



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Departamento de engenharia de minas e de
petróleo**

PMI 2092 - Trabalho de formatura em engenharia de minas

**Aplicação de sistema de planejamento de lavra em minas
subterrâneas brasileiras**

Aluno: Hary Wiesel

Orientador: prof. Dr. Giorgio F.C. de Tomi

Novembro de 2003

TF-2003
W637a
1424493

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Departamento de engenharia de minas e da
petróleo

PMI 2003 - Trabalho de conclusão em engenharia de minas

Apliação de sistemas de planejamento de lavas em minas
subterâneas brasileiras

Aluno: Harry Wiesel

Orientador: Prof. Dr. Gilson L. C. de Toni
M2003A

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005430

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, o autor da vida. A meus pais, Carmen e Paulo (*in memoriam*) pelo apoio incessante, paciência e compreensão. À minha noiva Érica pela paciência, apoio e presença, mesmo de longe.

A meu orientador, amigo e incentivador Giorgio F. C. de Tomi pelas oportunidades de aprendizado e desenvolvimento no Laboratório de Planejamento e Otimização de Lavra, LAPOL, onde fui bolsista de iniciação científica. Aos engenheiros Nelson Senhorinho e Ricardo Cabral de Azevedo pela amizade e grande apoio neste trabalho. Ao professor Lineu A. Ayres da Silva pelas oportunidades de aprendizado no Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR), onde também fui bolsista de iniciação científica.

Agradeço também, pela cooperação e disponibilização de informações técnicas que enriqueceram este trabalho, ao engenheiro Hugo Ribeiro de A. Filho, da Mineração Caraíba S.A. e aos engenheiros Silsomar Botelho Reis Pinto e Alexandre Marcos Petermann da Mineração Morro Velho.

Em especial gostaria de agradecer a Maria Cristina Martinez Bonesio e Elaine Grava, da biblioteca do departamento de engenharia de minas e de petróleo da Escola Politécnica, pela dedicação e apoio em toda a pesquisa bibliográfica que envolveu esse trabalho de formatura.

A todas as empresas que me deram a oportunidade de aprender e estagiar: Embu S.A., Mineração Morro Velho, Mineração Serra da Fortaleza, Minerações Brasileiras Reunidas, Camargo Correa Industrial, Mineração Penery, Datamine Latin America e Instituto de Pesquisas Tecnológicas. E ao CNPq pelo incentivo e oportunidades.

Resumo

Este trabalho apresenta os principais aspectos do planejamento de lavra, particularizando o uso de um sistema integrado de planejamento informatizado específico para minas subterrâneas.

Como forma de apresentar o panorama atual das minas subterrâneas brasileiras, foi realizado um levantamento das informações básicas a seu respeito, uma revisão sobre os principais aspectos envolvidos no planejamento de minas subterrâneas e suas peculiaridades.

O trabalho contempla, também, um estudo de caso real da aplicação do sistema integrado de planejamento informatizado no planejamento de todo um nível de lavra de uma mina subterrânea brasileira, bem como as suas características mais relevantes ao planejamento.

Sumário

1 Introdução	1
2 Objetivos	2
3 Metodologia	3
4 Desenvolvimento	4
4.1 Fichário	4
4.2 Sistemas de planejamento	6
4.2.1 Determinação da reserva	10
4.2.2 Projeto da mina	10
4.2.3 Planejamento de longo e curto prazo	11
4.3 Sistema integrado	12
4.3.1 Flexibilidade	14
5 Resultados	17
5.1 Planejamento	24
6 Análise e discussão	25
7 Conclusões	26
8 Anexos	27
9 Referências Bibliográficas	31

Lista de figuras

Figura 1 – Fatores geradores de incertezas no planejamento	15
Figura 2 – Tela do programa com a programação da produção	18
Figura 3 – Vista panorâmica do acesso à mina Cuiabá, com a Serra da Piedade ao fundo.....	20
Figura 4 – Seção horizontal do corpo de minério, ressaltando as suas principais regiões	21
Figura 5 – Desenho esquemático das operações de lavra na Mina Cuiabá....	23

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais minas subterrâneas em atividade no Brasil.....	5
Tabela 2 - Fases do planejamento de lavra, fatores e objetivos	9
Tabela 3 – Produção de ouro da Mineração Morro Velho nos últimos anos ...	19

1 Introdução

O uso de computadores e sistemas informatizados como ferramentas auxiliares para tomada de decisões na programação de produção diária de uma mina e no planejamento de curto e longo prazo é uma realidade na mineração de alto desempenho contemporânea. A utilização de ferramentas computacionais no planejamento, sequenciamento e otimização da lavra confere maior confiabilidade a um projeto de viabilidade e aceitação junto a investidores, podendo ser imprescindível e, até se tornar decisivo para a aprovação e financiamento de um empreendimento de mineração.

Ao contrário dos primeiros sistemas de planejamento para minas subterrâneas desenvolvidos, hoje é possível processar simultaneamente vários critérios e restrições e simular vários cenários com análise de sensibilidade aos numerosos fatores de risco inerentes a um projeto de mineração. A flexibilização do planejamento frente às constantes alterações nos fatores internos e externos, considerados inicialmente no planejamento da mina, é uma necessidade da indústria mineira atendida somente pelos mais recentes sistemas de planejamento mineral, viabilizada pela diminuição do custo de programas e microcomputadores e também pela grande capacidade e velocidade de processamento das máquinas atuais.

As principais características das minas subterrâneas com maior produção, em atividade no Brasil, foram pesquisadas e estão citadas neste trabalho de formatura mostrando o panorama das minas subterrâneas nacionais.

2 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho de formatura são apresentar as características, benefícios e limitações de um sistema específico para o planejamento de lavra em mina subterrânea, ilustrado com um estudo de caso de aplicação no planejamento de um nível de produção numa mina brasileira, a Mina Cuiabá em Sabará, Minas Gerais, e apresentar o panorama atual das minas subterrâneas em operação no Brasil através de um quadro, com informações a respeito de suas atividades.

3 Metodologia

O desenvolvimento do trabalho está dividido em 4 partes fundamentais.

Primeiramente foi feito um levantamento do panorama das minas subterrâneas brasileiras, através de uma ficha atualizada encaminhada às principais minas subterrâneas brasileiras em atividade. Com as informações obtidas foi elaborado um questionário a respeito das principais características e dos métodos de lavra empregados em cada uma das minas.

A segunda parte consistiu em estudar a literatura a respeito dos conceitos envolvidos nos sistemas de planejamento e em particular suas características específicas para minas subterrâneas.

Em terceiro lugar foi pesquisado um sistema integrado para planejamento automatizado, específico para minas subterrâneas, ilustrado com gráficos e telas explicativas.

Por fim, foi feito o acompanhamento da aplicação prática do sistema em uma mina de ouro brasileira com figuras e telas obtidas durante a execução do planejamento com o sistema.

4 Desenvolvimento

4.1 Fichário

A primeira etapa do trabalho consistiu em reunir informações a respeito das principais minas em atividade no Brasil, com dados mais recentes possível. Foram consideradas todas as minas subterrâneas com produção anual de minério maior que 260.000t. Para tanto, foi elaborado um fichário com questões sobre localização, produção, geologia, lavra, equipamentos e planos de expansão.

Outros aspectos foram abrangidos pelo questionário, mas para simplificar a comparação entre as minas subterrâneas, estas informações foram suprimidas da tabela 1 – principais minas subterrâneas em atividade no Brasil.

O modelo do fichário encaminhado às empresas está apresentado no Anexo A – Questionário sobre as características das minas subterrâneas brasileiras. Nem todas as minas responderam ao questionário, mas para estas, as informações foram obtidas através de publicações do DNPM em seu *site* na *internet*, do *site* oficial das empresas na *internet* e de periódicos especializados em mineração.

O resumo das informações obtidas está apresentado na tabela 1 - principais minas subterrâneas em atividade no Brasil, a seguir.

Tabela 1 - Principais minas subterrâneas em atividade no Brasil

MINA	EMPRESA	PRODUTO	PRODUÇÃO (x10 ³ vano)	MÉTODO DE LAVRA	CIDADE / ESTADO
Urucum	Cia. Vale do Rio Doce	Manganês	360	Pilar e salão	Corumbá / MS
Cantão	Carbonífera Belluno	Carvão	360	Pilar e salão	Siderópolis / SC
São Bento	São Bento Mineração S.A. Mineração Serra da Fortaleza S.A.	Ouro	400	Corte e aterro / Subníveis com perfuração longa	Santa Bárbara / MG
Serra da Fortaleza	Mineração Castelo Branco S.A.	Níquel	420	Subníveis	Fortaleza de Minas / MG
Formoso	Cia. Mineira de Metais	Carvão	540	Pilar e salão	Lauro Muller / SC
Morro Agudo	Cia. Mineira de Metais	Zinco	600	Pilar e salão	Paracatu / MG
Vazante	Cia. Mineira de Metais	Zinco	600	Pilar e salão / corte e aterro	Vazante / MG
Taquari - Vassouras	Cia. Vale do Rio Doce	Potássio	630	Pilar e salão	Rosário do Catete / SE
Ipueira	Mineração Vale do Jacurici	Cromo	732	Desabamento em Subníveis / Subníveis	Andorinha / BA
Mina III e Nova	Anglogold / Newinco	Ouro	735	Pilar e salão / corte e aterro	Crixás / GO
Cuiabá	Anglogold	Ouro	784	Corte e aterro	Sabará / MG
Fazenda Brasileiro	Yamana Resources	Ouro	1000	Subníveis	Teofilândia / BH
Trevo / Barro Branco	Ind. Carbonífera Rio Deserto	Carvão	1115	Pilar e salão	Siderópolis e Lauro Muller / SC
Caraíba	Mineração Caraíba S.A.	Cobre	1200	em Recuo Vertical (VRM)	Jaguarari / BA
Verdinho	Carbonífera Criciúma S.A.	Carvão	1205	Pilar e salão	Forquilha / SC
Esperança / Fontenele	Carbonífera Metropolitana S.A.	Carvão	1285	Pilar e salão	Treviso / SC
Baltar *	Votorantim Cimentos LTDA	Calciário	1500	Subníveis	Votorantim / SP

* produção da mina temporariamente
suspendida

4.2 Sistemas de planejamento

Desde o advento dos computadores, na década de 40, gradativamente, as atividades ligadas à mineração foram sendo beneficiadas pelo seu uso, até ser incorporado a praticamente todos os departamentos de uma mineração e a todas as fases da vida útil da mina. Equipamentos outrora caros, pesados, grandes e de uso específico foram, aos poucos, substituídos por máquinas e programas cada vez mais rápidos e acessíveis.

A miniaturização dos transistores, componentes básicos dos processadores, está relacionada com o seu desempenho e segue uma marcha de desenvolvimento de forma a evoluir com a duplicação da capacidade de processamento a cada dois anos, conforme Gordon Moore supôs em 1965, quando era presidente da Intel Corporation, atualmente a maior fabricante mundial de processadores para microcomputadores. Essa previsão se confirmou e é válida ainda nos dias de hoje, ficando conhecida como Lei de Moore. A grande difusão do uso de microcomputadores se deu a partir dos PC-XT, com processador 8088 que tinha 29 mil transistores. A tecnologia de fabricação evoluiu de forma que hoje os processadores para microcomputadores pessoais chegam a mais de 40 milhões de transistores, o que possibilitou um grande desenvolvimento dos sistemas, em especial dos voltados para a mineração, que requerem grande capacidade de processamento para se obter resultados satisfatórios após exaustiva combinação de fatores, considerando as diversas variáveis, restrições e possibilidades envolvidas na simulação de extração mineral e seu planejamento. Mantendo-se a forma de fabricação de microprocessadores usada atualmente e a sua taxa de desenvolvimento, o limite tecnológico, segundo (MORIMOTO, 1998), será atingido em 2007, com frequências de processamento em torno de 15Ghz. Para as necessidades atuais da indústria mineral, este limite não trará restrição ao planejamento computacional, da forma como é feito atualmente. Considerando-se que outras tecnologias, como a realidade virtual, exigem maiores recursos de

processamento e estão sendo usadas, com vantagens, em vários campos tecnológicos é de se esperar que as ferramentas de planejamento evoluam e se beneficiem também com o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento computacional. Conforme (AZEVEDO, 2002), o desempenho em termos de *hardware* e *software* deverá evoluir bastante para que a tecnologia da realidade virtual seja acessível e difundida no desenvolvimento mineiro. O planejamento de minas subterrâneas envolve um complexo conjunto de elementos que devem ser considerados e analisados de forma ampla e muitas vezes correlacionada, a fim de que todas as possibilidades possam ser estudadas, considerando as restrições impostas. Em cada uma dessas simulações é realizado um processo iterativo no qual a dependência entre seus elementos promove um aumento na complexidade das operações. Para o melhor planejamento possível, deve-se considerar que este seja realmente realizável e não que traga apenas os melhores resultados econômicos quando simulado, mas que se aplique no cotidiano operacional da mina. O conhecimento das restrições envolvidas no planejamento pode conduzir a uma melhor tomada de decisões, assegurando que todos os elementos necessários sejam considerados e que se possa fazer um julgamento crítico a respeito do resultado obtido.

As ferramentas de planejamento mais antigas são, em geral, sistemas específicos para aplicação em uma única mina e, às vezes aplicáveis a apenas uma região específica de uma mina, pois só considerava parâmetros fixos, retratando apenas o modelo para uma área com características homogêneas. A indústria mineral, atualmente, necessita de sistemas mais genéricos e capazes de permitir, rapidamente, a incorporação em seu modelo de planejamento, das mudanças provenientes da imprevisibilidade que o mercado e as características geológicas impõem ao planejamento. Outro aspecto importante é o de que o sistema deve apresentar também opções quanto ao método de lavra a ser empregado, permitindo a avaliação dos custos de desenvolvimento e produção.

Os aspectos citados aqui motivaram o desenvolvimento de uma nova classe de sistemas voltados para o planejamento de minas subterrâneas. Estes sistemas incorporaram, também, o recente avanço dos recursos gráficos, apresentando visualmente a lavra dos realces e do desenvolvimento da mina, através de recursos gráficos de alta resolução estáticos ou animados.

Cabe ressaltar que esses recursos gráficos não geram apenas figuras que subtraem um volume de outro, como os gráficos vetoriais gerados em ferramentas como, por exemplo, Autocad. Este tipo de solução é satisfatória quando se busca, por exemplo, obter a quantidade de material a ser lavrado numa mina ou o estéril a ser removido até se atingir o corpo de minério. Para modelos integrados, como o analisado neste trabalho, a simulação compreende todos os elementos e restrições impostas pelo operador no planejamento como: geologia, modelos econômico e geotécnico, mecânica de rochas, dimensão de galerias, sequenciamento e outras. Esse tipo de apresentação permite um maior controle e um planejamento mais próximo da realidade, pois considera também a evolução global da mina no tempo. Conforme (SENHORINHO, 2001), há grandes riscos em se executar um planejamento de longo prazo sem qualidade e que tenha se tornado distante da realidade da mina. Há casos em que isso levou a um encerramento prematuro da operação de lavra e a conseqüente paralisação da mina.

Outro aspecto importante que um sistema de planejamento deve prever é a possibilidade de confrontação entre o planejado e o realizado, permitindo a rápida atualização e, caso necessário, reprogramação dos horizontes de produção da mina. A fim de ilustrar a relação entre os diversos fatores envolvidos no planejamento em minas subterrâneas, (MORIN, 2002), sugeriu dividir o processo em etapas iterativas estagiadas, onde cada estágio possui objetivos específicos a serem encontrados. A Tabela 2, a seguir, apresenta o processo proposto e alguns dos fatores que interferem na resolução dos objetivos de cada estágio.

Tabela 2 - Fases do planejamento de lavra, fatores e objetivos.
Modificado de (MORIN,2002).

FASES	FATORES	OBJETIVOS
Determinação da Reserva Mineral	Estimativa geral da recuperação e diluição do minério	Classificar os dados geológicos e a distribuição mineral (análise de dados e modelagem geológica) e determinar as características e as dimensões do depósito
	Preços praticados para o bem mineral em questão	Calcular tonelagem da reserva lavrável e respectivos teores médios, baseados na seleção inicial de teores de corte
	Recuperação do produto final / Taxas de fusão e refino, etc.	Plotar as curvas de tonelagem-teor Estimar valor potencial do depósito
Projeto da mina ou planejamento de pré-produção	A tecnologia disponível determina os métodos de lavra e beneficiamento a serem utilizados	Extração viável do depósito (método de lavra)
	O método de lavra selecionado depende das características e dimensões do depósito	Processo de beneficiamento a ser selecionado bem como a recuperação do minério prevista
	Teor de corte selecionado implica nas reservas de minério disponíveis e depende do valor econômico do depósito	Estimativas de custos de capital e custos operacionais
	Escala de produção depende da tonelagem de minério disponível e de fatores de demanda do mercado consumidor	Escala de produção ótima
	Preços do bem mineral afetam o valor econômico do depósito	Teor de corte ótimo variando no tempo Valor econômico do depósito (valoração da mina)
Planejamento de longo prazo ou desenvolvimento	Projetos da mina e da usina (assim como os custos de capital requeridos) dependem da escala de produção selecionada	Maximizar rendimentos a partir da extração das reservas de minério (sequenciamento da lavra)
	O desenvolvimento requerido depende da disposição e tamanho do corpo de minério, além do método de lavra escolhido	Otimizar o desenvolvimento para acessar o depósito (<i>layout</i> da mina) e o processo de extração do minério (perfuração, desmonte, carregamento e transporte)
Planejamento de curto prazo ou operacional	A lucratividade dos blocos de lavra selecionados depende de todas as condições e objetivos previamente determinados	Maximizar rendimentos a partir da extração dos blocos de lavra selecionados (minimizar custos de produção) e otimizar a sequência de lavra (minimizar tempo de processo)

Por se tratar de um processo iterativo, cada decisão tomada ou restrição adotada afeta todas as outras fases do planejamento. Caso os objetivos não sejam alcançados, é necessário refazer o plano, a partir do nível exatamente anterior, até que se obtenha o resultado desejado. É comum que, frente a uma série de restrições impostas, não se obtenha nenhum resultado efetivamente realizável do ponto de vista operacional ou distante dos objetivos almejados. Os sistemas contemporâneos permitem relaxar as restrições para valores em uma faixa de tolerância antes de refazer o planejamento. Cada fase listada na tabela 2 será discutida a seguir.

4.2.1 Determinação da reserva

Os dados geológicos obtidos durante as etapas de pesquisa mineral são a base de todo o empreendimento e, em particular, do planejamento da mina. As informações da pesquisa provêm de fontes diversas, como de estudos de geofísica, geoquímica, levantamento aerofotogramétrico, geologia local e regional, furos de sondagem e análise de afloramentos, entre outras. Nesta fase, são determinadas as principais litologias, e suas propriedades intrínsecas, muito importantes para o planejamento e para se obter seções geológicas típicas do depósito. Essa determinação é dependente das técnicas de amostragem, dos métodos estatísticos e geoestatísticos empregados e dos teores estimados. Estes fatores impactam diretamente na qualidade da modelagem geológica. Falhas na estimativa destas informações poderão ter consequências diretas no projeto e planejamento da mina.

4.2.2 Projeto da mina

A fase de projeto da mina envolve atividades seqüenciadas, relacionadas e dependentes entre si. As principais etapas desta fase são a seleção do método de lavra, o projeto dos realces, disposição e sequenciamento preliminar da lavra, determinação da escala ótima de produção e das vias de acesso e galerias de produção e desenvolvimento, além de outras. A estimativa de custos para estes fatores, combinada com o valor das reservas de minério determinadas na etapa anterior serão utilizados no julgamento da

viabilidade do empreendimento e na determinação do valor do depósito analisado.

A escolha do método de lavra é muito influenciada pelas características do corpo de minério, identificadas na modelagem geológica. O método de lavra escolhido influencia o projeto dos realces, definidos a partir das dimensões, direção e sequenciamento da lavra. Determinar a escala de produção é uma decisão crítica e depende das reservas disponíveis e de fatores externos, como a demanda do mercado consumidor. Após sua escolha, determinará a vida útil da mina, o número de realces e outros aspectos como perfuração, transporte e armazenamento.

4.2.3 Planejamento de longo e curto prazo

O planejamento e sequenciamento da lavra são essenciais para a determinação da forma e do ritmo da produção na mina. São processos iterativos que visam a maximização do benefício econômico que o depósito mineral pode trazer, ao mesmo tempo em que levam em conta as restrições de produção e as áreas disponíveis para a lavra. O planejamento de longo prazo apresenta um aspecto mais estratégico, identificando como o depósito mineral será desenvolvido e lavrado enquanto que o de curto prazo dispõem os recursos necessários para viabilizar o planejamento de longo prazo, mostrando um aspecto mais tático.

O planejamento de curto prazo e o de longo prazo tem horizontes bem definidos e distintos no tempo, para cada projeto em especial. De maneira geral, o planejamento de longo prazo é orientado para ser realizado em horizontes entre 5 e 20 anos e o de curto prazo entre 6 meses e 3 anos, dependendo das características do projeto. Mesmo com o recente avanço das técnicas e dos métodos matemáticos disponíveis atualmente, não é possível, em geral, fazer um planejamento a curto ou longo prazo confiáveis, para horizontes maiores de tempo do que os apresentados acima.

Na operacionalização da mina, o controle de produção é a parte do planejamento em que há a integração entre o planejamento e a operação. Conforme (MORIN, 2002), ele pode ser dividido em:

- controle topográfico,
- controle de qualidade (em relação a teores),
- controle de fragmentação,
- controle de custos e
- controle do sequenciamento.

4.3 Sistema integrado

Um sistema destinado ao planejamento de minas subterrâneas deve estar apto a incorporar os diferentes aspectos envolvidos na lavra e na operação da mina, como o cálculo de reservas, sistemas de ventilação, distribuição de tensões no maciço, controle hidro-geológico, programação de produção, interpolação de teores entre os blocos a partir de dados geoquímicos, e outros. Na maioria dos casos, estas ferramentas são específicas e estanques para cada uma destas áreas. Além disso, são desenvolvidas para determinadas plataformas e sistemas operacionais, sendo incompatíveis com outros ambientes e sem a possibilidade de comunicação entre si. Esses fatores, externos ao universo do planejamento mineral em si, tornam o processo descontínuo e as soluções isoladas, uma vez que as informações que representam a mina, estão separadas em diferentes programas para computador. Este isolamento entre as informações pode afetar o planejamento, tornando o seu resultado inatingível.

Alguns sistemas de otimização da lavra tem sido elaborados ultimamente, por pesquisadores e empresas de mineração, envolvendo elevada quantidade de recursos e capital em seu desenvolvimento. Apesar de que um programa de computador, mesmo em se tratando de um modelo de otimização segundo regras e restrições definidas a respeito de um processo, não retrate toda a realidade da lavra de uma mina, sua interação com o

conhecimento do engenheiro e sua experiência obtida na operação da lavra compõem a melhor solução para o planejamento. Esta interação promoveu diversas alterações no planejamento até o encerramento do empreendimento, pois a solução obtida será ainda confrontada com o resultado da lavra e aperfeiçoada. Dessa forma, é possível aprimorar o planejamento constantemente, com possibilidades de criação de diversos cenários de planejamento, minimizando o risco de execução de exploração que não tenha sido prevista e, eventualmente, comprometer a sanidade financeira do empreendimento.

Para atender as características sugeridas acima, um programa informatizado de planejamento de lavra subterrânea, deve ter um sistema de gerenciamento e troca de dados eficiente e que permita a integração entre os vários sistemas especializados de cada aspecto da lavra, contemplando as seguintes características:

1. Parametrização dos recursos geológicos disponíveis, para maximizar os recursos geológicos disponíveis atendendo às necessidades da usina de beneficiamento, quanto a quantidade e teores
2. Estudo estatístico das variáveis presentes no modelo geológico, de modo a analisar o comportamento e inter-relacionamento destas e também orientar a coleta de amostras na mina e posterior entrada de dados para os modelos litológicos adotados no planejamento.
3. De acordo com os atributos de teor, contaminantes ou outros, proceder a simulação, classificando o material (recursos geológicos) e classificando em valores ou intervalos de valores pré-estabelecidas
4. Criação do modelo econômico, conferindo valor econômico para cada bloco e contemplando fatores como: receita, custos de extração, transporte e processamento, recuperação e diluição de lavra e processo, entre outros
5. Modelo geotécnico que atenda a critérios estritamente necessários de segurança da operação da mina, buscando a maximização dos recursos geológicos disponíveis.

6. Seleção de um método matemático para a maximização dos recursos geológicos dentro das restrições a serem consideradas (quantidade, qualidade, fatores econômicos, aspectos geotécnicos e outras)
7. Seleção do método de lavra, a partir dos estudos matemáticos da etapa anterior e que além dos fatores geológicos naturais, está intrinsecamente relacionado com as estratégias empresariais, que definirão o cronograma de produção da mina.
8. Sequenciamento da lavra, a partir dos blocos inclusos nas envoltórias matemáticas encontradas na etapa 6).
9. Operacionalização da lavra estabelecida na etapa 8), considerando os índices de produtividade dos equipamentos e mão de obra, ventilação, disponibilização de energia elétrica, água e ar comprimido e preparação para o desenvolvimento
10. Avaliação dos resultados operacionais obtidos e reconciliação dos dados, realimentando o sistema de planejamento com as informações operacionais obtidas
11. Planejamento ambiental feito de modo a atender às solicitações ambientais

4.3.1 Flexibilidade

Segundo (KAZAKIDIS, 2002), dependendo do tipo de análise que se faz e das características particulares de um projeto de mineração, certas condições podem ser admitidas como internas ou externas. As principais fontes de incerteza em projetos de mineração são oriundas de causas internas, inerentes ao depósito mineral, e de causas externas como questões de mercado e de fatores econômicos e estão apresentados na figura 1 a seguir

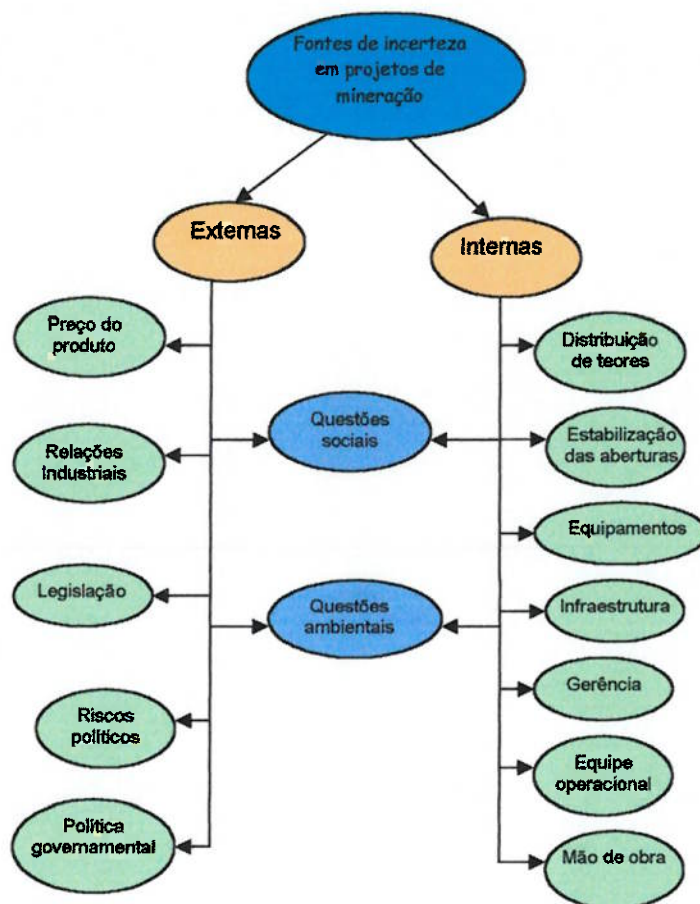


Figura 1 – Fatores geradores de incertezas no planejamento.

Adaptado de (KAZAKIDIS, 2002)

Um dos objetivos da equipe de planejamento é minimizar os custos e riscos associados à exploração. Isso pode ser feito, por exemplo, aumentando o número de furos de sondagem e a confiabilidade na estimativa dos teores, evitando imprevistos. A flexibilidade do planejamento não deve ser admitida apenas como uma forma de se aumentar a segurança do projeto contra as incertezas das operações de lavra, mas também visa fornecer à gerência a vantagem de ter oportunidades para novos desenvolvimentos durante o ciclo de vida da mina.

Segundo (KAZAKIDIS, 2002), não é comum na mineração subterrânea adotar-se um método sistemático de flexibilização do planejamento. Quando é feita, esta não chega a ser documentada para consulta posterior, tratando-

se de um ato isolado, geralmente nas mãos de apenas uma pessoa que tem maior experiência a respeito da lavra na mina. A associação de um valor à flexibilidade, pode ser obtido pela comparação entre cenários alternativos e seus respectivos impactos na produção da mina e nos custos operacionais. Apesar de que a análise do fluxo de caixa descontado e a simulação de produção poderem ser usados na avaliação de alternativas, o valor real da flexibilidade não pode ser determinado. A flexibilidade operacional considera o risco associado a fatores não-mercadoológicos como, por exemplo, problemas operacionais que levam ao afastamento dos objetivos em relação a custos e de desempenho de produção preestabelecidos.

5 Resultados

O sistema utilizado no estudo de caso analisado neste trabalho é resultado do recente desenvolvimento de uma equipe mundial de programadores, consultores e profissionais em mineração. A sede do projeto estava baseada na África do Sul e seu desenvolvimento levou 2 anos. O programa utilizado foi o Mine2-4d, desenvolvido pela AST Mining e distribuído mundialmente pela empresa Earthworks. Suas principais características inovativas são:

- integração entre o desenho tridimensional e o planejamento,
- rápida alteração no planejamento de longo prazo como resultado dos ganhos no curto-prazo,
- completa integração da programação de produção ao planejamento
- considera no planejamento operacional todas as operações unitárias e as de preparação e segurança (abatimento de choccos, dispersão de gases, aparafusamento de teto, aterro, limpeza após desmonte e outras),
- automática atualização do planejamento quando há alterações no modelo de blocos,
- simulação da operação com animações,
- integração com sistemas de atualização da lavra em tempo real,
- programação da produção. Ilustrada com gráfico de Gantt, como apresentado na figura 2.

O programa foi aplicado ao desenvolvimento e lavra de todo o nível N07 da mina Cuiabá, da Mineração Morro Velho.

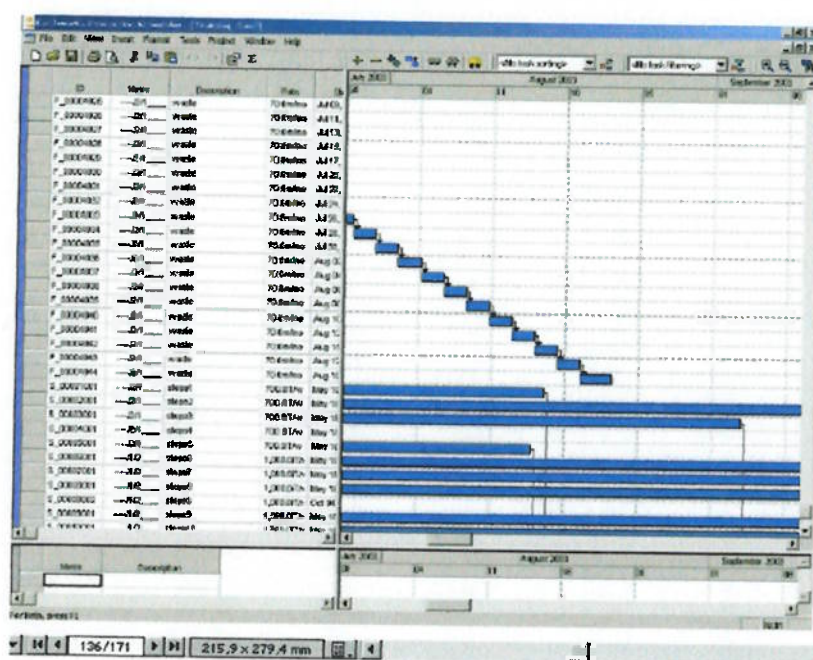


Figura 2 – Tela do programa com a programação da produção

As informações da mina são apresentadas nos parágrafos a seguir. A Mineração Morro Velho faz parte do grupo AngloGold South America, voltada à produção de ouro e que comanda as seguintes empresas:

- Mineração Morro Velho (MG), com participação de 100% ,
- Mineração Serra Grande(GO), com participação de 50% ,
- Cerro Vanguardia (Argentina), com participação de 46,25% ,
- Mineração Itajobi - Projeto Amapari (AP), com participação de 100%.

O processo produtivo da Mineração Morro Velho tem como subprodutos prata e ácido sulfúrico e sua produção vem se mantendo aproximadamente constante nos últimos anos, como se observa na tabela 3, a seguir:

Tabela 3 – Produção de ouro da Mineração Morro Velho nos últimos anos.

ANO	Produção (oz)
1998	200.000
1999	198.000
2000	196.503
2001	201.211
2002	203.362
2003 (estimativa)	202.089

A empresa está sediada no município de Nova Lima, conta com 1285 empregados e opera as minas Cuiabá, (subterrânea e objeto de estudo nesse trabalho) situada em Sabará e Engenho D'água (céu-aberto) em Rio Acima, todas em Minas Gerais estado em que está, também, a usina de beneficiamento, denominada Planta do Queiroz, no município de Raposos. A Mina Velha, situada em Nova Lima, encerrou suas operações em 2003.

A mina Cuiabá está localizada a 5,5 km do centro da cidade de Sabará, cujo acesso se faz pela rodovia MG 05, a 6 km a sudeste da Serra da Piedade e, a 30 km de Belo Horizonte. O principal produto é o minério de ouro, e os subprodutos são ácido sulfúrico, 100.000 toneladas anuais e prata, com uma produção de 500 kg anuais. O número de empregados é de 481 (subsolo e superfície) e a vida útil projetada da mina é de 17 anos, segundo o atual conhecimento de sua reserva lavrável, desde o nível 5 até o 11. Furos de sondagem já interceptaram a mineralização no nível 21. O método de lavra empregado é o corte e aterro. A figura 3 apresenta o acesso principal da mina.



Figura 3 – Vista panorâmica do acesso à mina Cuiabá, com a Serra da Piedade ao fundo.

Uma seção longitudinal típica da mina está apresentada no anexo B, onde se pode observar que o nível mais profundo a ser atingido é o N11, situado a 762m abaixo da boca do poço de acesso principal. Nos estudos quanto à mecânica de rochas, utiliza-se um sistema de classificação de maciços rochosos desenvolvido pela equipe técnica de mecânica de rochas da empresa, em função dos dados de monitoramento nas diversas minas da empresa e da observação do comportamento das escavações feitas nos diferentes tipos de maciços rochosos encontrados. A instrumentação nas minas baseia-se na análise de convergenciometria, extensometria e medidas de variação de tensão através de medidores de tensão.

Em relação à geologia regional, a mina se localiza no supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, constituído de uma seqüência de *Greenstone Belts*. Quanto à geologia econômica, os corpos de minério ocorrem numa estrutura dobrada em bainha, cujo plunge é de 30°, na direção 115. O ouro é associado aos corpos sulfetados, sendo a pirita o principal sulfeto, seguido

da arsenopirita e pirrotita. Vários corpos de minério são lavrados nesta estrutura e eles se encontram ao longo dessa circunferência encaixados numa unidade de formação ferrífera. A sua forma assemelha-se a lentes e tendem a ser relativamente contínuos à medida que se aprofundam.

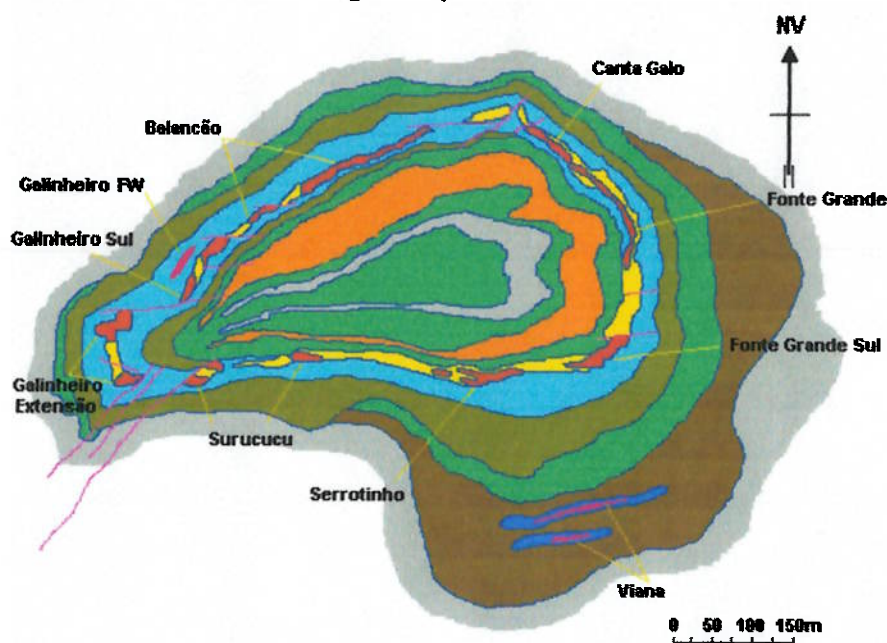


Figura 4 – Seção horizontal do corpo de minério, ressaltando as suas principais regiões.

As principais litologias, apresentadas na figura 4 são:

1. Quartzo-sericita-clorita-carbbonato (xs) – filito de coloração cinza-claro com quartzo vulcânico, .
2. Quartzo-carbonato-clorita-sericita (x1) – coloração cinza-escuro. Composto por grafita e feldspato. Apresenta acamamento bem desenvolvido sem fragmentos vulcânicos, paralelo ao acamamento da formação de ferro e aos contatos da formação de ferro e xisto.
3. Quartzo-carbonato-sericita (x2) – xisto com coloração cinza-claro. Pode apresentar intercalações de X1.
4. Formação ferrífera bandada (BIF) – O bandamento apresenta-se em dimensões centimétricas e milimétricas, como resultado da alternância entre camadas brancas (quartzo e carbonato), amareladas (sulfeto) e cinza-escuro (carbonato grafitoso).
5. Metabasalto andesítico (Mba) Xisto que apresenta coloração verde-escuro e foliações. É composta por epidoto, clorita, anfibólio, tianita, plagioclásio e quartzo.

Em 2000 foi inaugurado o novo sistema de ventilação com vazão ampliada para 300 m³/s, mantendo-se o mesmo tipo de ventiladores centrífugos sendo que o circuito de ventilação da mina passou a ser em paralelo.

O minério é retirado da mina pelo poço principal através de esquipas sendo o poço dividido em compartimentos. Neles, funcionam dois esquipas em balanço para içamento de minério e estéril, com capacidade de 5,5t por esquipa e uma gaiola de 2 andares com capacidade de transporte de 30 homens/andar por viagem, em balanço com um contrapeso de 7t. No poço há também um compartimento para o contrapeso da gaiola, um para tubulações e um para cabos elétricos.

Os painéis de lavra da mina acima do nível 3 têm uma altura de 60 metros cada e, abaixo deste, altura de 66 metros. O minério lavrado e o estéril resultante do desenvolvimento são transferidos, por gravidade, via *ore pass* ou *waste pass*, para a estação de carga junto ao fundo do poço, sendo daí içados à superfície através dos esquipas. O *ore pass* principal é interligado aos diversos níveis da mina através de *fingers* que recebem o minério lavrado nos mesmos. De forma idêntica, o *waste pass* principal possui *fingers* nos vários níveis da mina para receber, eventualmente, o estéril proveniente das frentes em desenvolvimento.

O minério içado através do poço vertical é transferido por meio de correia transportadora para a planta de britagem, e após britagem terciária é transportado até o complexo industrial do Queiroz por teleférico. O estéril, quando içado pelo poço, é transferido por correia transportadora até o silo de estéril nas proximidades da planta de britagem, de onde é retomado por caminhões para deposição no bota-fora.

A mina possui um segundo acesso representado por um adito no nível 3, que se comunica com as rampas que interligam este nível aos níveis 4, 5, 6, 7 e 8. O nível 8, que já tem acesso por rampa, é o mais profundo em

desenvolvimento. Utiliza-se esse segundo acesso para o trânsito de equipamentos móveis entre o subsolo e a superfície, e para o transporte de materiais. Em caso de uma eventual emergência no poço vertical, é também uma alternativa para transporte de pessoal. O nível 11, acessado apenas pelo Poço Vertical, já se encontra aberto em nível de lavra. A seção dessas rampas é de 4,5 x 4,0 metros e a sua inclinação é de 15%.

Na figura 5, pode-se ver uma figura esquemática da lavra na mina Cuiabá.

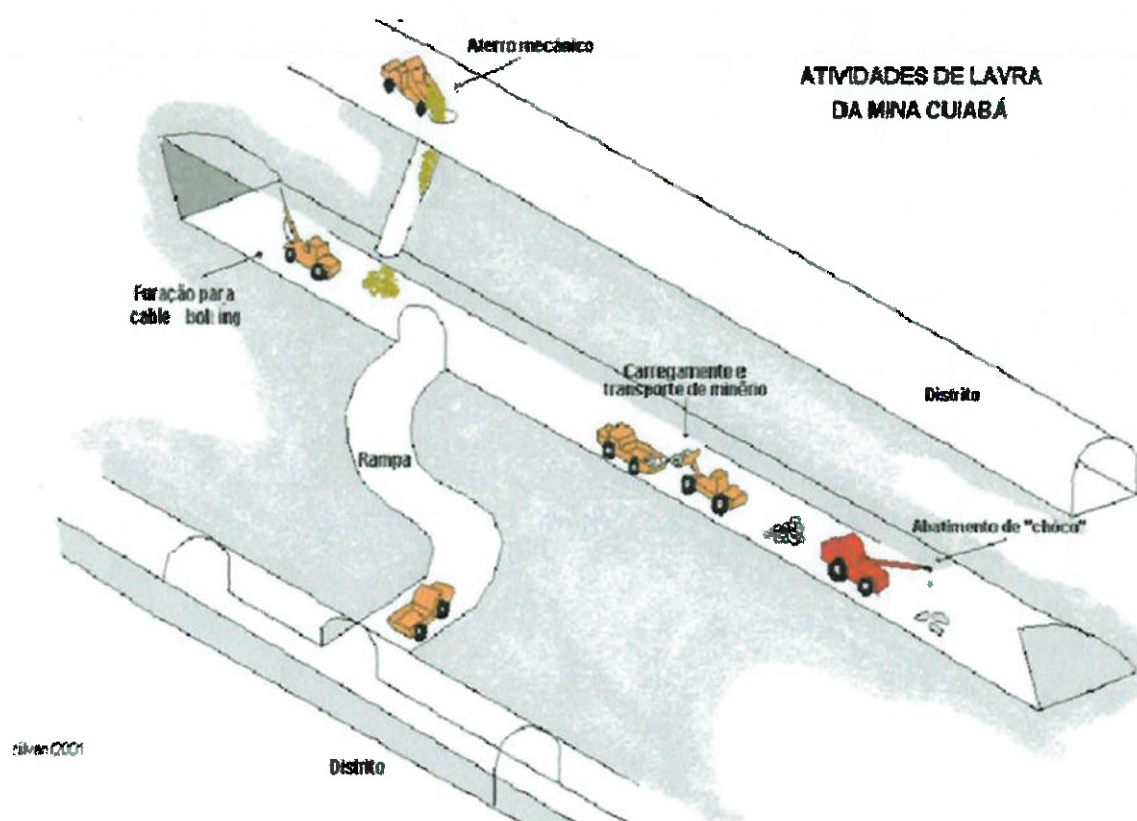


Figura 5 – Desenho esquemático das operações de lavra na Mina Cuiabá.

5.1 Planejamento

A equipe de planejamento da mina Cuiabá, recentemente optou por adotar o sistema Mine2-4d, a fim de aperfeiçoar e acelerar o processo do planejamento, no longo-prazo, curto-prazo e na programação da produção. Inicialmente foram transferidos os bancos de dados do desenvolvimento, topografia, sondagem e planejamento para o sistema. Após as primeiras simulações foram também introduzidas informações a respeito da ventilação e operação diária. Neste trabalho estão apresentados os trabalhos do planejamento do nível N07, cuja representação está no anexo C.

A escolha da mina Cuiabá como estudo de caso neste trabalho foi devido à boa integração aluno-empresa e ao fato de esta ser a mina brasileira que melhor aplica, atualmente, os conceitos de planejamento com sistema informatizado integrado. Uma figura do sistema em operação está apresentada no anexo D.

6 Análise e discussão

Na aplicação do sistema foi feita a integração de informações de diversas equipes atuantes na lavra, buscando um modelo mais próximo possível da realidade. Com o modelo de blocos disponível e com restrições diversas impostas, chegou-se a um resultado de planejamento e sequenciamento. Este foi refinado algumas vezes, com o relaxamento de determinadas restrições e feitas simulações alterando alguns critérios e seu peso (importância).

Os ajustes no modelo são freqüentes, pois o planejamento de minas é uma atividade dinâmica, sujeita à confirmação daquilo que se inferiu e com incertezas inerentes ao universo da mineração, conforme já foi analisado. Através da revisão do planejamento, confrontando o realizado com o planejado, é possível melhorar a compreensão e analisar como o planejamento é afetado por mudanças em certos fatores considerados inicialmente.

7 Conclusões

A aplicação do sistema difundiu-se no dia-a-dia do planejamento, mostrando-se ser uma ferramenta bastante útil, de fácil manipulação e integração com o usuário. Sua utilização no planejamento de um nível de lavra inteiro e o comprometimento da equipe de lavra com os objetivos traçados no planejamento com o auxílio do sistema, demonstram a proximidade entre o planejado e o possível.

Fica explícito que o sistema dificilmente apresentará um bom resultado na primeira simulação. A capacidade do planejador em julgar os resultados apresentados e alterar as condições é imprescindível para a obtenção de um bom resultado.

O bom resultado do planejamento com o auxílio do sistema depende, em grande parte, da correta inserção das condições das operações e da compreensão correlação entre elas. Quanto maior o número de fatores inseridos no modelo, mais difícil se torna a compreensão de sua influência sobre os demais, porém torna o modelo mais fiel à realidade. Dessa forma, a maneira mais indicada de utilização do sistema integrado informatizado é a inserção gradual de diversas condições, procedendo a inserção de um fator, somente quando o modelo estiver bem definido para os fatores já considerados, sob o risco de perder-se o controle sobre o processo.

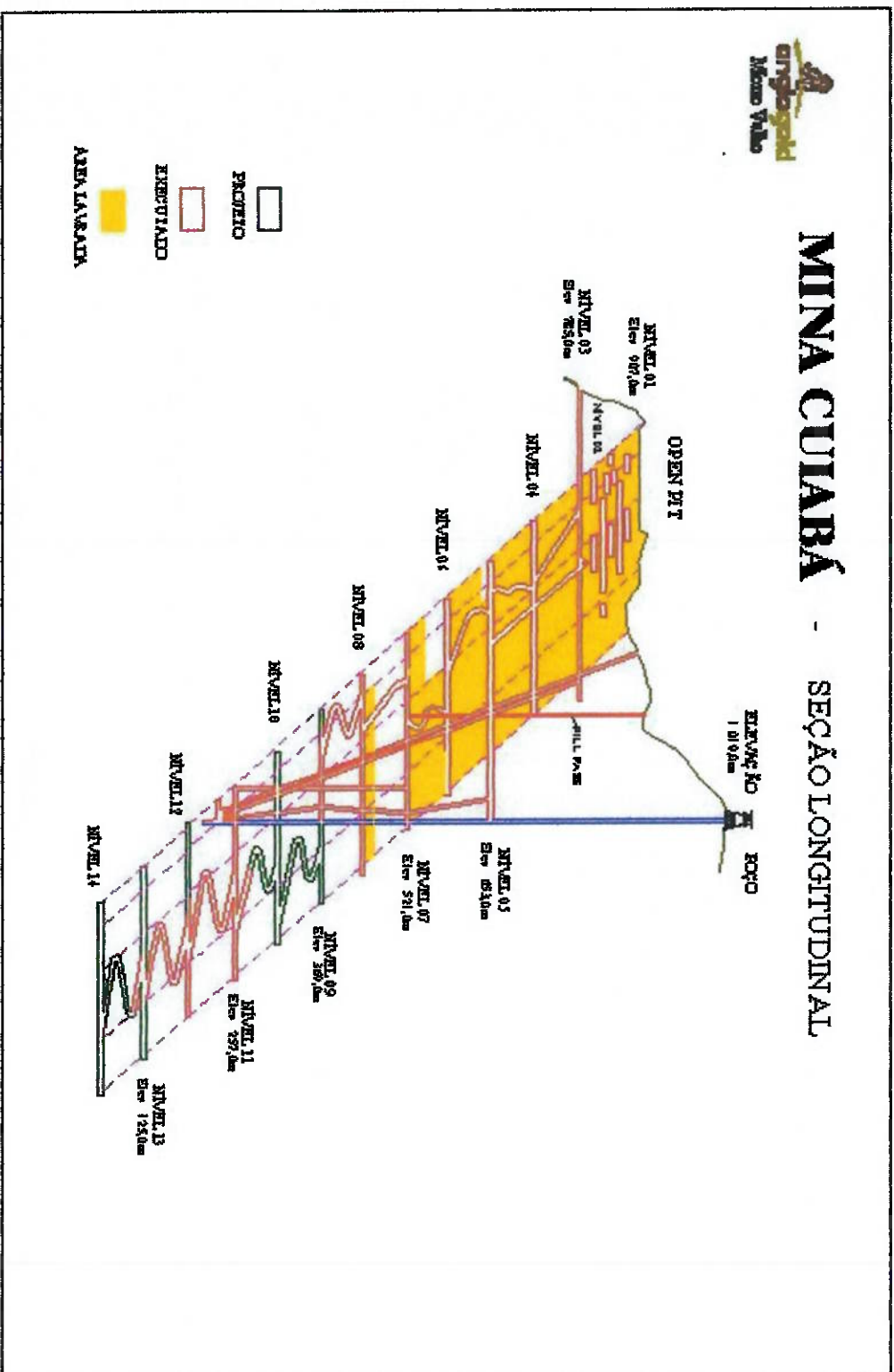
8 Anexos

Anexo A – Fichário enviado para as minerações

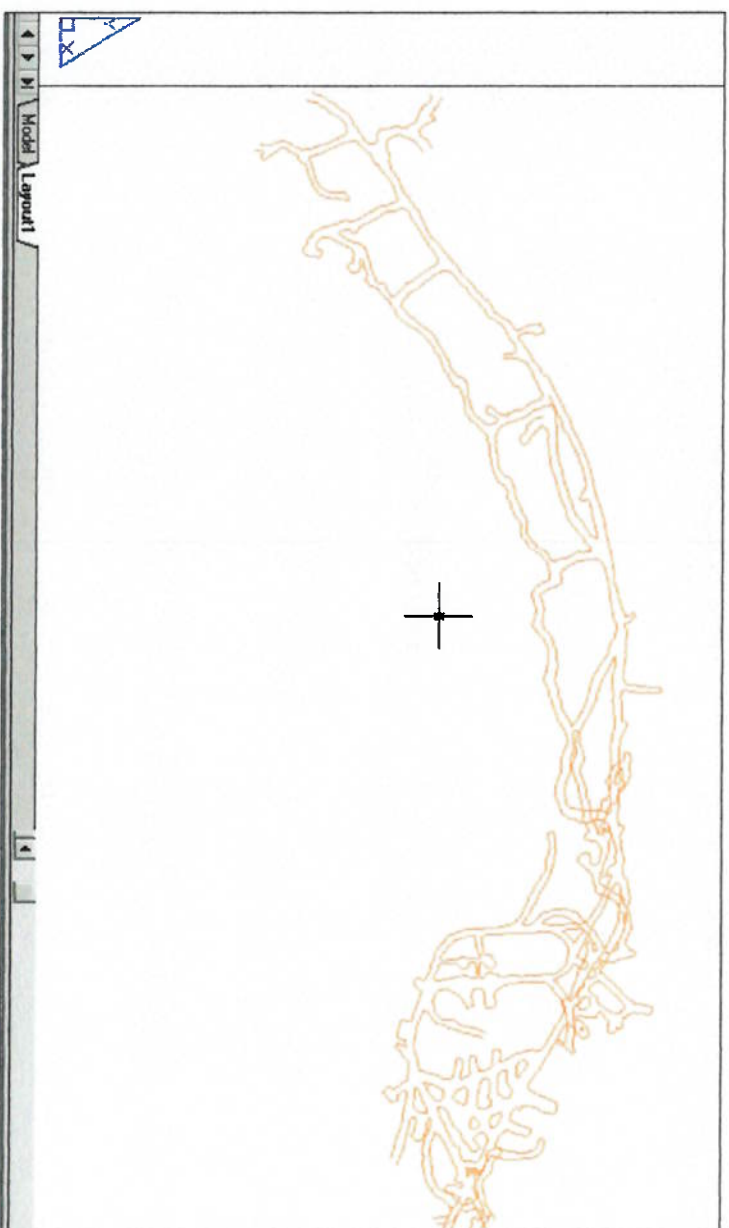
Trabalho de formatura - Questionário sobre as características das minas subterrâneas brasileiras

- 1- Situação e localização, incluindo produto principal e sub-produtos
- 2- Geologia Regional: descrição sucinta - somente poucas frases tipo "a área mineralizada é restrita aos calcários da formação XXX, do grupo YYY".
- 3- Geologia da Área da Mina: ressaltando os aspectos relevantes para a lavra
como "se for filonar, direção, mergulho, extensão horizontal e vertical, distribuição de teores e reservas; resistência/ comportamento do minério e encaixantes". Se for um corpo não-tabular, definição da posição espacial, dimensões, teores e reservas. Mapa da área mineralizada e secção geológica.
- 4- Escala de Produção e número de turnos por dia.
- 5- Modo de Acesso e Extração do minério (para fora da mina): características e capacidade.
- 6- Método de Lavra: definição e descrição do método, trabalhos de desenvolvimento, preparação para desmonte (alargamento, *belling*, construção de bicas, etc), desmonte do minério, parafusamento, escoramento, movimentação do minério dentro do realce, carregamento e transporte;
- 7- Equipamentos: (se não estiver incluído na descrição anterior).
- 8- Planos para mudança de método/ modificações/ aumento de produção, etc;
- 9- Produtividades (para efeito de comparação, seria bom que todos incluíssem, pelo menos, a Produtividade em t / homem turno [total] em subsolo).

Anexo B – Seção longitudinal típica da mina Cuiabá



Anexo C – Esquema do Nível N07



Anexo D – telas do sistema M2-4d em operação

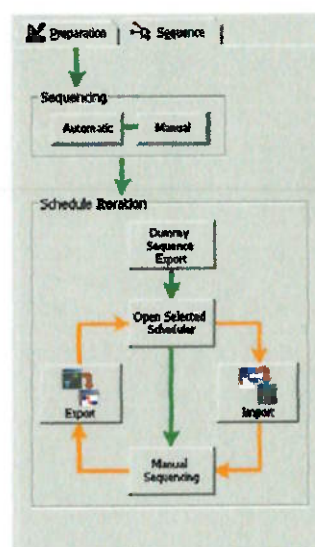
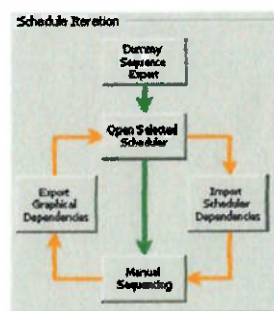
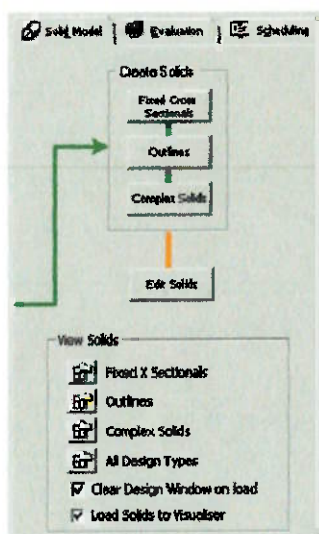
Visual Table Editor

File Edit Tools Help

PVALLE	PTN	COLOUR	LSTYLE	SYMBOL	XP	YP	ZP	MMDALINO	MMDLAY	MMDDESC	MMDTYPE
N	N	N	N	N	N	N	N	N	A	A	A
									B		
0000	1	55	1002	221	-1764.765	-1315.981	524.1653	-1	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0001	2	55	1002	221	-1778.764	-1305.781	524.103	-1	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0002	1	55	1002	221	-1778.764	-1305.781	524.103	0	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0003	2	55	1002	221	-1773.951	-1296.02	524.1996	0	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0004	1	55	1002	221	-2096.723	-1418.351	532.4399	0	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0005	2	55	1002	221	-2615.43	-1417.726	532.3836	0	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0006	1	55	1002	221	-2626.421	-1392.141	532.0696	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0007	2	55	1002	221	-2620.16	-1406.585	532.2601	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0008	1	55	1002	221	-2553.963	-1445.664	533.5043	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0009	2	55	1002	221	-2552.982	-1444.569	533.5042	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0010	1	55	1002	221	-2571.308	-1196.944	593.0266	-1	0d	Rampa S2	FS
0011	2	55	1002	221	-2569.292	-1199.554	592.6251	-1	0d	Rampa S2	FS
0012	1	55	1002	221	-2506.964	-1246.27	593.2474	0	0d	Trav Realce S2	FS
0013	2	55	1002	221	-2552.843	-1232.573	564.2326	0	0d	Trav Realce S2	FS
0014	1	55	1002	221	-2552.982	-1444.569	533.5042	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0015	2	55	1002	221	-2551.171	-1446.241	533.4795	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0016	1	55	1002	221	-2329.872	-1458.791	531.4896	0	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0017	2	55	1002	221	-2332.913	-1466.49	531.4933	0	0d	Trav Vent Dist S4	FS
0018	1	55	1002	221	-1940.169	-1358.117	523.1468	0	0d	Calça Agua	FS
0019	2	55	1002	221	-1922.677	-1372.821	523.1468	0	0d	Calça Agua	FS
0020	1	55	1002	221	-1922.677	-1372.821	523.1468	0	0d	Calça Agua	FS
0021	2	55	1002	221	-1911.794	-1358.304	523.1468	0	0d	Calça Agua	FS
0022	1	55	1002	221	-1902.967	-1411.849	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0023	2	55	1002	221	-1897.645	-1408.385	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0024	1	55	1002	221	-1929.77	-1404.012	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0025	2	55	1002	221	-1936.428	-1395.665	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0026	1	55	1002	221	-1963.961	-1382.93	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0027	2	55	1002	221	-1958.361	-1381.772	523.1468	-1	0d	Destrito Estrel S4	FS
0028	1	55	1002	221	-2523.196	-1445.093	533.1328	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0029	2	55	1002	221	-2513.215	-1445.682	533.0089	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0030	1	55	1002	221	-2463.251	-1442.631	532.3695	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0031	2	55	1002	221	-2459.392	-1438.474	532.3639	-1	0d	Trav Vent Dist S2	FS
0032	1	55	1002	221	-2505.426	-1452.806	503.9103	0	0d	Rampa Vent Dist CS	FS
0033	2	55	1002	221	-2503.215	-1444.272	532.8805	0	0d	Rampa Vent Dist CS	FS
0034	1	55	1002	221	-2453.392	-1438.474	532.3639	0	0d	Mucking Bay	FS
0035	2	55	1002	221	-2443.27	-1441.811	532.1410	0	0d	Mucking Bay	FS

New File Open File Save Save As Close Exit Help

D:\N07\N07\links0.din 58 Records : 14 Fields



9 Referências Bibliográficas

ALVES, F. E. As maiores empresas do setor mineral. **Brasil Mineral**, São Paulo, n. 218, p. 36-97, jun. 2003.

AZEVEDO, R. C. **Aplicação de realidade virtual no planejamento de lavra**. 2002. 65 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

CLIFFORD, D. Optimum or best. **Mining Magazine**, London, v. 181, n. 3, p. 146-151, Sept. 1999.

DE TOMI, G. F. C.; WIESEL, H.; SENHORINHO, N. C. S. Aplicações de otimização em lavra subterrânea. In: CONGRESSO DE MINA SUBTERRÂNEA, 1., Belo Horizonte, 2000. **Anais**. Belo Horizonte: IBRAM, 2000.

KHAZAKIDIS, V. N.; SCOLE, M. Planning for flexibility in underground mine production systems. **Mining Engineering**, New York, v. 55, n. 8, p. 33-38, Aug. 2003.

GIBBS, L. B. Managing hardware decisions, software development and computers department in developing countries. In: INDO-US SEMINAR ON "COMPUTER METHODS IN THE MINERAL INDUSTRY: STATE-OF-THE-ART AND ASSESSMENT OF EMERGING NEEDS. **Computers in mineral industry: proceedings**. Rotterdam: Balkema, 1994. p. 225-244.

MORIMOTO, C. E. **Novas tecnologias: guia do usuário**. 3 ed. 387 p. Disponível em: <http://ftp.las.ic.unicamp.br/pub/kurumin/e-book/Novas_Tecnologias-3ed.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2003.

MORIN, M. Underground mine design and planning: complexity and interdependencies. **Mineral Resources Engineering**, London, v. 11, n. 2, p. 197-215, Apr./June 2002.

SENHORINHO, N. C. S. **Otimização de cavas para minas de calcário para cimento**. 154 p. 2001. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

SINGH, A. K.; JHAMB, D. Crystal, an application packed developed on Indian deposits for geo-modelling and open pit design. In: INDO-US SEMINAR ON "COMPUTER METHODS IN THE MINERAL INDUSTRY: STATE-OF-THE-ART AND ASSESSMENT OF EMERGING NEEDS. **Computers in mineral industry: proceedings**. Rotterdam: Balkema, 1994. p. 101-107.

WHEELER, A. J. Developments in computerised underground mine planning (computer software for designing underground mines). **Mining Magazine**, London, v. 168, n. 5, p. 279-282, May 1993.

WIESEL, H.; DE TOMI, G. F. C. OptiseqII: otimização e sequenciamento de lavra. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, São Paulo, 2001. **Anais do 9º. SIICUSP**. São Paulo, USP, 2001. Resumo. 1 CD ROM.