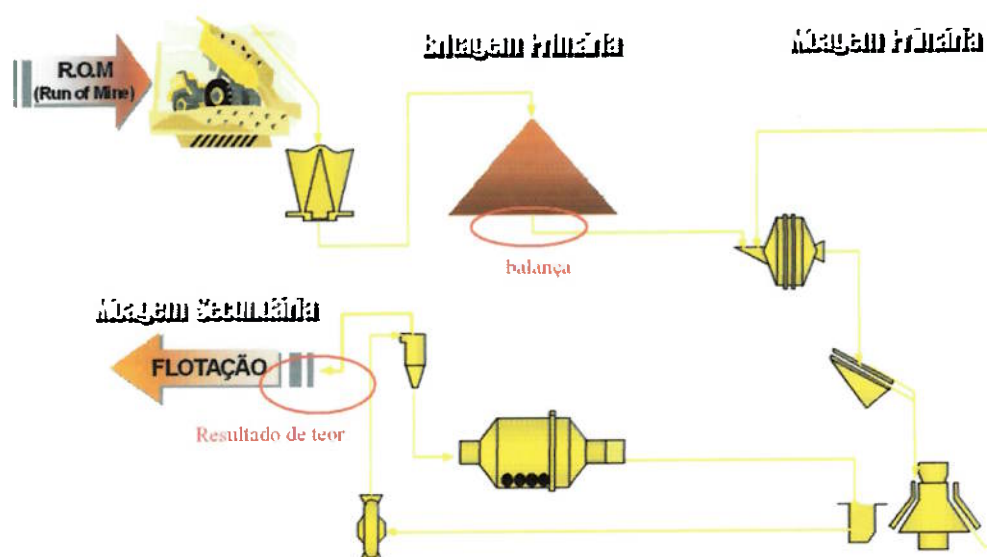


Figura 5: Pontos de avaliação na Usina

2.2.3.1. Características da Alimentação

A alimentação da instalação será proveniente das Minas de Sossego e Sequeirinho. A proporção relativa dos minérios de Sequeirinho e Sossego será 85% e 15%, respectivamente, conforme o Planejamento de Lavra.

As tabelas a seguir apresentam as caracterizações mineralógica e química para as reservas de Sequeirinho e Sossego, obtidas a partir de amostras de testemunhos de sondagem.

Minerais	Sequeirinho (%)	Sossego (%)
Quartzo	23	26
Feldspato	24	27
Clorita	2	14
Biotita	5	10
Magnetita	8	9
Calcopirita	2	3
Hematita	1	1
Anfibólio	24	2
Carbonatos	<1	6
Epidoto	10	2

Tabela 7 : Composição Mineralógica dos Minérios de Sequeirinho e Sossego

Elementos	Sequeirinho	Sossego
Cu (%)	1,17	1,07
Au (g/t)	0,34	0,27
S (%)	1,1	1,0
Fe (Total) (%)	15,1	9,1
Si (%)	21,9	26,4
Al (%)	5,53	5,21
F (ppm)	896	1.487
Ag (ppm)	2	3

Tabela 8 : Composição Química dos Minérios de Sequeirinho e Sossego

2.2.3.2. Características do Concentrado

O Projeto Sossego produzirá um concentrado com 30 % Cu, contendo aproximadamente 8 gramas de ouro por tonelada. A distribuição granulométrica do concentrado será de 95 % menor do que 74 μm e o teor de umidade será na faixa de 8 a 9 %.

A composição mineralógica do concentrado consistirá de aproximadamente 83 % de calcopirita e 4 % de bornita. Clorita, anfibólio e pirita irão, cada um, contribuir com aproximadamente 3 %, enquanto calcocita, covelita, plagioclásio e quartzo contribuirão, cada um, com 1 % ou menos.

Este concentrado não está sujeito a nenhuma penalidade na metalurgia em função das concentrações de elementos potencialmente deletérios, tais como flúor e mercúrio, conforme apresentado na tabela 9, já que estas substâncias estão todas abaixo dos níveis que implicariam em tais penalidades.

Para um teor de alimentação de 1,16 % de Cu, considerando o concentrado com 30 % de Cu e a recuperação metálica de 93,5 %, a recuperação em massa do concentrado será 3,6 %, o que corresponde a uma produção anual de cerca de 540.000 t/ano de concentrado, base seca.

A Tabela 9 mostra alguns valores típicos de composição química para o concentrado de cobre de Sossego.

Cu (%)	30	S (%)	28.1
Au (g/t)	8	SiO ₂ (%)	4.3
Ag (g/t)	8.5	MgO (%)	1.1
Fe (%)	28.8	CaO (%)	1.2
Bi (ppm)	1.4	Al ₂ O ₃ (%)	0.4
Se (ppm)	25	As (ppm)	37
Mo (ppm)	109	F (ppm)	135
Mn (ppm)	90	Hg (ppb)	23

Tabela 9 : composição Química Típica do Concentrado de Cobre de Sossego

2.2.3.3. Desempenho do Processo

São apresentados os dados básicos e critérios de projeto de processo mais relevantes que suportaram o desenvolvimento de uma Usina de Concentração, para produzir concentrado calcopirítico de cobre, com teor de médio de 30 % de cobre a partir do processamento de 15 milhões t/ano de minério (base seca), com teor médio de Cu variando de 0,75 a 1,62 %.

As recuperações médias de cobre e de ouro, estabelecidas em testes de flotação em bancada, testes cíclicos e em mini-planta piloto, estão apresentadas abaixo:

Cobre (%) – Sequeirinho	93,2
Cobre (%) – Sossego	95,0
Cobre(%) – Para balanço de massas (*)	93,5
Ouro (%) – Sequeirinho e Sossego	80,0
Cobre (%) – Razão de Concentração (**)	25,9

Tabela 10 : Recuperações médias de Cu e Au

* Média ponderada, considerando 15 % de Sossego e 85 % de Sequeirinho
 ** Alimentação com 1,16% Cu

As curvas apresentadas nas figuras 5 e 6 mostram a variação da recuperação de cobre, em função da variação do teor da alimentação (tendência), para amostras dos minérios de Sossego e Sequeirinho.

Um dos instrumentos clássicos do planejamento utilizados na seleção da melhor composição de blocos na alimentação é a curva de Recuperação x Teor de Alimentação.

A melhor Blendagem é aquela que assegura que o teor médio desejado mantenha-se constante no decorrer das atividades de lavra, sem que haja perdas no processo de beneficiamento.

Não adianta executar uma alimentação de blocos de minério com teores muito variável num determinado período de tempo, isto é, ora alimentar o britador com blocos de teores muito altos, ora com blocos de teores muito baixos.

O processo de beneficiamento possui alguns limites operacionais que de acordo com a alimentação proveniente da mina resulta em perdas do metal.

Nas curvas ilustradas na figura 5 e 6 pode-se notar que existe um teor de alimentação limite, não justificando aumentá-lo sendo que a usina não conseguirá recuperar o metal.

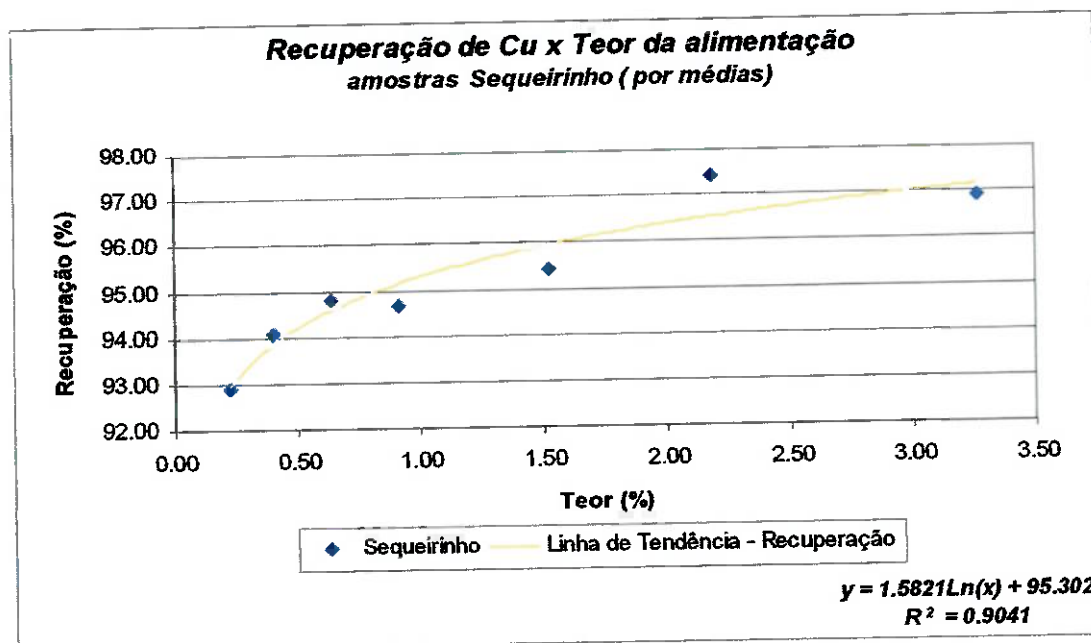


Figura 6. Recuperação x teor de cobre, Sequeirinho

Grades	nº samples	av. Cu grade	Av. Rec	Calc Rec
< 0,3	5	0.23	92.9	93.0
0,3-0,5	12	0.40	94.1	93.8
0,5 - 0,7	10	0.64	94.8	94.6
0,7 - 1,2	13	0.91	94.7	95.2
1,2-1,8	7	1.52	95.4	96.0
1,8-2,5	7	2.18	97.4	96.5
> 2,5	4	3.26	96.9	97.2

Tabela 11. $\text{Rec Cu} = 1.5821 \cdot \ln(C) + 95.302$

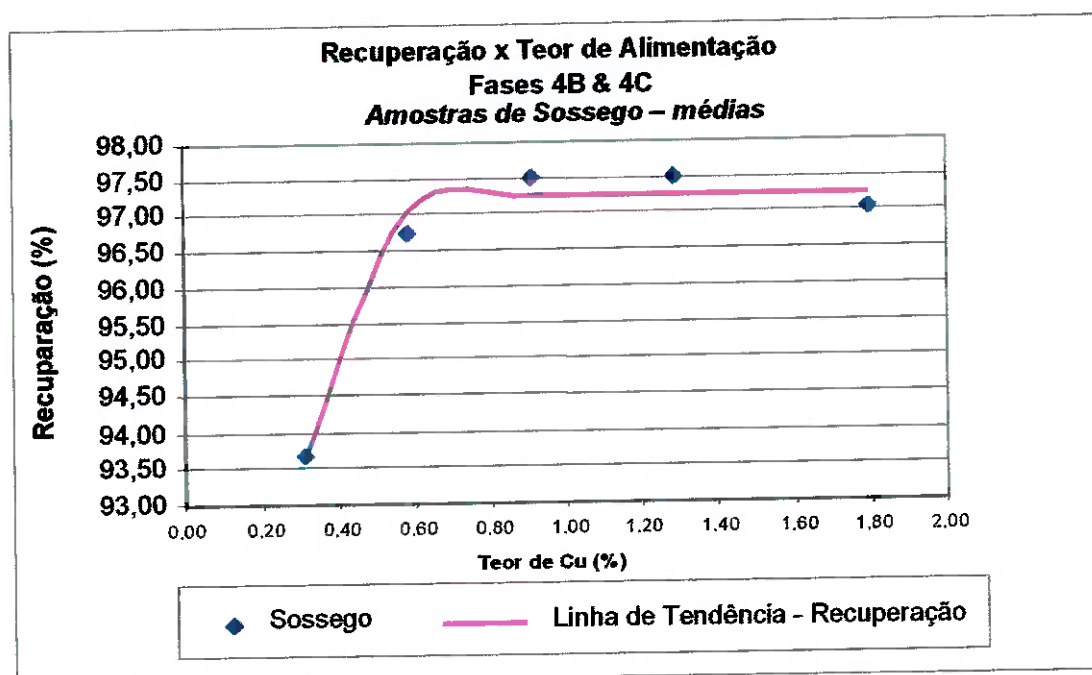


Figura 7. Recuperação x teor de cobre, Sequeirinho

Grade	nº samples	av. Cu grade	Av. Rec	Calc Rec
Up to 0,4	2	0,31	93,7	93,6
0,4 - 0,8	7	0,58	96,7	97,0
0,8-1,0	5	0,91	97,5	97,2
1,2 - 1,4	2	1,29	97,5	97,2
1,4- 2,5	5	1,79	97,0	97,2

Tabela I2: $\text{Rec Cu} = 97,24 * (1 - \exp(-10,64 * C))$

CAPÍTULO 3

3.1. Operacionalização do Sistema

Em jazidas de minérios complexos é necessário planejar rigorosamente a lavra, na busca da combinação de blocos que obedecem aos índices de qualidade, dentro dos limites mínimos e máximos das variáveis de controle. Estes índices surgem como especificações de entrada na usina sobre teores ou outras características.

Em qualquer processo de produção em série, os insumos fabricados devem ser controlados em relação a um ou mais parâmetros, que sofrem variações causadas por um grande número de influências externas e internas ao sistema produtivo. Todo controle necessita ser elaborado no decorrer do processo produtivo, de modo a atuar sobre ele se determinados limites de tolerância forem ultrapassados.

Os problemas de controle de produção permanecerão ao longo de toda vida da útil da mina, fundamentalmente dirigidos a problemas de curto prazo, sendo que os problemas de longo e médio prazo são diluídos e corrigidos nas sucessivas atualizações das otimizações de cava.

Para elaboração dos planos de lavra de curto prazo se utiliza blocos de minério e ou estéril com características bem definidas, suportados por sondagens e amostras de pó de perfuração para detonação, ou outros tipos de amostragens como por exemplo canaletas. Mas mesmo com toda esta *gama* de informações os teores provenientes da mina possuem uma variabilidade.

Para prever possibilidade de Blendagem de blocos é necessário considerar a variabilidade ‘in situ’ do minério (run – of – mine) na entrada da usina. É de vital importância o conhecimento da previsão de lavra, seja quantitativamente ou qualitativamente.

3.2. Planejamento de Mina / Estacionalização de teores

Usualmente, as jazidas são lavradas com um ou mais tipos de minérios, de diferentes teores de corte com seus respectivos volumes. Evidente que a relação Variância/Volume implica que para cada método de lavra exista uma distribuição do bloco de decisão de lavra, usando esta distribuição, o teor médio para os vários teores de corte possíveis pode ser previsto. A relação Variância/Volume pode ser usada para prever a variabilidade do

teor, informando ao planejamento parâmetros que possam definir áreas prioritárias a serem lavradas.

Com as áreas previamente definidas a primeira observação a ser feita sobre questões do plano de lavra, é a escolha de qual o melhor, o planejamento que visa a estacionalização ou aquele que visa a maximização da produção. Nem sempre estes dois tipos de planejamento resultam em resultados semelhantes, muito pelo contrário, os resultados são totalmente distintos.

A estacionalização rígida de uma lavra vai de contra com os conceitos de maximização, principalmente se esse benefício for de caráter econômico-financeiro, pois tenderá sempre lavrar primeiro as zonas mais ricas e ou de menor custo operacional de lavra e nunca nas condições médias da jazida.

Se o número de blocos a ser lavrado não for numeroso, será sempre teoricamente possível por meio de combinações sem restrições de blocos encontrar as associações que satisfaçam o objetivo final.

Mas por outro lado, se o número de blocos for muito numeroso obrigando a introduzir restrições nas combinações, o número de associações de blocos reduz sensivelmente.

Qualquer método de lavra pode ser dividido em operações com determinada lógica e interação entre a geologia, geometria da cava, reserva da jazida e a alocação do equipamento, métodos e sequência de desmonte.

A otimização dos avanços de lavra está diretamente vinculada a elaboração do plano de lavra semanal/mensal, embasado nas informações geológicas (modelo de blocos) e informações obtidas a partir das análises de pó de perfuratriz, bem como nos resultados da Usina.

Mensalmente o plano de lavra obrigatoriamente precisa direcionar a produção segundo um quantitativo e qualitativo pré-estabelecido, visando uma constante alimentação na Planta de Beneficiamento. É bom ressaltar que esta alimentação necessita manter uma qualidade uniforme, sem grandes variações no teor alimentado, em outras palavras, ora alimentação com teor alto ora com teor baixo. A alimentação tem que procurar seguir um teor médio e variar dentro de uma faixa limite que não prejudique as atividades na planta de beneficiamento.

A obtenção de um adequado valor médio do teor de alimentação da planta de beneficiamento será possível com a combinação de diferentes blocos de lavra, com valores menores e maiores que o valor médio objetivo, alimentados simultaneamente no britador

primário. Por exemplo, para obter um teor médio de 1,5 % de Cu, obrigatoriamente será necessário elaborar uma combinação de blocos de lavra com valores menores e maiores que 1.5% Cu.

Tendo em vista que existem diferentes tipos de minério na Mina do Sossego, esta combinação necessariamente terá de ocorrer. A classificação do minério sulfetado está exemplificada segundo tabela abaixo de acordo com o teor de corte:

Tipo de Minério	Cut Off
Minério Sulfetado de Super Alto Teor	CuEq $\geq$ 2,00 %
Minério Sulfetado de Alto Teor	0.50 $\geq$ CuEq $\leq$ 1.99%
Minério Sulfetado de Baixo Teor	0.34 $\geq$ CuEq $\leq$ 0.50 %
Minério Misto	Cu $\geq$ 0.50 %

Tabela 13: Tipos de minério

Esta combinação pode ser elaborada lavrando com diferentes equipamentos de carregamento, diferentes blocos de diferentes teores, em diferentes bancos na Mina. Outro fator que influencia a combinação perfeita é a produtividade dos equipamentos de lavra entre a frente de serviço e o ponto de basculamento no britador primário.

Estacionalização da lavra é a garantia da qualidade do fluxo de minério que alimenta a Planta de beneficiamento, maximizando as reservas minerais com o seu melhor aproveitamento, através das sucessivas mistura ou Blendagem minérios. Para prever possibilidade de Blendagem é necessário tomar em conta a variabilidade “in situ” do minério, medida pelo patamar do variograma e a tolerância, medida na entrada da usina. Se a tolerância no teor de alimentação da usina é de 1%, obrigatoriamente organizações e arranjos das frentes de lavras são elaborados.

O número de frentes de lavra irá corresponder ao número necessário para a combinação, bem como o número de equipamentos de carregamento utilizados, concomitantemente, na lavra do minério. É importante ressaltar que se todas as frentes se concentrarem em, apenas, um nível de lavra (apenas um banco), haverá um avanço muito acentuado dessa única bancada em relação às demais, com prejuízo para as combinações futuras. Muitas vezes, é importante que duas ou mais bancadas de lavra sejam lavradas, juntas, de forma a garantir avanços simultâneos e conseqüente desenvolvimento equilibrado da lavra.

O taxa total de produção será a média da soma de todas as taxas de cada equipamentos de carregamento de lavra. Essa soma resulta em uma taxa horária (t/h) que necessita ser constante ao longo do dia, garantindo uma produção constante, com uma qualidade também constante.

Usualmente a elaboração de planos de lavra a longo prazo visam grandes horizontes, limites de exaustão, planos para os próximos 10 15 e 20 anos. Respeitando os limites e os condicionantes geométricos destes planos, são elaborados planos de médio prazo, também cobrindo horizontes definidos. A fronteira entre o plano de médio prazo e de curto prazo é variável e depende das características operacionais, escala de produção de cada mina e outras variáveis. Um plano de curto prazo nunca deverá ultrapassar o período de um mês, podendo até ser subdividido em semanas, sob pena de se desatualizar com o decorrer das operações de lavra, as quais, por melhor que sejam planejadas e executadas, sempre apresentarão diferenças entre o planejado e o executado.

Para a elaboração e ajuste dos planos de lavra curto prazo os controles operacionais de lavra são as ferramentas que afastam o planejamento de curto prazo do descrédito, fornecendo informações para se planejar conforme e de acordo com os planos de médio e longo prazo já existentes.

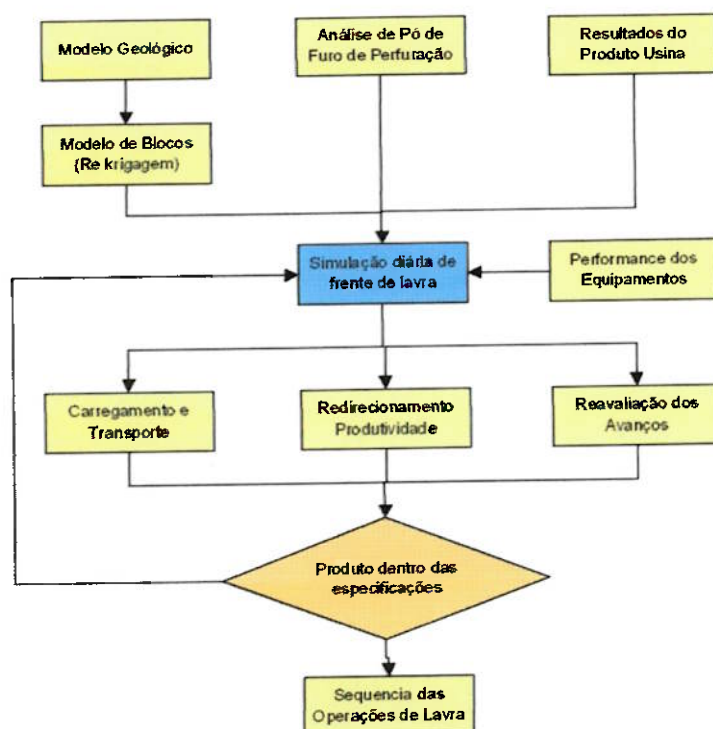


Figura 8: Macro fluxo da metodologia de otimização de frente de lavra

CAPÍTULO 4

4.1. Modelo de Simulação de Blendagem de Lavra

O propósito de um planejamento de lavra tem sido prover subsídio para o engenheiro de minas decidir sobre a capacidade de minerar determinadas unidades de lavra do depósito a partir de teores estimados. Salienta-se, porém que existe, a partir dos dados amostrais, incertezas a respeito do modelo geológico que devem ser consideradas ao se projetar uma cava e desenvolver a lavra. A simulação tem a capacidade de produzir múltiplos modelos equiprováveis, os quais podem ser avaliados independentemente como possíveis cenários do depósito mineral.

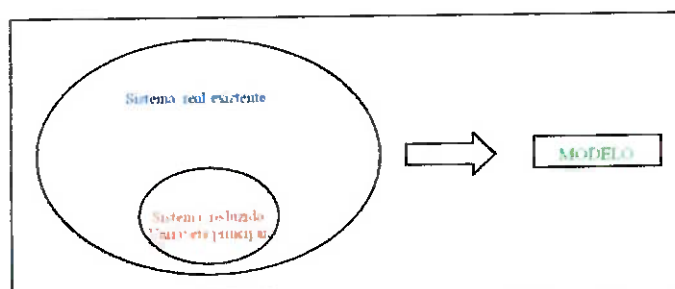
A metodologia proposta, basicamente, propõe em construir um modelo de um sistema real existente como meio de analisar e compreender o comportamento dessa situação.

Este sistema pode existir atualmente ou pode ainda estar em concepção. No primeiro caso, o objetivo do estudo é analisa o desempenho do sistema para escolher uma ação no sentido de aprimorá-lo. No segundo caso, o objetivo é identificar a melhor estrutura do sistema futuro.

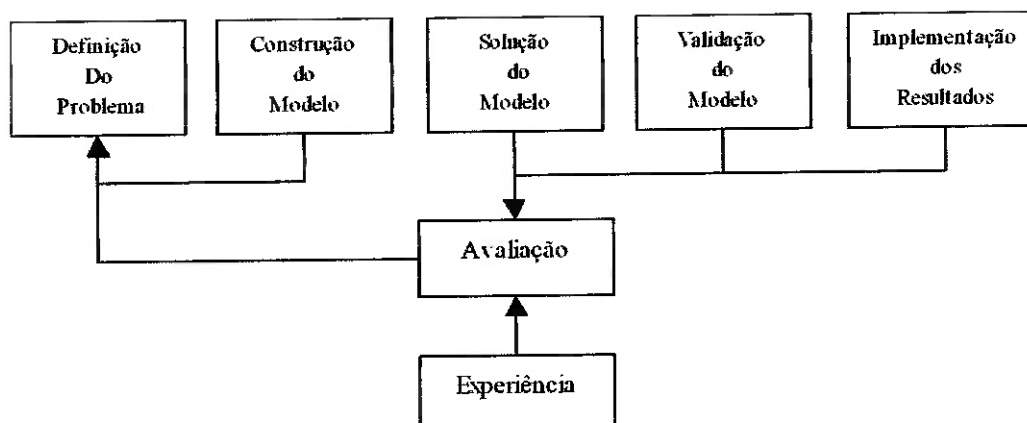
A complexidade de um sistema real resulta do fato de que seu comportamento é influenciado por um número muito grandes de elementos ou variáveis. Esta é a razão que leva à principal dificuldade em recomendar ações específicas de acompanhamento para cada variável.

No entanto, mesmo uma situação real que envolva um número muito grande de variáveis, tem seu comportamento fundamentalmente influenciado por uma quantidade reduzida de variáveis principais. Dessa forma, a simplificação do sistema real em termos de um modelo passa primeiramente ela identificação dessas variáveis principais. O sistema real reduzido é o núcleo do sistema existente que basicamente dita o comportamento deste e que pode ser modelado, para efeito de análise, por uma estrutura conhecida.

Uma representação simplificada do processo de modelagem aparece a seguir, na ilustração:



De forma geral um trabalho deve-se desenvolver segundo as fases indicadas no fluxograma abaixo:



Logicamente que essa seqüência de passos não é rígida, mas indica as principais etapas que devem ser vencidas. Exceto a fase de Solução do Modelo que se baseia em métodos e técnicas bem desenvolvidos, as demais fases não seguem regras fixas e definidas. Os procedimentos necessários para essas fases dependem do tipo do problema em análise e do ambiente que o envolve.

Para escolher a ação preferida, ou seja, a que mais se aproxima do objetivo almejado, o técnico responsável procura visualizar as conseqüências prováveis de cada alternativa possível. É evidente que esse processo é tão mais simples e intuitivo quanto mais simples for a decisão, não importando se trata de uma decisão doméstica ou empresarial.

Mesmo em problemas simples, onde o técnico não precisa formular conscientemente listas de alternativas de ação e respectivas conseqüências, em algum ponto do processo de decisão, ele deve fazer uma ligação entre o que pode fazer e o que acontecerá em cada caso.

Isto significa que ele deve ter um modelo mental do processo para gerar as conseqüências possíveis das ações. No entanto, a partir de um certo nível de complexidade, torna-se quase impossível estimar corretamente as implicações de uma decisão, sem avaliar corretamente a informação disponível, numa forma lógica e ordenada.

Esse tipo de análise estruturada dos dados é essencialmente uma forma de modelagem. Porém, existem modelos de complexidade muito maior, de modelagem bem mais difícil, exatamente por possuir um conjunto de regras e variáveis que vão além do que podemos mentalizar.

4.2. Tipos de Modelos

O relacionamento entre variáveis em um modelo é, na maioria das vezes, escrito em termos matemáticos. Existem diversas formas de gerar e utilizar essas relações, e por isso existem vários tipos de modelos.

O modelo mais apropriado para um dado contexto ou problema depende de vários fatores como:

- natureza matemática das relações entre as variáveis;
- objetivos do tomador de decisões;
- extensão do controle sobre as variáveis de decisão;
- nível de incerteza associado com o ambiente de decisão.

Com base nessas considerações, podemos dividir os modelos em dois grandes tipos:

- modelos de simulação;
- modelos de otimização.

4.2.1. Modelos de Simulação

São modelos que procuram oferecer uma representação real com o objetivo de permitir a geração e a análise de alternativas, antes da implementação de qualquer uma delas. Por isso, dão ao técnico um grau de liberdade e flexibilidade considerável, com relação à escolha da ação mais conveniente.

Isso significa que o técnico pode criar ambientes futuros possíveis e testar alternativas, procurando responder a questões do tipo "que acontecerá se?".

Os modernos programas de computador permitem construir modelos nos quais é possível visualizar na tela o funcionamento do sistema em estudo, tal como em um filme. Podemos visualizar o funcionamento de um banco, uma fábrica, um pedágio, um porto, um escritório, etc, tal como se estivéssemos em uma posição privilegiada em cada um destes cenários.

Antes de efetuar alterações em uma fábrica real, podemos interagir com uma fábrica virtual. A junção da tradicional teoria da simulação com as técnicas modernas de computação e jogos (tais como "vídeo game") têm possibilitado estes avanços.

Com um modelo "virtual" é possível testar soluções, prever gargalos, níveis de produção e obter diversas respostas sem a necessidade de testar no "mundo real".

4.2.2. Modelos de Otimização

Ao contrário do modelo anterior, não permite flexibilidade na escolha da alternativa, já que é estruturado para selecionar uma única, que será considerada ótima, segundo algum critério.

Esse critério de otimização (função-objetivo) é escolhido pelo técnico e o modelo encontra a melhor alternativa através de uma análise matemática. Essa análise é processada por métodos sistemáticos de solução, que são chamados algoritmos.

4.3. Necessidade do Modelo

A simulação é uma técnica cujo objetivo é reproduzir o comportamento de um sistema através de um modelo, introduzindo um conjunto de combinações de variáveis de entrada e procurar várias soluções para a função objetivo de acordo com as regras (restrições) que constituem o modelo. Permite descrever interações através de modelos, prever variações no sistema por modificações das condições operacionais, comparar alternativas de funcionamento e otimizar recursos disponíveis.

4.3.1. Aplicação na Lavra de Mina

Independente do método de lavra é possível criar um modelo em que são analisadas as interações dinâmicas entre a geometria da cava, geologia, reserva e alocações de equipamentos, bem como o sequenciamento dos desmontes.

Em jazidas heterogêneas com zonas ricas e zonas pobres como é o caso da Mina do Sossego, a interação do teor de corte com os custos de transporte necessitam ser considerados, podendo simular diferentes combinações de blocos para diferentes estratégias de lavra em várias posições de descarga.

Estas jazidas necessitam um rigoroso planejamento de lavra, na busca da melhor combinação de blocos que obedeçam a determinadas restrições de qualidade, os limites máximos e mínimos de certas variáveis. Estas restrições são causadas devido as especificações de entrada de minério na usina, sob aspecto qualitativo e quantitativo.

Se uma mina puder ser dividida em certas zonas onde cada equipamento de carregamento deve-se manter fixo, é possível simular o resultado da simulação proveniente de vários equipamentos de carregamento trabalhando simultaneamente, de modo que a

qualidade minério final obtido por composição dos diferentes blocos seja uniforme e controlada.

Existem situações em que é possível prever qual o bloco que determinado equipamento de carregamento deve se dirigir no “próximo” turno de trabalho com o objetivo de minimizar as variações do teor do produto.

A Simulação facilita a elaboração de um planejamento otimizado, possibilitando o controle e o replanejamento durante o desenvolvimento das atividades de operação (desmonte, carregamento e transporte), sendo usada principalmente em problemas como variações de teores e impurezas, determinação das tolerâncias nos teores de entrada na usina e muitos outros.

4.4. Técnicas de Modelagem

Já vimos que as técnicas de modelagem oferecem ao técnico a oportunidade de realizar experimentos com um modelo do sistema quando, geralmente, é impraticável experimentar com o sistema real. Dessa forma, a primeira tarefa no desenvolvimento de qualquer modelo é a definição de seu escopo, ou seja, a identificação das características relevantes do sistema a ser modelado, no contexto do problema específico em estudo.

É claro que a elaboração de qualquer modelo se tornará mais simples se for seguida uma certa sistemática para análise do problema. Com isso, tenta-se garantir que o modelo em desenvolvimento é apropriado ao problema e que, uma vez desenvolvido, poderá ser usado de forma efetiva.

CAPÍTULO 5

5.1. Entrada das Variáveis de Controle

Na elaboração do modelo de simulação e otimização de frente de lavra, será necessário ter em mãos uma série de informações, tais como variáveis químicas de controle, distância média de transporte do ponto de basculamento, percentual de participação de cada frente de lavra e a produção de minério e estéril desejada para um determinado período de tempo.

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 até, teoricamente, um máximo qualquer.

Para este modelo em particular, estaremos considerando quatro (4) frentes de lavra no minério (opções na mina e nos depósitos de material sulfetado) e apenas uma opção de lavra no estéril.

Na realidade, teremos opções de lavra de minério proveniente das frentes de lavra da mina e dos depósitos de material sulfetado de baixo, alto e super alto teor para serão Blendados no britador.

É bom ressaltar que as frentes de lavra são opções fixa, isto é, elas sempre estarão presentes no Blendagem, enquanto os depósitos entrarão em porções menores ou até mesmo não sendo necessárias. Desta maneira é importantíssimo que o controle do teor médio dos depósitos de minério sulfetados sempre estejam atualizados e sejam representativos.

5.1.2. Variáveis Químicas de Controle

De posse dos valores estimados do modelo de blocos e dos resultados das análises de pó de perfuração relativos a cada região a ser lavrada, teremos um valor ponderado representando uma dada frente de lavra. O número de informações para compor a média ponderada dos teores médios vai depender do ritmo e período de lavra, ou seja, se estaremos simulando a produção de um turno ou do dia. É bom ressaltar que quanto maior for o intervalo de tempo maior será o erro associado a simulação.

Inicialmente, o modelo de simulação está considerando uma região que compreende no máximo 10 blocos de lavra e ou 20 furos de perfuração.

Existem dois tipos de variáveis de controle, aquelas que influenciam positivamente na Blendagem do produto final (Cu e Au) e aquelas que influenciam negativamente no processo, os chamados elementos deletérios (S e F).

A restrição da qualidade é feita segundo o limite máximo e mínimo que obrigatoriamente a alimentação deve seguir, buscando sempre um teor médio pré-estabelecido. A variação imposta é de 30% tanto para o limite superior quanto para o limite inferior.

Frente	Cu	Au	S	F
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00
Lim Max	1.3	1.04	65	26
Teor Médio	1	0.8	50	20
Lim Min	0.7	0.56	35	14

Tabela 14 : Variáveis Químicas

Limite Máximo $\leq$ Teor Médio Cu $\geq$ Limite Mínimo

Limite Máximo $\leq$ Teor Médio Au $\geq$ Limite Mínimo

Limite Máximo $\leq$ Teor Médio S $\geq$ Limite Mínimo

Limite Máximo $\leq$ Teor Médio F $\geq$ Limite Mínimo

5.1.3. Distância Média de Transporte

Esta variável é a distância efetiva do centro de massa da frente de lavra ao seu ponto de descarga, seja ele o britador ou depósito de estéril, e tem como função objetivo a minimização o resultado da Blendagem escolhida.

Para que as distâncias dos trechos sejam corrigidas, um fator de correção foi criado em função da velocidade a cada trecho (subindo carregado, horizontal vazio, etc...), calculando assim uma distância “virtual”.

Este artifício tem como objetivo aferir o cálculo da produtividade horária dos equipamentos de transporte em cada trecho.

Perfil Total	Distâncias (m)	Fator de Correção	Distâncias (m)
Horizontal Vazio	500	1.00	500
Horizontal Carregado	500	1.13	563
Subindo Carregado	160	2.67	427
Subindo Vazio	160	1.29	206
Descendo Vazio	160	1.29	206
Descendo Carregado	160	1.60	256
DMT	1640		2157

Velocidade Carregado	
Horizontal	40
Subindo	15
Descendo	25

Velocidade Descarregado	
Horizontal	45
Subindo	35
Descendo	35

Tabela 15 : Distância Média de Transporte

5.1.4. Percentual de Participação de cada Frente de Lavra

Existe um campo na tabela de simulação onde podemos indicar as prioridades de alimentação de cada frente, representada pelo percentual de participação no Blendagem. Podemos dizer que significa uma restrição momentânea que pode ser alterada dependendo da resposta e o comportamento da Usina.

Estas restrições também têm como objetivo influenciar na produção de cada frente de lavra, dependendo do tipo de minério, teor de cobre contido e ou até mesmo da performance do equipamento.

Percentual
10%
35%
40%
15%
100%

Tabela 16: Prioridade de alimentação das frentes de minério

5.1.5. Escala de Produção

A produção das frotas de carregamento e transporte na mineração a céu aberto depende de que o projeto e o planejamento de lavra sejam adequados à jazida e de que os equipamentos selecionados estejam ajustados às demais operações unitárias de lavra e

beneficiamento. Assim, o tipo, porte e número de equipamentos a utilizar e a produtividade resultantes dependem de:

1. Tamanho de valor da jazida: vida da mina, taxa de produção, método de lavra;
2. Projeto da cava: altura das bancadas, largura das frentes de trabalho, desnível entre as frentes de lavra e o destino dos caminhões;
3. Tipos de rocha: características do minério e do estéril, como densidade "in situ", empolamento, umidade, resistência à escavação, grau de fragmentação;
4. Projeto da disposição do estéril: local de disposição, forma de disposição do estéril;
5. Projeto das estradas: largura das estradas, inclinação das rampas de acesso, raio das curvas, superfície de rolamento;
6. Planejamento de lavra: número de frentes simultâneas no minério, relação estéril/minério, frequência de deslocamento das frentes de lavra;
7. Destino do minério: tipo, dimensões e taxa de produção do equipamento que receberá o minério dos caminhões, como britadores, silos, moegas, grelhas, etc;
8. Infra-estrutura de apoio: recursos de manutenção, recursos para abastecimento, comunicações;
9. Equipamentos de apoio: manutenção das estradas e frentes de lavra, desmonte do minério e do estéril.

Todas estas variáveis têm influência direta na escala de produção a ser realizada, da quantidade de minério a ser lavrados no turno ou no dia. Na tabela de simulação entraremos com duas informações, a produção máxima e mínima de minério.

	Dados	
Produção Mínima Min	45000	calc
Produção Máxima Min	50000	45000

Tabela 17: Escala de Produção

5.1.6. Índices Operacionais

Os índices operacionais (disponibilidade física e utilização) estão disponibilizados na tabela de simulação para que a produtividade dos equipamentos de cada frente de lavra seja calculada, indicando ao supervisor qual o melhor ritmo deve inserir nos equipamentos de carregamento.

D.F	U	Produtividade
70%	80%	335
70%	80%	1172
60%	80%	1512
60%	80%	636
64%	80%	1133

Tabela 18: Índices Operacionais

5.1.6.1. Disponibilidade Física

Qualquer equipamento sofre problemas mecânicos que paralisam a produção. A relação entre as horas calendário e as horas disponíveis para produção é chamada de disponibilidade física.

$$DF = \frac{(\text{horas calendário} - \text{hora de manutenção})}{(\text{horas calendário})}$$

A Disponibilidade Física se reduz com a vida do equipamento e depende da qualidade da manutenção. Uma forma de manter a DF elevada é manter um bom programa de manutenção preventiva ou programada.

É preciso lembrar que os equipamentos são projetados para situações específicas de aplicação, nenhum equipamento é capaz de superar todos os outros em qualquer situação. Alguns são projetados para serviço pesado, sendo capazes de sustentar grandes produções durante longos períodos, estes projetos visa enfatizar a robustez dos equipamentos. Outros projetos são mais ágeis, desloca-se com maior facilidade à custa de uma vida e disponibilidades menores.

5.1.6.2. Utilização

A operação de qualquer equipamento sofre inúmeras influências que reduzem a sua utilização efetiva: paralisação de outros equipamentos, interrupção do tráfico por falta de visibilidade, mudança de frente de lavra, deficiências do operador, etc.

A relação entre as horas disponíveis e as realmente utilizadas é chamada de utilização.

$$U = \frac{(\text{horas trabalhadas})}{(\text{horas calendário} - \text{horas de manutenção})}$$

5.1.7. Período de simulação

A mina e a planta irão operar dentro dois regimes operacionais, de acordo com a legislação trabalhista e acordos sindicais, estão previstos:

turno administrativo – 8 h/dia, 5 dias/semana, com folga no final de semana;

turno de produção – 3 turnos de 8 horas/dia.

Na tabela de simulação existe um campo onde se defini o período de tempo que as variáveis a serem simuladas terão influência nas atividades de operações, tendo influência direta na Blendagem da alimentação proveniente da mina.

No exemplo abaixo todos os dados utilizados na simulação teriam validade para um (1) turno de 8 horas, e todas as outras variáveis restritivas seriam proporcionais a este intervalo. Ou seja, a escala de produção de minério (produção máxima e mínima) representaria o turno e não o dia, a disponibilidade física do equipamento de carregamento reflete o índice operacional do turno e assim por diante.

Turno/dia	1
Horas/Turno	8

Tabela 19: Período de simulação

CAPÍTULO 6

6.1. Análise de Resultados

Foi realizada uma simulação de lavra utilizando a tabela “Simulador de Frente de Lavra”, para calcular a quantidade ideal de cada frente de a ser lavrada, chegando a uma produção desejada e um teor médio da blendagem dentro das especificações solicitada pela Usina.

Para efeito de exemplo, foram fixados os teores de Cu, Au, S e F, a DMT, o teor limite de alimentação Usina e o rendimento da frota de carregamento de cada frente.

Os valores variados foram os percentuais de participação de cada frente de lavra na mistura total da blendagem.

	% Cu	g/t Au	% S	ppm F	DMT	D.F	U
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00	2157	70%	80%
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00	3038	70%	80%
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00	2369	60%	80%
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00	2369	60%	80%

Lim Max	1.30	1.04	65	26
Teor Médio	1.00	0.80	50	20
Lim Min	0.70	0.56	35	14

Tabela 20: Valores fixados na simulação

A primeira simulação considera o percentual de participação de todas as frentes de lavra igualmente distribuída, ou seja, 25% de cada frente.

Simulação 1

Frente	Cu	Au	S	F	Produção 1	Percentual	Produtividade (t/h)
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00	11,250	25%	837
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00	11,250	25%	837
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00	11,250	25%	977
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00	11,250	25%	977
Teor de Mistura 1	1.20	0.84	53.75	23.00	45,000	100%	907

Tabela 21: Percentual igualmente distribuído

As outras três (3) simulações o percentual de participação das frentes de lavra estão distribuídas de maneira desigual, ou seja, cada frente possui uma participação distinta, definida segundo critérios operacionais.

Simulação 2

Frente	Cu	Au	S	F	Produção 2	Percentual	Produtividade
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00	13,500	30%	1004
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00	14,559	40%	1083
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00	9,000	20%	781
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00	7,941	10%	689
Teor de Mistura 2	1.17	0.89	53.18	23.77	45,000	100%	930

Simulação 3

Frente	Cu	Au	S	F	Produção 3	Percentual	Produtividade
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00	9,000	20%	670
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00	10,999	30%	1004
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00	7,001	10%	689
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00	18,000	40%	1264
Teor de Mistura 3	1.13	0.78	55.13	22.58	45,000	100%	966

Simulação 4

Frente	Cu	Au	S	F	Produção 4	Percentual	Produtividade
Frente Min 1	1.20	1.50	48.00	30.00	7,941	10%	591
Frente Min 2	0.95	0.66	55.00	23.00	13,500	30%	1004
Frente Min 3	1.64	0.67	52.00	19.00	14,559	40%	1264
Frente Min 4	1.00	0.55	60.00	20.00	9,000	20%	781
Teor de Mistura 4	1.23	0.79	53.79	22.34	45,000	100%	971

Tabela 22: Percentual distribuído de maneira desigual

As células que estão em vermelho (percentual) são as variáveis que foram alteradas a cada simulação, para que o teor da mistura se aproxime ao máximo do limite de alimentação da Usina.

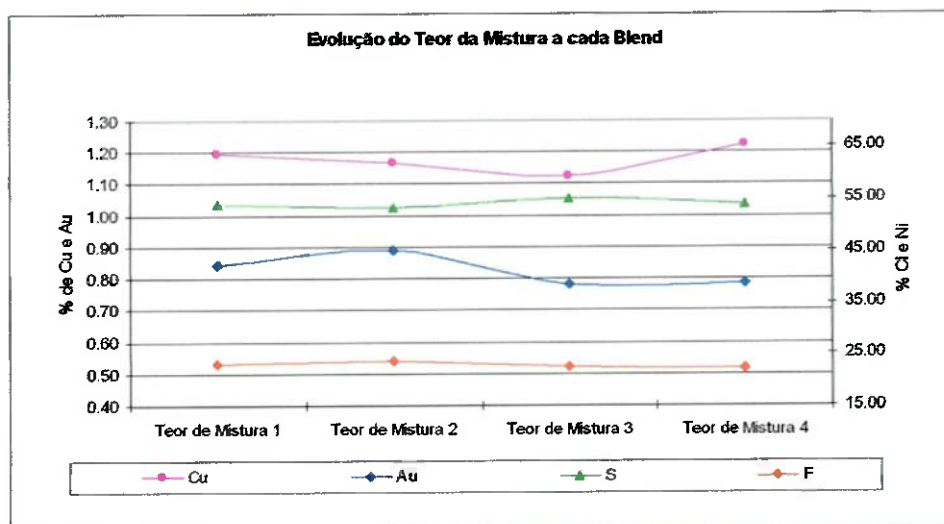
As células que estão sombreadas (produção, produtividade e teor mistura) são as variáveis que foram calculadas de acordo com as restrições operacionais indicadas e a função objetivo de maximizar a produção.

As células que não estão sombreada (Cu, Au, Cl e Ni) são as variáveis que permaneceram fixas e serviram de base para o cálculo do teor da mistura total da blendagem das frentes de lavra, influenciando também na produção e produtividade de cada frente de lavra. É bom ressaltar que estas variáveis também podem ser alteradas concomitantemente com o percentual de participação de cada frente de lavra, de acordo com os valores das análises de pó de perfuração e informações provenientes do Modelo de Blocos de cada região a ser lavrada.

Podemos observar que a cada simulação, a produção total permanece constante (45000 t de produto) e o percentual total sempre fecha 100% , mas com uma simples alteração do percentual de participação da frente de lavra, o teor total da mistura, a

produção e a produtividade necessária de cada frente é automaticamente alterada, seguindo uma mesma lógica de maximizar a produção e respeitar as restrições operacionais.

Segue gráfico e tabela comparativa com a evolução do teor total da blendagem entre as quatro (4) frentes que participaram da simulação.



	Cu	Au	S	F
Teor de Mistura 1	1.20	0.84	53.75	23.00
Teor de Mistura 2	1.17	0.89	53.18	23.77
Teor de Mistura 3	1.13	0.78	55.13	22.58
Teor de Mistura 4	1.23	0.79	53.79	22.34

Tabela 23: Evolução do Teor da Mistura (Blendagem)

Segue gráfico e tabela comparativa com a evolução da Produção entre as quatro (4) frentes que participaram da simulação.

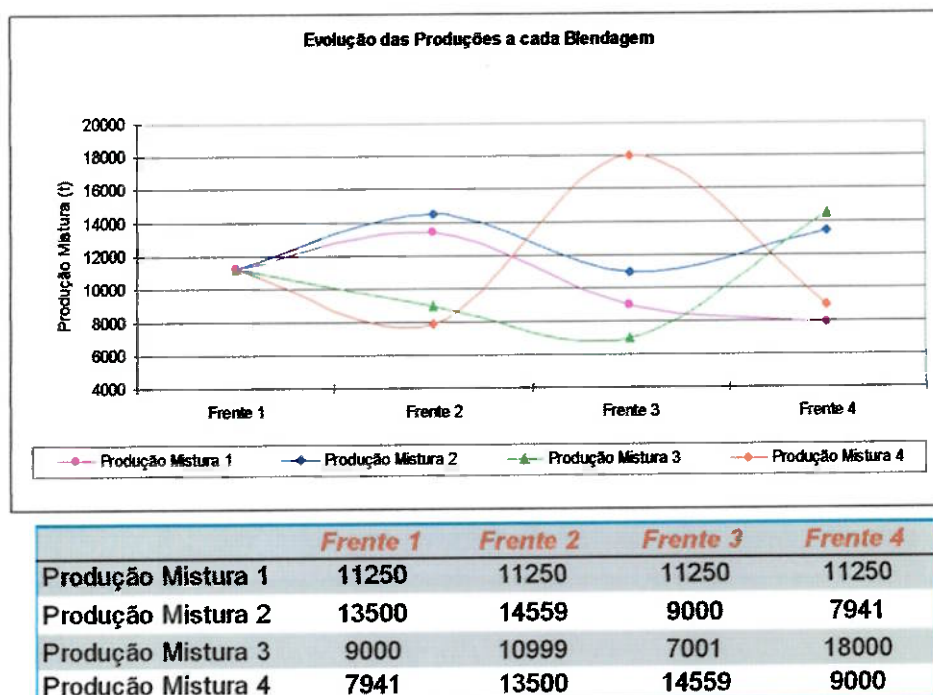


Tabela 24: Evolução da Produção a cada Frente de Lavra

Segue gráfico e tabela comparativa com a evolução da Produtividade entre as quatro (4) frentes que participaram da simulação.

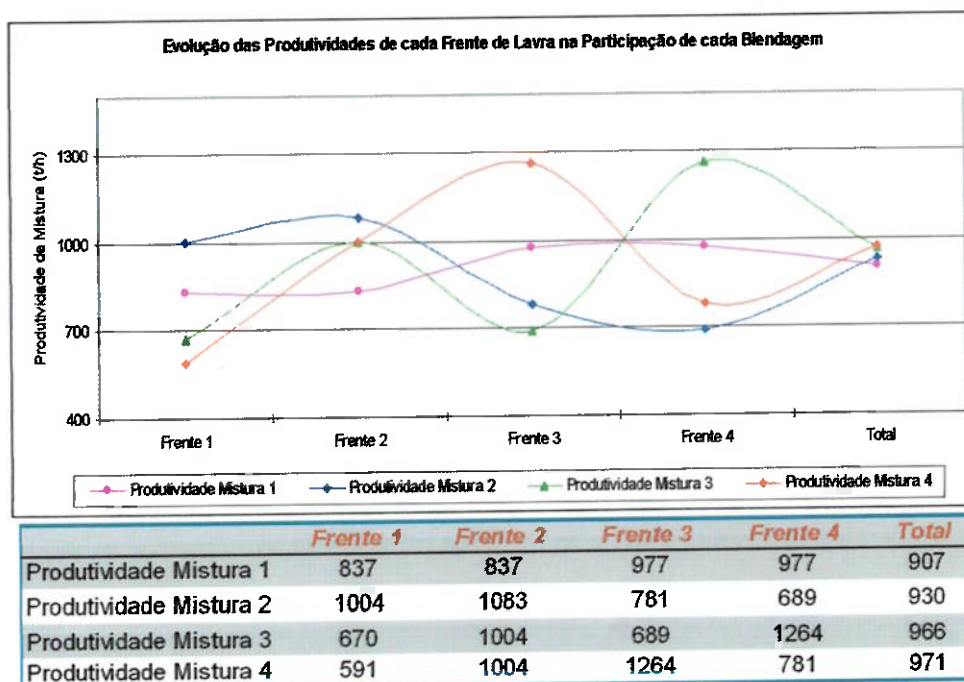


Tabela 25: Evolução da Produtividade a cada Frente de Lavra

Segue gráfico e tabela comparativa com a evolução do percentual de participação entre as quatro (4) frentes que participaram da simulação.

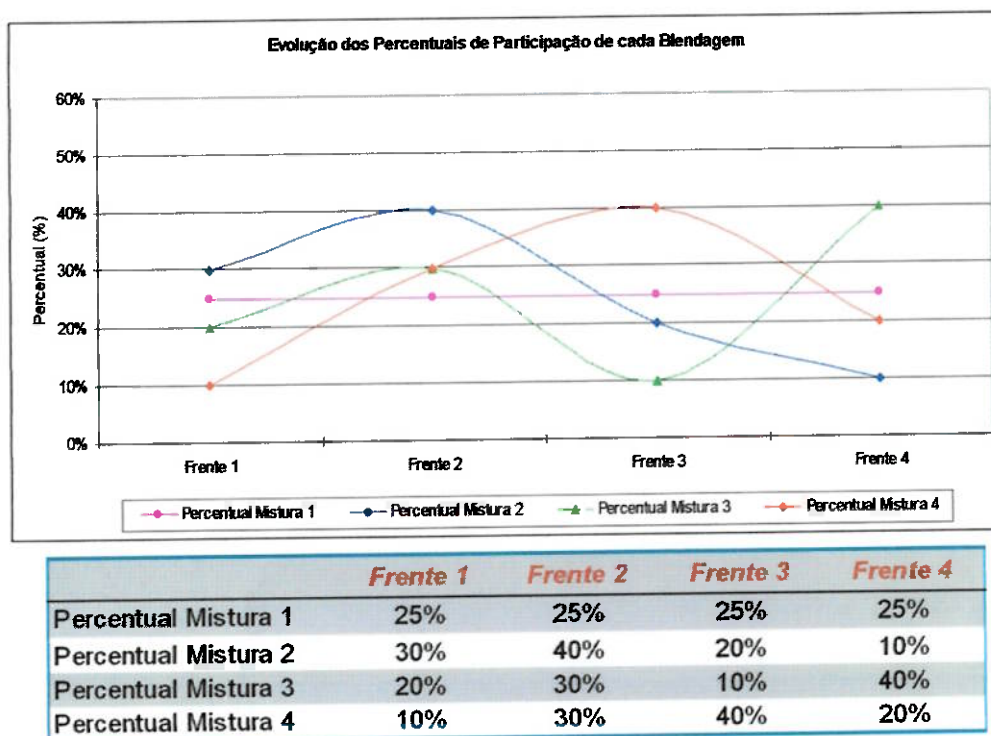


Tabela 26: Evolução do percentual de participação a cada Frente de Lavra

CAPÍTULO 7

7.1. Conclusão

7.1.1. Sensibilidade do Modelo

O sequenciamento da produção é geralmente executado pelo Planejamento a longo-prazo, e a satisfação da homogeneização e limites de blendagem não implicam na satisfação desses limites no Planejamento a curto-prazo. O Planejamento de curto-prazo possui dois objetivos principais:

- Fornecer um material mais homogêneo pela minimização da variabilidade dos teores das unidades seletivas de lavra.
- Evitar custos de penalização minimizando os desvios do valor médio esperado das especificações de mistura desejadas.

A escala de variabilidade de teores de um depósito é uma das mais importantes fontes de risco e o sucesso do planejamento de lavra de curto-prazo, dependendo da capacidade de quantificar a variabilidade dos teores na escala mais apropriada.

Uma série de resultados comparativos entre diferentes variáveis restritivas fornece cenários diferentes. A resposta produzida pelas diferentes simulações atesta que uma variação muito pequena, porém significativa, é produzida quando comparadas entre si as suas melhores e piores situações.

No caso do Blendagem de algumas frentes de lavra, a variabilidade do teor não é grande o suficiente para ser inviabilizada por um caso pessimista, ou supervalorizar por um caso otimista, mas é fato que a análise de múltiplas alternativas ou cenários é uma ferramenta extremamente útil para uma análise decisória mais embasada.

7.1.2. Conclusão Final

Atuando como base de sustentação para a maioria dos segmentos industriais, a extração mineral hoje desempenha um papel fundamental na economia brasileira não só como geradora de empregos e impostos, como também representa fator determinante para o desenvolvimento de um elevado número de cidades e micro-regiões.

Considerada em seu aspecto mais amplo, tecnicamente a mineração compreende todos os serviços necessários à extração de um bem mineral de seu local de jazimento. Envolve, portanto, todos os trabalhos e operações desde a descoberta até a lavra. Um empreendimento mineiro pioneiro, implantado numa determinada área, fatalmente terá

passado pelas fases de procura (prospecção), estudo e avaliação (exploração), preparação para a lavra (desenvolvimento) chegando, finalmente, à extração (lavra, exploração) do bem mineral visado.

As matérias primas necessárias para a obtenção dos metais constituem os minerais, cuja extração é, precisamente tarefa primordial da indústria mineira. Além dos minerais metálicos, são também aproveitados na economia de um país outros não metálicos como: carvão, petróleo, materiais para construção e muitos outros. Portanto as diversas indústrias como a química, metalúrgica, farmacêutica, cosmética, construção civil necessita da matéria prima mineral seja ela metálica ou não para a fabricação de seus bens de consumo.

O inevitável esgotamento das grandes reservas pela lavra tem levado, ultimamente, o homem a profundas preocupações a respeito das futuras fontes de abastecimento de matérias primas. E nesse aspecto assume em particular a importância de otimizar e utilizar ao máximo as reservas disponíveis, criando e desenvolvendo técnicas que evitem e ou minimizem as perdas dos bens minerais.

Como foi mencionada no início deste trabalho, a tabela desenvolvida em Planilha Excel, é uma ferramenta prática que pode ser utilizada de forma rotineira pela supervisão de mina, minimizando os desvios e a variabilidade do teor do Blendagem, evitando uma alimentação que resulte em perdas.

A árdua obrigação de controlar diariamente o teores considerados muito baixo, da ordem de 1,0% de Cu e 0,3 g/t de Au, é uma grande responsabilidade, obrigando um ostensivo controle da alimentação da Planta de Beneficiamento pela supervisão de mina e do técnico de planejamento curto prazo.

Lembro que as atividades de operações da Mina do Sossego ainda não tiveram início, impossibilitando executar simulações com dados reais e principalmente, aferir os resultados simulados na tabela com as respostas vindas da Usina.

É bom ressaltar que este trabalho é um primeiro protótipo de uma ferramenta simplificada, utilizada por técnicos que trabalham em turno de mina auxiliando nas decisões operacionais, sendo periodicamente adaptada e melhorada de acordo com as necessidades dos trabalhos rotineiros.

Journel, A. G. Geostatistical simulation methods for exploration and mine planning, Engineering and Mining Journal. **Engineering and Mining Journal**., 1979.

Journel, A. G. e C. J. Huijbregts. **Mining Geostatistics**. Academic Press, 1978

Wang, Q. e H. Sevim. **Alternative to parameterization in finding a series of maximum-metal pits for production planning**. Mining Engineering. 1995.

Valente, J. M. C. P. **Geomatématica – Lições de Geoestatística - Volume V e Volume VI**. 1995.