

Gubio Barsottini

**Sequenciamento de lavra subterrânea de uma mina de manganês utilizando
parâmetros baseados em indicadores operacionais**

São Paulo

2017

Gubio Barsottini

**Sequenciamento de lavra subterrânea de uma mina de manganês utilizando
parâmetros baseados em indicadores operacionais**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo – EPUSP.

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Francesco
Cesare de Tomi

São Paulo

2017

TF-2017

B281

Exmo 2880870

H 2017j

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010039

FICHA CATALOGRÁFICA

Gubio Barsottini

Sequenciamento de lavra subterrânea de uma mina de manganês utilizando parâmetros baseados em indicadores operacionais/ Gubio Barsottini – São Paulo, 2017

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

1. Mineração subterrânea 2. Planejamento de lavra 3. Método de pilar e salão 4. Manganês 5. Sequenciamento de lavra I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

Aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre foi tão generoso comigo, me proporcionando oportunidades excepcionais ao longo de toda minha vida.

Aos meus pais, Jorge Barsottini e Masuyo Ikejiri Barsottini, cujos esforços nunca foram medidos a fim de me ensinarem o caminho moral correto e me proporcionarem condições de chegar onde estou, através de muita luta e trabalho duro.

À minha querida irmã, Livia Barsottini que sempre me acompanhou e me auxiliou, desde o início da minha história.

À minha namorada, Paula Pitta, pelo afeto e companheirismo, que esteve ao meu lado em inúmeras situações, boas e ruins, mas que sempre soube me trazer as palavras e atitudes que precisava em cada um destes momentos.

À minha família, que sempre me apoiou, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

A todos meus amigos e colegas, de colégio, da Poli, da Atlética, do Beisebol, das empresas onde trabalhei e da vida, que foram e são parte indispensável da minha formação e de quem sou hoje.

A todos integrantes da Datamine Africa, por terem acreditado em meu potencial e me ensinado grande parte do que sei hoje sobre mineração, além do grande aprendizado de vida que me proporcionaram. Em especial, aos Engenheiros Bruno **Panachão** Abileira e Ricardo “Moreno” Rosendo, que confiaram a mim a grande responsabilidade de fazer parte do projeto objeto de estudo do presente trabalho, espero que eu tenha sido digno dessa confiança. A Epígrafe deste trabalho é uma homenagem à uma frase muitas vezes citada pelo Panachão e que a cada dia faz mais sentido para mim.

A todos da Meridian Mining S.E., em especial aos Engenheiros Carlos Braga Filho, Joter Trindade Siqueira, Yuki Yamamoto e Gabriel Gines Jil Mera e ao Geólogo Pablo Martin-Cocher que me acolheram em suas equipes de trabalho e sempre fizeram questão de me passarem seus conhecimentos.

À Associação Atlética Acadêmica Politécnica e a todos que fizeram e fazem parte de sua história. Um dos maiores orgulhos que tenho em minha longa vida acadêmica é ter tido a honra de representar esta Associação. Deste período de muita aprendizagem, alegria e orgulho, levo como maior presente as amizades que fiz.

À equipe de Beisebol da Poli, o mundialmente famoso “BarçaPoli” que não apenas me fez sentir paixão por um esporte novamente, mas principalmente me trouxe amigos que para sempre serão levados comigo

A todos meus professores da Escola Politécnica, em especial ao meu orientador, Giorgio de Tomi, que me trouxeram inúmeros ensinamentos profissionais, acadêmicos e pessoais.

“Se pude ver mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes”.

Sir Isaac Newton (1643 – 1727)

RESUMO

O planejamento e o sequenciamento de lavra são fundamentais para que os objetivos de uma mina sejam atingidos. O planejamento de lavra pode ser dividido em três etapas distintas, com focos diferentes, estas etapas são os planejamentos de longo, médio e curto prazo. O planejamento de longo prazo possui características mais abrangentes e menos detalhadas, sendo o foco desta etapa o estudo de reservas lavráveis e a viabilidade do projeto. O presente trabalho teve o desafio de criar uma metodologia de planejamento e sequenciamento de lavra de longo prazo, que serviu como base para as etapas seguintes do planejamento, capazes de atingir um crescimento de produção dentro do período de 5 anos, partindo de uma produção anual de minério de 1.750.000 toneladas e atingindo 2.000.000 de toneladas de minério produzido. Após o período inicial de 5 anos, a produção teve de ser mantida constante pelo maior período de tempo possível. O planejamento adotado teve ainda o desafio de ser restrito aos parâmetros operacionais da mina, já em atividade. Inicialmente criou-se uma metodologia capaz de desenhar galerias e pilares representativos da mina, com diferenciação estratégica entre galerias de desenvolvimento e galerias de produção, a fim de se obter um sequenciamento baseado nas estratégias de avanço que respeitassem fatores econômicos e operacionais. Com o desenvolvimento de tal metodologia, foi possível se realizar um sequenciamento onde os objetivos de se atingir a meta de 2.000.000 de toneladas de minério de manganês produzidos anualmente, dentro de um período de 5 anos e sua manutenção constante pelo maior período de tempo foram alcançadas, tendo sido obtido um aumento de 14% da produção inicial e sendo mantido constante por 36 anos após o período de crescimento inicial. Os critérios de restrições operacionais não puderam ser respeitados por todo o período de lavra da mina, porém, para os 10 primeiros anos, o número de equipes de trabalho foi mantido constantes, o que representa um valor satisfatório, tendo em vista que o planejamento operacional da mina é focado em planos quinquenais.

Palavras-chave: Mineração subterrânea. Planejamento de lavra de longo prazo. Método de pilar e salão. Manganês. Sequenciamento de lavra.

ABSTRACT

Mining planning and sequencing are critical to achieving the goals of a mine. The mining planning can be divided into three distinct stages, with different focuses, these stages are the long, medium and short term planning. Long term planning has broader and less detailed features, the focus of this stage is to estimate the mineable reserves and the feasibility of the project. The present study had the challenge of creating a long-term planning and sequencing methodology that can be the base for the following planning stages, capable of achieving a growth of production within the period of 5 years, starting from an annual production of ore of 1,750,000 tons and reaching 2,000,000 tons of ore produced. After the initial 5 year period, production had to be kept constant for as long as possible. The planning adopted also had the challenge of being restricted to the operating parameters of the already active mine. Initially, a methodology has being created, capable of designing galleries and pillars representative of the mine, with strategic differentiation between development galleries and production galleries, in order to obtain a sequencing based on the strategies of advance that respected economic and operational factors. With the development of such methodology, it was possible to carry out a sequencing in which the objectives of reaching the target of 2,000,000 tons of manganese ore produced annually within a period of 5 years and its constant maintenance for the longest period of time were achieved, with a 14% increase in initial production and being maintained constant for 36 years after the initial growth period. The criteria for operational restrictions could not be respected throughout the life of mine, however, for the first 11 years, the number of work crews was kept constant, which represents a satisfactory value, since operational planning of the mine is focused on five-year plans.

Key words: Underground mining. Long term mining planning. Manganese. Room and pillar method. Mining sequencing

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Classificação de Recursos e Reservas Minerais | 15 |
| Figura 2: Modelo de Blocos 3D | 18 |
| Figura 3: Fontes de Incertezas em um Projeto de Mineração | 20 |
| Figura 4: Fluxograma das etapas de trabalho | 22 |
| Figura 5: Lente de minério | 25 |
| Figura 6 - Modelos de Blocos 2D de longo prazo, colorido por categoria de material..... | 25 |
| Figura 7: Representação de um salão completo padrão | 28 |
| Figura 8: Linha base utilizada para o desenho de todas as galerias de desenvolvimento | 29 |
| Figura 9: Grade planar representando as galerias de desenvolvimento | 30 |
| Figura 10: Representação dos salões..... | 30 |
| Figura 11: Desenho das galerias de desenvolvimento e dos salões planares | 31 |
| Figura 12: Projeção das linhas planares na lente de minério..... | 31 |
| Figura 13: Desenho em linhas da área lavrável..... | 32 |
| Figura 14: Expansão das linhas para gerar sólidos tridimensionais | 33 |
| Figura 15: Expansão das linhas de salão | 33 |
| Figura 16: Vista planar e em perspectiva das galerias e salões..... | 34 |
| Figura 17: Cálculo do fator de galerias de desenvolvimento | 36 |
| Figura 18: Cálculo do fator de galerias de salão | 36 |
| Figura 19: Estrutura do <i>software</i> de sequenciamento | 37 |
| Figura 20: Gráfico do perfil de produção de Mn e a quantidade de equipes dedicadas aos trabalhos nas duas lentes combinadas | 40 |
| Figura 21: Sequenciamento de lavra da lente 1, colorido por períodos de 5 anos | 41 |
| Figura 22: Sequenciamento de lavra da lente 2, colorido por períodos de 5 anos | 41 |

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Classificação dos produtos por teor e relação Mn/ Fe..... | 26 |
| Tabela 2: Dimensões dos Pilares baseados na profundidade e na altura da galeria | 26 |
| Tabela 3: Dimensões das galerias | 27 |
| Tabela 4: Metas de produção | 35 |
| Tabela 5: Descrição das capacidades de produção por equipe de trabalho..... | 35 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO E OBJETIVOS..... | 13 |
| 1.1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRAFICA..... | 15 |
| 2.1 | DEFINIÇÕES DE RECURSO E RESERVA MINERAIS | 15 |
| 2.1.1 | Recurso Mineral | 15 |
| 2.1.2 | Reserva Mineral | 16 |
| 2.2 | DEPÓSITOS SEDIMENTARES DE MANGANÊS | 16 |
| 2.3 | MODELAGEM GEOLÓGICA UTILIZANDO MODELO DE BLOCOS | 17 |
| 2.3.1 | Modelo de Blocos de longo e curto prazo | 18 |
| 2.3.2 | Modelo de Blocos 2D..... | 18 |
| 2.4 | PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO | 19 |
| 2.4.1 | Incertezas em um projeto de mineração | 20 |
| 2.5 | ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE LAVRA | 21 |
| 3 | METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 | MODELAGEM GEOLÓGICA ADEQUADA AO PROJETO | 22 |
| 3.2 | MÉTODO DE LAVRA..... | 23 |
| 3.3 | CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA MINA | 23 |
| 3.4 | DISTINÇÃO ESTRATÉGICA DAS GALERIAS | 23 |
| 3.5 | MÉTODO DE DESENHO DAS GALERIAS | 24 |
| 3.6 | ESTRATÉGIAS DE SEQUENCIAMENTO | 24 |
| 4 | EXEMPLO DE APLICAÇÃO | 24 |
| 4.1 | GEOLOGIA DO DEPÓSITO | 24 |
| 4.2 | MODELOS DE BLOCOS UTILIZADOS | 25 |
| 4.3 | DESENHO DAS GALERIAS E DOS PILARES | 26 |
| 4.3.1 | Parâmetros utilizados | 26 |
| 4.3.2 | Escolha das dimensões das galerias, dos pilares e dos salões de produção..... | 27 |
| 4.3.3 | Desenho das galerias de desenvolvimento e dos salões de produção | 28 |
| 4.3.4 | Projeção dos desenhos planares na lente de minério..... | 31 |
| 4.3.5 | Retirada das áreas já lavradas..... | 32 |
| 4.3.6 | Transformação das linhas em sólidos tridimensionais | 32 |
| 4.4 | PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO | 34 |
| 4.4.1 | Metas de produção | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4.2 | Restrições | 35 |
| 4.4.3 | Estratégias de desenhos das galerias | 35 |
| 4.4.4 | Etapas de sequenciamento..... | 37 |
| 5 | DISCUSSÃO E RESULTADOS | 39 |
| 6 | CONCLUSÕES | 42 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 43 |

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

Os empreendimentos mineiros são cercados por inúmeras fontes de incerteza, tornando-os investimentos de alto risco. Dentre estas incertezas, pode-se destacar as incertezas geológicas intrínsecas e a imprevisibilidade do valor futuro do minério. Tais empreendimentos necessitam de longos períodos de maturação até que possam começar a gerar lucro.

Para que haja diminuição do nível de incerteza de um empreendimento mineiro, são realizadas pesquisas minerais nas áreas de interesse, pesquisas estas que após estudos e interpretações geológicas dão origem a um modelo de blocos, cuja finalidade é transformar um depósito de formas e dimensões contínuas em um modelo discreto, com um número finito de blocos que represente da melhor maneira possível o depósito mineral a ser lavrado.

A partir de um modelo de blocos bem definido, dá-se início à etapa de planejamento estratégico de lavra, que será o objeto de estudo do presente trabalho.

Este trabalho mostra um caso prático de planejamento de lavra de longo prazo, através de um exemplo de aplicação realizado em uma mina subterrânea de manganês já em atividade, que adota pilar e salão como método de lavra. A utilização da tecnologia de *softwares* voltados especificamente para o planejamento e sequenciamento de lavra disponíveis atualmente no mercado é uma realidade que vem crescendo e se desenvolvendo ao longo dos anos. Porém, cabe ao Engenheiro de Minas, baseado em sua experiência acadêmica e profissional, realizar uma análise crítica e minuciosa dos resultados obtidos através do *software* a fim de adotar ou não cada uma das sugestões por ele trazida com o propósito de melhorar o planejamento de lavra e consequentemente maximizar os lucros da empresa.

Para a realização de um bom planejamento de lavra, é necessário embasar-se em boas práticas de planejamento estratégico, já consolidadas ao longo do tempo, mas além disso, é necessária a compreensão do caso específico em que se está trabalhando, e levar em consideração variáveis como o comportamento de mercado do minério de interesse, as características geológicas do maciço e as legislações locais no momento da tomada de decisões.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento e sequenciamento de lavra que viabilizasse o crescimento gradativo da produção da mina em estudo, visando uma produção anual de 2 milhões de toneladas de minério dentro de um período de 5 anos.

Além de traçar uma estratégia capaz de atingir a produção desejada nos primeiros 5 anos, o presente trabalho teve o desafio de manter a produção constante pelo maior período de tempo possível após o período de crescimento inicial.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 DEFINIÇÕES DE RECURSO E RESERVA MINERAIS

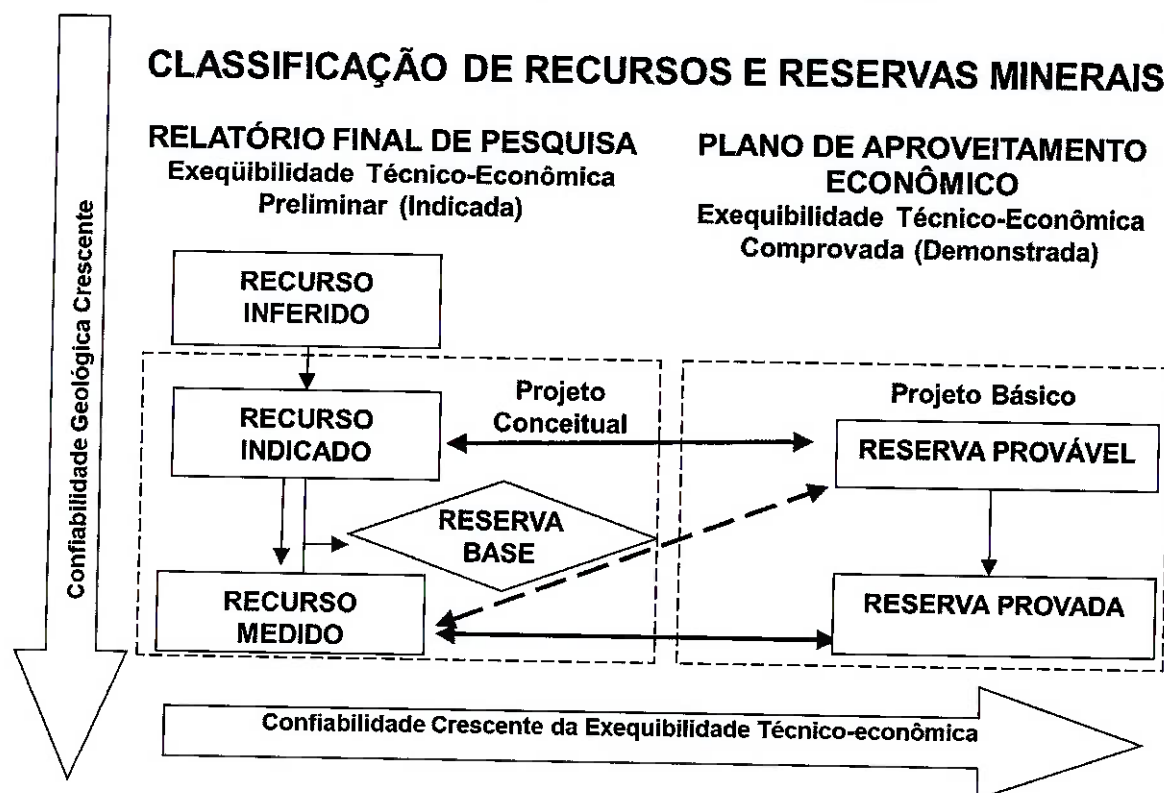
2.1.1 Recurso Mineral

Segundo a CBRR (2016), um Recurso Mineral é uma ocorrência ou um depósito mineral na crosta terrestre, de material sólido ou de água mineral, com teor e quantidade suficientes para que, após ser pesquisado, indique a possibilidade de aproveitamento econômico.

A localização, quantidade, teor, continuidade ou outras características geológicas do Recurso Mineral são conhecidos, estimados ou interpretados a partir de evidências e conhecimento geológicos específicos, incluindo amostragem.

Os Recursos Minerais são subdivididos em ordem crescente de confiabilidade geológica nas categorias Inferido, Indicado e Medido, conforme pode ser conferido na Figura 1 a seguir.

Figura 1: Classificação de Recursos e Reservas Minerais



Fonte: Adaptada de DNPM (2015)

A escolha da classificação adequada do Recurso Mineral depende da quantidade, da distribuição e da qualidade dos dados disponíveis e do nível de confiabilidade associado a esses dados. A adequada classificação do Recurso Mineral deve ser determinada pelo Profissional Qualificado.

As porções de um depósito mineral que não tenham perspectivas razoáveis de extração econômica não podem ser incluídas em um Recurso Mineral.

2.1.2 Reserva Mineral

Segundo o a CBRR (2016), uma Reserva Mineral é a parte economicamente lavrável de um Recurso Mineral Medido e/ou Indicado.

Isso inclui diluição e perdas que podem ocorrer quando o material é lavrado ou extraído e é definido apropriadamente pelos estudos nos níveis de Pré-Viabilidade ou de Viabilidade que incluem a aplicação de Fatores Modificadores, que são considerações usadas para converter Recursos Minerais em Reservas Minerais. Esses incluem, mas não se limitam a considerações sobre: a lavra, o processamento, a metalurgia, a infraestrutura, a economicidade, o mercado, os aspectos legais, ambientais, sociais e governamentais.

As Reservas Minerais são aquelas porções de Recursos Minerais que, após a aplicação de todos os fatores de mineração, resultam em uma tonelagem e teor estimados que na opinião do Profissional Qualificado que faz as estimativas, pode ser a base de um projeto viável, após levar em consideração todos os Fatores Modificadores.

O termo ‘economicamente lavrável’ implica que a extração de uma Reserva Mineral demonstra ser viável sob premissas financeiras razoáveis. O significado da expressão ‘adequadamente justificada’ poderá variar de acordo com o tipo de depósito, o nível de estudo que tenha sido desenvolvido e parâmetros financeiros de cada entidade. Por esse motivo, não pode haver uma definição rígida para o termo ‘economicamente lavrável’. Entretanto, espera-se que as entidades busquem alcançar um retorno aceitável sobre o capital investido e que os retornos aos investidores no projeto sejam competitivos considerando investimentos alternativos de riscos equivalentes.

2.2 DEPÓSITOS SEDIMENTARES DE MANGANÊS

Depósitos sedimentares de manganês, são depósitos estratiformes da margem marinha, que podem estar presentes em fácies de óxido e/ou carbonato, em sequências estratigráficas condensadas (Cannon and Force, 1986).

As rochas hospedeiras incluem rochas sedimentares marinhas rasas, mais comumente rochas de carbonato, argila e areia glauconítica, comumente com cascas de conchas, em sequências de alto suporte associadas a bacias anóxicas. A maioria dos depósitos inclui rochas de carbonato na sequência hospedeira. As rochas enriquecidas com bário, fósforo e cobre podem ser espacialmente ou estratigráficamente adjacentes a rochas enriquecidas com manganês. Os depósitos reduzidos, como o xisto preto, podem estar associados de maneira semelhante à rocha enriquecida com manganês e podem conter enriquecimentos de uma variedade de metais comuns (Cannon and Force, 1986).

As camadas de minério de manganês, nestes depósitos, consistem em leitos finos de óxido de manganês e/ou minerais de carbonato, normalmente mais finos do que 10 metros, apenas influenciados incidentalmente por características estruturais. A zonação vertical pode registrar a regressão deposicional no alto nível do mar. A zonação lateral pode envolver fácies de óxido para transições de fácies de carbonato.

2.3 MODELAGEM GEOLÓGICA UTILIZANDO MODELO DE BLOCOS

O modelo de blocos é uma representação matemática discreta de um corpo de minério com dimensões e limites contínuos, que tem por finalidade representar da melhor maneira possível o corpo de minério em questão. A melhor maneira de se representar um corpo de minério varia de mina para mina, de acordo com parâmetros, tais como as características do minério, de seu depósito mineral e seu método de lavra, além de aspectos econômicos como características de venda, exigências de mercado e a forma com que o produto final é entregue pela companhia mineradora.

Para que um modelo de blocos possa ser utilizado no planejamento estratégico de lavra, é necessário que o mesmo possua informações como:

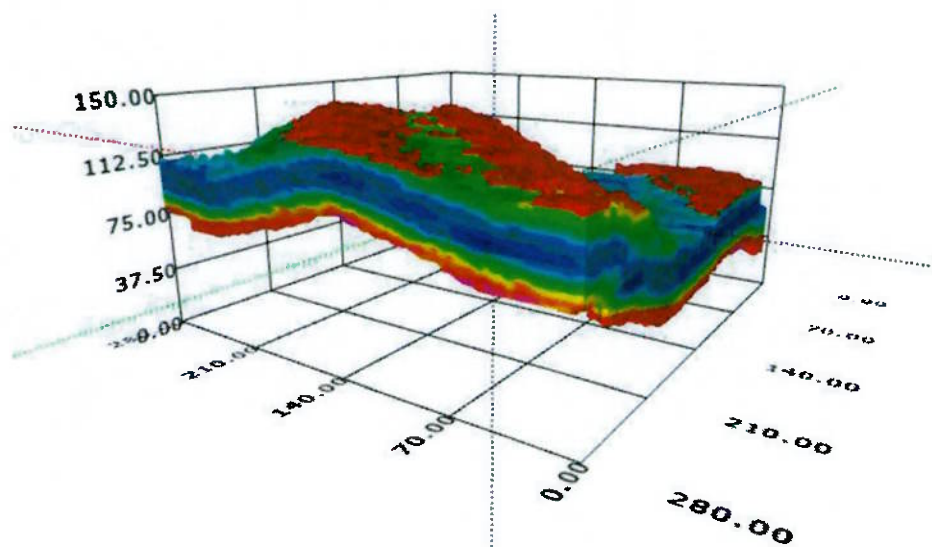
1. Estimativa de teores.
2. Análise litológica e estado de alteração das rochas.
3. Densidade de cada uma das rochas.
4. Classificação (medido, indicado ou inferido).

Estas informações devem ser obtidas através de análises geoestatísticas, que são os dados básicos para cálculos de recursos de minério e controle de classificação. A análise começa com o exame dos dados obtidos na pesquisa mineral (Yamamoto, 2016). Estes dados passam por processos como:

1. Composite dos furos de sondagem em intervalos de comprimentos padronizados.
2. Análise de histogramas e diagramas de correlação dos composites.

3. Cálculo dos variogramas 2D e 3D.
4. Execução de simulação condicional ou Krigagem.

Figura 2: Modelo de Blocos 3D



Fonte: Yamamoto (2016)

2.3.1 Modelo de Blocos de longo e curto prazo

Para realização de um planejamento de lavra, o Modelamento de Blocos pode ser dividido em duas etapas, a de longo prazo e a de curto prazo.

O Modelo de Blocos de longo prazo é obtido através dos métodos citados acima, baseado nos furos de sondagem, análises geofísicas e interpretações geológicas realizadas na fase de pesquisa mineral.

O Modelo de Blocos de curto prazo é obtido também utilizando-se dos métodos citados acima, porém, baseado em informações mais precisas que são obtidas através da análise de amostras retiradas durante a operação de lavra. O Modelo de Blocos de longo prazo é ainda atualizado periodicamente com base no Modelo de curto prazo, sendo assim, tem-se uma constante interação entre o Modelo de curto e o de longo prazo.

2.3.2 Modelo de Blocos 2D

Os modelos de blocos normalmente são gerados em 3 dimensões, pois na maioria dos casos são a melhor representação do depósito em análise, porém, neste trabalho, utilizar-se-á um modelo de blocos 2D. O modelo de blocos 2D é gerado da seguinte maneira:

Inicialmente gera-se um modelo de blocos 3D, com cada bloco contendo todas as informações possíveis sobre teores de minério e seus contaminantes, litologia de suas rochas e sua classificação. A partir destes valores é feita uma normalização planar, onde são fixadas dimensões em X e Y e todos os blocos que tiverem seus valores de X e Y coincidentes e valores de Z diferentes, serão aglomerados, e uma média ponderada dos valores de cada um de seus campos será realizada, dando origem assim, ao novo Modelo de Blocos que será utilizado para se realizar todas as etapas do planejamento de lavra (Datamine, 2016). Para a junção dos blocos são utilizados como limitantes no eixo Z os valores da altura das galerias em cada setor da mina. Estes valores são fornecidos pela equipe de mecânica de rochas.

Algumas das vantagens da utilização de um modelo de blocos 2D são:

1. A velocidade com que os arquivos são processados, devido ao fato do modelo de blocos se tornar muito mais leve.
2. O fato de que mesmo com o desenho das galerias estando levemente deslocado no eixo Z, o resultado de suas estimativas continuará sendo obtido como se o desenho estivesse seguindo de maneira fiel o corpo de minério.

2.4 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

Planejamento estratégico pode ser definido como um conjunto de decisões e ações que resultam na formulação e implementação de estratégias destinadas a atingir os objetivos de uma organização (Szwilski, 1987).

Segundo Sharma (2011), através de um planejamento e um sequenciamento estratégicos bem elaborados, as minas terão economias diretas e indiretas, por se tornarem mais produtivas, previsíveis e lucrativas. Deve-se sempre levar em conta que cada mina possui suas particularidades, o que tornam cada projeto de planejamento, um projeto único.

Segundo Henderson & Turek (2013), o planejamento estratégico é a base para todas operações subsequentes no desenvolvimento de uma mina. Para que um bom planejamento estratégico seja realizado, é necessário que haja uma sólida compreensão do minério, rigorosos padrões e processos, tecnologia de informação robusta e utilizáveis e uma força de trabalho capacitada. O planejamento de longo prazo é a chave para identificar e traçar o direcionamento estratégico de qualquer mina, enquanto o planejamento de curto prazo é a chave para que possam ser realizadas previsões orçamentárias.

Segundo Fouet et al (2009), um plano de lavra não é diferente de qualquer outro tipo de planejamento, na medida em que é um guia para definir metas como volume de produção, custo e receita por um período de tempo definido. É essencial que o plano se aproxime ao máximo da realidade, para que as expectativas possam ser atingidas. O plano da mina deve ser seguro, executável e efetivo. Se não for, então o plano precisa ser ajustado.

2.4.1 Incertezas em um projeto de mineração

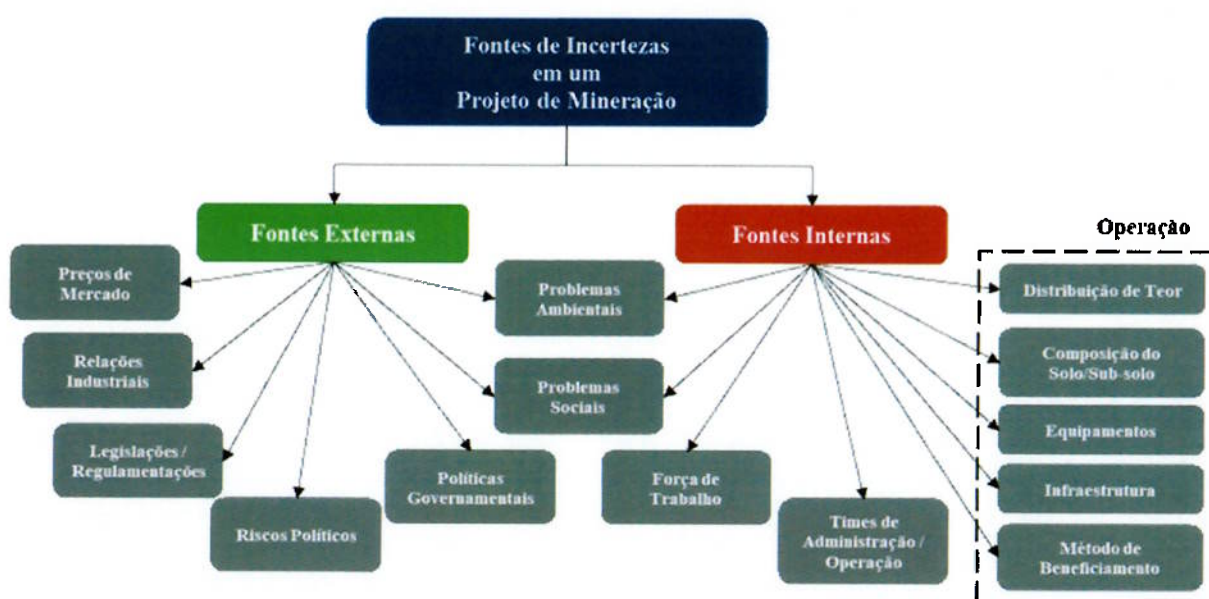
Devem-se levar em consideração as inúmeras fontes de incertezas atreladas a um projeto de mineração na fase de planejamento estratégico.

As fontes internas de incerteza são aquelas que são ditadas pelo próprio depósito. As fontes externas são determinadas por considerações que fogem do ambiente da mina, como exigências comerciais ou de mercado (Krantz e Scott, 1992).

Segundo Kazakidis e Scoble (2003), as fontes internas de incerteza em um projeto de mineração relacionam-se, por exemplo, com a distribuição de teor, condições do solo, força de trabalho, equipe de gerenciamento/operação, equipamentos e infraestrutura. As fontes externas incluem preços de mercado, condições ambientais, risco político/país, relações comunitárias, relações industriais, relações com *stakeholders*, legislações e políticas governamentais (Smith, 1995; Dunbar et al., 1998). Dependendo do tipo de análise realizada e das características específicas de um projeto de mineração, certas condições podem ser percebidas como internas e não externas, ou vice-versa.

As fontes comuns de risco em projetos de mineração estão resumidas na Figura 3. De acordo com Worth e Haystead (1990), os fatores de risco avaliados em um estudo de viabilidade por uma instituição financeira incluem riscos operacionais, riscos técnicos, riscos de não conclusão e/ou de superação de custos, riscos de preço e de mercado, risco país, risco legal e risco ambiental.

Figura 3: Fontes de Incertezas em um Projeto de Mineração



Fonte: Adaptada de Worth e Haystead (1990)

Os aspectos ambientais e de segurança da avaliação do risco do projeto de mineração foram avaliados por Summers (2000). A eficácia do cronograma de produção e das estimativas de custo em um plano de mina dependerá de sua capacidade de explicar a variabilidade nas características geológicas do minério e na experiência da equipe de operação. Um dos objetivos de uma equipe de planejamento de mina é minimizar os riscos associados ao cronograma previsto de produção e custos. Obter informações adicionais sobre um parâmetro específico (como perfuração adicional para melhorar a confiabilidade na estimativa de teores) pode possivelmente reduzir esse risco ou criar estratégias de flexibilização do planejamento, que também possuem a função de mitigar os riscos.

2.5 ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE LAVRA

Segundo Steffen (2005), o planejamento de lavra deve ser dividido em três categorias diferentes:

1. **Planejamento de longo prazo:** Esta é a etapa inicial do planejamento da mina, onde o objetivo é criar as diretrizes em que as etapas de planejamento subsequentes devem se alicerçar. Nesta etapa devem-se definir as reservas lavráveis, a capacidade de produção remanescente da mina e os requisitos de infraestrutura (Silva, 2008).
2. **Planejamento de médio prazo:** Nesta etapa, normalmente se planejam os próximos 3 a 5 anos da mina, que tem por objetivo a diminuição dos riscos para os investidores, visando a maximização dos lucros neste espaço de tempo.
3. **Planejamento de curto prazo:** O planejamento de curto prazo se guia pelos objetivos traçados no planejamento de médio prazo, de maneira que possa transferir o planejamento de alguns anos para bases mensais, semanais e até mesmo diárias. Nesta etapa do planejamento, é feito o controle de qualidade do minério, o controle de custos, a alocação dos equipamentos e o controle da produtividade operacional.

O presente trabalho se ateve em gerar um planejamento e um sequenciamento de longo prazo, dessa maneira, as características deste planejamento são de não se prender a detalhes, utilizando-se de aproximações em algumas situações, porém, sempre com o foco em produzir dados confiáveis, capazes de serem utilizados como base para as etapas seguintes do planejamento.

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como finalidade desenvolver um planejamento de lavra de longo prazo capaz de aumentar gradativamente a produção de uma mina de manganês utilizando parâmetros pré-estabelecidos pelo setor de produção.

Como em todo planejamento de lavra, o presente estudo deve se basear em parâmetros oriundo de pesquisas geológicas, geotécnicas, projeções de mercado, entre outras, porém, além dos parâmetros habituais, pelo fato da mina já estar em atividade, deve-se levar em conta parâmetros operacionais como fatores limitantes deste projeto. O fluxograma contido na Figura 4 mostra a sequência de etapas adotada para a realização do planejamento e sequenciamento de lavra do presente trabalho.

Figura 4: Fluxograma das etapas de trabalho



Fonte: Elaboração própria

3.1 MODELAGEM GEOLÓGICA ADEQUADA AO PROJETO

Para que um planejamento de lavra seja bem sucedido, deve-se realizar uma modelagem geológica adequada ao problema. Não necessariamente exista apenas um método de modelagem que se adeque ao caso em estudo, porém, cabe ao setor de planejamento, juntamente com o setor de geologia, decidir qual modelo de blocos melhor se adequa ao planejamento e consequentemente à operação da mina.

As variações dentre as modelagens podem ser desde diferenças entre as técnicas utilizadas para se estimar os teores dos locais não amostrados até a escolha entre se utilizar um Modelo de Blocos 3D ou 2D.

3.2 MÉTODO DE LAVRA

O método de lavra adotado nesta mina subterrânea, é o método de pilar e salão, método este que já é utilizado desde o início da operação da mina. Os pilares e galerias possuem larguras e alturas variáveis, baseados nas características geotécnicas de cada uma das áreas.

O presente corpo de minério possui duas lentes com espessura média vertical de 4,5m e distantes entre si aproximadamente 21m e com dimensões horizontais quilométricas. Nestas condições opta-se por lavra-lo em 2 camadas sub-horizontais aproximadamente paralelas.

3.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA MINA

Baseando-se nos estudos geotécnicos realizados, e no caso de uma mina já em operação, também se limitando às capacidades e restrições dos equipamentos já em operação, deve-se optar pelas configurações construtivas das galerias e pilares que atenda da melhor maneira possível os objetivos do planejamento.

Após a escolha dos parâmetros a serem utilizados para a construção das galerias e dos salões, deve-se traçar uma estratégia que torne viável o desenho das galerias e dos salões da maneira desejada. Nesta etapa, não existe apenas uma opção de estratégia de desenho, porém, cabe ao setor de planejamento escolher uma opção que atenda de maneira adequada aos requisitos.

3.4 DISTINÇÃO ESTRATÉGICA DAS GALERIAS

No método de pilares e salões, existe uma divisão estratégica das galerias em dois grupos distintos, as galerias de desenvolvimento e as galerias de produção, ou galerias de salão.

As galerias de desenvolvimento são abertas aos pares, por motivos operacionais, como ventilação e segurança. Este tipo de galeria possui um avanço linear mais acelerado por adotar uma estratégia de não se criar pilares regulares que deverão ficar sem sofrer alterações até a exaustão da mina, ao invés disso, criam-se ligações entre os pares de galerias a distâncias maiores do que as esperadas para a configuração final da mina, com isso, ganha-se tempo de avanço em linha reta, o que permite que uma maior área de frente de lavra seja aberta, viabilizando assim mais opções de lavra para as galerias de produção.

As galerias de produção possuem um avanço linear mais lento, pois ao contrário do que ocorre com as galerias de desenvolvimento, elas são escavadas de maneira que após sua lavra, os pilares e salões fiquem com as dimensões finais planejadas.

Juntamente com a estratégia de desenho das galerias de produção, deve-se traçar uma estratégia para se definir o tamanho de cada um dos salões, se eles terão um tamanho padronizado e a quais restrições eles devem obedecer.

3.5 MÉTODO DE DESENHO DAS GALERIAS

Para que a Mina possa ser representada de uma maneira realista e que venha a trazer resultados confiáveis de estimativas de reservas e recursos minerais, categoria de minério, reconciliação, entre outros parâmetros, seu desenho deve ser realizado de maneira coerente, estando de acordo com a geologia, o modelo de blocos, e as estratégias de desenho adotadas.

Diferentes *softwares* de mineração, podem trazer diferentes abordagens para a construção dos desenhos das galerias, porém, cabe ao responsável pelo projeto utilizar as ferramentas disponíveis a fim de realizar um desenho coerente com a realidade.

3.6 ESTRATÉGIAS DE SEQUENCIAMENTO

O sequenciamento de uma mina subterrânea deve sempre seguir as limitações impostas pelo método de lavra adotado, mas além disso, deve também seguir decisões estratégicas tomadas previamente e no caso de uma mina em atividade, deve respeitar uma lógica operacional a fim de se evitar deslocamentos desnecessários de maquinário e infraestrutura.

O sequenciamento de lavra é o resultado final de um planejamento de mina de longo prazo, com ele é possível observar se as restrições estão sendo respeitadas e se as metas de produção estão sendo alcançadas.

Difícilmente o primeiro sequenciamento de lavra obtido será o utilizado ao final do projeto, cabe aos responsáveis pelo projeto observarem o planejamento obtido e de maneira crítica proporem e executarem mudanças no mesmo, a fim enquadrá-lo nos padrões desejados.

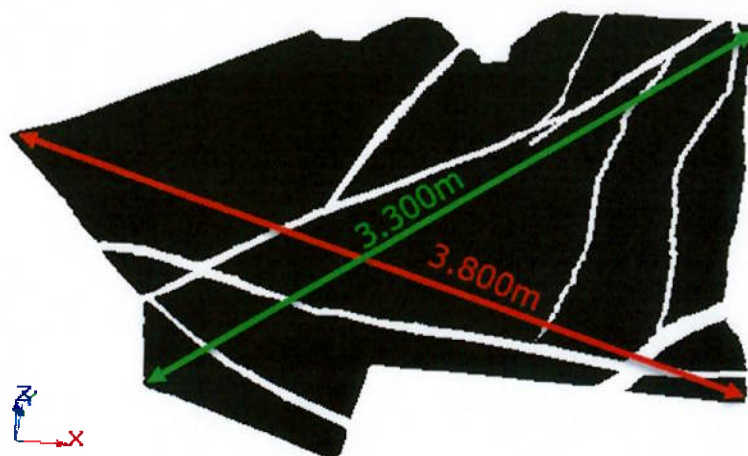
4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4.1 GEOLOGIA DO DEPÓSITO

A geologia local segue as características de um depósito de manganês sedimentar, citado anteriormente. O corpo de minério economicamente lavrável possui dimensões horizontais quilométricas, conforme mostrado na Figura 5 e dimensão vertical praticamente constante com

duas lentes de minério com cerca de 4,5m de espessura e distantes 21m entre si. As lentes de minério possuem um leve desnível, causado por dobramentos e falhas geológicas.

Figura 5: Lente de minério

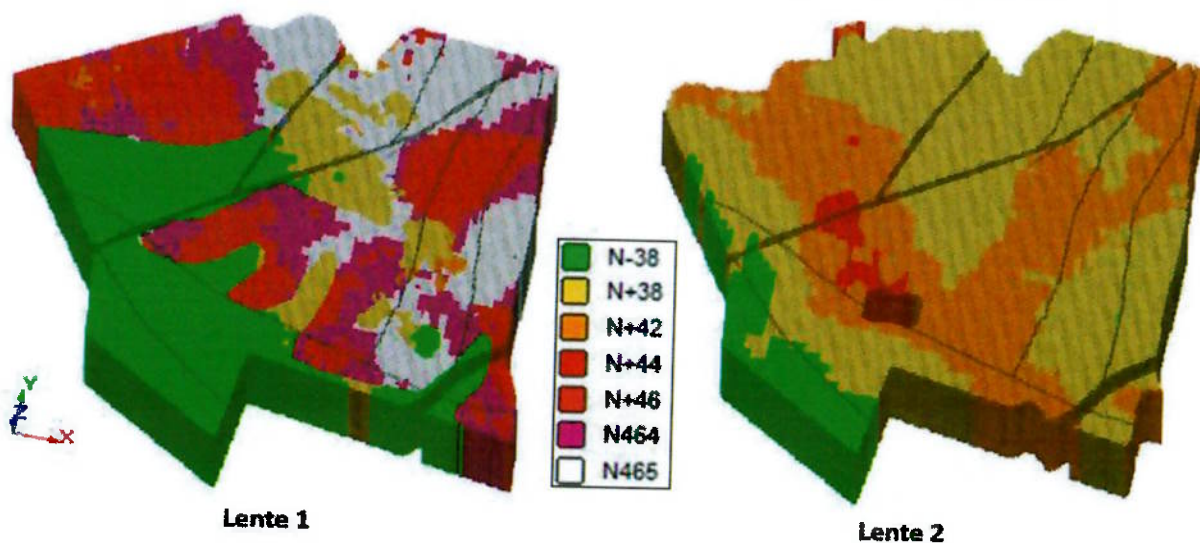


Fonte: Arquivo próprio

4.2 MODELOS DE BLOCOS UTILIZADOS

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados modelos de blocos 2D de longo prazo, conforme citado anteriormente e mostrado na Figura 6 a seguir, categorizado por intervalos de teor de manganês contido e relação Mn/Fe existente em seus blocos. As categorias de legenda foram baseadas nos produtos que a companhia mineradora deve oferecer a seus clientes a fim de que possa cumprir com seus contratos de fornecimento de minério.

Figura 6 - Modelos de Blocos 2D de longo prazo, colorido por categoria de material



Fonte: Arquivo próprio

As categorias adotadas estão baseadas nas classificações mostradas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1: Classificação dos produtos por teor e relação Mn/ Fe

| Classificação | Categoria (Legenda) | Mn (%) | Mn/Fe |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------|
| Alto Teor | N464 | Teor \geq 46 | > 5 |
| Médio e Baixo Teor | N+46 | Teor \geq 46 | < 5 |
| | N+44 | $44 \leq \text{Teor} < 46$ | |
| | N+42 | $42 \leq \text{Teor} < 44$ | |
| | N+40 | $40 \leq \text{Teor} < 42$ | |
| | N+38 | $38 \leq \text{Teor} < 40$ | |
| Estéril | N-38 | Teor < 38 | - |

Fonte: Arquivo próprio

4.3 DESENHO DAS GALERIAS E DOS PILARES

4.3.1 Parâmetros utilizados

Para a realização dos desenhos das galerias e dos pilares, foram utilizados parâmetros geotécnicos e operacionais, obtidos com departamentos da empresa como o de mecânica de rochas e o de produção. A Tabela 2 mostra as dimensões dos pilares necessárias para diferentes profundidades e alturas de escavação.

Tabela 2: Dimensões dos Pilares baseados na profundidade e na altura da galeria

| Profundidade | Dimensões dos pilares para cada altura de escavação em determinada profundidade (m) | | | | | |
|--------------|---|-----|-------|-----|-------|-----|
| | Altura: 3,5 m | 4 m | 4,5 m | 5 m | 5,5 m | 6 m |
| 200 a 249 m | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 250 a 299 m | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 300 a 349 m | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| 350 a 399 m | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 |
| 400 a 449 m | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| 450 a 499 m | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 |
| 500 a 549 m | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 |
| 550 a 599 m | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 |
| 600 a 649 m | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 |
| 650 a 699 m | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 |
| 700 a 749 m | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 10 |

Fonte: Arquivo próprio

As dimensões planejadas para as galerias são baseadas em aspectos geotécnicos e em parâmetros operacionais, como por exemplo nos tamanhos dos equipamentos utilizados na operação da mina. As dimensões das galerias escolhidas estão mostradas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Dimensões das galerias

| Dimensões planejadas de galerias | Manganês | |
|---|--|------------|
| | Altura da galeria do Salão (m) | 4,5 |
| | Largura da galeria do Salão (m) | 8 |
| | Avanço por detonação (m) | 3,8 |
| | Estéril | |
| | Altura da galeria do Salão (m) | 4,5 |
| | Largura da galeria do Salão (m) | 6 |
| | Avanço por detonação (m) | 3,8 |

Fonte: Arquivo próprio

4.3.2 Escolha das dimensões das galerias, dos pilares e dos salões de produção

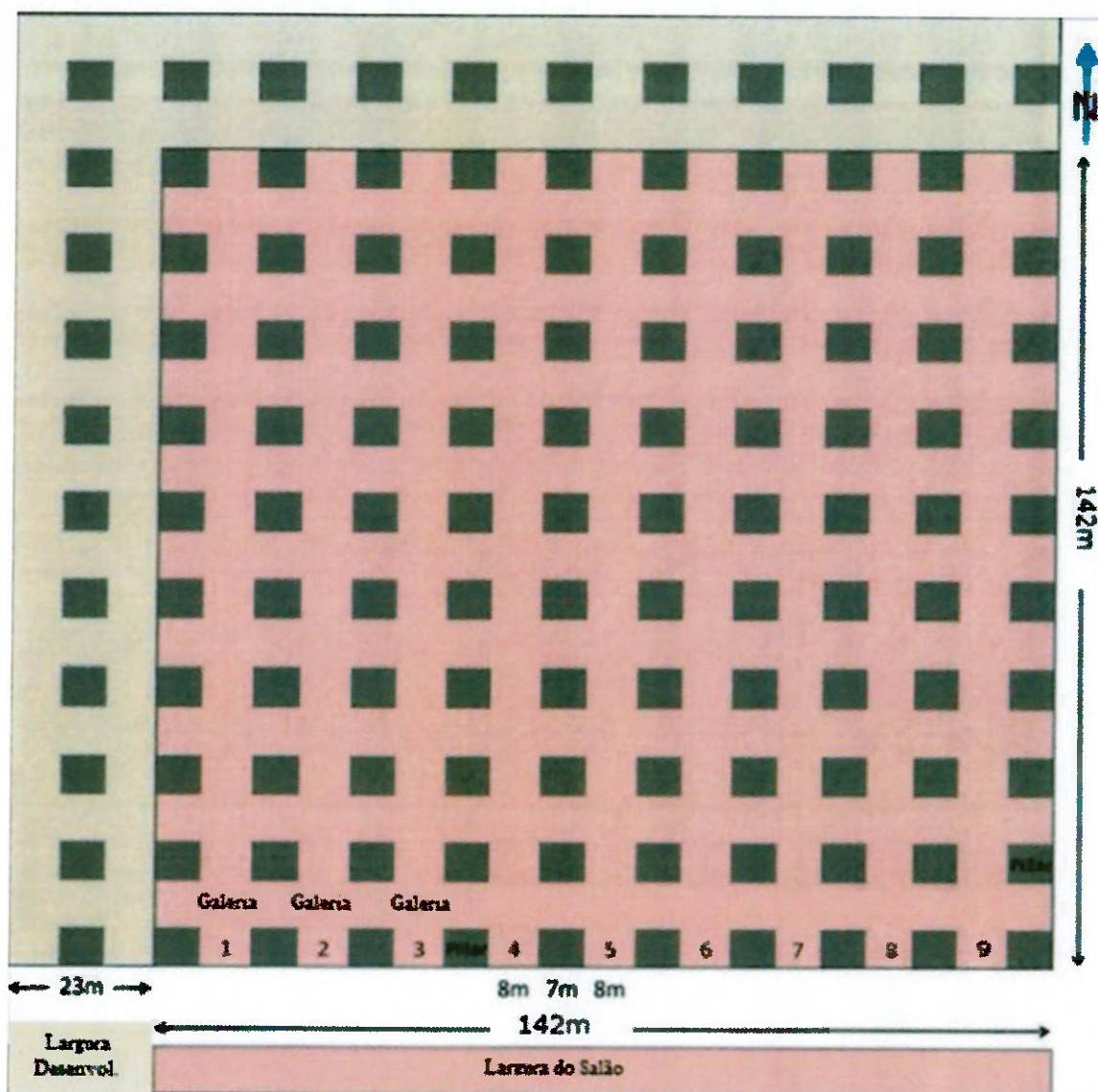
Baseando-se nas informações contidas na Tabela 2 e na Tabela 3 e sabendo-se que o corpo de minério em questão localiza-se entre 500m e 600m de profundidade, adotou-se o desenho de galerias de desenvolvimento e de produção (salão) seguindo o modelo mostrado na Figura 7, com galerias de 8m de largura, por 4,5m de altura e pilares quadrados de 7m por 7m.

Com as dimensões das galerias e dos pilares definidas, foi realizada uma reunião com o setor de produção da mina que em conjunto com o setor de planejamento, definiram as dimensões dos salões de produção. Essas dimensões foram escolhidas, através de cálculos juntamente com a experiência de operação e o conhecimento do maciço que o setor de produção possuía. As dimensões de um salão padrão ficaram definidas como sendo 142m de largura por 142m de comprimento, contendo 10 pilares e 9 galerias em ambas as direções, conforme pode ser observado na Figura 7.

Cada salão de produção é rodeado nos quatro cantos, por galerias de desenvolvimento.

Estruturalmente as galerias de desenvolvimento e de produção são idênticas, porém, há uma separação estratégica entre elas, que será explicada quando forem abordados o planejamento e o sequenciamento de lavra.

Figura 7: Representação de um salão completo padrão



Fonte: Arquivo próprio

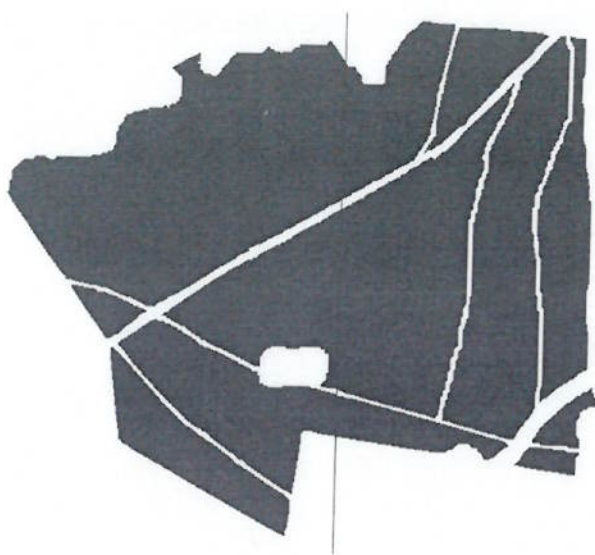
4.3.3 Desenho das galerias de desenvolvimento e dos salões de produção

Com as dimensões de galerias, pilares e salões definidos, deu-se início ao desenho das galerias. Conforme citado anteriormente, as dimensões das galerias de desenvolvimento e de produção são idênticas, porém, neste momento seus conceitos de desenho serão abordados de maneiras diferentes.

As galerias foram desenhadas inicialmente em um plano e posteriormente projetadas na lente de minério.

Todo o desenho das galerias de desenvolvimento teve início com uma única linha Norte-Sul, mostrada na Figura 8 que representa o meio de uma galeria e foi submetida a diversos processos, que estão descritos a seguir.

Figura 8: Linha base utilizada para o desenho de todas as galerias de desenvolvimento

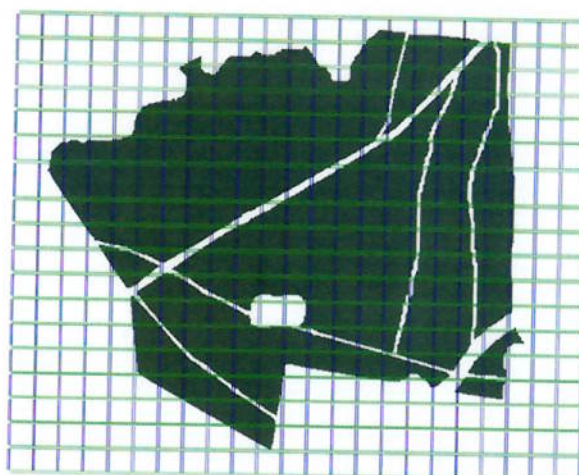


Fonte: Arquivo próprio

1. Definiu-se os limites laterais de cada salão, gerando-se cópias paralelas da linha inicial posicionadas 165m distantes umas das outras.
2. As linhas geradas anteriormente são copiadas e transladadas paralelamente às originais em 15m, gerando-se assim as galerias duplas de desenvolvimento na direção Norte-Sul, conforme ilustrado anteriormente na Figura 7.
3. A partir da linha base original, rotaciona-se uma cópia em 90°, que servirá de base para o desenho das galerias de desenvolvimento Leste-Oeste.
4. Analogamente ao que se foi feito às linhas Norte-Sul, criam-se cópias paralelas e distantes de 165m umas das outras.
5. Analogamente ao item 2, geraram-se linhas paralelas distantes de 15m entre si, para que as galerias de desenvolvimento duplas fossem representadas na direção Leste-Oeste.
6. Ao final deste processo, as posições das galerias de desenvolvimento foram ajustadas manualmente de maneira que aspectos geológicos fossem respeitados e as frentes de lavra já existentes pudessem ser aproveitadas. As frentes de lavra que se encontravam deslocadas da posição desejada para uma galeria de desenvolvimento, foram tratadas como galerias de produção, que serão melhor detalhadas mais a frente neste trabalho.

Após estas 6 etapas, obteve-se uma grade planar, contendo as galerias de desenvolvimento corretamente posicionadas nos eixos X e Y, conforme pode ser observado na Figura 9 a seguir.

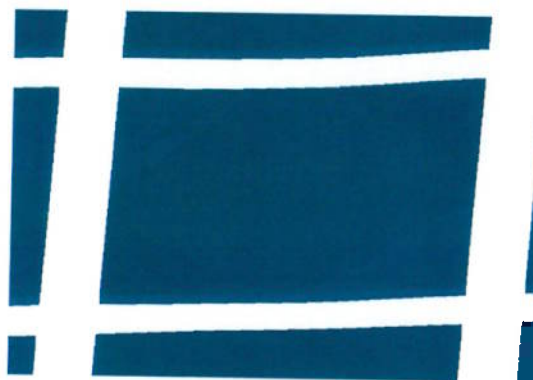
Figura 9: Grade planar representando as galerias de desenvolvimento



Fonte: Arquivo próprio

Diferentemente das galerias de desenvolvimento que foram desenhadas uma a uma, as galerias de produção foram representadas aglomeradas por unidades de salão, conforme observa-se na Figura 10. Nesta estratégia de representação dos salões, os volumes de escavação das galerias de produção não conseguem ser obtidos de forma direta, pois o desenho não diferencia galerias de pilares, dentro do salão. A alternativa encontrada para a obtenção dos volumes de escavações a serem feitas por salão, foi aplicar um fator de desconto ao valor do volume total do salão, este valor e a maneira como ele foi obtido, serão discutidos futuramente, quando forem demonstradas as estratégias de lavra.

Figura 10: Representação dos salões



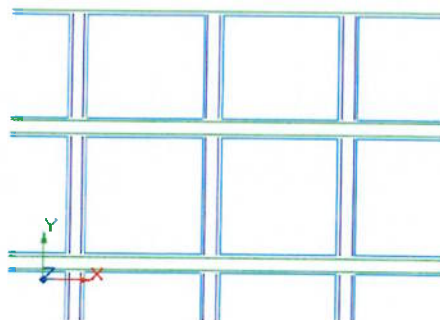
Fonte: Arquivo próprio

Assim como as galerias de desenvolvimento, os salões foram desenhados em um plano para posteriormente serem projetados à lente de minério. Os salões foram desenhados baseados nas linhas das galerias de desenvolvimento já existentes, seguindo os seguintes passos:

1. Criou-se uma cópia de todas as linhas Norte-Sul, as linhas duplas mais a leste foram transladadas paralelamente 4m para direita e as duplas mais a oeste foram transladadas paralelamente 4m para esquerda.

2. Criou-se uma cópia de todas as linhas Leste-Oeste, as linhas duplas mais ao sul foram transladadas paralelamente 4m para baixo e as linhas duplas mais ao norte foram transladadas paralelamente 4m para cima.
3. Ao serem transladadas da maneira indicada nos itens 1 e 2, as linhas geradas se interceptam nos vértices dos salões, dessa maneira, as linhas foram cortadas nestes vértices e deram origem aos quadriláteros planares que futuramente serão as representações dos salões, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11: Desenho das galerias de desenvolvimento e dos salões planares

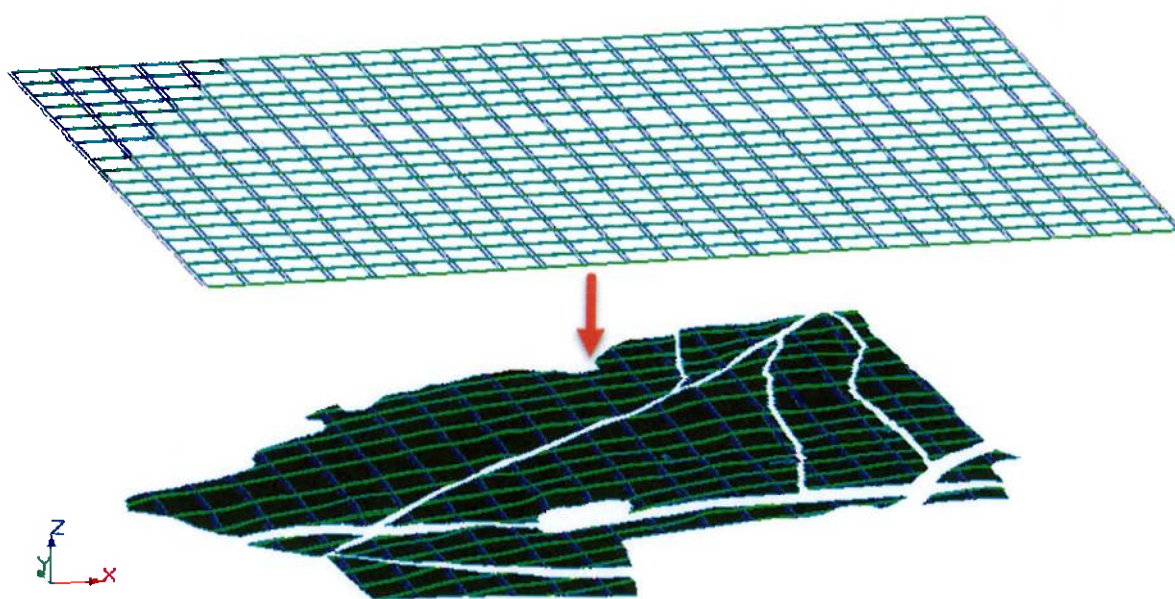


Fonte: Arquivo próprio

4.3.4 Projeção dos desenhos planares na lente de minério

Após desenhar-se as linhas referentes às galerias de desenvolvimento e aos salões em um plano, deve-se projetá-las nas lentes de minério, para que sua posição fique condizente com as escavações a serem realizadas. As linhas planares foram projetadas na lente de minério, conforme pode ser observado na Figura 12 a seguir.

Figura 12: Projeção das linhas planares na lente de minério



Fonte: Arquivo próprio

4.3.5 Retirada das áreas já lavradas

Após se projetar as linhas no corpo de minério, deve-se retirar do arquivo as áreas onde já ocorreu a lavra, para isso, projeta-se na lente de minério o arquivo das áreas lavradas. Após se realizar a projeção, combina-se o arquivo das áreas lavradas com os arquivos das galerias, gerando-se assim um arquivo com as áreas lavráveis, representado na Figura 13 a seguir.

Figura 13: Desenho em linhas da área lavrável



Fonte: Arquivo próprio

4.3.6 Transformação das linhas em sólidos tridimensionais

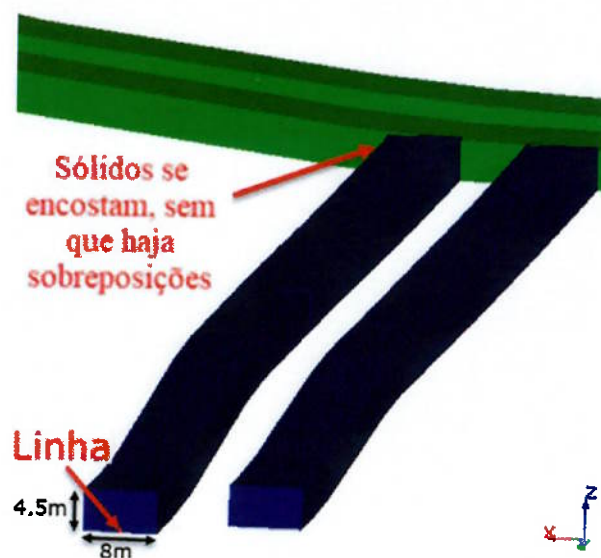
A partir das linhas desenhadas anteriormente, geram-se sólidos tridimensionais que representam as galerias de forma fiel. As linhas foram desenhadas com espaços entre si, para que não houvesse sobreposição dos sólidos tridimensionais ao se realizar a expansão das linhas.

Seguindo-se os parâmetros listados anteriormente na Tabela 3, a partir de cada uma das linhas que representam as galerias de desenvolvimento formam-se sólidos com seções transversais iguais às mostradas na Figura 14. Devido ao fato do sólido que representa a lente de minério estar posicionada na parte inferior ou no pé do corpo de minério, as linhas por terem sido projetadas na mesma, também estão localizadas no limite inferior do corpo de minério, o que implica em sua projeção para cima, conforme pode ser observado na Figura 14, ao atentar-se à posição da linha em relação ao sólido gerado.

Realiza-se um processo similar com os salões, os quadriláteros formados são expandidos verticalmente, 4,5m para cima, dessa maneira, as linhas dão origem a um sólido que representa um volume único de galerias de produção e pilares de salão, que posteriormente são

multiplicados por um fator para se obter os valores reais de volume e tonelagem de escavação a serem realizados. O resultado da expansão das linhas de salão pode ser observado na Figura 15 a seguir.

Figura 14: Expansão das linhas para gerar sólidos tridimensionais



Fonte: Arquivo próprio

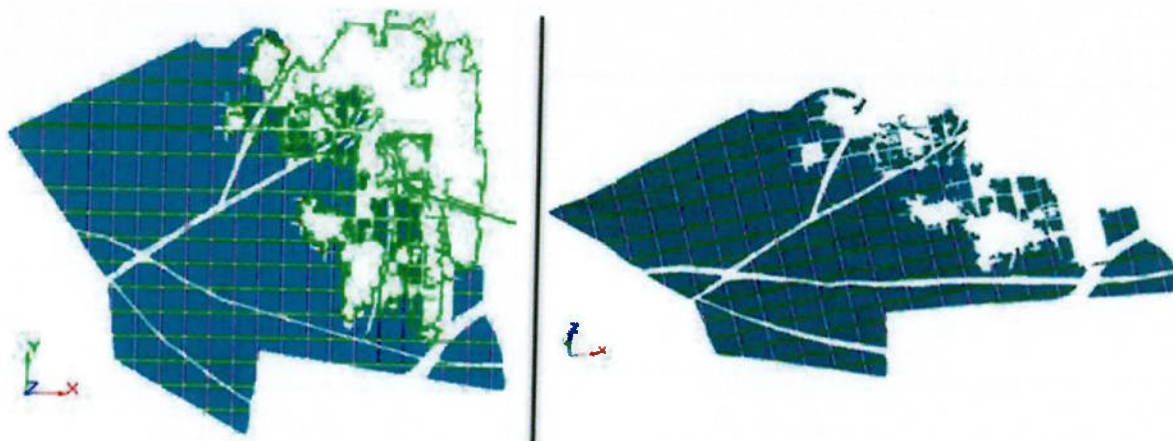
Figura 15: Expansão das linhas de salão



Fonte: Arquivo próprio

O resultado das expansões das linhas de galerias de desenvolvimento e de salões combinados pode ser observado na Figura 16. Como pode-se observar, as galerias e salões estão posicionados exatamente sobre a lente de minério.

Figura 16: Vista planar e em perspectiva das galerias e salões



Fonte: Arquivo próprio

4.4 PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO

Segundo Steffen (2005), o planejamento de lavra deve ser dividido em três categorias diferentes, o planejamento de longo, médio e curto prazos. O presente trabalho se limita à realização do planejamento de longo prazo, que segundo Silva (2008), é a etapa inicial do planejamento da mina, onde o objetivo é criar as diretrizes em que as etapas de planejamento subsequentes devem se alicerçar. Nesta etapa devem-se definir as reservas lavráveis, a capacidade de produção remanescente da mina e os requisitos de infraestrutura

O planejamento de uma mina deve ser baseado em metas de produção a serem entregues ao mercado consumidor, limitado por suas restrições. As restrições podem ser de diversos tipos, como por exemplo, físicas, geológicas, legais, da força de trabalho, entre outras.

4.4.1 Metas de produção

Conforme citado anteriormente, um planejamento de lavra necessariamente está atrelado às metas de produção, neste caso em estudo, as metas de produção são determinadas para os 5 primeiros anos, e simula-se uma produção constante do 5º ano em diante. As metas de produção se encontram na Tabela 4, conforme pode ser observado, o objetivo da mineradora é alcançar uma produção de 2M de toneladas de produto anualmente dentro de 5 anos, inicialmente lavrando apenas a lente superior e gradativamente ir completando a produção com a lente inferior de minério.

Tabela 4: Metas de produção

| Produção (t) | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Alvo | Ano 1 | Ano 2 | Ano 3 | Ano 4 | Ano 5 | Ano 6-Exaustão |
| Lente 1 | 1.760.000 | 1.800.000 | 1.900.000 | 1.950.000 | 2.000.000 | 2.000.000 |
| Lente 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Fonte: Arquivo próprio

4.4.2 Restrições

Conforme citado anteriormente, algo que se deve levar em consideração ao se realizar o planejamento de lavra são as restrições oriundas de diversas fontes. Neste exemplo de aplicação, a geologia do local é aproximadamente horizontal, com inclinações máximas de 5°, o que permite uma lavra sequencial, sem maiores complicações e as liberações legais já estão concedidas. Sendo assim, uma das principais restrições a se considerar neste caso será a limitação da quantidade de equipe de trabalho e de seus avanços diários. Suas capacidades máximas estão mostradas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Descrição das capacidades de produção por equipe de trabalho

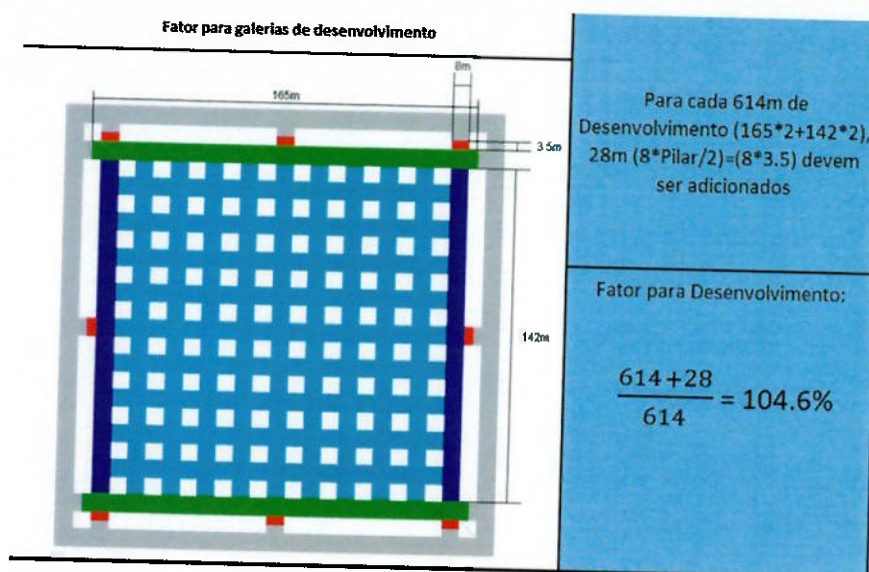
| Ano: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Avanço em metros/detonação (m/dt) | 3.60 | 3.70 | 3.70 | 3.70 | 3.70 |
| Número de equipes disponíveis | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| Detonações/dia em salões (dt/d) (média) | 1.87 | 1.87 | 1.87 | 2.00 | 2.00 |
| Detonações/dia em Desenvolvimento (dt/d) (média) | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 |
| Tempo dedicado a salões (%) | 70% | 70% | 70% | 70% | 70% |
| Tempo dedicado a desenvolvimento (%) | 30% | 30% | 30% | 30% | 30% |
| Avanço/dia (m) (média) | 17.59 | 17.59 | 17.59 | 18.50 | 18.50 |

Fonte: Arquivo próprio

4.4.3 Estratégias de desenhos das galerias

As galerias de desenvolvimento têm por objetivo abrirem frentes de lavra para que posteriormente possam ser lavradas galerias de produção, que possuem um avanço em linha reta mais lento. Para que o avanço em linha reta das galerias de desenvolvimento seja ainda mais rápido, opta-se por não serem abertas conexões entre as galerias duplas citadas anteriormente a cada 8m, como deverá ser ao final da vida da mina. Ao invés disso, opta-se por abrirem conexões a cada 71m, ou seja, apenas uma conexão entre as galerias de desenvolvimento é realizada por salão, nesta etapa de abertura de frentes. O desenho e os fatores utilizados estão demonstrados na Figura 17 a seguir, onde as galerias de desenvolvimento estão representadas em verde e roxo, e as conexões que devem ser adicionadas encontram-se representadas em vermelho.

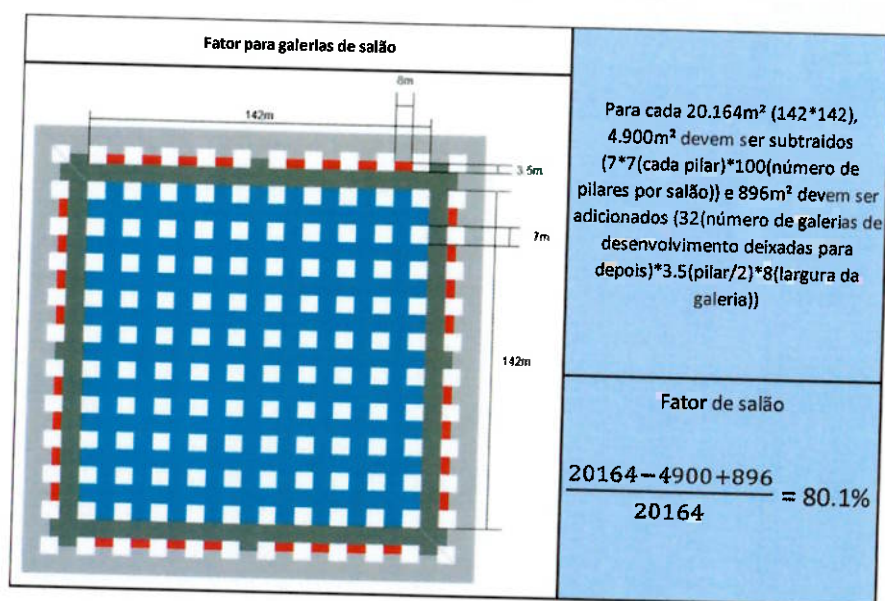
Figura 17: Cálculo do fator de galerias de desenvolvimento



Fonte: Arquivo próprio

Conforme citado anteriormente e mostrado na Figura 15, os salões são representados de maneira integral, sem distinção entre galerias e pilares, o que gera um volume direto irreal de escavações a serem realizadas. Para que o valor correto de volume e consequentemente de tonlagem das escavações seja obtido, deve-se realizar um cálculo de maneira análoga ao que se foi realizado para as galerias de desenvolvimento, que se encontra detalhado na Figura 18 a seguir, onde as galerias de produção estão representadas em azul claro, os pilares que deverão ser descontados se encontram vazios e os seguimentos de conexão das galerias de desenvolvimento remanescentes se encontram em vermelho.

Figura 18: Cálculo do fator de galerias de salão

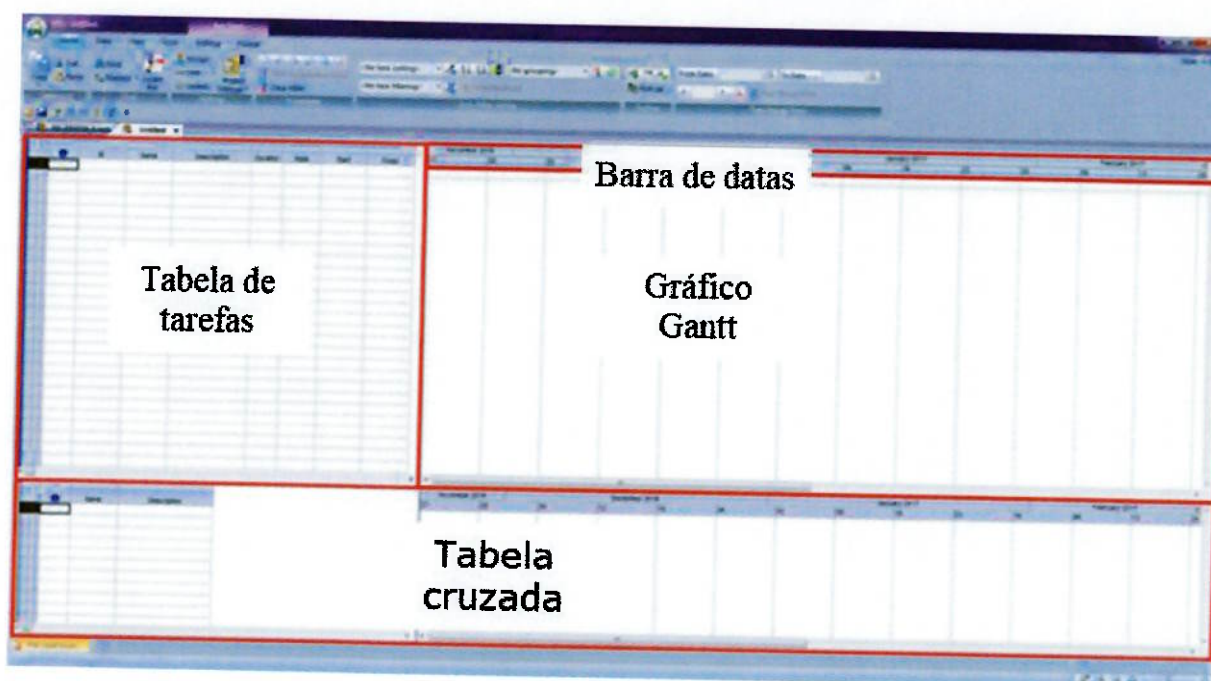


Fonte: Arquivo próprio

4.4.4 Etapas de sequenciamento

Após a realização dos desenhos baseados nas estratégias e restrições citadas anteriormente, inicia-se o sequenciamento de lavra. Para esta etapa do projeto, utilizou-se um segundo *software*, especializado em sequenciamento de lavra, sua estrutura é similar à de outros *softwares* de gerenciamento de projetos, como pode ser observado na Figura 19, porém em sua estrutura existe uma ligação direta com o *software* utilizado para o desenho das galerias, o que o torna uma poderosa ferramenta de iteratividade entre o desenho da mina com o sequenciamento de lavra.

Figura 19: Estrutura do *software* de sequenciamento



Fonte: Arquivo próprio

Primeiramente, exportaram-se todos os sólidos que representavam as galerias de desenvolvimento e os salões, já com as ligações referentes às restrições físicas e estratégicas citadas anteriormente. Após se exportar esses dados, realiza-se a importação dos mesmos no *software* de sequenciamento. No *software* de sequenciamento, a fim de se obter uma sequência temporal dos acontecimentos, limitados pelas restrições citadas anteriormente, realizam-se as seguintes etapas:

1. Aplicam-se os fatores mostrados na Figura 17 e na Figura 18 às respectivas tarefas.
2. Cadastra-se no *software* as equipes de trabalho com suas respectivas produtividades e restrições.
3. Designam-se as equipes de trabalho às tarefas, de acordo com suas localizações, disponibilidades e estratégias adotadas.

4. Colocam-se as metas de produção a serem obtidas ano a ano, conforme mostrados na Tabela 4.
5. O *software* é colocado para rodar e gera o melhor cenário possível do ponto de vista de valor presente líquido, seguindo as restrições impostas.
6. Analisa-se o cenário gerado e se decide entre utiliza-lo ou incluir mais restrições a fim de se obter um cenário melhor do ponto de vista operacional.
7. A etapa 6 é repetida até se obter um cenário satisfatório do ponto de vista financeiro e operacional.

Após a realização destas 7 etapas, tem-se o resultado final do presente exemplo de aplicação, que será exposto e discutido a seguir.

5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Após a realização de todas as etapas anteriormente citadas neste trabalho, os resultados do planejamento e sequenciamento de lavra foram obtidos.

Deve-se destacar que diferentes sequenciamentos foram realizados, totalizando 7 cenários gerados e comparados entre si, para que dentre as opções existentes, a equipe de planejamento da Mina pudesse escolher a melhor opção que atendesse as necessidades da empresa. No presente trabalho, apenas os resultados obtidos no planejamento final escolhido são expostos, pois estes serão os dados utilizados como base para as etapas seguintes do planejamento.

Conforme pode ser observado no gráfico de perfil de produção contido na Figura 20, as metas de produção mostradas anteriormente na Tabela 4 foram alcançadas.

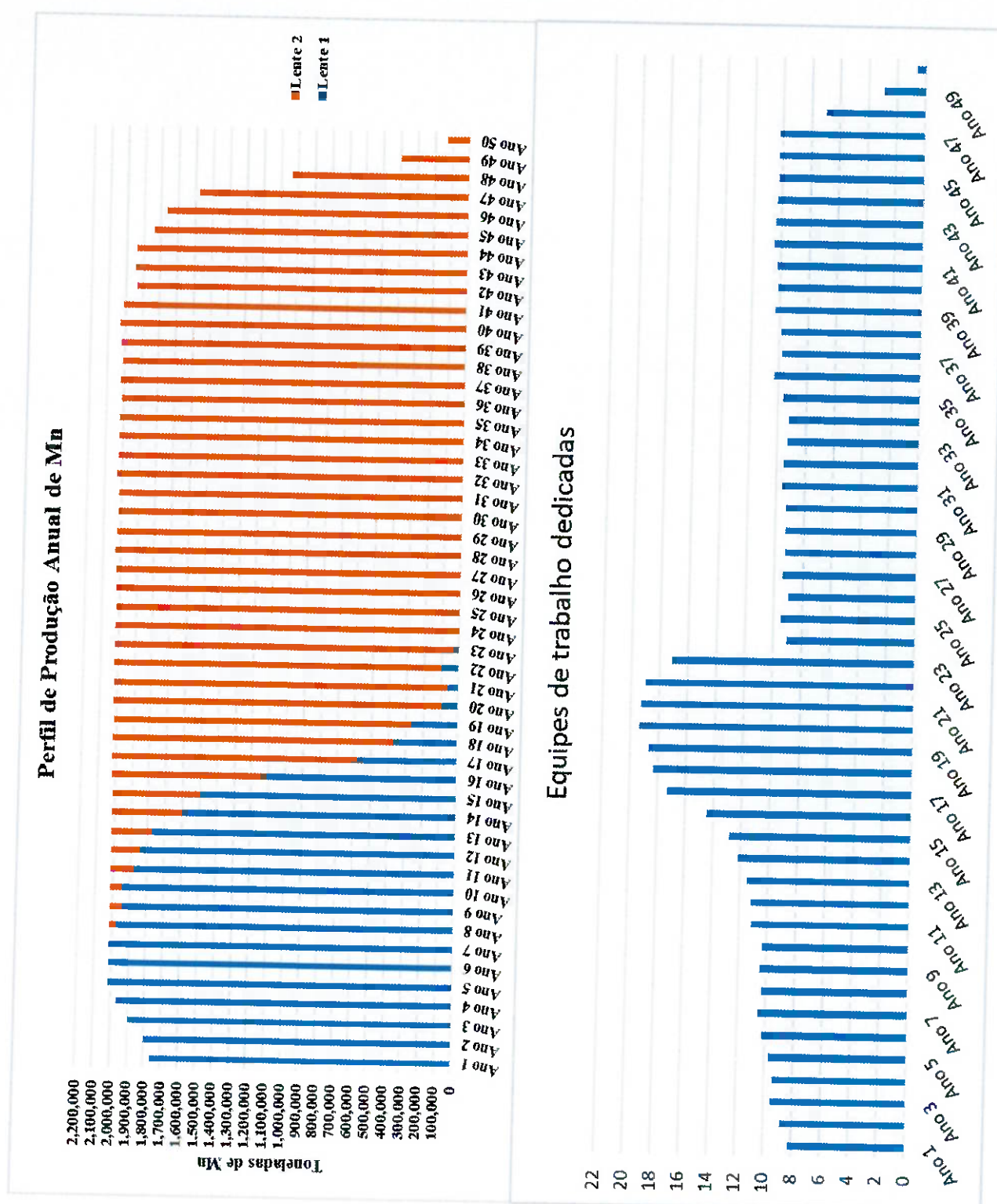
Porém, para que seja possível dizer que o planejamento e o sequenciamento de lavra obtiveram sucesso, deve-se observar também se as restrições foram respeitadas. Conforme podemos observar no gráfico de equipes dedicadas à lavra contido na Figura 20, o limite de 10 equipes trabalhando simultaneamente não está sendo respeitado. Sendo assim, uma decisão teve de ser tomada, ou a meta de produção deveria ser reduzida a partir do ano 11, ou o planejamento e sequenciamento deveriam ser realizados novamente ou então um número maior de trabalhadores deveria ser contratado ou então alocado de outras áreas para que a meta de produção possa ser atingida.

Neste caso, optou-se por a partir do 11º ano alocar ou contratar mais equipes para suprir a necessidade de mão de obra requerida no local em estudo, sendo assim, optou-se por se manterem as metas de produção, o planejamento e o sequenciamento de lavra realizados.

Os sequenciamentos de cada uma das lentes de minério coloridos por ano de lavra estão expostos na Figura 21 e na Figura 22.

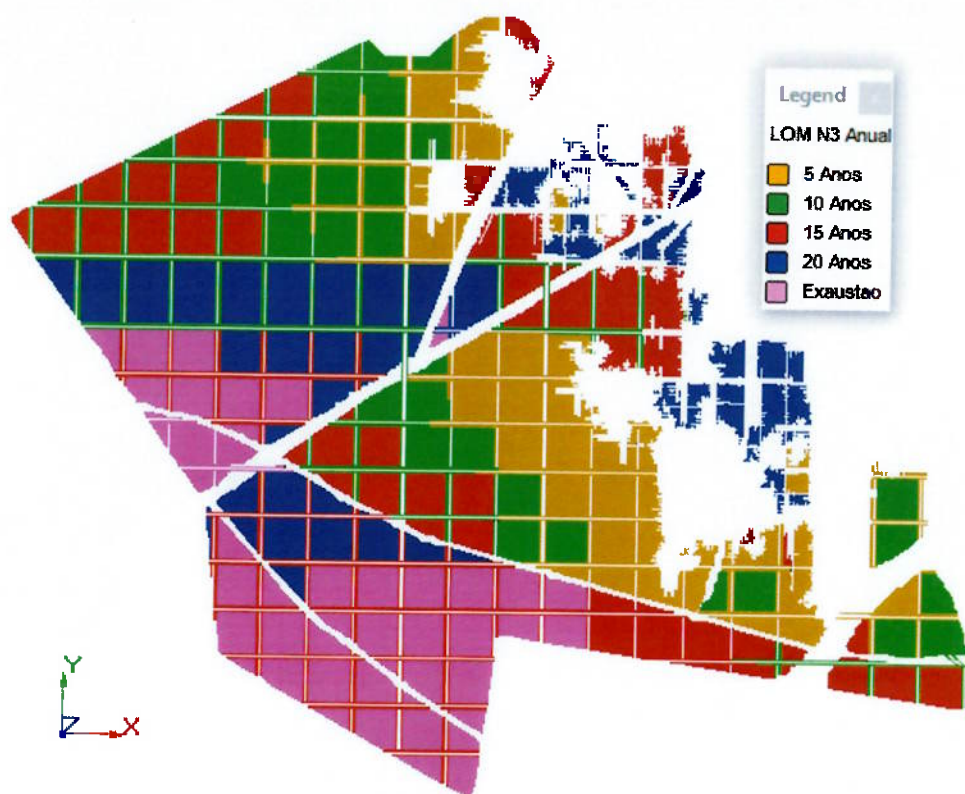
Pode-se observar na Figura 21 e na Figura 22 que os salões seguem em sua grande maioria, as dimensões padrões estabelecidas anteriormente, porém, existem exceções, que por motivos geológicos, estruturais ou por questões estratégicas, como por exemplo, se aproveitar as escavações pré-existentes como guias para as galerias de produção, não seguem a grade regular.

Figura 20: Gráfico do perfil de produção de Mn e a quantidade de equipes dedicadas aos trabalhos nas duas lentes combinadas



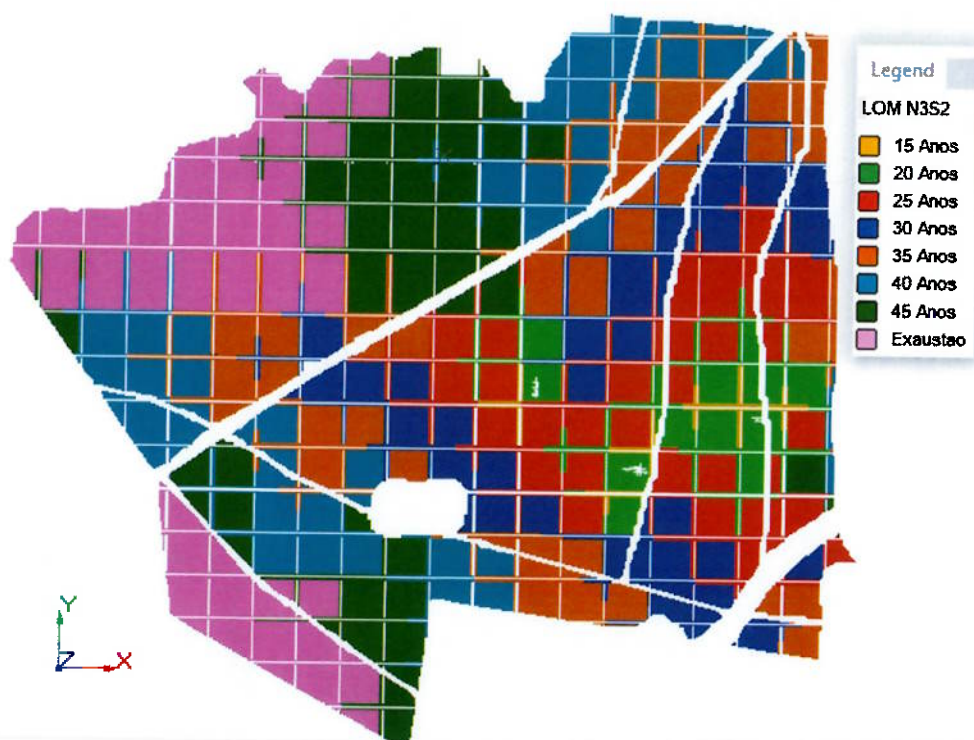
Fonte: Arquivo próprio

Figura 21: Sequenciamento de lavra da lente 1, colorido por períodos de 5 anos



Fonte: Arquivo próprio

Figura 22: Sequenciamento de lavra da lente 2, colorido por períodos de 5 anos



Fonte: Arquivo próprio

6 CONCLUSÕES

Para que um planejamento e um sequenciamento de lavra seja realizado, deve-se adotar uma metodologia que atenda aos objetivos estabelecidos pela mina. Neste exemplo de aplicação, foi necessária uma mudança na metodologia que estava sendo aplicada até o momento, que apenas foi possível com o apoio do setor de operação da mina. A nova metodologia desenvolvida, e aplicada obteve resultados satisfatórios dentro dos objetivos desejados.

O principal foco deste trabalho era atingir a meta de produção anual de 2 milhões de toneladas de manganês dentro de um período de 5 anos e mantê-la constante pelo maior período de tempo possível, objetivo este que foi alcançado, resultando em um acréscimo de 14% na produção anual de produto.

Este exemplo de aplicação teve como limitações os parâmetros operacionais da mina, porém, para que o principal objetivo, a meta de produção, fosse alcançado, o limitante do número de trabalhadores operando na mina teve de ser reajustado, a partir do momento em que ambas as lentes entram em operação conjunta, a quantidade de trabalhadores deverá ser dobrada a fim de se atingir as metas de produção.

Conclui-se, portanto que a metodologia aplicada é adequada ao problema, conseguindo resultados desejados para as metas de produção, principalmente dentro dos primeiros 5 anos de operação, que são o foco para as próximas etapas de planejamento de médio e curto prazo, porém o presente exemplo de aplicação, mostra que será necessário um plano para se contratar mais equipes de trabalho a longo prazo. Além dos pontos citados anteriormente, aconselha-se a realização novos estudos de longo prazo a partir do momento que informações atualizadas sejam incorporadas ao presente Modelo de Blocos, criando assim uma nova situação a ser estudada.

7 REFERÊNCIAS

- Szwilski, A.B. 1987. **Advantages of Strategic Mine Planning**. Department of Mining Engineering, College of Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY (U.S.A.)
- Cannon, W.F., and Force, E.R., 1986, **Descriptive model of sedimentary Mn**: U.S. Geological Survey Bulletin 1693, p. 231.
- Comissão Brasileira de Recursos e Reservas (CBRR). **Guia CBRR para declaração de resultados de exploração, Recursos e Reservas Minerais**, Brasília, DF, Brasil (2016).
- Datamine. **Material de Treinamento, Studio 5D Planner**. Johannesburg, África do Sul (2016).
- Datamine. **Material de Treinamento, Enhanced Production Scheduler. (EPS)**. Johannesburg, África do Sul (2016).
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), **Proposta para Atualização dos Conceitos de Recursos e Reservas Minerais no Brasil**, Brasil (2015).
- Dunbar, W.S., Dessureault, S., and Scoble, M., 1998, “**Modeling of flexible mining systems**,” 100th Annual General Meeting, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Quebec, 8 pp.
- Fouet, T., Riske, R., Morley C., Cook C., Conti D. and Centofanti J. 2009. **Standardising the reconciliation factors required in governance reporting**: Proc. 7th Int. Mining Geol. Conf., Perth WA, August, AusIMM, 127–139.
- Kato, M. S. **Estudo de planejamento de mina subterrânea**. São Paulo, 2007. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 2007.
- Krantz D., and Scott, T., 1992, “**Hard-rock mining: Method selection summary**,” Chapter 21.3, SME Mining Engineering Handbook, Second Ed., Vol. 2, pp. 1850-1853.
- Henderson, R & Turek, C. 2013, **Mine planning best practice at Kinross Gold, Mining Technology**, 122:2, 86-93, DOI: 10.1179/1743286313Y.0000000041
- Sharma, P. D. **Mine Planning and Sheduling – Smart Practices**. Bangalore, 2011. Disponível em <<https://miningandblasting.wordpress.com/2011/08/30/mine-planning-and-scheduling-smart-practices/>>
- Silva, N. C. S. **Metodologia de Planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. São Paulo, 2008 – Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 2008.

- Smith, L.D., 1995, "**Discount rates and risk assessment in mineral project evaluation,**" Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin, 88, No. 989, pp. 34-43.
- Steffen, O.; **Planning of Open Pit Mines.** In: Australian Centre for Geomechanics, CSIRO, Curtin University and University of Western Australia, Austrália, 2005.
- Summers, J., 2000, "**Analysis and management of mining risk,**" MassMin 2000, Brisbane, Qld, 29 Oct.-2 Nov., pp. 63-79.
- Kazakidis, V.N. and Scoble, M., 2003. **Planning for flexibility in underground mine production systems.** University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada. Nonmeeting paper number 02-310, November 2003.
- Worth, D.J., and Haystead, B., 1990, "**How banks assess mineral properties and companies,**" Canadian Imperial Bank of Commerce, December, 9 pp.
- Yamamoto, J. K., 2016. **Apostila do Curso de Geoestatística Aplicada para Engenharia de Minas,** IGCUSP, São Paulo 2016.