



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas



**PLANO MENSAL DE LAVRA DE UMA MINA DE FERRO
LOCALIZADA NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO: UM ESTUDO DE
CASO**

GUSTAVO FARIA XIMENES

OURO PRETO
2018

GUSTAVO FARIA XIMENES

**“PLANO MENSAL DE LAVRA DE UMA MINA DE FERRO LOCALIZADA
NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO:UM ESTUDO DE CASO”**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Área de concentração: Planejamento de Lavra de Mina

Orientador: Prof. Dr. Adilson Curi

OURO PRETO

2018

X6p

Ximenes, Gustavo Faria.

Plano mensal de lavra de uma mina de ferro localizada no Quadrilátero
Ferroífero [manuscrito]: um estudo de caso / Gustavo Faria Ximenes. - 2018.

41f.:

Orientador: Prof. Dr. Adilson Curi.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Engenharia de Minas. 2. Minérios de ferro. 3. Lavra de minas. I. Curi,
Adilson. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.014



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

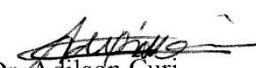
Aos 26 dias do mês de junho de 2018, às 14h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“PLANO MENSAL DE LAVRA DE UMA MINA DE FERRO LOCALIZADA NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO: UM ESTUDO DE CASO”**, pelo aluno **Gustavo Faria Ximenes**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Adilson Curi (Orientador)**, **Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz** e **Engº de Minas Elianderson Isac Souza**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **aprovação** do candidato, com a nota **8,5**, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

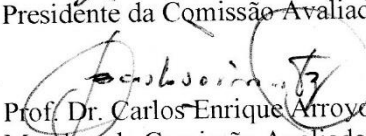
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

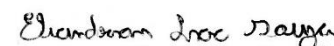
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

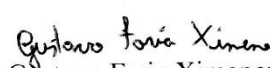
Ouro Preto, 26 de junho de 2018.


Prof. Dr. Adilson Curi

Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Elianderson Isac Souza
Membro da Comissão Avaliadora


Gustavo Faria Ximenes


Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade de ter um ensino de qualidade;

Aos meus pais, Aurélio e Silvana, por todo amor e todo apoio necessário;

À todos meus familiares;

À todos meus amigos;

Aos membros da República Oito & Oitenta, por toda irmandade;

À minha namorada Lucimeire, por todo carinho e força nos momentos difíceis;

À ArcelorMittal, por todo conhecimento adquirido no meu estágio;

À todos os professores que contribuíram para a minha formação como profissional e pessoa.

RESUMO

Cada empreendimento mineiro necessita de um planejamento de lavra minucioso e assertivo para garantir a exploração do bem mineral da melhor maneira possível, levando em consideração as exigências do mercado e a segurança nas operações de mina. O planejamento de lavra é dividido em três fases: longo, médio e curto prazo, sendo o último o objetivo de estudo do presente trabalho. Cada mineradora faz o seu planejamento de curto prazo de uma maneira específica, podendo englobar planos mensais, semanais e até diários. Nesse trabalho, o foco é elaborar no *software* Surpac, um plano mensal de lavra de uma mina de minério de ferro, que atenda as exigências de massa e qualidade do cliente. Cada avanço na lavra é projetado levando em consideração a capacidade de produção dos equipamentos de carga e transporte, e tem um objetivo próprio, que é explicado na apresentação do plano, feita pela equipe de planejamento para a equipe de operação. Ao final do mês é feita a reconciliação para determinar se o plano projetado foi cumprido.

Palavras chaves: Planejamento de lavra, Plano mensal, Surpac, Reconciliação.

ABSTRACT

Each mining enterprise demands a detailed and assertive mining planning to guarantee the exploration of the mineral good in the best way, taking into account the requirements of the market and the safety in mine operations. The mining planning is divided into three phases: long, medium and short term, the short one is the objective of this study. Each mining company makes its short-term planning in a specific way, which can include monthly, weekly and even daily plans. In this study, the focus is to elaborate in the software Surpac, a monthly plan of mining of an iron ore mine, that meets the requirements of mass and quality of the client. Each progress in mining is designed taking into account the production capacity of the cargo and transportation equipment, and it has its own goal, which is explained in the presentation of the plan, made by the planning team to the operation team. At the end of the month, reconciliation is made to determine if the projected plan has been met.

Key words: Mining planning, Monthly plan, Surpac, Reconciliation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Modelo de blocos Hustruuld & Kuchta (1995)	6
Figura 2: Seção geológica vertical da mina.....	12
Figura 3: Cava final da mina.....	13
Figura 4: Tabela do volume de cada litologia da cava final	14
Figura 5: Rota de processos do beneficiamento do minério.....	15
Figura 6: Desenho do plano mensal de lavra	17
Figura 7: Representação do avanço 1	18
Figura 8: Representação dos avanços 2 e 3	19
Figura 9: Representação do avanço 4	20
Figura 10: Representação do avanço 5.....	21
Figura 11: Representação do avanço 6.....	22
Figura 12: Gráfico de massa por frente de lavra	23
Figura 13: Tabela da qualidade prevista do minério.....	24
Figura 14: Áreas lavradas na mina no mês	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Conceitos para o Planejamento de Mina	3
2.2 Conhecimento da Jazida.....	4
2.3 Delimitação do Corpo Mineral	4
2.4 Modelo de Blocos.....	5
2.5 Planejamento de Lavra	7
2.6 Planejamento de Lavra de Longo Prazo	7
2.7 Planejamento de Médio Prazo	8
2.8 Planejamento de Curto Prazo	8
2.8.1 Plano de Lavra Mensal	9
2.9 Utilização de softwares na Mineração.....	10
2.10 Sequenciamento da Lavra	10
3 DESENVOLVIMENTO	12
3.1 Características da Mina.....	12
3.1.1 Geologia da Mina.....	12
3.1.2 Cava Final.....	12
3.1.3 Processo de Lavra.....	14
3.1.4 Beneficiamento	15
3.1.5Produção Anual	15
3.2 Plano Mensal de Lavra	16
3.3 Reconciliação.....	24
4 CONCLUSÕES	27
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração, assim como qualquer outro empreendimento, tem como objetivo maximizar o lucro. Porém, é caracterizada por aproveitar economicamente um bem exaurível e não renovável, o que a diferencia das demais indústrias (CHIMUCO, 2010 *apud* COSTA, 1979). Além disso, trata-se de um empreendimento que apresenta algumas incertezas e depende de um alto investimento. Portanto é necessário um projeto ou planejamento de mina cuidadosamente desenvolvido, para que seja possível obter um bom lucro para os investidores (CAMPOS, 2017).

A partir do planejamento de lavra, é possível antecipar a ocorrência de problemas a fim de evitá-los no futuro, ou pelo menos minimizar as suas consequências. Por se tratar de uma simulação antecipada das operações da mina, é possível conhecer as variáveis, para que seja feito um melhor aproveitamento dos equipamentos de carga e transporte, bem como um cronograma para um melhor aproveitamento do minério e uma melhor disposição do estéril da mina ou rejeito do beneficiamento buscando a minimização do impacto ambiental (CHIMUCO, 2010).

Ainda segundo Chimuco (2010), todo trabalho de planejamento de lavra deve ser feito levando em consideração um certo período de tempo, que seja necessário para cumprir os processos envolvidos nos seus planos de longo, médio e curto prazo.

O planejamento de lavra de longo prazo é responsável pelos estudos de cava final, planejamento de barragens de contenção, disposição de estéril, desenvolvimentos de novos produtos e de acessos permanentes, bem como os trabalhos de geologia de pesquisa (MANDARINO, 2018).

O planejamento de lavra de médio prazo é utilizado para dar continuidade ao processo de lavra e atingir os objetivos intermediários do empreendimento. Geralmente abrange o período de 1 a 5 anos.

Já o planejamento de lavra de curto prazo é responsável por elaborar os planos de lavra trimestrais e mensais. No presente trabalho será elaborado um plano mensal de lavra. Os planos de lavra de curto prazo são utilizados para: atingir as metas de qualidade requeridas pela usina de beneficiamento; programação da disposição de estéril no dia a dia; controle das pilas de ROM

(*run of mine*); suporte à programação de embarques; atualização da topografia das minas; estudos de acessos temporários; estudos da qualidade da produção; amostragens pré-lavra; atualização do banco de dados; reconciliação; dentre outras atividades.

1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é apresentar um plano mensal de lavra de uma mina de minério de ferro localizada no quadrilátero ferrífero.

Além disso, podem ser citados os seguintes objetivos específicos:

- Conceituar o planejamento de mina, com uma ênfase ao planejamento de curto prazo.
- Desenhar os avanços da lavra previsto para o mês através do *software* SURPAC.
- Apresentar a massa e qualidade prevista do material que deve ser retirado a fim de atender as exigências do cliente.
- Fazer a reconciliação, mostrando a aderência ao planejado.
- Propor soluções para melhorar a aderência ao plano mensal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos para o Planejamento de Mina

A indústria extrativa mineral tem como objetivo, maximizar a sua riqueza futura e como visa o aproveitamento econômico de recursos naturais exauríveis e não renováveis, a maximização da riqueza deve ser realizada em um período definido, ou seja, durante a vida útil da mina. Um projeto de mina é composto por vários estudos que necessitam de um amplo conhecimento técnico de diversas especialidades da Engenharia (CURI, 2004).

O planejamento de mina envolve as operações de extração, colocando em ordem as operações de mineração e determinando o sequenciamento de lavra da mina, para que os objetivos de produção possam ser alcançados. Além disso as rotinas de monitoramento de cada frente de lavra são monitoradas, a fim de controlar a qualidade do *run-of-mine* (ROM), que de acordo com Sznclwar *et al* (2009) é o nome dado para todo material saído da mina que se destina a usina de beneficiamento, sendo que essa definição só engloba a extração do minério. Essas medidas fornecerão melhorias nas condições de segurança da mina e de estabilidades dos taludes e minimizarão os custos associados ao uso de equipamentos de carregamento e transporte (SANTOS, 2015 *apud* BAPTISTA, *et al*; 2014).

De acordo com Reis (2006), o planejamento da mina é a principal atividade do projeto de um empreendimento mineiro, sofrendo a interferência de três grupos de fatores:

1. Fatores naturais e geológicos: condições geológicas, tipos de minérios, condições hidrológicas, topografia e características metalúrgicas;
2. Fatores econômicos: teor do minério, tonelagem de minério, relação estéril/minério, teor de corte, custo operacional, investimento, lucro esperado, escala de produção e condições de mercado;
3. Fatores tecnológicos: equipamentos, ângulo de talude, altura da bancada, greide (inclinação) das estradas, limites da propriedade e limites da cava.

Curi (2014) afirma que para realizar os estudos que determinarão a viabilidade técnico-econômica de todo o projeto, é necessário um grande conhecimento da jazida.

2.2 Conhecimento da Jazida

Um projeto de lavra de minas deve-se basear em estudos confiáveis, garantido que a mina seja implantada de maneira adequada. A base de sustentação de qualquer empreendimento mineiro é o conhecimento da reserva mineral, que deve ser feito na fase de pesquisa, com um erro de estimativa aceitável, que possibilite o prosseguimento do projeto (CURI, 2014).

Curi (2014) ainda afirma que o método de pesquisa que deve ser empregado, depende do tipo da jazida existente, e o método deve ser seguro, objetivo, rápido e econômico. As campanhas de sondagens devem levar em consideração o tipo de rocha e as possíveis variações no maciço, para que a determinação dos volumes e teores sejam assertivas.

Durante a avaliação geológico-econômica, a delimitação dos depósitos é a principal tarefa executada pelo engenheiro de minas. E a correta interpretação dos dados fornecerão a forma do depósito mineral, seus limites e as dimensões reais da jazida (SANTOS, 2015 *apud* SAD & VALENTE, 2007)

2.3 Delimitação do Corpo Mineral

Segundo Souza (2013) vários métodos são utilizados pelos geólogos e engenheiros de minas para delimitar o corpo mineral e avaliar a quantidade e qualidade das variáveis analisadas.

Até os anos 1960 os limites de lavra eram determinados manualmente. Entretanto, a partir de 1964, diversos métodos de definição dos limites da lavra foram aparecendo e sendo aperfeiçoados gradativamente em razão, principalmente, da evolução da informática e da geomatemática. Isso foi possível porque foram desenvolvidos algoritmos específicos para a mineração, aplicando, sobretudo, as técnicas de simulação e programação dinâmica (CURI, 2014, p.148).

Atualmente são utilizados vários algoritmos e *softwares* para delimitar o corpo, a fim de obter a maior lucratividade possível. (SOUZA, 2013).

Segundo Curi (2014) para utilização de algum programa de delimitação de uma jazida, é necessário criar um arquivo com os dados das sondagens, em seguida cria-se o arquivo de superfície para determinar o contorno da jazida, e então, pode se obter o modelo de blocos, onde os blocos são preenchidos com os atributos de interesse.

2.4 Modelo de Blocos

Segundo Peroni (2002), uma das maiores dificuldades enfrentadas por geólogos e engenheiros de minas é o problema da definição dos limites do corpo mineral e a avaliação da quantidade e qualidade dos parâmetros de interesse. Para a definição desses limites existe uma série de métodos, onde o mais utilizado é a representação de um modelo de blocos, dividindo o corpo mineral em um conjunto de pequenos blocos. Saydam & Yalcin (2002) dizem que a prática atual de planejamento de lavra começa com o modelo de blocos, e determinam se um bloco deve ser lavrado ou não, quando deve ser lavrado e quando deve ser enviado ao processo.

Hustruild & Kuchta (1995) afirmam que o modelo de blocos é uma importante aplicação de artifícios computacionais à mineração, servindo para estimar teores e quantidade de material na reserva, além de visualizar o depósito mineral. Na figura 1 é possível ver uma representação de um modelo de blocos de uma mina.

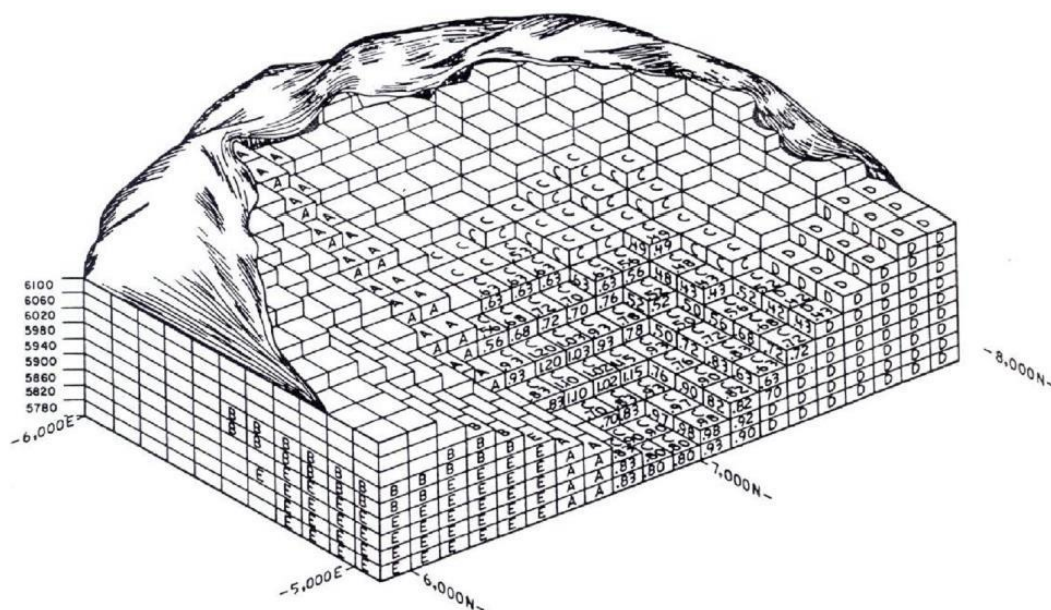


Figura 1: Modelo de blocos Hustruuld & Kuchta (1995)

O modelo de blocos é um banco de dados para estimação de volume, massa e para a definição da característica média das dimensões de um corpo mineralizado. Todo o processo é feito através de dados retirados de sondagens (NEME *et al*; 2011).

Os resultados da análise química, e a descrição geológica dos furos de sondagem dão origem a um banco de dados o qual é importado pelo software de modelamento geológico. Através dos furos de sondagem, são criadas seções geológicas horizontais e verticais no software de modelamento. Através das seções será criado um sólido. Este sólido é então dividido em blocos de dimensões pré-determinadas. Finalmente, através da utilização de ferramentas geoestatísticas de interpolação como inverso do quadrado da distância e a krigagem, são atribuídos valores a cada um desses blocos. Segundo Souza (2013), cada bloco armazenará parâmetros técnicos, como por exemplo: coordenadas; terrores; densidade; umidade e recuperação. Através dessas informações é possível atribuir a cada bloco um valor líquido (positivo ou negativo) considerando as receitas e custos.

Segundo Amaral (2008) a assertividade do modelo de blocos é essencial para o planejamento do empreendimento mineiro, principalmente para a determinação dos limites da cava ótima e do sequenciamento da lavra. Os

parâmetros de teores, quantidades e qualidade do material definidos nos modelos geológicos são os principais fatores para a determinação da cava final.

2.5 Planejamento de Lavra

O planejamento de lavra visa garantir a maximização da vida útil de uma mina, reduzir os custos de produção, atender as metas de movimentação de estéril, a relação estéril / minério, e finalmente atender às especificações de qualidade do minério através da determinação das frentes e volumes a serem lavrados (CHIMUCO, 2010).

Uma mina possui várias frentes de lavra de minério, cada uma com sua particularidade e qualidade. A lavra executada sem planejamento pode acarretar na exploração de um produto de baixa qualidade, que não atende às especificações do cliente, seja ele interno ou externo. Ao mesmo tempo pode gerar em alguns cenários, a exploração de um produto com a qualidade acima do especificado, inevitavelmente empobrecendo o restante da jazida e inviabilizando a lavra de frentes de minério mais pobres. A ausência de planejamento também pode causar a movimentação de estéril de forma errônea, não garantindo a liberação de minério, elevando a relação estéril / minério e consequentemente os custos operacionais, e em casos extremos, até mesmo levar a mina ao fim de sua vida útil de forma prematura.

Segundo Curi (2014) o planejamento de lavra é o projeto de avanço da lavra da mina envolvendo a previsão dos recursos e a determinação dos custos. À medida que ocorre a lavra, surgem novas informações sobre a reserva, ocasionando constantes readaptações ao plano original. O planejamento de lavra é dividido entre longo, médio e curto prazo.

2.6 Planejamento de Lavra de Longo Prazo

Mandarino (2018) afirma que o planejamento de longo prazo de uma mina contempla os estudos de viabilidade, de investimentos, ampliações e reduções de produção, onde os profissionais responsáveis determinam o ritmo de produção anual e a cava ótima para a mina. Segundo Campos (2017), cava

ótima é o volume de material viável economicamente de ser extraído e que se obtém o maior lucro possível do empreendimento mineiro.

Curi (2014) diz que além do cálculo de reservas, o planejamento de longo prazo deve abranger os projetos de *pit* final e pilhas de estéril, o sequenciamento de lavra, a seleção do método de lavra, além de dimensionar a frota ideal de equipamentos a serem utilizados até a mina ser exaurida.

Curi (2014) ainda menciona que é extremamente importante que os resultados gerados pelo planejamento de longo prazo, como a cava ótima, a relação estéril minério global e o dimensionamento e orçamento das frotas sejam assertivas para que o processo se inicie sem a geração de custos extras.

2.7 Planejamento de Médio Prazo

De acordo com Campos (2017), o planejamento de médio prazo é importante para certificar que os objetivos intermediários sejam cumpridos. Geralmente esse planejamento consiste em períodos de 1 a 5 anos.

Pinto e Dutra (2008) mencionam que o planejamento a médio prazo desenvolve um sequenciamento da produção para maximizar o valor presente líquido e obter um retorno do investimento inicial. Os equipamentos e os sistemas operacionais da mina são utilizados para atingir critérios ótimos de produtividade, garantindo a continuidade da lavra de maneira correta.

2.8 Planejamento de Curto Prazo

O planejamento de curto prazo pode ser realizado em intervalos semanais, quinzenais ou mensais. Ele tem por objetivo garantir as especificações do produto lavrado, a liberação de minério e a aderência ao plano de lavra de médio prazo, o qual geralmente é anual. O plano de lavra de curto prazo determina quais as frentes de minério e estéril serão lavradas, e qual a massa será lavrada de cada uma das frentes. Além de assegurar o atendimento às especificações de produto e liberação de minério para lavra subsequente, também deve assegurar a meta de produção e relação estéril / minério. Dentro do planejamento de curto prazo ainda são realizadas outras atividades, tais como: amostragem de frentes de lavra; atualização de banco de dados;

atualização do mapeamento geológico e estudo de acessos temporários (CHIMUCO, 2010).

No planejamento de curto prazo, o principal objetivo é determinar o ritmo de lavra que será implementado em cada frente para fornecer a alimentação adequada à usina de beneficiamento, além de alocar os equipamentos de carga e transporte (COSTA, 2005).

Segundo Mandarin (2018), o plano de lavra de curto prazo é um detalhamento dos planos de lavra de longo prazo, apresentando uma maior discriminação de atividades, a fim de reduzir as incertezas. O planejamento de curto prazo pode ocorrer de diversas formas, porém são limitados a um ano.

2.8.1 Plano de Lavra Mensal

Mandarin (2018) afirma que o plano de lavra mensal é elaborado pela equipe de planejamento de curto prazo e tem como objetivo determinar a sequência das operações de lavra, buscando a maior aderência ao plano anual. O plano mensal sugere os avanços que devem ser feitos no minério e no estéril para garantir uma relação adequada de estéril / minério e alcançar as metas de produção.

O plano de lavra mensal mostra quais frentes devem ser lavradas, assim como aloca os equipamentos de carga e transporte por ordem de prioridade do avanço.

Segundo Silva (2014) o maior desafio do plano mensal é fazer com que a operação perca o vício da movimentação a qualquer custo e siga as orientações passadas nos planos, pois mesmo não sendo as mais produtivas no momento, são muito importantes para o desenvolvimento futuro da mina.

Para a elaboração de um plano mensal, deve-se conhecer todas as particularidades da mina, os equipamentos a disposição, bem como seus índices de disponibilidade física (DF), utilização física (UF) e produtividade. Tudo isso é feito com auxílio de *softwares* e relatórios que ajudam no processo e nas tomadas de decisões (SILVA, 2014).

2.9 Utilização de softwares na Mineração

De acordo com Silva (2014), os *softwares* são utilizados diariamente em um projeto mineiro e se tornaram uma ferramenta muito importante para auxiliar no planejamento de lavra da mina e na execução das operações. AMARAL (2008) *apud* KAPAGERIDIS (2005) sugere que as funções principais dos *softwares* no auxílio das atividades de planejamento são:

- A visualização tridimensional da mina;
- A construção do modelo de blocos;
- O gerenciamento de bancos de dados geológicos e históricos de produção;
- A estimativa da reserva;
- O projeto de cava final ótima;
- O sequenciamento da produção.

Segundo Silva (2014) existem muitas ferramentas para a solução de problemas da mina, sendo que a maioria delas está na área de planejamento e são importantes para definir a sequência da lavra de forma mais precisa.

2.10 Sequenciamento da Lavra

Depois de determinada a cava final, deve-se determinar a maneira que a mina será desenvolvida. A cava ótima oferece a máxima lucratividade, e para chegar até a mesma, deve se propor um sequenciamento de lavra tendo como objetivo a cava final (SOUZA, 2013).

AMARAL (2008) *apud* TOLWINSKI & UNDERWOOD (1996), afirma que o desafio do sequenciamento da lavra é encontrar a ordem em que os blocos devem ser removidos, a fim de maximizar o lucro, representado pelo VPL (Valor Presente Líquido), e está sujeito a uma variedade de restrições técnicas e econômicas.

Ainda segundo Amaral (2008), a restrição técnica mais comum é a manutenção de ângulos de taludes seguros para a operação, culminando em uma série de regras para a retirada dos blocos. Porém podem ser observadas outras restrições, como:

- O número máximo de taludes que podem ser lavrados simultaneamente (AMARAL, 2008 *apud* PEGMAN et al., 1996);
- A existência de um espaço de trabalho mínimo para operação dos equipamentos (AMARAL, 2008 *apud* TOLWINSKI & UNDERWOOD, 1996);
- A minimização da profundidade da cava (AMARAL, 2008 *apud* CACCETTA & HILL, 2003).

Por outro lado, as restrições econômicas mais comumente encontradas são:

- Limites de produção que podem ser estabelecidos para os equipamentos de carga ou a produção permitida para um horizonte de tempo;
- Limites para as variáveis químicas para o controle da qualidade;
- Capacidade de plantas de tratamento ou de pilhas de estoque;
- Restrições logísticas de escoamento (AMARAL, 2008 *apud* PENDHARKAR, 1997);
- Tamanhos máximos de lotes que podem ser produzidos para a venda por período (AMARAL, 2008 *apud* MENABDE et al., 2004);
- Preços variáveis para o minério para cada período (AMARAL, 2008 *apud* GOODWIN et al., 2006).

O sequenciamento de lavra tem como objetivo final fornecer minérios dentro das características esperadas, que são buscadas através de técnicas de blindagem de minérios de diferentes qualidades, seguido de técnicas de homogeneização para reduzir as variâncias (CURI, 2014).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Características da Mina

Neste tópico serão apresentadas algumas características da mina, como geologia, cava final, processo de lavra, beneficiamento, produção anual.

3.1.1 Geologia da Mina

Para determinar a geologia da mina em estudo, foram realizadas campanhas de sondagem onde os dados coletados foram utilizados para alimentar o *software* Vulcan, e então foi possível realizar o desenho do mapa geológico da mina. Na figura 2 estão representadas as litologias presentes em uma seção geológica vertical.

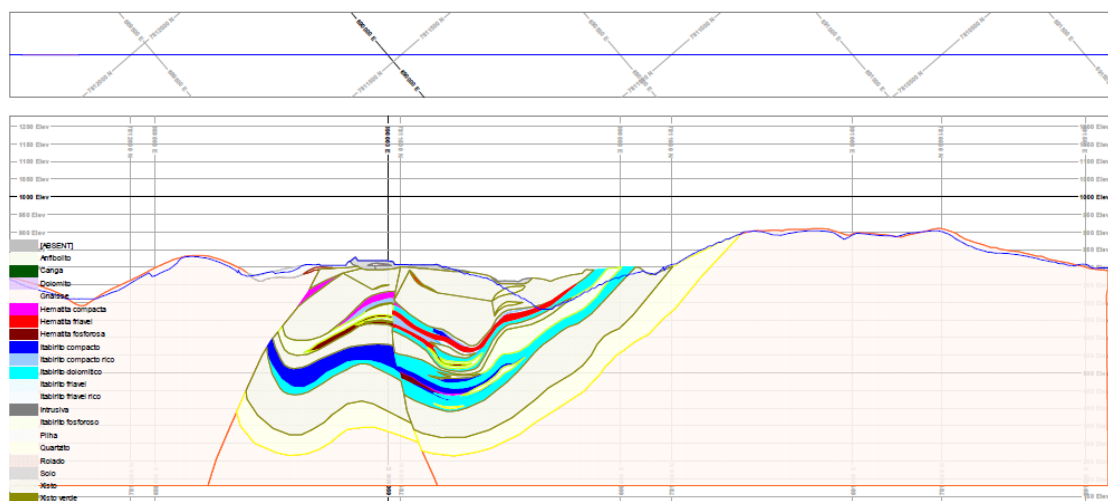


Figura 2: Seção geológica vertical da mina

3.1.2 Cava Final

A cava final da mina foi determinada através do *software* SURPAC, sendo considerado minério apenas a hematita, tanto compacta como friável. De acordo com a figura 3 é possível visualizar a configuração da mina quando for exaurida a reserva de hematita.

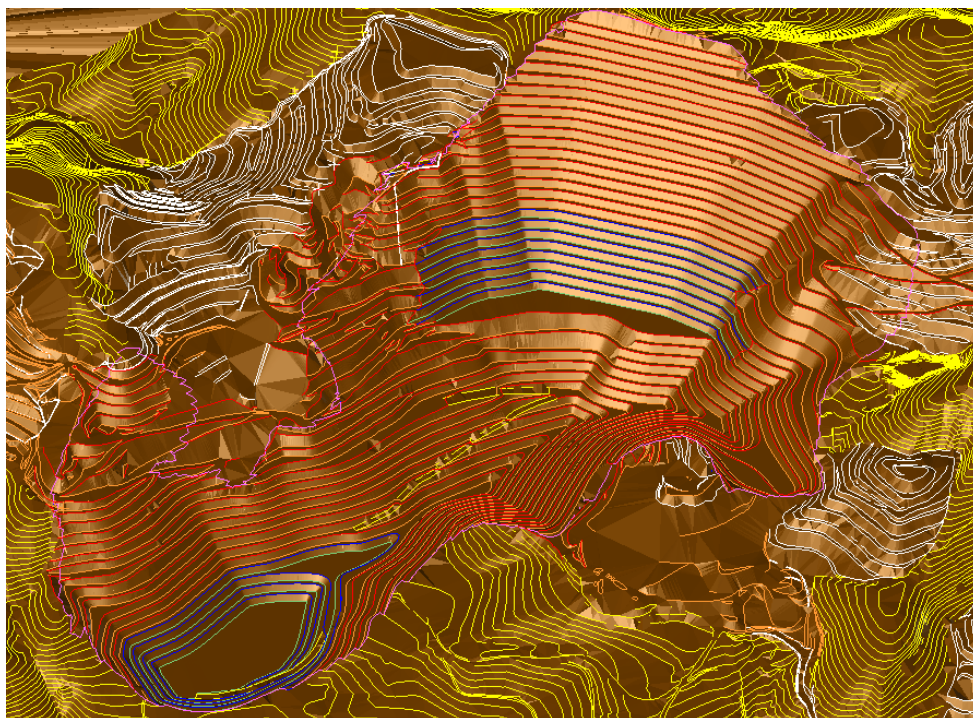


Figura 3: Cava final da mina

A partir do relatório gerado pelo *software* é possível determinar a vida útil da mina. Supondo uma produção anual de 1,5 milhões de toneladas de minério, e levando em conta que a reserva de hematita é de pouco mais de 11 milhões de toneladas, de acordo com a tabela na figura 4 que foi alimentada a partir de informações retiradas dos relatórios gerados no *software*, podemos estimar a vida da mina em mais 7 anos, portanto é provável que em 2025 acabe a reserva de hematitas, o que levará a empresa a beneficiar o itabirito, que apresenta menor teor de ferro em comparação com a hematita.

Litologia	Toneladas
Itabirito Friável	9930787
Itabirito Compacto	3660211
Xisto Inferior	15457500
Hematita Friável	4085996
Hematita Fosforósa	501891
Hematita Compacta	6709862
Basalto	293463
Rolado Canga	1117553
Itabirito Compacto Rico	284895
Itabirito Fosforoso	67402
Quartzito	2066789
Xisto Superior	25440229
Itabirito Dolomítico	5497680
Gnaiss	153187
Pilha de Estéril	2266
Ar	0
Basalto Friável	172793
Filito	187813
Pilha de Minério	774961
Itabirito Friável Rico	88277
Total	76493555
Hematitas	11.582.644

Figura 4: Tabela do volume de cada litologia da cava final

3.1.3 Processo de Lavra

O método de lavra utilizado na mina é a céu aberto com desmonte em bancadas descendentes e drenagem direcionada para um *sump* no interior da cava. Os taludes da cava são de 10 ou 20 metros de altura e o ângulo geral é de 40°. Para taludes de 10 metros, utiliza-se berma de 6 metros e para taludes de 20 metros utiliza-se berma de 8 metros, sendo que os taludes de 20 metros só podem ser feitos se forem de material compacto, para os materiais friáveis, os taludes necessariamente tem que ser de 10 metros.

O processo de lavra baseia-se nas operações unitárias de lavra, como perfuração, desmonte, carregamento e transporte do minério bruto. As detonações são realizadas praticamente todos os dias, sempre às 12:30 (no horário de almoço dos operadores), e é feita através de explosivos do tipo ANFO.

O minério desmontado é carregado por carregadeiras e escavadeiras de pequeno porte e transportado por caminhões com capacidade de 33 toneladas das frentes de lavra até o ROM (run of mine), onde são depositados em 3 pilhas segundo a qualidade do material. Uma pá carregadeira retira o material de cada pilha de acordo com as orientações da equipe de planejamento, a fim de garantir a qualidade esperada, e alimenta a usina de beneficiamento.

3.1.4 Beneficiamento

O arranjo geral será constituído por pilha pulmão de blendagem, britagem primária, britagem secundária, peneiramento primário, peneiramento secundário e britagem terciária, como pode ser visto no fluxograma representado na figura 5.

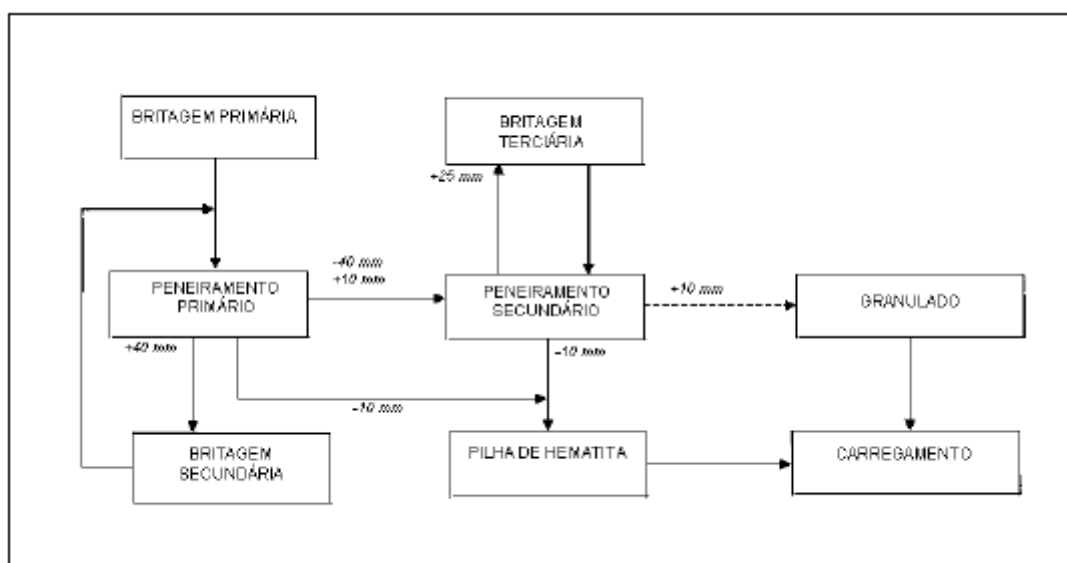


Figura 5: Rota de processos do beneficiamento do minério

3.1.5 Produção Anual

A produção anual é de 1,5 milhões de toneladas de minério. Supondo que a Re/m (relação estéril / minério) seja de 3,3, portanto a remoção de estéril anual deve ser de 4,95 milhões de toneladas. Como o foco do trabalho é o plano

mensal de lavra, podemos estimar que a extração de minério deve ser de 125 mil toneladas por mês, enquanto a de estéril deve ser de 412,5 mil toneladas.

3.2 Plano Mensal de Lavra

A elaboração do plano de lavra de curto prazo nesse caso é feita com uma periodicidade mensal. Antes de iniciar a elaboração do plano de lavra são feitas visitas às frentes de lavra da mina para observar fatores inerentes ao planejamento como: necessidade de abertura de acessos, abertura de drenagens, condições de infraestrutura de cada frente dentre outros fatores. Outros fatores observados na seleção das frentes de lavra a serem incluídas no plano de lavra são: sazonalidade (período chuvoso) e a demanda da planta de beneficiamento quanto à qualidade do minério. Apesar de haver valores pré-determinados para elemento útil e tolerância a contaminantes, a tolerância a teores de certos contaminantes pode oscilar durante o ano, o que influencia na seleção das frentes de lavra. Após visita a campo são determinadas as frentes de lavra a serem incluídas na elaboração do plano de lavra mensal.

A equipe de topografia faz um levantamento da configuração atual da mina e encaminha o arquivo com o desenho da mina naquele momento, para a equipe de planejamento elaborar o plano de lavra. A elaboração do plano de lavra é realizada com auxílio do *software* de modelamento geológico e planejamento de lavra SURPAC, Utilizando-se do *software*, os avanços em cada frente de lavra são desenhados. Após a conclusão do desenho dos avanços, são gerados pelo *software*, relatórios, onde é possível determinar a massa e a qualidade do material lavrado em cada frente. O plano de lavra é elaborado preservando a meta de produção mensal e a meta para relação estéril / minério. Através do *software* são coletadas as coordenadas dos bancos a serem lavrados e passadas à equipe de topografia, que faz a marcação destes pontos no campo a fim de orientar a equipe de operação qual a extensão do avanço a ser realizado. Uma apresentação à equipe de operação de mina é feita, a fim de esclarecer quaisquer dúvidas quanto à execução do plano.

Como dito acima, a meta de produção mensal é de 125 mil toneladas de minério e 412,5 toneladas de estéril, portando são feitas simulações de avanço até que sejam atingidos esses valores, de acordo com os relatórios gerados pelo

SURPAC. Quanto a qualidade do minério, o cliente limita o teor de sílica em até 5,80%, o de Alumínio em até 1,70% e o de fósforo em até 0,060%. Como o minério da mina apresenta um alto teor de ferro, na casa de 64%, o cliente não especifica esse parâmetro. A equipe de planejamento é instruída a buscar os teores dos contaminantes o mais próximo possível do limite, para não vender um produto com a qualidade muito acima da aceitável para o cliente.

Na figura 6 estão representados os avanços que devem ser realizados no mês.

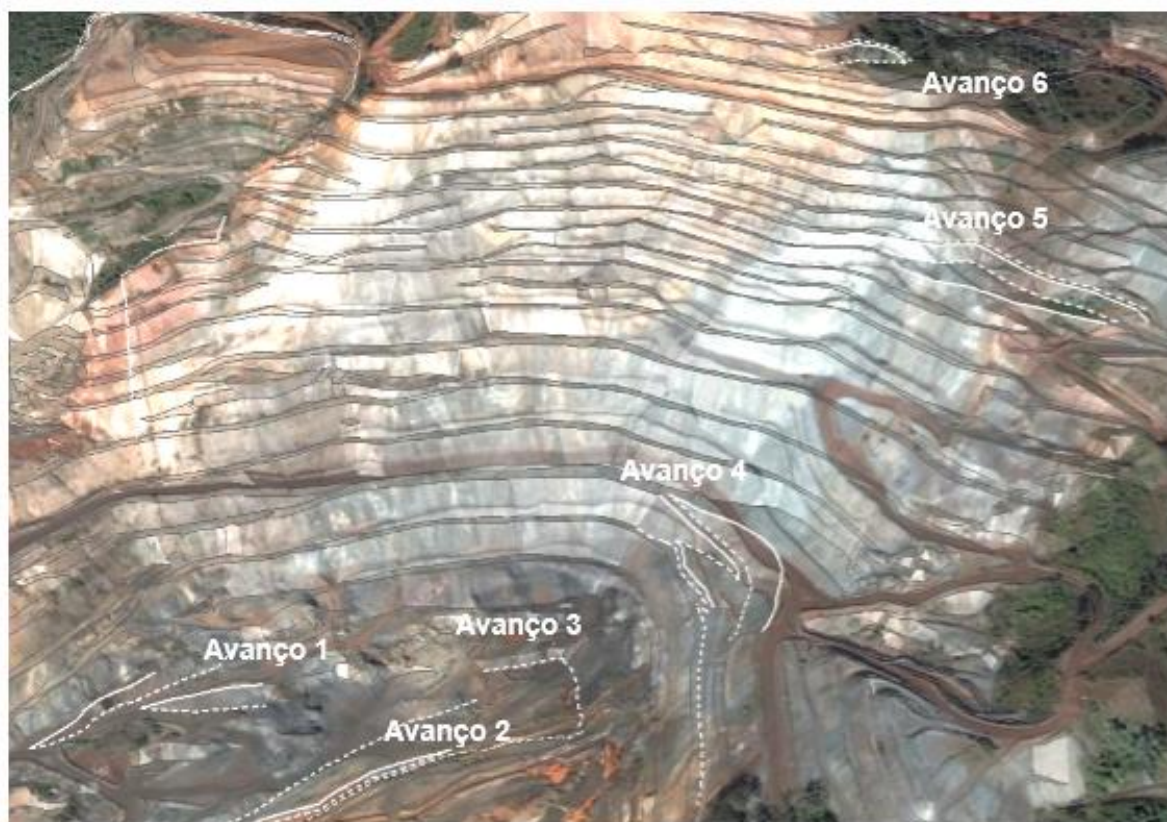


Figura 6: Desenho do plano mensal de lavra

A seguir serão evidenciados cada avanço, bem como uma breve explicação do que deve ser feito.



Figura 7: Representação do avanço 1

No avanço 1, será lavrado um banco até a cota 790 e deverá ser acertada a rampa a fim de facilitar o acesso até o fundo da cava. Nessa área trata-se de um material compacto, portanto deverá haver o desmonte por explosivos, e é uma área de itabirito e hematita. A hematita será transportada até a usina de beneficiamento e o itabirito para a pilha de estocagem do itabirito.



Figura 8: Representação dos avanços 2 e 3

No avanço 2 será feito um canal, onde a cota superior se estabelecerá em 765 e a inferior em 762, esse *greide* será suficiente para escoar a água presente no fundo da cava até um cano e que a levará até uma bacia hidrográfica. O material proveniente desse avanço será hematita, itabirito e estéril franco, sendo que a hematita vai para o beneficiamento, o itabirito para a pilha de itabirito e o estéril franco para a pilha de estéril. No avanço 3 só será retirado minério, que na configuração atual da mina é onde encontra-se o minério com melhor qualidade, até chegar na cota 768.



Figura 9: Representação do avanço 4

No avanço 4 será feito um recuo no banco e começara a ser desenhada uma rampa que irá da cota 830 até a cota 820, porém como a massa a ser retirada para a confecção da rampa é grande e a produtividade da área não é muito boa, não será possível fazer a rampa em um mês, ficando então no atual plano de lavra, chegar a rampa até a cota 825. A área possui itabirito e hematita compacta, portanto deve haver desmonte com explosivos.



Figura 10: Representação do avanço 5

Nesse avanço só há a retirada de itabirito e estéril franco, portanto não há minério. Esse avanço consiste em descer um banco de 10 metros até a cota 970 e deve ser feito para abrir um pouco a cava a fim de liberar mais minério a medida que for descendo os bancos. É uma área de material compacto e friável, portanto será necessário o uso de explosivos para liberar parte do material.

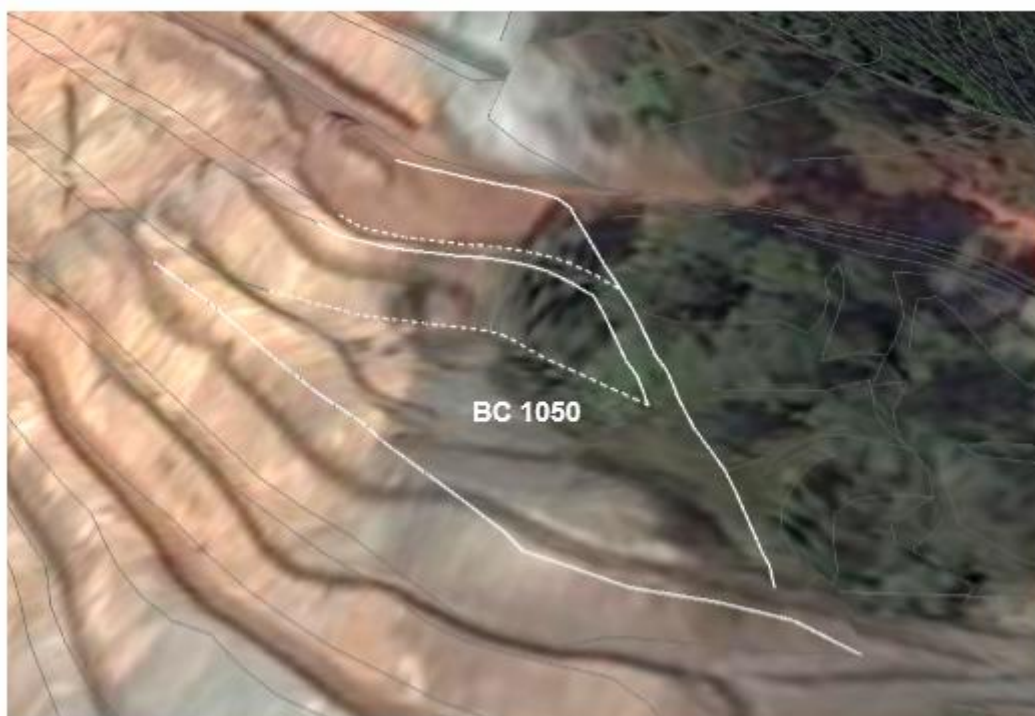


Figura 11: Representação do avanço 6

Nesse avanço só será lavrado estéril franco, e consiste em acertar a rampa até a cota 1050 e deixar uma praça grande na mesma cota. O motivo desse avanço é para fechar a massa de estéril no mês e também porque possibilitará a liberação de minério no futuro.

Após realizados os avanços, foram gerados relatórios de cada área, a fim de determinar a massa de cada litologia retirada e a qualidade do minério. Para gerar um relatório no *software* SURPAC, precisa delimitar a área de onde quer gerar o relatório, desenhando um polígono envolta da área, e sobrepor o arquivo DTM, que são modelos de superfície, com os avanços feitos do arquivo DTM que configura a situação atual da mina. A diferença de material é dada em um relatório que consta a massa de cada litologia e então foi possível fazer um gráfico com a massa de minério, itabirito e estéril franco que será liberado em cada frente.

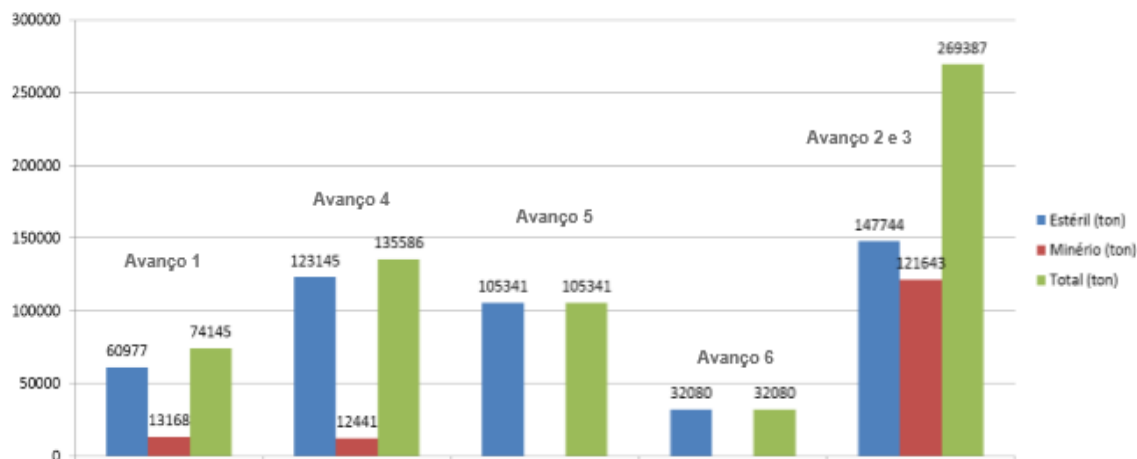


Figura 12: Gráfico de massa por frente de lavra

No gráfico é possível ver que a grande maioria do minério sai dos avanços 2 e 3, que estão localizados na área onde o minério tem a melhor qualidade e como a área possui uma praça ampla é possível colocar 2 ou 3 escavadeiras e tem acesso para vários caminhões, caracterizando uma área de alta produtividade. Nos outros avanços, a maior parte do material é composta por itabirito e estéril francos e são avanços para melhorar acessos e para liberar minério no futuro.

Após determinar a massa a ser lavrada no mês, foi determinada a qualidade do minério, também através de relatórios do SURPAC, onde são definidos os parâmetros de interesse de qual deseja-se saber o teor, que no caso são o ferro, sílica, alumínio e fósforo. Para determinar a qualidade média prevista, basta fazer uma média ponderada da qualidade das áreas. O resultado pode ser observado na tabela 13.

Áreas		MODELO GEOLÓGICO			
		Fe	Si	Al	P
Avanço 1		65,17%	6,03%	0,81%	0,033%
Avanço 4		63,30%	5,71%	1,74%	0,045%
Avanço 2 e 3		63,94%	5,33%	1,72%	0,022%
QUALIDADE PREVISTA DO MINÉRIO					
64%	5,42%	1,64%	0,025%		

Figura 13: Tabela da qualidade prevista do minério

É possível observar que os contaminantes sílica, alumínio e fósforo ficaram abaixo do limite imposto pelo cliente, portanto o plano mensal está satisfatório.

Após a apresentação do plano à equipe de operação, são feitas várias visitas a mina, a fim de fiscalizar se o plano está sendo cumprido corretamente e ao final do mês é realizada a reconciliação.

3.3 Reconciliação

A reconciliação consiste em comparar o que foi planejado com o que foi de fato executado. São levadas em consideração durante a reconciliação, o volume e as áreas lavradas, e o viés entre a qualidade planejada e a qualidade obtida no produto.

Os principais indicadores de eficiência do planejamento de lavra gerados pela reconciliação são a aderência ao plano de lavra e o viés da qualidade. A aderência ao plano de lavra é dada pela interseção entre aquilo que foi planejado e aquilo que foi efetivamente lavrado, impactando na aderência ao plano de lavra àquilo que foi planejado e não foi lavrado, e também aquilo que foi lavrado sem ter sido planejado. O viés da qualidade é dado pela diferença percentual entre a qualidade esperada pelo plano e a qualidade obtida no produto após o fim da

execução do plano de lavra mensal. A figura 14 ilustra a verificação da aderência ao plano de lavra mensal.

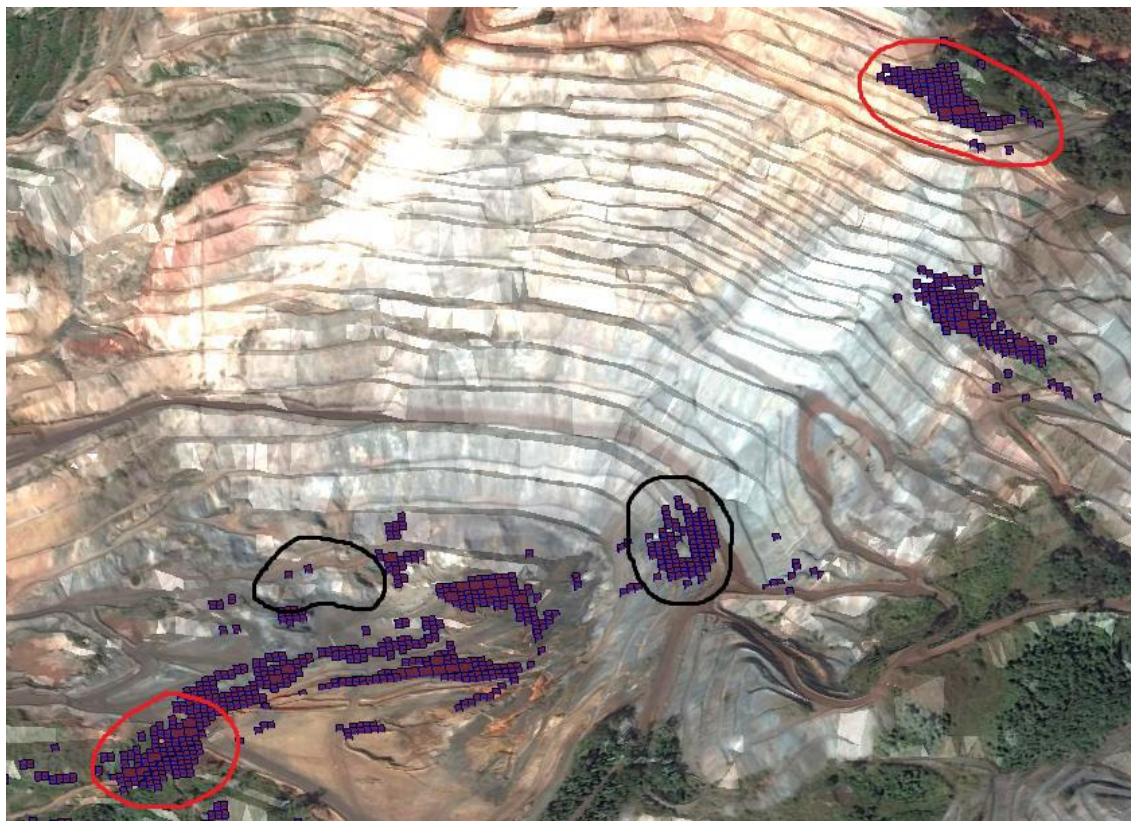


Figura 14: Áreas lavradas na mina no mês

As áreas circuladas de vermelho na figura acima representam áreas que foram lavradas sem terem sido planejadas, ou áreas em que o volume lavrado foi acima do planejado. Áreas circuladas em preto representam áreas que foram planejadas, porém não foram lavradas, ou lavradas parcialmente. Os demais blocos representam o volume executado dentro do planejado. Através da geração de relatórios no SURPAC, é possível determinar os valores das massas planejada e executada.

A aderência ao plano de lavra é dada em porcentagem, pela relação entre a massa lavrada dentro do plano e toda a massa planejada. A tabela da figura 15 mostra a relação entre as massas planejada, executada, executada planejada, e planejada não executada.

Aderência	Planejado	Executado	Executado não planejado	Planejado executado	Planejado não executado
Massa	616.539	567.314	126.934	440.380	176.159
%	100%	92%	21%	71%	29%

Figura 15: Tabela da relação entre as massas planejadas e executadas

Apesar de a massa executada corresponder a 92% do volume planejado, apenas 71% da massa foi efetivamente lavrada dentro do plano de lavra. Tendo sido 21% da massa executada, lavrada fora do plano de lavra. Portanto, o mês de outubro obteve uma aderência ao plano de lavra de 71%.

As justificativas para essa aderência de 71% são:

- Não execução da massa planejada no avanço 1.
- Execução parcial da massa planejada no avanço 4.
- Execução maior que o previsto no rebaixamento do canal (retaludamento devido presença de trinca) e no banco 1050.

O viés da qualidade pode ser observado na figura 16.

	QUALIDADE QUÍMICA PREVISTA					QUALIDADE PRODUÇÃO			
	Fe	Si	Al	P		Fe	Si	Al	P
Média Global	64,00%	5,42%	1,64%	0,025%		64,08%	5,84%	0,90%	0,043%
						ESPECIFICAÇÃO DO CLIENTE			
							5,80%	1,70%	0,060%
	VIÉS DE QUALIDADE								
	0,08%	0,42%	-0,74%	0,018%					

Figura 16: Tabela do viés da qualidade do plano mensal

Analisando a tabela, é possível observar que os valores da produção ficaram próximos aos previsto no modelo, havendo uma maior diferença no alumínio, porém não é prejudicial. A porcentagem de sílica da produção ficou um pouco acima da especificação do cliente, mas como o valor foi pequeno, pode ser facilmente corrigido no embarque, através de uma blendagem com um lote com menor teor de sílica.

4 CONCLUSÕES

Após a elaboração do plano mensal de lavra, o acompanhamento das operações de produção ao longo do mês e da reconciliação, é possível chegar à algumas conclusões que podem embasar algumas sugestões para otimizar o processo.

Como visto no trabalho, o planejamento a curto prazo pode ser feito de diferentes formas e cabe a empresa decidir qual deve ser utilizada, levando em consideração as características da mina. Nem sempre a metodologia aplicada pela empresa, é a mais adequada, portanto é válido que sejam realizados algumas mudanças no planejamento até que se atinja o melhor resultado ou o mais perto possível, a fim de garantir um sequenciamento de lavra que aumentará a vida útil da mina.

No caso apresentado no trabalho, a empresa utiliza apenas o plano mensal como planejamento a curto prazo. O plano mensal é passado para a equipe de operação de mina, que é composta de empresas terceirizadas, o que pode ser uma das causas de não se ter uma aderência muito boa no final do mês, pois mesmo trabalhando no mesmo local, são empresas diferentes e que podem ter objetivos e metas diferentes, portanto é mais difícil de se alinhar à equipe de planejamento. A primeira sugestão é fazer um estudo e analisar a viabilidade da empresa assumir as operações de mina. Assim seria possível uma aproximação entre o planejamento e a operação.

Outro fator que pode explicar a diferença entre o planejado e o executado no plano mensal é a questão climática, pois na confecção do plano não é levado em conta a sazonalidade. A meta de produção anual é dividida para todos os meses de forma igual, porém em meses que a ocorrência de chuvas é maior, a produtividade cai bastante e fica difícil de bater a meta de produção mensal. E nos meses em que não chove e a produtividade é maior, não é permitido lavar material a mais do que o estipulado para compensar. Portanto outra sugestão é aplicar a sazonalidade quando for dividir a meta de produção anual por mês. Isso pode ser feito com base na produção de cada mês nos anos anteriores, assim é possível fazer um levantamento dos meses onde a produtividade é maior e menor.

A última sugestão é dividir o plano mensal em 4 planos menores, e apresentar esses planos no início de cada semana para a equipe de operação. Para que o resultado fique mais assertivo é necessário que a meta do plano seja de acordo com o número de dias que ele abrange, ou seja, um plano com 8 dias terá uma meta maior do que um plano com 7 dias, seguindo a proporção de produção diária. Além disso é interessante que a equipe de planejamento passe as diretrizes diárias de produção, ordenando quais avanços devem ser feitos em cada dia para garantir o melhor sequenciamento de lavra possível, sendo que essas diretrizes devem ser embasadas nas características da mina no dia e na produtividade dos equipamentos disponíveis.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, M., **Modelos Matemáticos e Heurísticos Para Auxílio ao Planejamento de Operações de Lavra Em Minas a Céu Aberto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CAMPOS, P. H. A., **Um Comparativo de Metodologias no Planejamento de Lavra: Sequenciamento direto de Blocos Vs. Planejamento Tradicional**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

CHIMUCO, J. P. J., **Metodologia de Planejamento de Mina Para Retomada Das Operações de Lavra Das Jazidas de Kassinga Norte – Angola**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto, 2010.

COSTA, F. P. **Aplicações de Técnicas de Otimização a Problemas de Planejamento Operacional de Lavra Em Minas A Céu Aberto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto, 2005.

CURI, A. **Minas A Céu Aberto Planejamento de Lavra**. Oficina Textos Ouro Preto, 2014.

HUSTRULID W.; KUCHTA M., **Open Pit Mine Planning & Design Volume 1**, Publisher: A Balkema Publishers; Student ed. edition 1995.

MANDARINO, M. F., **Análise de Métodos Para Planejamento de Curto Prazo: Uma Abordagem Para o Line Up**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

NEME M. B.; CURI A.; SILVA J. M.; CARNEIRO A. C. B., **Realização De Projeto De Lavra De Mina Subterrânea Com Utilização De Aplicativos Específicos**. Ouro Preto, 2011.

PERONI, R. L., **Análise Da Sensibilidade Do Sequenciamento De Lavra Em Função Da Incerteza Do Modelo Geológico**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

PINTO, C.; DUTRA, J. G. **Introdução ao Planejamento e Operação de Lavra (A Céu Aberto e Subterrânea)**. Universidade Corporativa Chemtech. Belo Horizonte, 2008.

REIS, L. L. **Monitoramento da Recuperação Ambiental de Áreas de Mineração de Bauxita na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Porto Trombetas (PA)**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, B. S. L., **Planejamento de Lavra a Céu Aberto Para Jazida de Calcário**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas), Centro Universitário Luterano de Palmas, 2015.

SAYDAM, S. e YALCIN. E. **Reserve and Ultimate Pit Limit Design Analysis of Caldagi Nickel Deposit, Turkey**. 30th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Littleton, SME, 2002.

SILVA N. H. C., **Uma Abordagem Sobre O Planejamento De Lavra De Curto Prazo Com Ênfase Na Metodologia Da Programação Diária (Line Up) Da Mina De Salobo**. Monografia, Programa de Pós-Graduação Especialização em Sistemas Minero – Metalúrgicos, Parauapebas, 2014.

SOUZA, R. A., **Análise e controle dos índices de aderência e cumprimento para planos de lavra**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Goiás, 2013.

SZNELWAR, J. J.; DOMPIERI, M.; SCALABRIN, R. **Relatório Técnico 84: Fluxo de Massa de Materiais no Brasil**. Ministério de Minas e Energia, 2009.

.