CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

CAMPUS ARAXÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

MESTRADO PROFISSIONAL

Kely Sehn da Costa

SEQUENCIAMENTO MATEMÁTICO DE CURTO PRAZO ESTABILIZANDO TEORES ENTRE PILHAS DE MINÉRIO

Araxá, MG

2025

KELY SEHN DA COSTA

SEQUENCIAMENTO MATEMÁTICO DE CURTO PRAZO ESTABILIZANDO TEORES ENTRE PILHAS DE MINÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos

Coorientadores: Dr. Luciano Nunes Capponi

MSc. Leandro Dias da Silva

Linha de pesquisa: Planejamento de Lavra

Araxá, MG

2025

Costa, Kely Sehn da
C838s Sequenciamento matemático de curto prazo estabilizando teores entre pilhas de minério / Kely Sehn da Costa. – 2025.
85 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos.
Coorientadores: Prof. Dr. Luciano Nunes Capponi.
Prof. MSc. Leandro Dias da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2025.
Bibliografia.

1. Minas e Mineração – Planejamento – Teses. 2. Lavra de Minas – Teses. 3. Sequências (Matemática) – Teses. 4. Programação linear Teses. I. Santos, Allan Erlikhman Medeiros. II. Capponi, Luciano Nunes. III. Silva, Leandro Dias. IV. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. V. Título.

CDU 622.2

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas, em ter novos olhos.”

(Marcel Proust)

RESUMO

O planejamento de lavra é um processo complexo que envolve a tomada de decisões estratégicas para a extração eficiente de recursos minerais considerando diversos fatores buscando em alguns casos, maximizar o valor econômico do empreendimento. Estabilizar teores entre pilhas de minério é uma prática fundamental para otimizar o processo de beneficiamento garantindo a qualidade do produto. Dentre os benefícios da estabilização de teores estão, a melhoria do controle do processo de beneficiamento, o aumento da recuperação mineral, a melhoria da qualidade do produto, a sustentabilidade do empreendimento. A estabilização de teores possibilita o aproveitamento de materiais com diferentes características mineralógicas, a redução dos custos no beneficiamento e redução da variabilidade entre pilhas de minério garantindo uma operação mais segura. Esse estudo está sendo realizado em uma mina de pirocloro, situada em Minas Gerais, que atua na extração e beneficiamento do minério bem como no processo de metalurgia. O trabalho tem como objetivo principal verificar a eficácia da utilização de um sequenciador matemático baseado em programação matemática para confeccionar pilhas de minério buscando reduzir a variabilidade no teor de nióbio e recuperação metalúrgica entre elas sem penalizar os teores médios das demais variáveis de controle. Para isso, foram realizados testes comparativos entre o método manual aplicado usualmente e o método automatizado utilizando o sequenciador matemático. Os polígonos utilizados para as análises comparativas foram os mesmos em ambos os métodos aplicados. O tempo para confecção dos planos de lavra mensais foi reduzido em aproximadamente 60% com a aplicação da metodologia. A redução da variabilidade entre as pilhas obtida com o uso da ferramenta contribuiu para a maior aderência de aproximadamente 95.81% para o plano manual versus 98,9% para o método otimizado, respectivamente. Os resultados das análises obtidos ao final do estudo foram utilizados para apoiar a utilização do método automatizado para confecção de pilhas de minério e tornar a atividade rotineira na empresa onde o estudo foi realizado.

Palavras-chave: planejamento de lavra, curto prazo, estabilização de teores, sequenciador matemático.

ABSTRACT

Mine planning is a complex process that involves making strategic decisions for the efficient extraction of mineral resources, considering various factors and, in some cases, aiming to maximize the economic value of the enterprise. Stabilizing grades between ore piles is a fundamental practice to optimize the beneficiation process, ensuring product quality. Among the benefits of grade stabilization are improved beneficiation process control, increased mineral recovery, improved product quality, and enterprise sustainability. Grade stabilization enables the utilization of materials with different mineralogical characteristics, reduces beneficiation costs, and reduces variability between ore piles, ensuring a safer operation. This study is being conducted at a pyrochlore mine located in Minas Gerais, which is involved in the extraction and beneficiation of the ore as well as in the metallurgy process. The main objective of the work is to verify the effectiveness of using a mathematical sequencer based on mathematical programming to create ore piles, aiming to reduce the variability in niobium grade and metallurgical recovery between them without penalizing the average grades of other control variables. For this purpose, comparative tests were carried out between the usually applied manual method and the automated method using the mathematical sequencer. The polygons used for comparative analyses were the same in both applied methods. The time to create the monthly mine plans was reduced by approximately 60% with the application of the methodology. The reduction in variability between the piles obtained with the use of the tool contributed to greater adherence of approximately 95.81% for the manual plan versus 98.9% for the optimized method, respectively. The results of the analyses obtained at the end of the study were used to support the use of the automated method for creating ore piles and to make the activity routine in the company where the study was conducted.

Keywords: mine planning, short-term, grade stabilization, mathematical sequencer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Modelo de blocos conceitual 22
Figura 2.2 - Sequência de pushbacks 24
Figura 2.3 - Sequência de lavra e bancadas 26
Figura 2.4 - Lavra "Worst Case" 28
Figura 2.5 - Lavra "Best Case" 28
Figura 2.6 - Fluxograma resumido do processo de planejamento de lavra 31
Figura 2.7 - Fluxograma resumido do processo de planejamento de curto prazo 36
Figura 2.8 - Modelo típico do otimizador utilizado 44
Figura 2.9 - Esquema básico das etapas do otimizador matemático 46
Figura 2.10 -Imagem aérea da mina onde ocorre o estudo 48
Figura 2.11 - Mapa Geológico do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro 49
Figura 2.12 - Gênese do complexo alcalino carbonatítico do Barreiro 50
Figura 3.13 - Pilhas sequenciadas manualmente (Setembro 2022) 51
Figura 3.14 - Pilhas sequenciadas manualmente (Outubro 2022) 52
Figura 5.15 - Pilhas sequenciadas manualmente (Novembro 2022) 52
Figura 3.16 - Fluxograma esquemático da metodologia proposta para confecção de plano de lavra mensal subdividido em pilhas, utilizando sequenciador matemático .54
Figura 3.17 - Criação de grupos e determinação de períodos 55
Figura 3.18 - Mapeamento de destinos de material 55
Figura 3.19 -Aba de restrições 56
Figura 3.20 - Aba de definição de digllines 57
Figura 3.21 - Definição de precedências de fases 57
Figura 3.22 - Pilhas programadas pelo sequenciador matemático 58
Figura 4.23 - Pilhas sequenciadas setembro 61
Figura 4.24 - Pilhas sequenciadas outubro 62
Figura 4.25 - Pilhas sequenciadas novembro 63
Figura 4.26 - Mapa de rotas de polígono de lavra 72
Figura 4.27 - Rampa de acesso construída para redução de DMT 73
Figura 4.28 - Canaleta de drenagem 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados otimizados comparados ao método manual 60
Tabela 2- Sumário estatístico manual x cenário 01 setembro.....65
Tabela 3 - Sumário estatístico manual x cenário 01 outubro.....65
Tabela 4 - Sumário estatístico manual x cenário 01 novembro.....66
Tabela 5 - Tempo de confecção de plano de lavra método manual x método otimizado.....71
Tabela 6 - Médias de IRG método manual x método otimizado.....75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico comparativo dos erros absolutos entre método manual e automatizado.....64
Gráfico 2- Variação de volume (m^3) em setembro.....66
Gráfico 3 - Variação de volume (m3) em outubro.....67
Gráfico 4 - Variação de volume (m3) em novembro.....67
Gráfico 5 - Variação de teor de Nb_2O_5 em setembro.....68
Gráfico 6 - Variação de teor de Nb_2O_5 em outubro 68
Gráfico 7 - Variação de teor de Nb_2O_5 em novembro.....69
Gráfico 8 - Variação de recuperação metalúrgica em setembro 69
Gráfico 9 - Variação de recuperação metalúrgica em outubro 70
Gráfico 10 - Variação de recuperação metalúrgica em novembro 70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPEX – Capital de investimento

CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração

Cd – Custos diretos

Ci – Custos indiretos

Cl – Custo de lavra

CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais

DMT – Distância média de transporte

IBM – Internacional Business Machines Corporation

ILP – Otimização linear interna

IRG – Índice de recuperação global

LOM – Life of mine

MILP – Programação linear mista

MSIP – Planejador interativo minesight

OPEX – Capital de operação

PL – Programação linear

REM – Relação estéril minério

REV – Receita

VEB – Valor econômico do bloco

VPL – Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 12

1.2 JUSTIFICATIVA 14

1.3 OBJETIVO 16

1.3.1 Objetivo Geral 16

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 16

2 REVISÃO DA LITERATURA 18

2.1 Fases da mineração 18

2.1.1 Pesquisa 18

2.1.2 Exploração 19

2.1.3 Desenvolvimento 19

2.1.4 Explotação 19

2.1.5 Fechamento 20

2.2 Conceitos básicos do planejamento de lavra 20

2.2.1. Modelo de blocos 20

2.2.1 Definição do valor econômico dos blocos 22

2.2.2 Cava ótima 23

2.2.3 Definição de pushback 24

2.2.4 Otimização do teor de corte 24

2.2.5 Sequenciamento de lavra 26

2.2.6 Programação da produção 27

2.3 Planejamento de Lavra: Aspectos Gerais 29

2.3.1 Planejamento de Longo Prazo 31

2.3.2 Planejamento de Médio Prazo 32

2.3.3 Planejamento de Curto Prazo 33

2.4 O Planejamento de curto prazo em contraste com o longo prazo 34

2.5 Estacionarização de teores no planejamento de curto prazo 36

2.5.1 Métodos de otimização de curto prazo – Visão geral 38

2.5.2 Ferramentas de otimização matemática aplicadas ao sequenciamento de lavra 41

2.5.3 Otimizador automático: Visão Geral 42

2.5.4 Aspectos práticos do sequenciador matemático....45
2.6 Características gerais da área de estudo 47
2.6.1 Contexto geológico local....48
3 METODOLOGIA....50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES....59
4.1 Comparativo Resultados método manual x otimizado 66
4.2 Ganhos no tempo de planejamento 71
4.3 Ganhos operacionais de lavra....71
4.4 Ganhos no índice de recuperação metalúrgica....74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS....75
5.1 Sugestões de pesquisas futuras 77
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....78

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mineração sempre foi de grande importância para a humanidade. Os minerais estão presentes no dia a dia de todos e se tornaram imprescindíveis para a sobrevivência do ser humano. Por serem bens esgotáveis, trabalhar de forma sustentável é indispensável.

De acordo com Hartman & Mutmansky (2002), as etapas de existência de uma mina se dividem em prospecção, exploração, desenvolvimento, explotação e recuperação ou fechamento de mina.

Os planejamentos de longo e médio prazos, trabalham em horizontes de tempo maiores e tem como principal base de informações o modelo de blocos, que por sua vez é suportado pelos furos de sondagem. Para Silva (2008) essa etapa precisa ser periódica devido às mudanças econômicas, acréscimos de informações geológicas etc., que irão fornecer informações sobre a jazida. Alegações realizadas buscando interpretar teores, geologia e amostras não são suficientemente representativas.

Segundo Curi (2014), uma exploração mineral precisa ter densidade de informações abrangente e suficiente porém, sem exageros. No entanto, estes dados não são suficientes para que tenhamos precisão de lavra em períodos menores, como no curto prazo, onde se faz necessário um maior detalhamento das informações que alimentarão o banco de dados, por isso, métodos de amostragem para essa etapa geralmente são diferentes dos utilizados nas anteriores. Na empresa onde o trabalho foi desenvolvido, o banco de dados de curto prazo é alimentado por amostras obtidas através de furos de trado em uma malha de 15x15 metros onde são obtidos dois intervalos, cada um deles compostos por furos de com 5 metros de altura.

O planejamento de lavra de curto prazo é um processo crucial para a otimização das operações mineiras. Ele se concentra em um horizonte de tempo mais imediato que geralmente abrande dias, semanas ou meses e visa garantir a execução eficiente das atividades de extração de minério, priorizando a segurança, produtividade e a lucratividade. Tem como objetivos principais, a otimização da produção, a

minimização dos custos, o atendimento às demandas garantindo o atendimento à necessidade da usina, a manutenção da segurança e a mitigação dos riscos relacionados à atividade de mineração.

No planejamento de curto prazo que se concentram as atividades de seleção dos blocos de minério *(mining blocks)* que serão lavrados para alimentação das usinas de beneficiamento, que pela heterogeneidade intrínseca se faz necessário a formação de pilhas de homogeneização para reduzir a variabilidade dos teores e assim atender as demandas da usina. Decisões assertivas no planejamento e execução da lavra e a são imprescindíveis para possibilitar a sustentabilidade do empreendimento, o aumento da lavra, a redução de custo, maior previsibilidade e aumento da lucratividade. É um processo dinâmico e contínuo que deve ser ajustado periodicamente para se adaptar às diversas mudanças nas condições da mina, às demandas do mercado e aos avanços tecnológicos.

De acordo com Godoy (1998), as etapas que constituem o controle de teores são: amostragem, análise química, mapeamento geológico e estrutural, estimativa de teores de blocos, definição e demarcação dos limites de escavação e carregamento.

Uma amostragem de curto prazo confiável suporta um modelo de blocos seguro que permitirá ao planejador definir quais blocos serão lavrados de acordo com o teor recebido por cada um deles. Uma pilha de minério é composta por diferentes blocos de várias regiões da mina, essa mistura geralmente é denominada “blend”. A mistura de diferentes teores de minério traz uma série de vantagens para a operação de mineração como o melhor aproveitamento do minério, redução dos custos de beneficiamento e o aumento da flexibilidade operacional.

Na empresa onde ocorre o estudo, um plano de lavra de curto prazo é composto por várias pilhas de minério que alimentarão a usina de beneficiamento por um período de aproximadamente um mês. Quando essa seleção de blocos é realizada de forma manual a variação de teores entre pilhas tende a ser maior, pois, nem sempre é possível obter a linearidade desejada, ao longo do período de alimentação delas.

A linearidade desejada em uma usina de beneficiamento se trata da manutenção da alimentação de pilhas com menor variação possível em relação às variáveis de interesse. Quanto mais alinhada à alimentação da usina, melhor o desempenho,

menor o gasto com insumos na troca de pilhas e menor o tempo de adaptação à entrada de uma nova pilha.

Fica, portanto, a cargo do planejamento de lavra a responsabilidade de decidir sobre a lavra de blocos de diferentes teores de forma que atendam à produção da usina de beneficiamento e buscando a estabilidade de teores para diminuir sua perda de desempenho. Esta etapa pode ser tratada como uma das mais complexas e significativas de um empreendimento mineiro.

Segundo Capponi (2019), o processo de execução dos planos de lavra é realizado através de polígonos construídos manualmente nos diferentes softwares de mineração, e que os prazos geralmente curtos, não permite ao planejador realizar diferentes análises de outros cenários. O ideal é que obtenhamos planos com teores controlados e que busquem resultados otimizados para que as decisões mais adequadas sejam tomadas.

Portanto, através dessa dissertação, pretende-se realizar um estudo de caso utilizando o sequenciador matemático de um determinado software na confecção de planos de lavra de curto prazo, buscando a diminuição da variação nos teores de Nb2O5 e recuperação metalúrgica entre pilhas. Desta forma, procura-se otimizar o trabalho do planejador atendendo ao plano de produção mensal de forma mais linear na usina de beneficiamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Toledo (2018), o comum no horizonte de curto prazo é confeccionar poligonais de minério livre para a lavra buscando atender às demandas da planta levando-se em consideração vários fatores restritivos atrelados à lavra como por exemplo, fatores operacionais, ambientais e de incerteza geológica.

Conforme Andrade e Rosa (2021) os equipamentos de beneficiamento podem não operar de forma otimizada se os teores de alimentação variarem significativamente. Isso pode levar a desgastes prematuros e falhas no equipamento, aumentando os custos de manutenção.

Toledo (2018) afirma que em grande parte das situações, não é aplicada a utilização de ferramentas de otimização no horizonte de curto prazo, onde o

planejador busca o atingimento das metas de forma manual o obrigando a não cumprir completamente as metas estipuladas. Os planos de curto prazo realizados de forma manual, podem gerar resultados com grandes variações entre pilhas o que tem como consequência a queda de rendimento da planta, causando maiores custos no beneficiamento do minério e exigindo ajustes constantes na planta tanto operacionais quanto de reagentes. Entende-se, portanto, que, quanto menor a variabilidade dos teores nas pilhas maior a eficiência do processo.

Capponi (2019) ressalta que, a utilização de ferramentas que se baseiam em programação matemática é projetada para lidar com múltiplas variáveis e restrições complexas e fornece resultados mais precisos e consistentes se comparados aos métodos manuais que podem ser morosos, subjetivos e variáveis. Esses métodos são capazes de processar grandes volumes de dados encontrando soluções ótimas em um tempo menor do que manualmente, o que é especialmente importante no horizonte de curto prazo em que as decisões precisam ser rápidas e precisas para uma melhor eficiência operacional.

O ajuste da ferramenta pode ser realizado para diversos cenários e condições operacionais permitindo que a empresa adapte seu plano de acordo com as mudanças do mercado, disponibilidade de recursos e outras variáveis externas, além de maximizar o valor presente líquido. A redução de custos operacionais é outro benefício da ferramenta visto que pode resultar em operações mais econômicas e sustentáveis minimizando transporte de materiais e otimizando o uso de equipamentos e recursos.

O projeto é justificado também através da possibilidade de se obter uma maior previsibilidade referente ao minério destinado à usina em determinado período e principalmente pela redução no tempo gasto pelo planejador para confeccionar planos de lavra subdivididos em pilhas de minério que possuam entre si a menor variabilidade nos teores de Nb_2O_5 e recuperação metalúrgica.

O diferencial deste estudo é o fato de buscar tornar rotineira no curto prazo a utilização da ferramenta (sequenciador matemático) que já é amplamente empregada nos horizontes de médio e longo prazos, além de tornar o trabalho menos manual, mais produtivo, mais assertivo, otimizando assim o *blend* mais adequado das frentes de lavra atingindo de forma equalizada as metas estabelecidas pilha a pilha. Outro

diferencial do estudo está na possibilidade de realizar inúmeros cenários buscando a resposta ótima em atendimento às demandas de produção.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar estudo de caso utilizando um sequenciador matemático baseado em otimização de cronogramas que usa programação matemática inteira mista para confecção de planos de lavra mensais buscando otimizar a variabilidade nas variáveis de interesse entre pilhas de minério. Esta dissertação terá como objetivo, tratar especificamente do planejamento de curto prazo, visando verificar a eficácia da utilização de sequenciador matemático para confeccionar pilhas de minério, buscando diminuir variabilidade de teores de $\mathrm{Nb_2O_5}$ e Recuperação metalúrgica nas pilhas entre si, permitindo assim, obter planos mais acurados e assertivos, reduzindo o tempo utilizado para tal tarefa e a otimizando possíveis perdas de produção na usina de beneficiamento.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que as hipóteses desta dissertação sejam atendidas, os objetivos abaixo deverão ser atingidos. Seguem alguns passos importantes para este trabalho:

(a) examinar e realizar a revisão de conceitos fundamentais relacionados ao planejamento de lavra de curto prazo, buscando embasar o trabalho proposto;
(b) entender os conceitos e funcionamento sequenciador matemático MinePlan Schedule Optimizer® (MPSO) que utiliza programação matemática;
(c) aplicar a metodologia proposta em cenário a partir de planos pré-definidos;
(d) realizar análises comparativas entre os métodos (manual e automatizado).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em 5 capítulos que fazem parte da estrutura desse trabalho. São eles:

(i) Capítulo 1: apresenta a introdução que tem como principal foco a contextualização do problema, a hipótese investigativa, objetivos gerais e específicos e a metodologia aplicada;

(ii) Capítulo 2: traz a revisão bibliográfica com os princípios teóricos necessários para realização do trabalho e percorre conceitos importantes relacionados à geologia regional e local da mina objeto de estudo, fundamentos de planejamento de lavra, especificamente curto prazo e métodos utilizados para realização de sequenciamento de lavra;

(iii) Capítulo 3: detalha a construção e aplicação da metodologia proposta para programação de pilhas de minério;

(iv) Capítulo 4: expõe as conclusões dos resultados obtidos com o método proposto nesse trabalho e suas aplicações;

(v) Capítulo 5: traz sugestões para aplicações em trabalhos futuros oportunizando a continuidade do estudo sobre o tema buscando novos benefícios para o processo de beneficiamento de minério como um todo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo deste capítulo é explorar conceitos relevantes e fundamentais no que diz respeito ao planejamento de lavra, algoritmos e métodos de otimização de sequenciamento de lavra com enfoque especificamente em planejamento de lavra de curto prazo, que serão utilizados para embasar o estudo e a metodologia aplicada na realização dos testes necessários para a obtenção dos resultados e suas implicações práticas para os profissionais desta área.

2.1 Fases da mineração

A mineração é um processo de extração de minerais da crosta terrestre de grande importância para a economia mundial, sendo ela, fonte de matérias primas essenciais para a indústria.

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002), a mineração se divide em 4 fases. Pesquisa e exploração, desenvolvimento e explotação (lavra). Definem também a mineração como um sistema aberto, ou seja, um sistema que interage com o ambiente externo. O ambiente externo pode influenciar o Sistema de mineração de várias maneiras, como fornecendo recursos, impondo restrições e exigindo responsabilidade. As etapas da mineração são interconectadas e interdependentes. As decisões tomadas em uma fase podem afetar as fases subsequentes. A mineração é uma atividade complexa que requer um planejamento cuidadoso. As etapas da mineração devem ser cuidadosamente consideradas para garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade da operação.

2.1.1 Pesquisa

Nesta fase, Hartman e Matmansky (2002) citam que são realizadas pesquisas geológicas para identificar áreas com potencial para a ocorrência de minerais. Após a identificação de uma área promissora, são realizadas pesquisas mais detalhadas para avaliar a viabilidade econômica da mineração. Aqui, podem ser utilizadas geofísica e geoquímica a fim de definir melhor os corpos mineralizados, bem como os furos de sondagem que serão ferramentas que fornecerão informações definitivas a respeito da jazida.

2.1.2 Exploração

Na segunda fase, Hartman e Matmansky (2002) é possível definir com precisão o tamanho e valor econômico da jazida. Para obter mais informações que poderão ampliar a riqueza do depósito, podem ser realizados testes químicos, raio x, espectometria e análises radiométricas. O resultado de todos os testes e estudos realizados nessa fase é o estudo de viabilidade econômica da jazida que irá determinar o potencial de desenvolvimento do depósito e sua viabilidade de lavra.

2.1.3 Desenvolvimento

Na etapa de desenvolvimento são construídos os acessos à mina, como estradas, túneis e poços. Curi (2014), ressalta que essa etapa engloba todos os trabalhos que irão preparar a jazida para seu aproveitamento. Também são construídas as estruturas necessárias para a operação de mina, como barragens de rejeitos, instalações de beneficiamento e são dimensionados os equipamentos. Essa fase é uma etapa crítica da mineração pois, é quando a mina é preparada para a produção e as decisões tomadas podem afetar o sucesso da operação.

Hartman e Matmansky (2002) reforçam a importância de integrar o planejamento do desenvolvimento com a fase de produção de mina para garantir uma operação eficiente. O desenvolvimento da mina representa um investimento significativo e o planejamento precisa considerar cuidadosamente os custos envolvidos, bem como a segurança e meio ambiente, os métodos de monitoramento e controle que serão aplicados e os recursos adicionais necessários.

2.1.4 Explotação

Curi (2014) reforça que na fase de lavra ou explotação, se aplicam as tarefas propriamente ditas para o aproveitamento econômico da jazida, porém, levando-se em consideração a explotação segura e sustentável. Aqui serão determinadas a produtividade e lucratividade da operação. O método de lavra é escolhido de acordo com uma série de fatores que incluem tipo de minério, a profundidade da jazida, as condições geológicas e o mercado para os minerais.

Hatman e Matmansky (2002) detalham que, nessa fase o minério é extraído da mina e preparado para o mercado. É necessário e relevante considerar fatores como

a sequência de extração, o dimensionamento das áreas de lavra, a ventilação, o controle de diluição e a infraestrutura necessária. Os métodos de extração do corpo mineral serão definidos considerando aspectos geológicos, econômicos, tecnológicos e de segurança. A explotação de minas é um processo complexo e multifacetado que requer expertise em diversas áreas.

2.1.5 Fechamento

Curi (2015), define esta etapa como o final da vida útil de uma mina, que envolve a desativação das operações, a recuperação da área e o monitoramento pós-fechamento. O planejamento do fechamento é crucial para garantir a segurança, a sustentabilidade e a minimização dos impactos ambientais e sociais na mina. Esse planejamento deve levar em consideração os objetivos específicos do projeto e as características do local. O plano de fechamento deve incluir medidas para desativação das instalações, a recuperação da área, o monitoramento pós-fechamento e o financiamento das atividades.

A recuperação da área da mina visa restaurar o ambiente natural e minimizar os impactos negativos da mineração, dentre as diversas técnicas de recuperação Curi (2015) cita a revegetação, reconfiguração do terreno, controle de erosão e tratamento de água. Essas técnicas de recuperação dependem de diversos fatores como o tipo de mineração executada e as características do solo e clima da região. O monitoramento pós fechamento é essencial para avaliar a efetividade da recuperação da área.

2.2 Conceitos básicos do planejamento de lavra

2.2.1. Modelo de blocos

Um dos principais problemas que desafiam geólogos e engenheiros de minas é relacionado à definição do corpo mineral presente na jazida, bem como a avaliação da qualidade e quantidade dos critérios de interesse (Peroni, 2002).

Segundo Philips (2014), na atualidade o modelo de blocos é reprodução mais utilizada para exemplificar um depósito mineral, sendo amplamente utilizado por profissionais atuantes na mineração para ilustrar a jazida e seus respectivos teores.

Esse modelo é alimentado das mais diversas informações de relevância para as mais diversas análises realizadas no planejamento de lavra permitindo sua manipulação, facilitando o trabalho de entendimento do corpo mineralizado a ser explotado.

Kim (1978) afirma que, o modelo de blocos é um dos métodos utilizados para representação dos parâmetros e limites de um corpo mineralizado. Segundo Blom et al. (2018), o modelo de blocos é uma representação tridimensional de uma jazida que que possui blocos caracterizados por suas propriedades geológicas, que podem incluir: teores, litologia, massa, densidade e valor econômico e propriedades geotécnicas. As propriedades de cada bloco são usadas para definir a melhor forma de lavrá-los.

O modelo de blocos proporciona a possibilidade de armazenamento de várias informações. Esses dados permitem criar projetos de lavra sequenciais buscando a cava ótima (Curi, 2014).

Conforme Rossi; Deutsch (2013), os modelos de longo e curto prazos tem diferenças em suas atualizações sendo o primeiro baseado em perfurações com maiores espaçamentos que vão sendo preenchidas ao longo do desenvolvimento do projeto. Já para o curto prazo os modelos são atualizados com furos de produção e é preciso garantir que não possuam viés em relação ao modelo de longo prazo.

Os modelos de longo prazo fornecem estimativas generalizadas que tem precisões aceitáveis, porém, não permitem a obtenção de informações suficientes para um horizonte de curto prazo em que é necessário maior controle das variáveis do processo.

Capponi (2019), reforça que para se obter um modelo de blocos de curto prazo com informações que representem a realidade, a amostragem é de imprescindível importância. Os furos realizados e analisados devem ter o mesmo protocolo e este ser criteriosamente gerenciado. Estes furos possuem informações importantes de teor, geologia e tipos de minerais o que auxiliarão na montagem de um modelo confiável para o curto prazo.

Abzalov et al. (2010), cita que as distribuições das amostras no espaço e qualidades de dados diferentes obtidos, podem interferir diretamente na etapa de controle de teores. Dessa forma, todos os dados que serão utilizados para a confecção do modelo de blocos devem ser guiados por rigorosos e adequados padrões de qualidade.

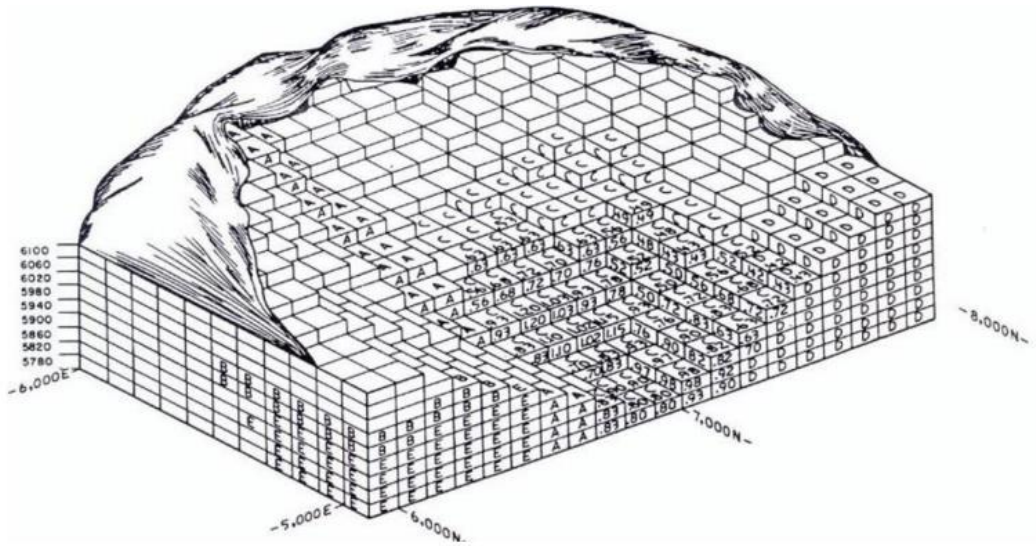
O mapeamento e a amostragem realizados de forma criteriosa, aumentam significativamente o desempenho da escolha dos blocos diminuindo a diluição e maximizando a recuperação do processo (Dominy *et.al.* 2010).

Quanto mais adensadas forem as malhas de sondagem de curto prazo, que poderão ser realizadas através de furos de desmonte, maior a precisão nas previsões em torno da recuperação nos avanços de lavra (Rossi e Deutsch, 2013).

Conforme Gambim, (2003), o princípio da amostragem em um determinado depósito mineral, se dá através da possibilidade de dividir um todo em uma porção menor que será analisada em separado.

A Figura 2.1 apresenta a representação de um modelo de blocos que através de sua geometria permite maior entendimento do seu conceito.

Figura 2.1- Modelo de blocos conceitual



Fonte: Crawford & Davey, 1979

2.2.1 Definição do valor econômico dos blocos

O valor econômico do bloco (VEB) é a medida do valor de um bloco individual em um depósito mineral, sendo calculado como a diferença entre a receita gerada pela venda do minério extraído do bloco e os custos diretos de sua extração e processamento.

Wright (1990), afirma que as variáveis envolvidas na determinação do valor econômico do bloco são:

1 – Receita (REV): se trata do valor de venda da massa / volume recuperado do bloco. Esse valor é representado geralmente em \$/t ou \$/m^3.

2 – Custos diretos (Cd): custos diretos associados ao bloco (desmonte, carregamento e transporte). Representado em \$/t.

3 – Custos indiretos (Ci): custos que são associados a todo modelo e não por bloco especificamente. Dentre eles estão: custos com engenharia, administrativos etc.

O custo total de lavra é definido por Hartman (2002) como a soma dos custos diretos e custos indiretos:

$$Custo\ de\ Lavra\ (Cl) = Cd + Ci \qquad (1)$$

Portanto, de acordo com Wright (1990), o VEB é determinado pela equação:

$$VEB = REV - Cd \qquad (2)$$

Para definição do lucro total do bloco é necessário subtrair os custos indiretos do valor do bloco:

$$Lucro\ total = \sum(VEB) - Ci \qquad (3)$$

O valor econômico do bloco é uma medida importante do valor de um bloco individual em um depósito mineral. Ele pode ser usado para avaliar a viabilidade econômica de um projeto de mineração, selecionar os blocos que serão lavrados e otimizar a sequência de lavra dos blocos.

2.2.2 Cava ótima

Cava ótima de acordo com Periotto (1992), é a obtenção de lucratividade máxima possível com a seleção de blocos a serem lavrados considerando a segurança e operacionalidade da lavra.

Curi (2014) reforça que para que o processo de extração ocorra da forma ideal e não ocorra a geração de custos extras, a cava ótima, REM (relação estéril minério) e dimensionamento de frotas precisam ser confiáveis.

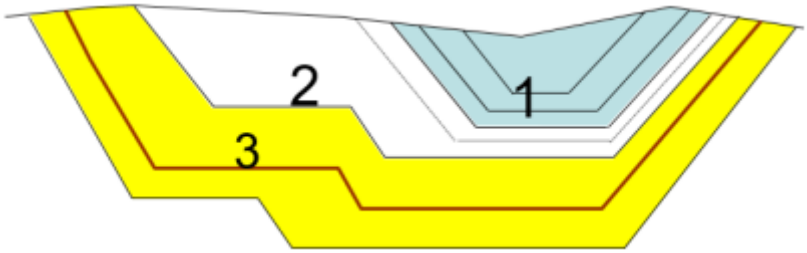
A escolha do método para determinação da cava ótima depende da complexidade do projeto, da capacidade computacional, da disponibilidade de dados dentre outros fatores.

2.2.3 Definição de pushback

Pushbacks de acordo com Consuegra; Dimitrakopoulos (2010), são grupos de blocos possivelmente lavráveis. Eles ditam a sequência de lavra de determinado corpo mineral partindo de um ponto inicial e final. Os pushbacks são importantes por controlarem a REM através da subdivisão da cava em unidades de lavra individuais que possuem um ritmo próprio de extração.

A Figura 2.2 apresenta diferentes pushbacks de uma cava final. Cada pushback possui características distintas de lavra.

Figura 2.2 - Sequência de pushbacks



Modificado de: Consuegra; Dimitrakopoulos (2010)

2.2.4 Otimização do teor de corte

Teor é a quantidade de mineral ou metal presente em determinado minério. Expresso geralmente em porcentagem. Ele é importante na determinação da viabilidade econômica de um projeto de mineração. Conforme Rendu (2008), o teor de corte de uma jazida é o mínimo teor que após ser lavrado e beneficiado na usina gera lucro com sua venda. O teor de corte mínimo é aplicado somente em situações em que os custos de operação são considerados. Em um depósito mineral, o teor médio é calculado dividindo-se o total do mineral ou metal presente pelo total de minério.

O teor de corte pode ser considerado como sendo o teor valor mínimo de concentração de um determinado minério que torna economicamente viável sua

extração e processamento. De acordo com Campos (2017), o teor encontrado abaixo do valor mínimo definido é classificado como estéril.

A estratégia de maximizar o VPL tem como característica a lavra de valores altos de teores nos primeiros períodos e é reduzida até atingir o nível crítico com o passar do tempo, onde não são obtidos lucros, ou seja, o valor da receita obtida no bloco é igual ao valor da despesa (DAGDELEN, 2001).

Lane (1964), sugere um algoritmo que busca o teor de corte ótimo, após identificar que, a maximização do VPL depende também de fatores como: beneficiamento e capacidade de lavra e não apenas de fatores econômicos.

Fórmula básica do lucro segundo Lane (1964):

$$P = (s - r)\ Qr - cQc - mQm - f\ T \quad (4)$$

C – Capacidade máxima do concentrador no período;
R – Capacidade máxima de refino no período;
m – Custo por tonelada de material lavrado;
c – Custo por tonelada de material beneficiado;
r – Custo por tonelada de material refinado;
f – Custos fixos que independem da produção e que seriam extintos no fechamento da mina;
s – Preço de venda por unidade de produto;
T – Extensão do período de produção considerado;
Qm – Quantidade de material lavrado;
Qc – Quantidade de minério enviado ao concentrador;
Qr – Quantidade de produto produzido.
y – recuperação

Existem ainda, segundo Lane (1964), seis teores de corte onde, 3 dependem da operação de capacidade limitante e três que se baseiam no balanço de 2 operações.

Quando a lavra é a operação limitante, o teor de corte (*g*) é calculado conforme abaixo:

$$gm = \frac{c}{y(s-r)} \quad (5)$$

Caso, a concentração seja a operação limitante, g é calculado da seguinte forma:

$$gc = \frac{c+\frac{f}{C}}{y(s-r)} \quad (6)$$

Quando o refino é a operação limitante, aplica-se a fórmula abaixo:

$$gr = \frac{c}{y\left(s-r-\frac{f}{R}\right)} \quad (7)$$

2.2.5 Sequenciamento de lavra

Rossi; Deutsch, (2013) citam que, quando uma análise de viabilidade tem início em um projeto de mineração, é necessário contar com a programação de lavra para que se tenha condições de estimar futuros fluxos de caixa.

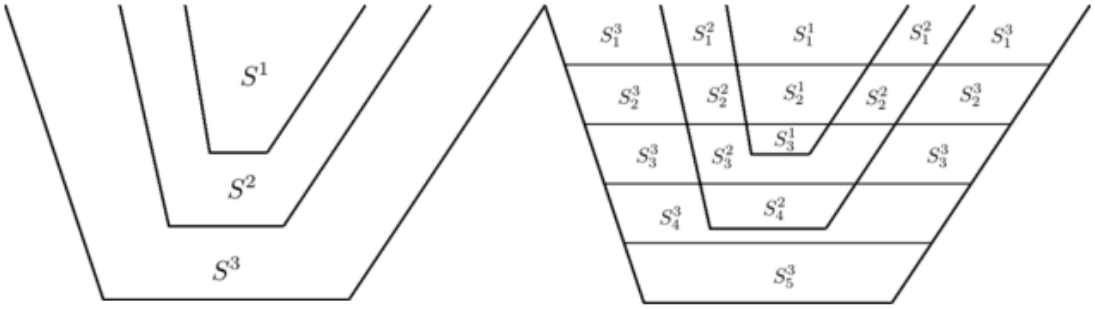
De acordo com Torres (2018), o sequenciamento de lavra é definido pela ordem de lavra dos blocos de uma determinada cava ao longo da vida da mina (LOM). O principal objetivo do sequenciamento de lavra é a otimização da extração considerando a relação estéril minério (REM) e seu balanceamento. O objetivo do sequenciamento é obter o máximo VPL levando em consideração os parâmetros estabelecidos anteriormente.

Chimuco (2010) cita algumas restrições que precisam ser seguidas durante a etapa de sequenciamento de lavra. São elas: restrições logísticas, capacidades de mina e usina, restrições geotécnicas, relação estéril minério e suas flutuações e restrições referentes a pilhas para estocagem de material.

Torres (2018) ressalta que, agrupamentos de cavas que correspondem a diversos teores de corte são gerados através de técnicas convencionais de otimização sob parâmetros e restrições técnicas pré-determinados.

A Figura 2.3 apresenta em 2D a sequência de lavra de três fases (S^1, S^2 e S^3) e seus conjuntos considerando 5 bancadas (S^1, S^2, S^3, S^4 e S^5) de uma mina a céu aberto.

Figura 2.3 - Sequência de lavra e bancadas



Fonte: GOYCOOLEA, M.; MORENO, E.; RIVERA (2013)

2.2.6 Programação da produção

Essa etapa é crucial e define a ordem e o período em que o minério será lavrado. Traduz o planejamento estratégico de longo prazo em ações concretas e detalhadas no curto prazo que garantem a eficiência, segurança e rentabilidade da operação. A programação da produção bem como, o sequenciamento de lavra, devem ser atualizados periodicamente para se adaptarem as mudanças nas condições geológicas, do mercado e da disponibilidade de recursos.

Segundo Campos (2017), o objetivo da programação de produção é a maximização do VPL e deve atender alguns requisitos como: a capacidade de lavra e da usina de beneficiamento, as restrições geotécnicas da mina, as restrições físicas e operacionais, a alimentação uniforme à usina, restrições de blendagem e as restrições de pilhas de estoque.

Hustrulid e Kuchta (2006), citam que os objetivos entre os diversos tipos de sequenciamento são: realizar a lavra de uma jazida considerando que o custo de lavra será mínimo a cada ano, a manutenção da viabilidade operacional e acesso para os equipamentos, manter minério exposto como “seguro” caso a reserva tenha sido subestimada, o adiamento da extração de estéril o máximo possível e propiciar uma taxa de produção estável.

Existem, na etapa de otimização, diferentes formas de se realizar o sequenciamento de lavra de forma adequada. Dois deles mais comumente utilizados são o *“Worst Case”* e o *“Best Case”.*

Campos (2017), cita que no caso do “*Worst case*” (Figura 2.4), apesar de ser a forma mais simples de extração de minério, o VPL não é favorecido, pois, como o sequenciamento é realizado de cima para baixo a necessidade de remoção de estéril

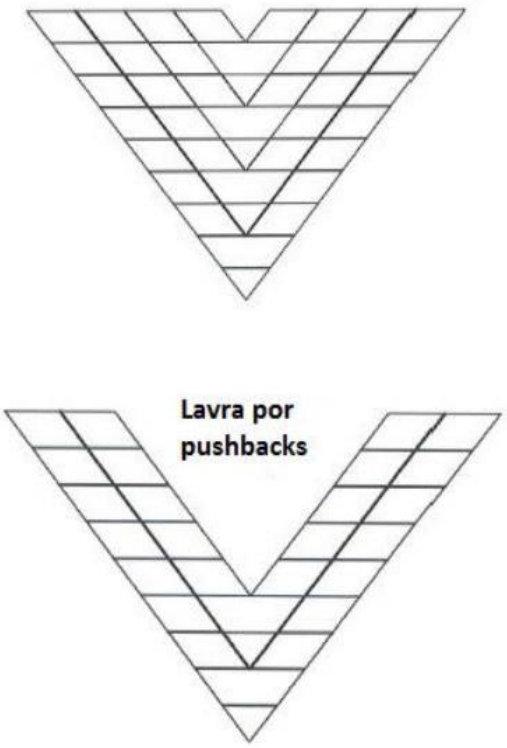
para que seja possível a lavra do corpo mineralizado é grande aumentando os gastos com essa etapa.

Figura 2.4 - Lavra "Worst Case"

Fonte: CAMPOS, A (2017)

No *"Best Case"* (Figura 2.5), a lavra é realizada considerando o VPL como fator bastante significativo, onde estéril e minério são lavrados de forma corresponde dentro do período e através de *pushbacks.*

Figura 2.5 - Lavra "Best Case"



Fonte: CAMPOS, A (2017)

Os resultados obtidos através destas técnicas nem sempre serão viáveis, o que fará com que o planejador realize diversos cenários diferentes em busca do que mais atenderá a demanda considerando também aspectos operacionais, de segurança e econômicos.

2.3 Planejamento de Lavra: Aspectos Gerais

O planejamento de lavra é uma etapa da mineração que desempenha o papel de definir a estratégia e os procedimentos que serão empregados na extração do minério. Essa etapa é essencial para a indústria de mineração, e é compreendida desde a seleção do método de lavra, passando por análises geotécnicas, estimativas de recursos e reservas, o planejamento de lavra em si em suas três etapas principais (longo, médio e curto prazos) e gerenciamento de rejeitos e estéril. Todas essas etapas consideram questões ambientais e de sustentabilidade.

O planejamento de lavra está inserido no contexto de dentro de definição de metas, objetivos e estratégias para se alcançar um resultado esperado. Se trata de um processo contínuo e dinâmico, que poderá ter suas condições alteradas ao longo

do tempo, se fazendo necessária a realização de revisões que se adaptem as novas mudanças impostas em busca do alcance dos objetivos definidos.

Couzens (1979) detalha dois tipos de planejamento de produção, sendo eles: operacional ou planejamento de curto prazo que é imprescindível para o funcionamento de uma mina em operação e o planejamento de longo prazo que normalmente é utilizado para estudos de viabilidade econômica e financiamento. Trata, portanto de elementos que determinarão as tomadas de decisão e o planejamento de produção de longo prazo que é comumente confeccionado com a finalidade de estudos de viabilidade e financiamento de um empreendimento.

Segundo Capponi (2019), apesar de o planejamento de lavra, no seu conceito, ser essencialmente o mesmo para todo empreendimento mineiro, ele possui características distintas que resultam de sua dependência específica para cada recurso mineral lavrado. Todo esse processo inclui além da determinação de dimensões da mina, o sequenciamento de suas atividades de extração, a escolha dos equipamentos, a técnica de lavra a ser utilizada de acordo com o tipo de material a ser explorado, a estimativa dos custos e a avaliação dos riscos envolvidos.

De acordo com Camus (2002), o produto do planejamento de lavra é um plano de negócios para lavrar o depósito, desde a abertura até seu fechamento. Este plano de negócios inclui um plano de lavra, que é simplificado pelo cronograma de produção indicando a origem e destino de diferentes tipos de materiais existentes na jazida, com suas respectivas qualidades a serem extraídas.

Dimitrakopoulos *et al*., (2002), definiu o planejamento de lavra como o processo de otimização da extração de reservas minerais a fim de maximizar o valor agregado alinhado com as metas e os objetivos estratégicos do empreendimento. Todo esse processo de planejamento e otimização pode ser considerado como um componente crítico para os aspectos financeiros dos empreendimentos.

Portanto, o planejamento de lavra tem como principal objetivo a maximização da produção de minério e ao mesmo tempo minimização dos custos garantindo uma lavra sustentável que permite manter a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente. De acordo com Dimitrakopoulos *et al.(* 2002), o objetivo do complexo conjunto de atividades associadas a esse processo seria, identificar qual o melhor projeto de produção possível, considerando diversos fatores, dentre eles: investimento de capital, custo operacional, previsão de receita e gerenciamento de fluxos de caixa da operação de mineração.

O planejamento de lavra é subdividido em três etapas principais que se diferem entre si de acordo com o nível de detalhamento de sua atividade, objetivos ou do tempo em que as mesmas ocorrem o serão aplicadas. Existem tempos específicos para projetos de planejamento de longo e médio prazos, porém, eles não podem ser generalizados, visto que de acordo com o tipo de minério a ser explorado as variáveis que serão utilizadas poderão ser menos ou mais complexas e esse período poderá variar. O planejamento tático, ou de curto prazo, será responsável pelo atendimento aos planos de produção em um tempo mais curto que os anteriores, podendo ser dividido em bases mensais, semanais e diárias. (Camus, 2002).

Todas as etapas do planejamento de lavra são importantes para garantir a eficiência da operação minerária e a maximização da produção de minério. Conforme, Thorley (2012) o produto do planejamento precisa ser suficientemente robusto para ter continuidade e permanecer economicamente interessante para que perdure da sua etapa inicial até o encerramento de suas atividades.

A Figura 2.6 apresenta um fluxograma resumido das atividades realizadas pelo planejamento de lavra em suas vertentes.

Figura 2.6 - Fluxograma resumido do processo de planejamento de lavra

Fonte: elaboração do próprio autor

2.3.1 Planejamento de Longo Prazo

O planejamento de longo prazo é um processo contínuo e abrangente que visa estabelecer objetivos e traçar um caminho para alcançá-los em um período extenso, geralmente de cinco anos ou mais. Ele envolve a análise do ambiente interno e externo, a definição de metas e prioridades, a criação de estratégias e a alocação de recursos para o futuro.

Segundo Smith (2012), o planejamento de longo prazo tem caráter estratégico e de certa forma tem uma definição simples, como sendo, a associação de metodologias, processos e lógicas que facilitam a estruturação da lavra da jazida interligada às exigências do mercado. Esse tipo de planejamento busca assegurar o aproveitamento ótimo da jazida atendendo às alterações de mercado bem como, a legislação e demais estratégias.

De acordo com Diedrich (2012), o planejamento de longo prazo está relacionado geralmente a fatores como o valor presente líquido (VPL) que avaliará a viabilidade do investimento no empreendimento, a produção de minério, a relação estéril minério (REM), o capital de operação e capital de investimento (OPEX e CAPEX).

Smith (2012) ressalta que, o produto do planejamento de longo prazo é o plano de negócios, onde são realizadas as avaliações para atendimento ao mercado em seus diversos cenários ao longo do tempo.

O planejamento de longo prazo é um processo essencial para o sucesso de qualquer organização, é contínuo e adaptável que deve necessariamente ser revisitado e atualizado periodicamente para garantir sua efetividade.

2.3.2 Planejamento de Médio Prazo

O planejamento de médio prazo se concentra em um período geralmente entre 1 e 5 anos. De acordo com CAMPEAU et al. (2020), o objetivo é otimizar a cava junto ao planejamento de longo prazo buscando atender as exigências do mercado, servindo também, como ponte entre o planejamento estratégico de longo prazo e a execução das atividades de curto prazo.

Lane (1988), cita também que a perenidade de um determinado teor de corte só poderá ser atingida de maneira interativa e se considerada também a perenidade da sequência de produção.

Smith e Wicks (2014), destacam que o planejamento de médio prazo trabalha com cronogramas que estipulam a remoção de estéril e minério em determinados períodos para garantir a permanência da alimentação da usina. Portanto, o planejamento de médio prazo é um processo dinâmico que deve ter seu trabalho revisado periodicamente para incorporar novas informações e se adaptar às mudanças no ambiente interno e externo da operação.

É importante que exista uma coordenação eficiente entre o planejamento de longo, médio e curto prazos, para garantir a coerência das estratégias e o atingimento dos objetivos da mineração ao longo do tempo.

2.3.3 Planejamento de Curto Prazo

O planejamento de curto prazo se concentra em um período geralmente de uma semana a 3 meses e serve de base para os cronogramas operacionais de produção.

De acordo com Chimuco (2010), elaborar planos de lavra voltados para a operação de mina em busca do atendimento das metas de produção definidas pela planta de beneficiamento, bem como a programação de estéril são algumas das responsabilidades do curto prazo.

Costa (2005) menciona que, o planejamento das variadas frentes de lavra não deve exceder a capacidade física do sistema e essas devem atender a quantidade e qualidades desejadas.

Blom et al. (2018), cita que diversas fontes de incertezas são mitigadas no curto prazo, dentre elas estão as incertezas geológicas e as relacionadas à equipamentos. A incerteza econômica não é tão relevante nesse horizonte visto que se trata de um parâmetro de controle dos longo e médio prazos.

O planejamento de curto prazo é dinâmico, em função das diversas modificações que ocorrem inesperadamente ao longo da lavra como: manutenções,

alterações de qualidade de minério pela usina, atrasos no processo e acidentes (BEZERRA, 2022).

Ao implementar um planejamento de lavra de curto prazo eficaz, as empresas de mineração podem melhorar significativamente a produtividade, reduzir custos, aumentar a segurança e minimizar os impactos ambientais de suas operações.

Segundo Rossi et al. (2013), uma das dificuldades do curto prazo é relacionada à atualização do modelo de curto prazo com as informações geológicas e as estimativas das amostras devido o curto espaço de tempo entre a coleta das amostras e a necessidade de lavra das áreas.

2.4 O Planejamento de curto prazo em contraste com o longo prazo

Em conformidade com Blom *et at.,* (2018), existem várias diferenças entre o planejamento de curto e longo prazos, como por exemplo: (i) tipo de modelo de blocos utilizado; (ii) os períodos de trabalho entre eles; (iii) premissas e necessidades a serem atingidas; (iv) quantidade de restrições a serem consideradas e por fim, (v) o grau de detalhamento das entregas que serão realizadas.

Bloom et al. (2018) afirma que, definições que irão determinar custos relacionados da lavra até o beneficiamento, restrições físicas que impactam o projeto, dimensionamento da frota e sua capacidade, disponibilidades físicas e capacidade da planta são comumente definidos nos horizontes de médio e longo prazos.

Jwebal *et. al.* afirma que o planejamento de curto prazo por vezes pode não estar alinhado com as orientações do longo prazo devido principalmente pelos objetivos de os dois horizontes não serem os mesmos.

Thorley (2012), menciona que o planejamento de curto prazo pode alterar o planejamento de longo caso necessário, desde que seja bem executado, pois, quando não realizado de forma correta pode causar danos ao empreendimento.

De acordo com, Halatchev (2002) a programação de lavra otimizada, depende de vários fatores, dentre eles estão as características geológicas da jazida, condições de lavra, tecnologias disponíveis e parâmetros econômicos relacionados ao espaço e tempo.

No planejamento de curto prazo, de acordo com Quigley (2016) através da otimização do programa de produção de lavra é possível estipular a melhor sequência para remoção do minério e estéril e, também qual o melhor destino para sua alocação.

Esse horizonte do planejamento exige um detalhamento maior da área a ser minerada, portanto, deve estar munido de amostras confiáveis, geralmente realizadas em malhas com menores espaçamentos e modelos de blocos específicos com o maior número de informações possíveis.

De acordo com Capponi (2019), as responsabilidades quanto à otimização requerida ao curto prazo possuem exigências adicionais em relação ao longo prazo, embora seja executada em regiões mais restritas.

Dentre as principais restrições estão listadas:

(i) as operacionais;

(ii) o posicionamento de equipamentos nas frentes de lavra;

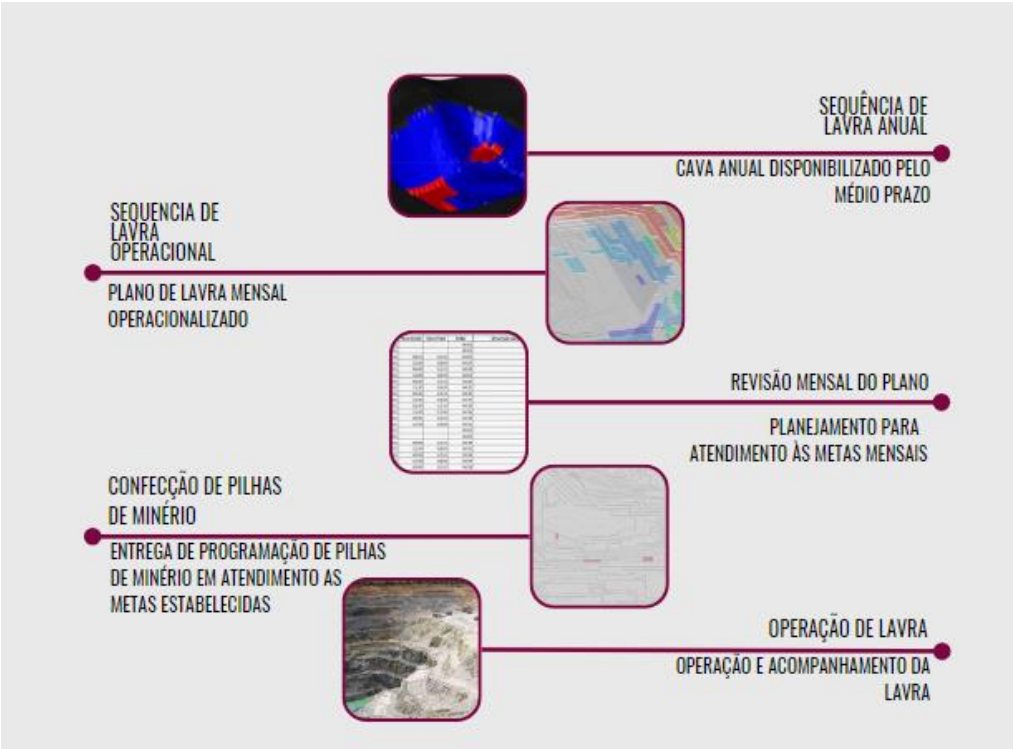
(iii) os planos de lavra com demandas específicas e a estacionarização de teores nas pilhas de minério que alimentarão as usinas de beneficiamento

(iv) liberação de minério do estéril em um horizonte quinzenal / semanal com a menor relação estéril/minério possível.

Portanto, os objetivos do longo prazo são voltados para um espaço maior de tempo, ou seja, são especificamente focados em LOM, recurso e reserva, enquanto o curto prazo tem seus objetivos atingidos em um pequeno período, seja, um ano, meses, semanas e até dias.

A Figura 2.7 traz um fluxograma resumido do processo de planejamento de lavra de curto prazo usualmente aplicado nas mineradoras.

Figura 2.7 - Fluxograma resumido do processo de planejamento de curto prazo



Fonte: elaboração do próprio autor

2.5 Estacionarização de teores no planejamento de curto prazo

Segundo Toledo (2018), o planejamento de curto prazo em uma mineração a céu aberto necessita de definições de polígonos que representem os avanços de lavra que serão realizados. Estes polígonos são desenhados habitualmente de forma manual em um processo trabalhoso buscando atingir as metas estabelecidas de produção para qualidade e quantidade de acordo com os limites definidos, este minério selecionado precisa possuir a menor variabilidade possível em termos de qualidade para atingir as especificações necessárias na usina de beneficiamento.

Compreender a estacionarização de teores apoia o desenvolvimento de estratégias de lavra e sequenciamento que consideram a variabilidade dos teores ao longo do tempo. Atualmente vários softwares com algoritmos específicos para sequenciamento de lavra permitem diferentes tipos de simulações permitindo ao planejador encontrar a melhor forma e mais sustentável de se realizar o planejamento de lavra. Esse tipo de ferramenta é constantemente utilizado pelo longo prazo, porém,

pode-se deduzir que se pode obter vantagens significativas no curto prazo quando também se faz uso dela.

Toledo (2018), ressalta que a utilização de algoritmos genéticos para realização de otimização do processo de planejamento de curto prazo pode nos indicar que é possível automatizar as rotinas de trabalho neste horizonte que até então são realizadas manualmente, permitindo que sejam realizadas de forma mais eficiente e com a qualidade necessária do minério que será entregue a usina de beneficiamento.

A estacionarização de teores em uma usina de beneficiamento pode trazer uma série de benefícios, dentre eles estão: melhor controle de qualidade que permite a identificação de tendências, padrões ou desvios que irão afetar a qualidade do produto. A otimização do processo é outro benefício que permite identificar quais etapas ou processos da usina tem maior impacto na vulnerabilidade dos teores, sendo possível realizar ajustes operacionais visando a obtenção de um produto com maior qualidade, sendo possível uma maior previsibilidade do comportamento do minério, o que propicia a compreensão das flutuações nos teores de minério ao longo do tempo.

Toledo (2018) cita que, especificamente para o planejamento de lavra de curto prazo é comum não existirem algoritmos de otimização, e, como este processo é realizado de forma manual o número de repetições ou testes realizados para atingir a qualidade necessária do minério é limitado, obrigando o planejador a não cumprir de forma satisfatória as demandas encaminhadas pela usina de beneficiamento.

Valente (1982), cita que mesmo com as diminuições de flutuações de teores, o minério ainda apresentará variações em algum dos parâmetros de qualidade. Um artificio amplamente utilizado na mineração para diminuir a variabilidade intra pilhas são as pilhas de homogeneização que podem ser construídas através de diferentes técnicas. Segundo Silva (2019), todos os materiais lavrados devem ser tratados como heterogêneos em sua essência, se fazendo necessário a busca por meios que de homogeneização aceitáveis, uma vez que, o nível de homogeneização considerado perfeito não pode ser atingido. Para isso, os profissionais buscam utilizar algum método que atenue as flutuações intra pilhas, o que pode ser alcançado com as pilhas de homogeneização. Desta forma, a redução da variabilidade dos teores poderá ocorrer substancialmente.

Gambim (2003) reforça que, devido os resultados positivos utilizando-se desse método, essa prática vem se tornando cada vez mais comum no âmbito da indústria de mineração. Desde que sejam projetadas e operadas de forma correta, as pilhas

possuem a capacidade de desempenhar o papel de elemento de aprovisionamento também homogeneizar o material.

Possivelmente para o curto prazo, poderia ser uma solução adequada usar algoritmos de meta heurística na solução de problemas. Em situações em que existem uma série de variáveis que precisam ser otimizadas são geralmente utilizados algoritmos denominados de meta-heurística que buscam encontrar soluções aproximadas para problemas complexos, muitas vezes caracterizados por um grande espaço de busca e restrições difíceis de serem modeladas de forma matemática devido ao grande número de blocos que compõem o modelo de curto prazo. Esses algoritmos são inspirados na teoria da evolução e nas leis da genética de Darwin, processos naturais como o comportamento animal ou fenômenos físicos são bases para suas formulações. Utilizam uma abordagem baseada em populações de soluções candidatas, que são manipuladas através de operadores genéticos como seleção, recombinação (crossover) e mutação.

O propósito das próximas etapas que seguem é o de trabalhar o sequenciamento de lavra de curto prazo no horizonte de pilhas de minério considerando como principal restrição a estacionarização de teores relevantes para o processo e demonstrar o funcionamento dos diversos algoritmos aplicados a sequenciamento de lavra com foco no curto prazo.

2.5.1 Métodos de otimização de curto prazo – Visão geral

Capponi (2019), reforça que apesar de não possuírem tanto aprofundamento nos estudos quanto para o longo prazo, as situações que envolvem problemas relacionados a otimização de planejamento de lavra voltados para o curto prazo têm ganhado maior atenção nos últimos tempos em virtude dos benefícios.

Algumas das vantagens trazidas são: a garantia de uma produção consistente, a minimização de custos referentes à operação de mina e a manutenção da estabilidade do minério que é alimentado na usina de beneficiamento.

Existem vários métodos de otimização utilizados no planejamento de lavra de curto prazo na indústria de mineração e que oferecem uma série de vantagens como, eficiência operacional através da alocação eficiente de recursos (equipamentos, mão de obra e suprimentos), resultando em uma operação mais eficiente reduzindo custos e maximizando a produtividade, permitindo a gestão de riscos, avaliando diferentes

cenários tomando decisões mais robustas que levem em consideração a variabilidade dos teores de minério, as flutuações nos preços e outras incertezas do mercado, ajudando a mitigar os riscos e aumentando a confiabilidade dos planos de lavra.

Os métodos de otimização levam em conta várias restrições operacionais e geotécnicas, limites de processamento, capacidade de equipamentos entre outras. Realizam análises de sensibilidade que avaliam o impacto de diferentes parâmetros e variáveis nas soluções ótimas, permitindo entender a influência de fatores como: mudanças nas condições operacionais ou nas restrições facilitando a tomada de decisões. Esses métodos otimizam diferentes objetivos como a maximização da produção, minimização de custos operacionais, impactos ambientais, uso de recursos dentre outros, permitindo que as empresas ajustem os planos de lavra de curto prazo para atender os seus objetivos específicos, suportando ainda a tomada de decisões fornecendo informações valiosas para auxiliar nessa fase ajudando os gestores a tomar decisões mais embasadas e estratégicas para o planejamento de curto prazo.

No geral, os métodos de otimização de planejamento de lavra de curto prazo oferecem uma abordagem sistemática e baseada em dados para melhorar a eficiência dessa atividade tão relevante à manutenção do empreendimento mineiro.

A meta heurística seria uma opção a ser utilizada no curto prazo, o que inclui os algoritmos genéticos que utilizam operadores de reprodução, mutação e seleção para evoluir uma população de soluções ao longo de várias gerações buscando respostas cada vez melhores. De acordo com Gen e Cheng (1997) os algoritmos genéticos encontram soluções boas em relação à problemas de otimização.

Linden (2006) cita algumas vantagens dos algoritmos genéticos sob as demais técnicas. São elas: não usam métodos de busca completamente aleatórios, lidam com situações discretas e contínuas, podendo também trabalhar com funções mistas, e são próprias para resolver problemas encontrados no sequenciamento de uma lavra como por exemplo busca em espaços grandes.

Alguns modelos de programação linear foram desenvolvidos ao longo do tempo, buscando otimizar as soluções para o curto prazo especificamente como por exemplo: o desenvolvimento de um modelo de programação linear (PL) por parte de Wilke e Reimer (1977) visando a maximização do lucro e fornecendo um minério que atende a qualidade requerida na usina de beneficiamento. Outro modelo desenvolvido precisamente voltado para uma mina de ferro onde havia restrições relacionadas a

limitações na quantidade de minério produzido, pela taxa de remoção de estéril e pela qualidade da blendagem por período foi proposto por Fytas (1985).

Ao longo de todo um período de trabalhos e estudos desenvolvidos, os processos de otimização foram evoluindo chegando então até a programação inteira mista (MIP) que pode ser considerada mais apropriada para chegar a resolução de problemas relacionados ao planejamento de lavra, portanto, este tipo específico de otimização será tratado de forma mais aprofundada neste trabalho considerando que será utilizado para a obtenção dos resultados finais do projeto. A principal característica distintiva do tipo de problema solucionada por esse tipo de programação é a presença de restrições que exigem que algumas variáveis sejam restritas a valores inteiros. Geralmente, os problemas de MIP são mais restritivos e, portanto, mais desafiadores de serem resolvidos do que os demais, permitindo modelar restrições mais complexas e produzir soluções mais realistas em muitos cenários.

Blom et al. (2018) menciona que os métodos mais modernos de resolução de problemas de otimização no curto prazo são solucionados através de MIP. Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos utilizando a programação inteira mista. Yavarzadeh, Abodallheisharif e Neishabouri (2014) propuseram um método de programação linear mista (MILP) que unia o sentido da lavra e vários períodos otimizado garantindo o alcance dos objetivos relacionados a massa e sua classificação para cada período.

Vários modelos utilizando meta heurística foram desenvolvidos e aplicados buscando as mais inúmeras soluções para os problemas encontrados nas mais diversas minas no horizonte de planejamento de curto prazo até então pouco explorado.

Um modelo com diversos objetivos que minimizavam o risco financeiro e que maximizavam o retorno utilizando heurística foi desenvolvido por Richmond e Beaseley (2004) Os mesmos autores desenvolveram um trabalho onde um algoritmo de cone flutuante bidimensional pesquisava a solução através de um elipsoide de busca definido com base no tamanho do equipamento utilizado para a lavra determinando janelas específicas para a maximização do lucro.

De acordo com Capponi (2019), os algoritmos meta heurísticos vem conquistando mais espaço no planejamento de lavra além dos algoritmos heurísticos. Sendo a principal diferença entre os dois o método utilizado para a aceitação para mudanças. Os algoritmos meta heurísticos possibilitam que o algoritmo realize as pesquisas buscando a solução de forma mais abrangente pois, consideram a

probabilidade da aceitação baseando-se na melhoria relativa, podendo ser essa probabilidade diferente de zero para alterações negativas no valor.

A meta heurística foi utilizada em uma mina de ferro para satisfazer a massa total de minério extraído, minimizando os desvios de qualidade para duas variáveis. Nessa abordagem Kumral e Dowd (2002) obtiveram 250 soluções de forma rápida e realizaram a seleção de 5 delas que julgaram ser as melhores opções de forma manual. Porém esse método não considerou restrições de curto prazo oportunas como: a posição e movimentação dos equipamentos utilizados na lavra.

O método de recozimento simulado ou *annealing* foram aplicados ao curto prazo com objetivos de minimização de custos operacionais por Mousavi et al (2016).

2.5.2 Ferramentas de otimização matemática aplicadas ao sequenciamento de lavra

Existem várias ferramentas de otimização matemática amplamente utilizadas para solucionar problemas relacionados ao planejamento de lavra. Cada uma delas possui recursos e funcionalidades específicas, e a escolha da ferramenta adequada depende das necessidades dos problemas, do tamanho do modelo e dos requisitos oferecidos por cada ferramenta ao solucionar a mais apropriada para um determinado cenário de planejamento de lavra.

Nesta seção iremos dissertar sobre o CPLEX, pois trata-se da ferramenta utilizada pelo sequenciador no presente trabalho.

De acordo com a IBM o CPLEX trata-se de uma solução de alto desempenho de programações matemáticas que resolve problemas com milhões de restrições e variáveis, abrangendo diferentes áreas de programação linear como as com variáveis inteiras, programação inteira mista, quadráticas e programações quadráticas ilimitadas.

Em relação a programação linear ele implementa o método simplex que é altamente utilizado para resolver problemas de otimização linear. Esse método explora as propriedades da função objetivo linear e das restrições lineares para encontrar uma solução ótima. Para problemas de programação mista, o CPLEX utiliza uma combinação de técnicas, incluindo a otimização linear inteira (ILP) e a busca em ramificação e corte. Essas técnicas permitem lidar com problemas que envolvem variáveis inteiras ou binárias, bem como variáveis contínuas.

Além dos tipos de programação mencionados acima, o CPLEX também oferece recursos avançados, como programação não linear, programação por metas, programação por escalarização e outros.

No geral o CPLEX é uma ferramenta versátil e poderosa para desenvolver problemas de otimização matemática. Sua eficiência, capacidade de lidar com problemas complexos e recursos avançados fazem dele uma escolha popular para uma ampla gama de aplicações de otimização.

Whittle (2009), ressalta que o desafio de otimizar as operações de mineração é grande devido à complexidade das operações atuais.

O software utilizado no estudo utiliza técnicas de programação linear mista (MILP). Esse tipo de otimização lida com problemas de decisão que envolvem variáveis contínuas e discretas. Um dos principais objetivos deste tipo de programação é a maximização da produção total, sem exceder os recursos disponíveis. É mais complexa que a programação linear tradicional, pois o número de soluções possíveis pode ser muito grande, tornando a resolução mais desafiadora.

De acordo com Zhanyou *et al*. (2009), o sequenciador realiza cálculos onde leva em consideração várias restrições, sendo elas: geométricas, de mineração, de beneficiamento e de equipamentos. As restrições geométricas podem ser exemplificadas pelas precedências de fase, ou, ordem de extração das fases de um sequenciamento. Já as restrições de mineração são limites definidos para teor, volume, tipos de materiais e massas a serem extraídas. Nas restrições de processamento incluem-se os limites de processamento da usina de beneficiamento existente, e as restrições de equipamento informa o número de escavadeiras, caminhões e outros implementos necessários para a lavra e transporte do material.

2.5.3 Otimizador automático: Visão Geral

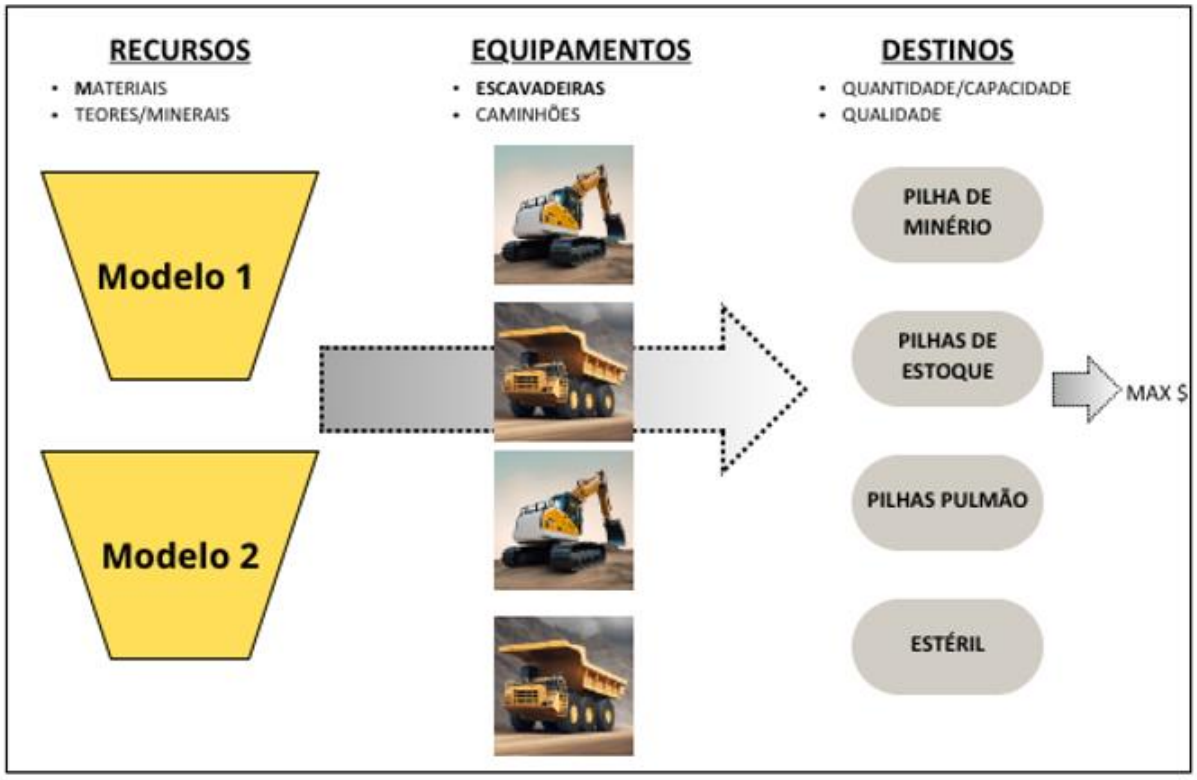
De acordo com, Mintec®, Inc. 26th Seminar, May 2009, o otimizador utilizado no estudo é uma ferramenta de planejamento desenvolvida para planejamento de produção de médio e curto prazo. Se baseia na programação linear de inteiros mistos (MILP) desenvolvendo um cronograma ótimo para cada período definido e cumpre com seus objetivos e atende a outras várias restrições, podendo ser utilizada para lavra a céu aberto ou subterrânea para atender as demandas necessárias. Seu

objetivo é encontrar a melhor sequência de tarefas, considerando critérios de otimização específicos, como minimização de tempo, maximização de lucro ou minimização de custo. Para isso, o algoritmo utiliza um conjunto de partículas que se movem em um espaço de busca, explorando diferentes combinações de sequenciamento.

Cada partícula representa uma solução candidata e possui uma posição no espaço de busca, que corresponde a uma determinada sequência de tarefas. Além disso, cada partícula mantém uma memória das melhores posições já encontradas, tanto por ela mesma quanto por outras partículas. Durante a execução do algoritmo, as partículas exploram o espaço em busca por meio de movimentos aleatórios, sendo influenciadas pela sua própria experiência e pela experiencia das melhores soluções encontradas até o momento. Essa interação social entre as partículas permite uma busca mais eficiente e abrangente do espaço de soluções. O otimizador é capaz de lidar com problemas complexos, nos quais existem múltiplas tarefas a serem executadas em determinada ordem, levando em consideração restrições e critérios de otimização específicos.

A Figura 2.8 apresenta um cenário típico na mineração onde se faz necessário o trabalho simultâneo com vários modelos dos quais os cortes são extraídos, os recursos a serem utilizados como, os tipos de materiais disponíveis e os teores dos minerais de interesse, os equipamentos de transporte e equipamentos auxiliares disponíveis para a execução da lavra, bem como os destinos que cada tipo de material poderá seguir de acordo com critérios estabelecidos pelo planejador, buscando a maximização do lucro.

Figura 2.8 - Modelo típico do otimizador utilizado



Adaptado pelo autor de: Mintec®, Inc. 26th Seminar, May 2009

O objetivo de um modelo de otimização é utilizar os equipamentos disponíveis para lavrar os cortes definidos no modelo e enviá-los aos seus destinos corretos alcançando os objetivos propostos que podem ser maximização do valor líquido, teor, minimização da relação de estéril/minério, distância média de transporte (DMT) e horas de caminhões, ao mesmo tempo que são satisfeitos os requisitos relacionados tanto a qualidade quanto à quantidade do produto seguindo as restrições físicas impostas a ele.

O planejamento de mina portanto, ocorre a partir da criação dos planos de longo prazo em que são gerados cortes e cálculos de reserva. A partir disto, são gerados perfis de transporte, arquivos de tempo de ciclo e relatórios de roteamento de material. Usando os cortes e os dados gerados o otimizador irá buscar a sequência ótima de extração de cortes operacionais em cada período que atinge o objetivo e satisfaz as restrições indicadas.

2.5.4 Aspectos práticos do sequenciador matemático

De acordo com Zhanyou *et al*. (2009), a ferramenta utilizada para sequenciamento no presente, utiliza de técnicas de programação linear mista (MILP) e busca encontrar a melhor sequência operacional de lavra em busca do atingimento de objetivos que satisfaçam a qualidade e quantidade do produto lavrado, considerando as restrições químicas e físicas impostas a ele. Podemos considerar que, os cortes serão obtidos de diferentes modelos e enviados aos diversos destinos informados (pilhas de estoque, usina e pilhas de estéril), cada um destes, com suas determinadas capacidades e tipos de materiais. A ferramenta encaminhará os diferentes cortes gerados com suas características específicas utilizando a frota disponível para seus respectivos destinos buscando maximizar o valor presente líquido (VPL) atingindo os objetivos estipulados, enquanto também atinge os requisitos de qualidade e quantidade considerando as restrições físicas e químicas do material lavrado.

Ainda de acordo com Zhanyou *et al*. (2009), a ferramenta leva em consideração restrições geométricas, obedecendo as precedências de fases estipuladas; de mineração, considerando os volumes de cada tipo de material que deverá ser minerado em cada uma das fases de processamento, ou seja, os limites de minério que serão processados em uma determinada planta por período e por fim, restrições de equipamento, quando podem ser controlados os tipos e número de equipamentos que serão utilizados em cada etapa da lavra.

Segundo Zhanyou (2009), o otimizador trabalha importando os cortes e os dados gerados e por fim define a precedência de fases. Após essa etapa, ele calcula a precedência dos cortes e configura o mapeamento dos materiais com base nos teores de corte estipulados definindo seus destinos e os equipamentos necessários. O otimizador estabelece os objetivos, as restrições e os demais parâmetros para então realizar os cálculos do cronograma de lavra. Quando se obtêm o sequenciamento ótimo, relatórios são gerados para melhor análise do planejador. Caso o planejador julgue os relatórios não satisfatórios, os dados poderão ser alterados e novas rodadas do otimizador poderão ser realizados até que atendam as necessidades do programa de produção. Por fim, os resultados obtidos serão disponibilizados e colocados em prática dentro dos períodos estipulados.

A Figura 2.9 traz um esquema básico de como o otimizador trabalha buscando atender as restrições e objetivos proposto.

Figura 2.9 - Esquema básico das etapas do otimizador matemático

Fonte: elaboração do próprio autor

A ordem em que as fases devem ser extraídas é denominada precedência de fases. As regras de precedência para fases e cortes são geradas automaticamente pelo otimizador a fim de evitar a subextração, porém, essas regras podem também ser modificadas manualmente caso não atendam especificamente as necessidades do planejador. Uma vantagem da geração automática da precedência é a economia de tempo, sendo necessário na maioria das vezes a modificação manual de poucas delas. O número de bancadas que podem ser lavradas em cada fase ou período também são controladas no otimizador. Os limites inferiores e superiores para massa, volume, materiais dos materiais que serão lavrados em cada período ou fase, a REM, também serão controlados respeitando sempre os destinos selecionados para cada tipo específico de material.

Análises de inviabilidade que buscam encontrar restrições não atingidas são geradas quando não é possível encontrar soluções para determinado período. Nesse

caso, o planejador irá realizar novas rodadas que poderão flexibilizar certas restrições para buscar a solução ótima necessária.

Ao final do trabalho de sequenciamento, os relatórios gerados podem ser exportados em diferentes formatos de arquivos e os cortes definidos para cada etapa podem ser visualizados separadamente na tela de acordo com a sequência de extração de cada parte. Esses relatórios são customizados com as variáveis e informações pertinentes e para facilitar a visualização das informações através da aplicação de filtros.

2.6 Características gerais da área de estudo

A mina onde o estudo ocorre é a céu aberto (Figura 2.10), ou seja, suas operações ocorrem em superfície. Trata-se de uma jazida composta principalmente por material intemperizado (laterítico). Em superfície, de acordo com Biondi (2015), existe uma crosta laterítica ferruginosa, contendo a presença de limonita/goethita e magnetita, que concentra pirocloro e apatita. Logo abaixo desta crosta, está o principal corpo mineralizado, ou seja, um regolito, formado pela alteração e lixiviação do carbonatito e que concentra bário-pirocloro, apatita e monazita (ISSA FILHO et al., 2001).

Figura 2.10 -Imagem aérea da mina onde ocorre o estudo

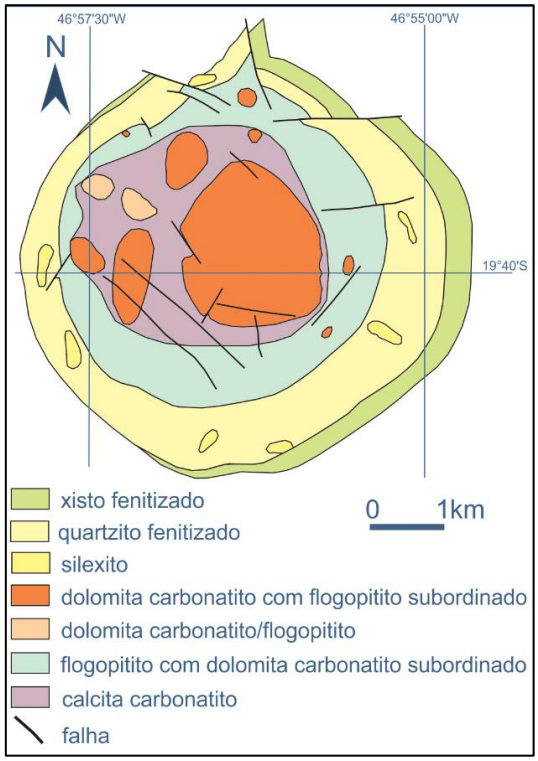
Fonte: Google Earth 2023

Em virtude da característica friável do material, não se faz necessária a utilização de explosivos para desmonte do material lavrado. O desmonte, seja ele minério ou estéril é realizado através de escavadeiras e o material é transportado por caminhões de 40 toneladas para seus diversos destinos (usina, pilhas de estéril ou estoque). A lavra é desenvolvida em bancos preferencialmente de 5 metros de altura com ângulo de talude de 68º e larguras de bermas de 15 metros. O minério é transportado para a usina de beneficiamento através de correia transportadora que parte de um pátio de homogeneização que tem como principal objetivo diminuir o máximo possível a variabilidade intra pilhas.

2.6.1 Contexto geológico local

A reserva mineral de nióbio está localizada no Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (Figura 2.11), que, junto com os complexos de Tapira, Salitre e Serra Negra, integrando um conjunto de complexos carbonatíticos e kimberlíticos (GIBSON et al., 1995). O complexo possui forma circular, com cerca de 5 km de diâmetro e está encaixado por quartzitos e xistos proterozóicos do Grupo Ibiá (SEER, 1999).

Figura 2.11 - Mapa Geológico do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro



Fonte: SILVA, A. B., MARCHETTO M., SOUZA O.M (1979)

De acordo com Issa Filho et al. (1984), as seguintes fases compuseram a estruturado complexo erodido de Araxá (Figura 2.12):

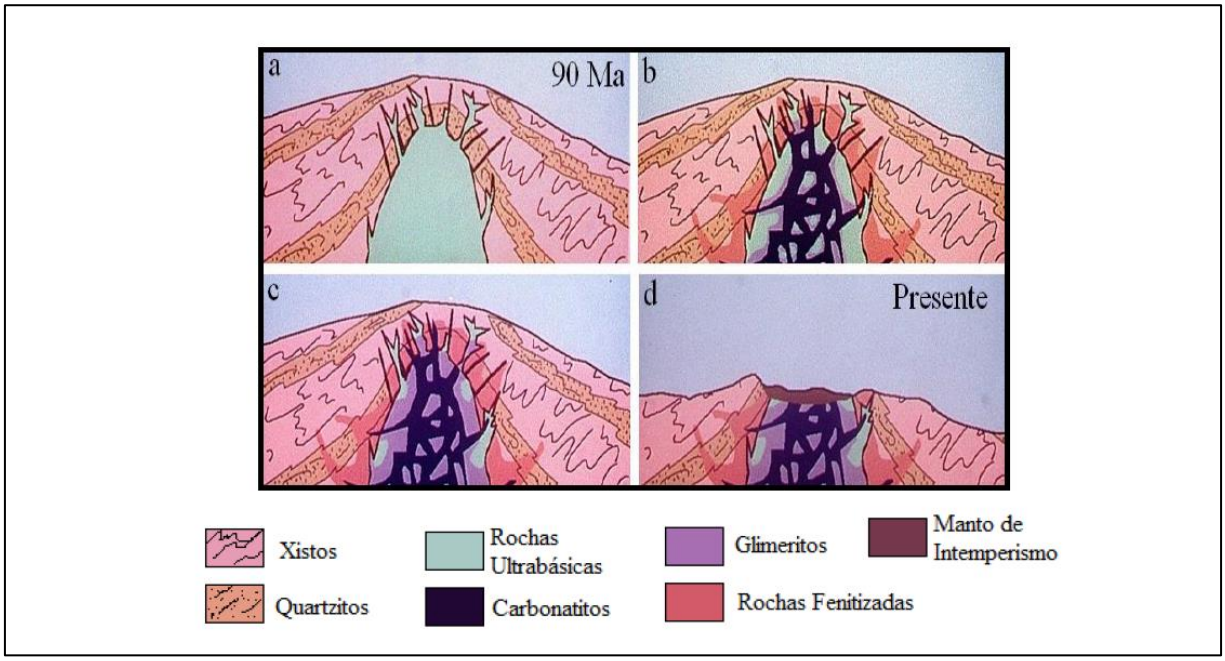
(a) intrusão de rochas ultrabásicas dunítica e peridotíticas em meio às supracrustaisdo Grupo Ibiá;

(b) intrusão do magma carbonatítico e início do metassomatismo das rochas ultrabásicas, gerando os glimeritos e fenitizando as rochas encaixantes;

(c) glimeritização completa das rochas ultrabásicas e a fenitização das encaixantes, gerando núcleos de silexitos em meio aos quartzitos fenitizados;

(d) erosão e intemperismo das rochas alcalinas gerando um manto no qual ocorreu o enriquecimento dos minerais existentes.

Figura 2.12 - Gênese do complexo alcalino carbonatítico do Barreiro



Fonte: ISSA FILHO et al. (1984)

3 METODOLOGIA

Nos capítulos previamente apresentados, foram discutidos os objetivos, hipóteses, metodologia, a revisão dos conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, bem como os aspectos práticos do sequenciador matemático utilizado. Neste capítulo, os parâmetros de entrada e a metodologia para serão abordados, visando definir a estrutura mais efetiva para o atingimento dos objetivos propostos.

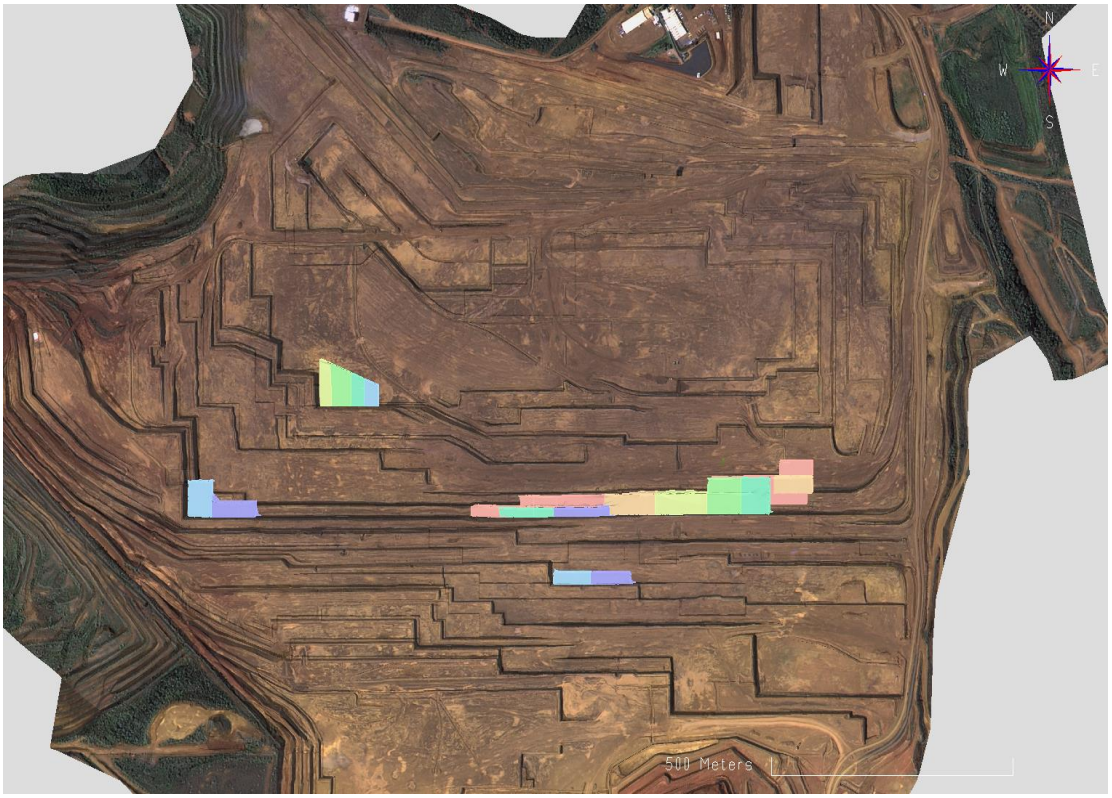
Uma pilha de minério é composta pelo material extraído de diferentes frentes de lavra onde a mistura delas atendem aos parâmetros de qualidade determinados pelo planejador. São dispostas de forma organizada e temporária buscando garantir que o material seja alimentado de maneira eficiente e contínua no processo de beneficiamento.

Os planos de lavra confeccionados de forma manual, partem de um plano de médio prazo dividido em meses em que, todas as áreas são revisadas a fim de atualizá-las com a topografia atual. Após as etapas de verificação e atualização concluídas, a cubagem é realizada para verificação de qualidade de minério disponível

e expectativa de produção da usina. Os polígonos são desenhados manualmente um a um e submetidos à cubagem individual. Após a divisão das áreas em porções menores com volumes próximos, são compostas pilhas que contenham em sua composição as frentes de lavra definidas que são cubadas em conjunto para confecção de relatórios contendo a qualidade de cada uma delas. As linhas de DMT são desenhadas, os arquivos em dxf e excel são fornecidos às partes interessadas, os polígonos são lavrados em campo e enviados ao pátio de homogeneização para posterior alimentação da usina de beneficiamento.

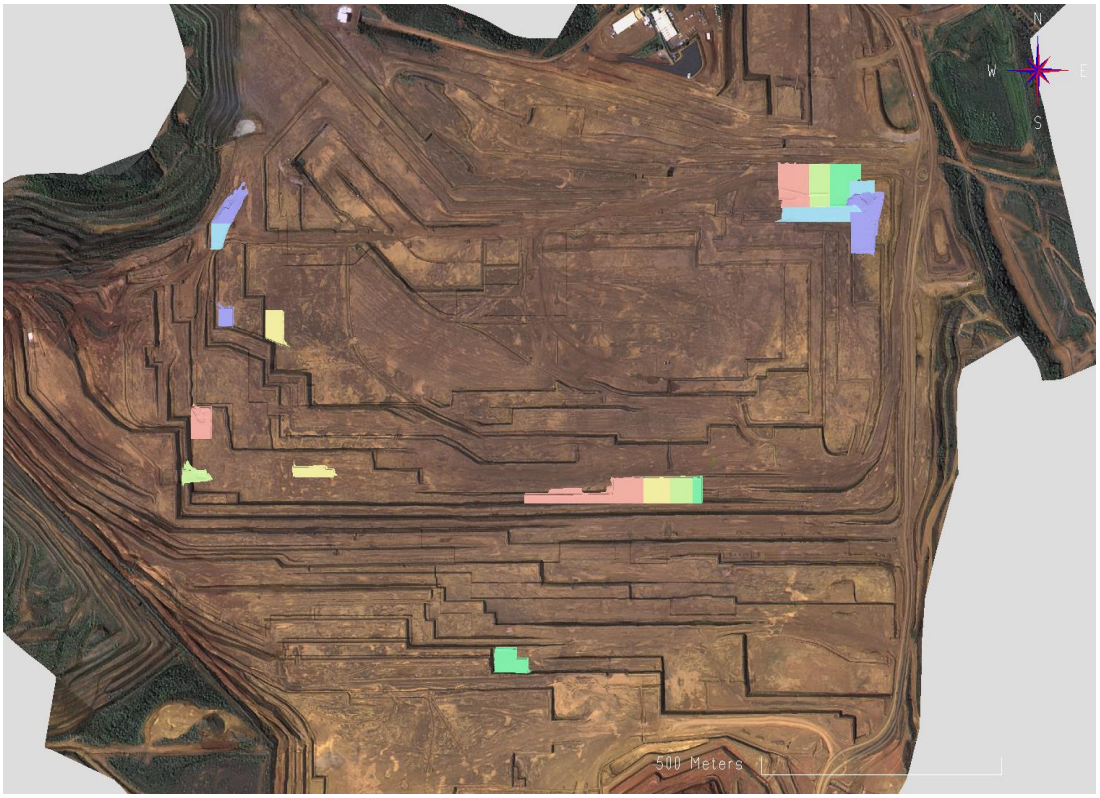
Na figura 3.13 pode-se verificar as pilhas programadas de forma manual no período de setembro, outubro e novembro do ano de 2022.

Figura 3.13 - Pilhas sequenciadas manualmente (Setembro 2022)



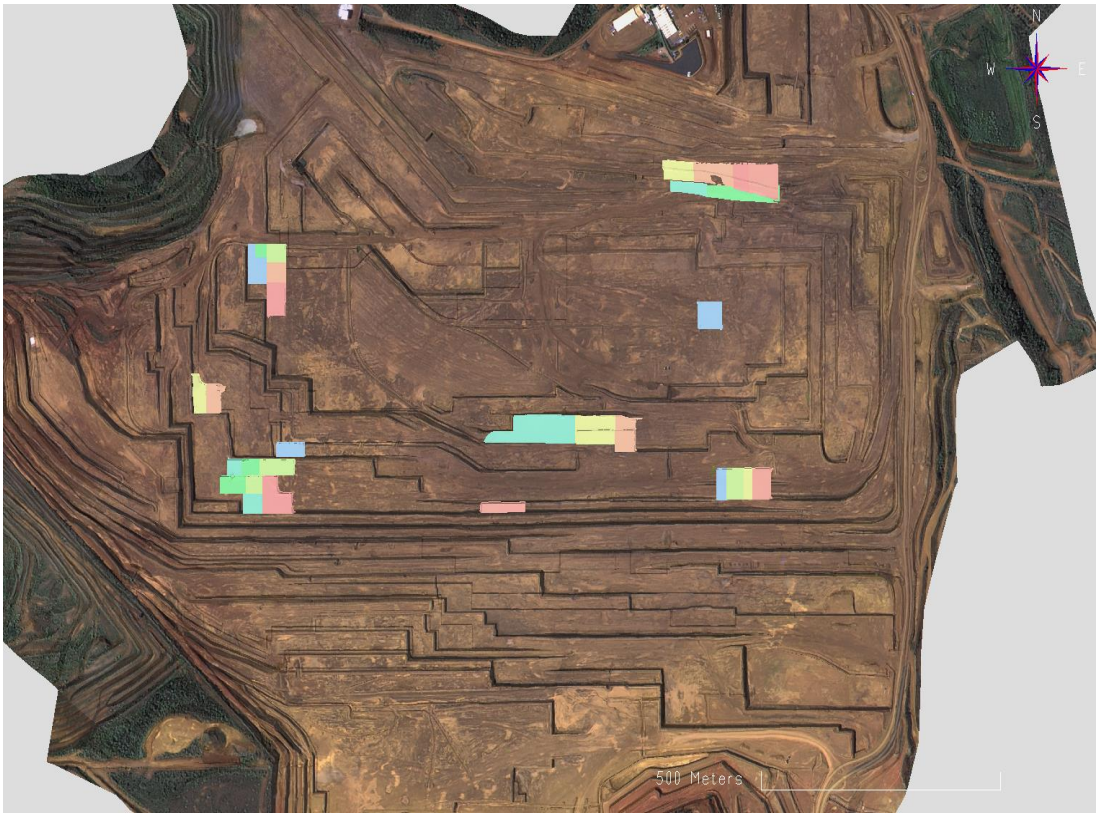
Fonte: elaboração do próprio autor

Figura 3.14 - Pilhas sequenciadas manualmente (Outubro 2022)



Fonte: elaboração do próprio autor

Figura 5.15 - Pilhas sequenciadas manualmente (Novembro 2022)



Fonte: elaboração do próprio autor

O método proposto nesse trabalho é iniciado partindo de planos de lavra de curto prazo já confeccionados anteriormente de forma manual (setembro / outubro e novembro de 2022) e baseado nas áreas disponibilizadas pelo médio prazo. As regiões foram agrupadas e submetidas ao sequenciador matemático do software aplicado nesse trabalho. As variáveis selecionadas para a otimização foram o teor de Nb_2O_5 e a recuperação metalúrgica. Os limites superiores e inferiores das variáveis foram calculados levando em consideração o desvio padrão das pilhas programadas manualmente no trimestre definido para o estudo. Foram então definidas as direções de lavra (diglines), as precedências de fases, o destino do material (usina) e também foram estabelecidas as restrições de volume, teor de nióbio e recuperação metalúrgica para o alcance das metas. Várias simulações foram obtidas e analisadas e o melhor resultado foi selecionado de acordo com a avaliação realizada pelo planejador.

Para realização do sequenciamento matemático, foram utilizadas frentes de lavra programadas anteriormente através do método manual afim de realizar a comparação dos métodos utilizando as mesmas áreas. Os dados obtidos através do sequenciamento manual das pilhas no período citado foram levantados e arquivados para posteriores comparações com o método proposto.

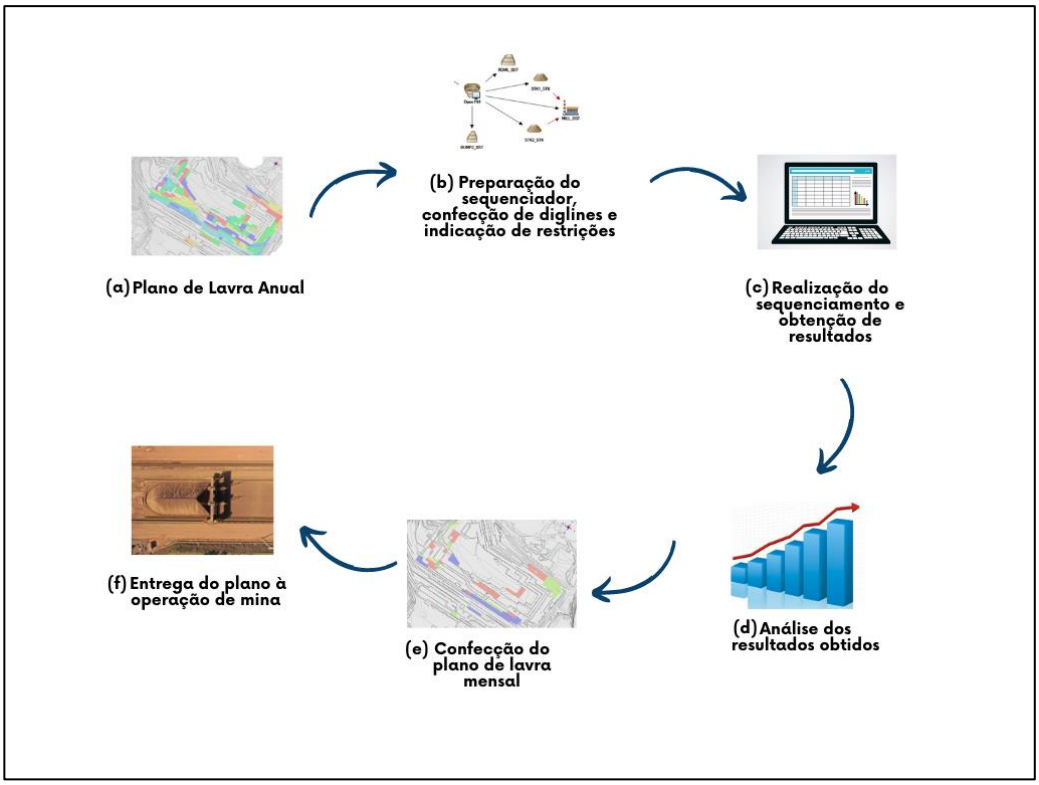
O modelo de blocos para realização do estudo foi bloqueado no modelo utilizado para confecção dos planos de lavra manuais a fim de utilizar o mesmo banco de dados para utilização da ferramenta de sequenciamento matemático.

A seleção das fases foi definida com o objetivo de comparar o cenário real com a proposta de estacionarização do teor utilizando o algoritmo matemático da ferramenta já disponível no software utilizado no planejamento de lavra. Com as áreas já definidas e atualizadas (fases), elas foram subdivididas em cortes de 30x30 metros utilizando uma ferramenta específica para essa finalidade (Autoslicer).

Na Figura 3.16 está apresentado o fluxograma aplicado ao planejamento de lavra de curto prazo utilizando o sequenciador matemático onde: (a) trata-se do plano de lavra anual fornecido pelo planejamento de médio prazo contendo as áreas previstas para lavra no período; (b) configuração do sequenciador matemático para receber as informações necessárias e restrições estabelecidas de acordo com as metas a serem atingidas; (c) obtenção dos resultados do sequenciamento; (d) os dados são analisados e realizadas novas rodadas de sequenciamento caso não os

objetivos não tenham sido atingidos de forma satisfatória; (e) as pilhas programadas são exportadas e o plano de lavra mensal é confeccionado; (f) entrega do plano de lavra subdividido em pilhas de minério atualizadas à topografia para a operação de mina.

Figura 3.16 - Fluxograma esquemático da metodologia proposta para confecção de plano de lavra mensal subdividido em pilhas, utilizando sequenciador matemático

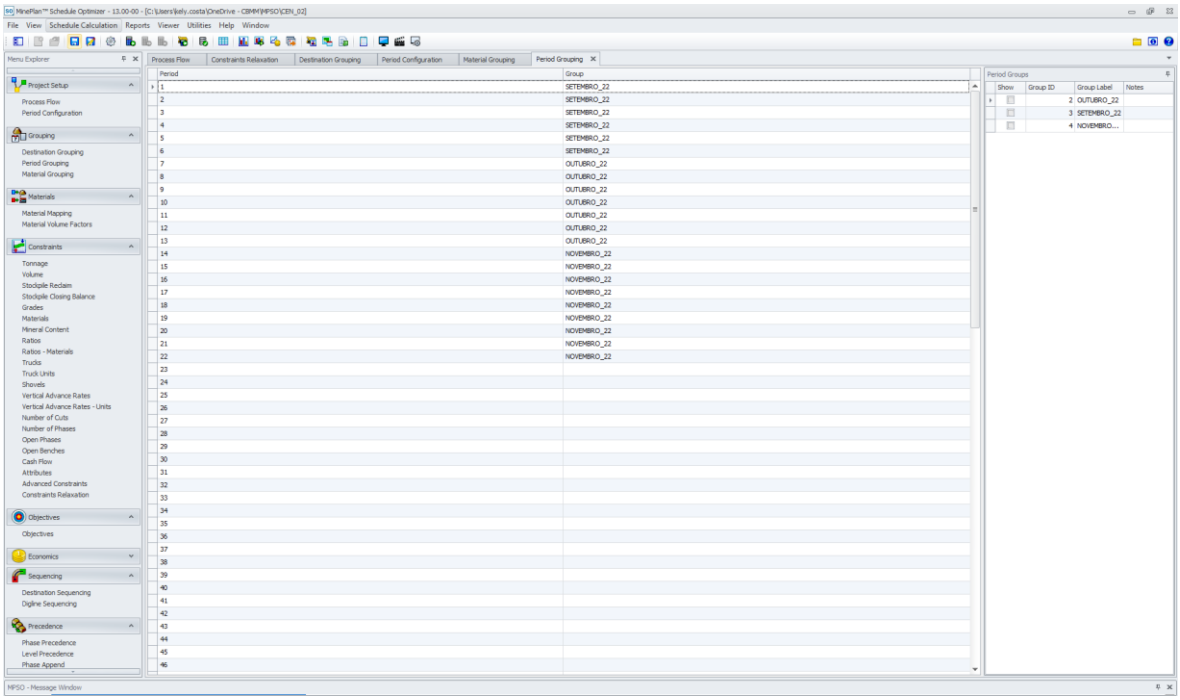


Fonte: elaboração do próprio autor

Os limites superior e inferior para os teores foram calculados considerando o desvio padrão nas pilhas programadas manualmente, somado ou subtraído da média aritmética delas. O volume superior e inferior das pilhas foi definido considerando a capacidade máxima e mínima do pátio de homogeneização da empresa onde o estudo foi realizado. O fluxo do processo foi construído considerando somente um destino, ou seja, usina.

Na Figura 3.17, com o fluxo do processo definido, são determinados os períodos (pilhas de minério), eles são definidos de acordo com o número de pilhas que podem ser formadas com o volume disponível em todas as fases (meses). Nessa fase, são também criados os grupos que receberão as pilhas de minério ou períodos, que foram denominados como setembro_22, outubro_22 e novembro_22.

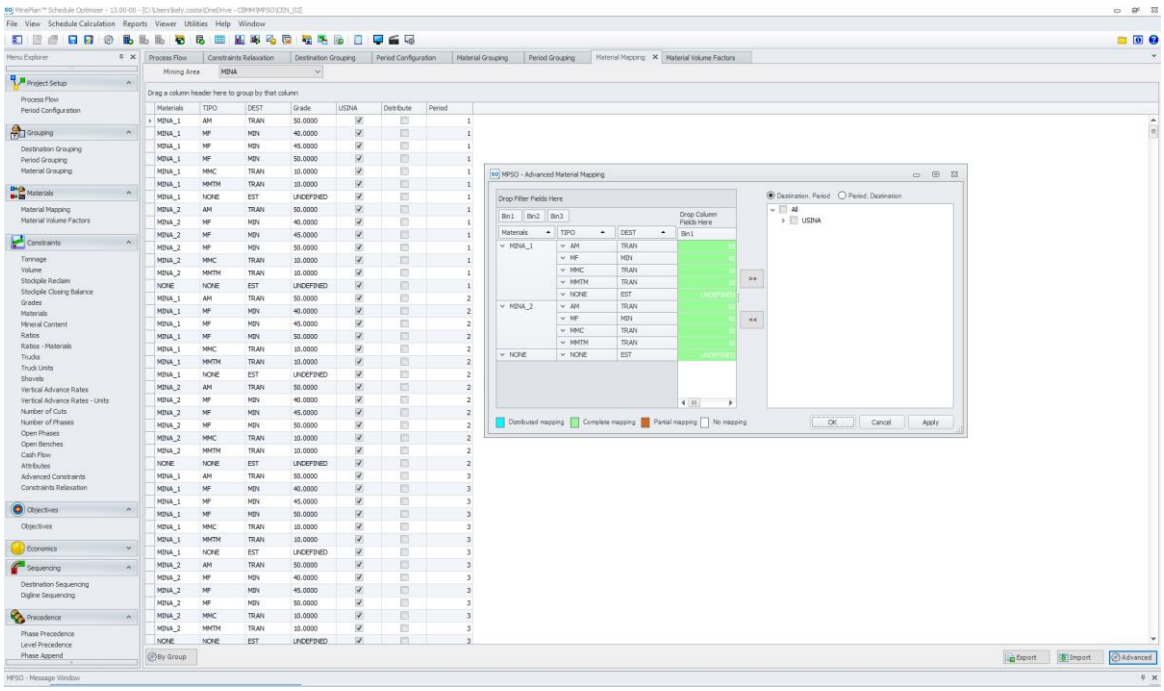
Figura 3.17 - Criação de grupos e determinação de períodos



Fonte: elaboração do próprio autor

Na aba *material mapping* o material disponível é destinado de acordo com suas características tipológicas e de qualidade tais como: estéril, minério de transição e minério franco. Como o material utilizado se trata de minério, o mapeamento realizado foi somente para minério. (Figura 3.18).

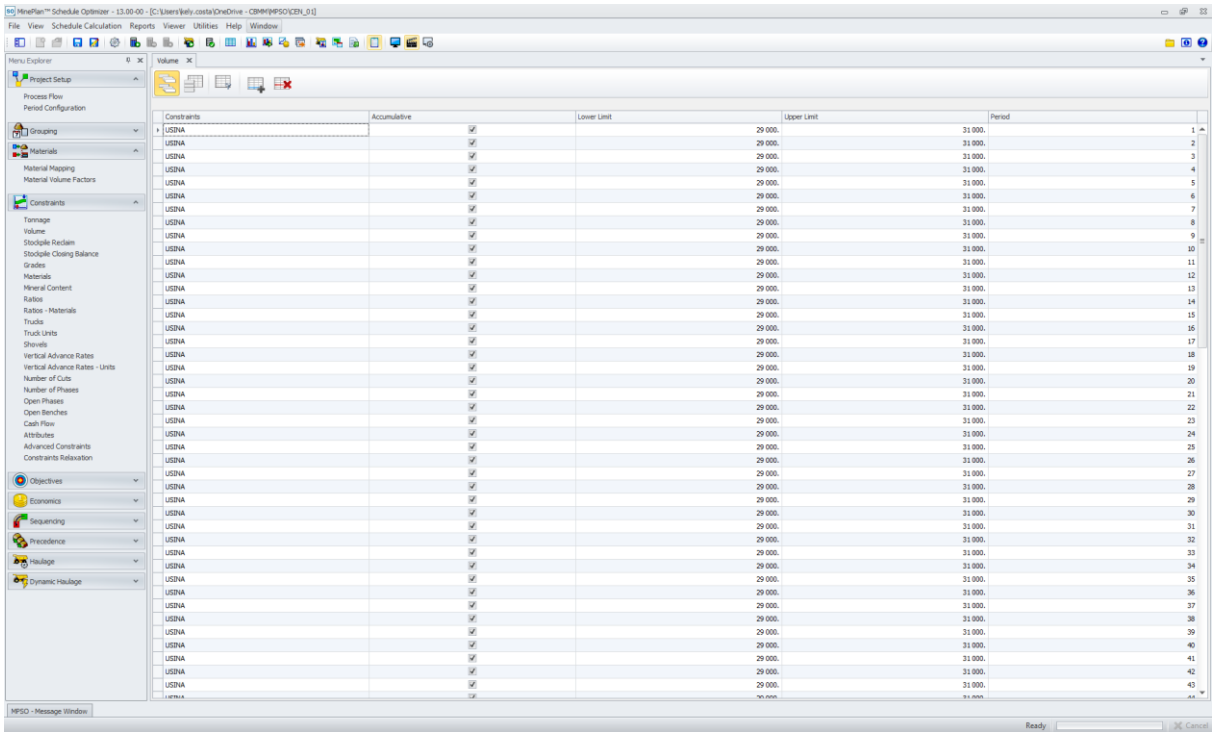
Figura 3.18 - Mapeamento de destinos de material



Fonte: elaboração do próprio autor

Para estabelecer as restrições relacionadas à volume, teor de Nb_2O_5 e Recuperação metalúrgica que o sequenciamento deverá obedecer para cumprir as metas impostas pelo programador, a aba de *constraints* é preenchida (Figura 3.19). Limites superiores e inferiores foram estipulados para cada restrição, baseando-se nos desvios das pilhas programadas nas fases, tanto para cima quanto para baixo.

Figura 3.19 -Aba de restrições

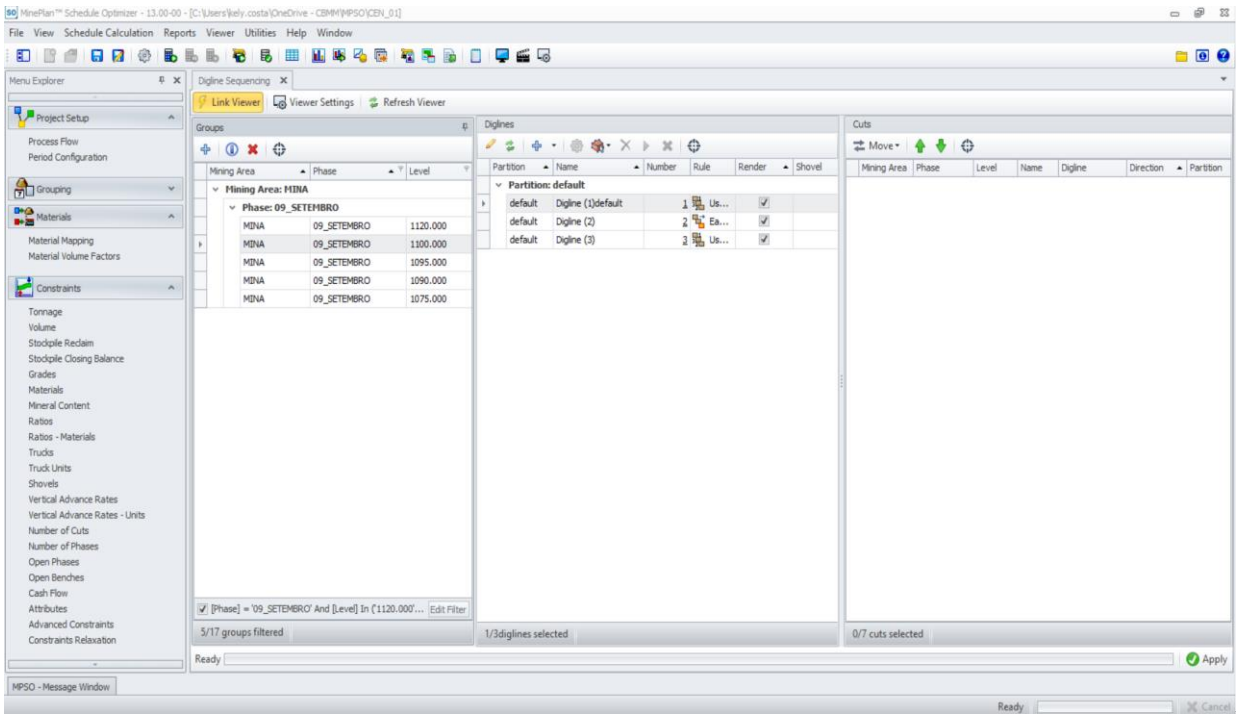


Fonte: elaboração do próprio autor

Na etapa seguinte, após a realização dos passos anteriormente estabelecidos, as *diglines* ou, linhas que darão a direção da lavra são determinadas banco a banco e fase a fase (Figura 3.20).

Para cada direção de lavra de um determinado banco são desenhadas as possíveis *diglines* que permitem a saída do polígono selecionado de forma operacional e que não interfira diretamente na lavra das demais frentes.

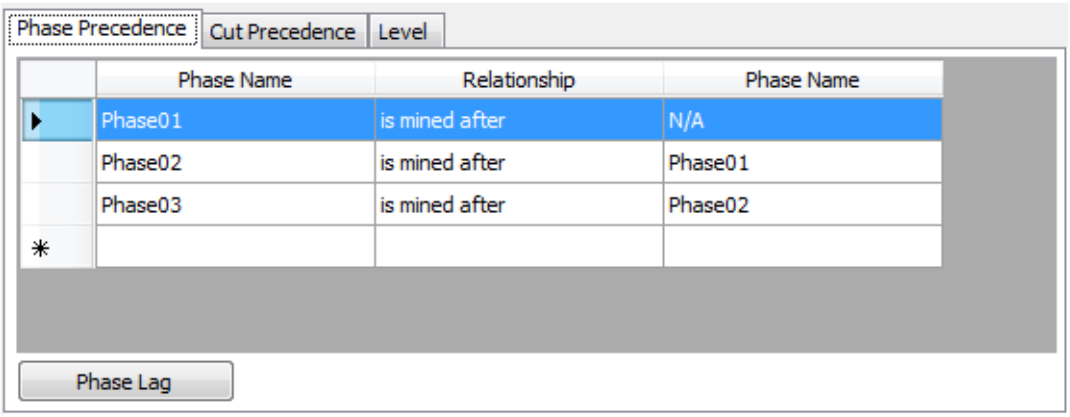
Figura 3.20 - Aba de definição de digllines



Fonte: elaboração do próprio autor

Conforme Figura 3.21 nesta etapa, são definidas as precedências de fases, ou seja, a ordem e as dependências entre as fases. As precedências determinarão a sequência que a lavra irá ocorrer garantindo as restrições e requisitos operacionais definidos pelo planejador. Nesta etapa foi definida a ordem de lavra das fases e suas relações entre si.

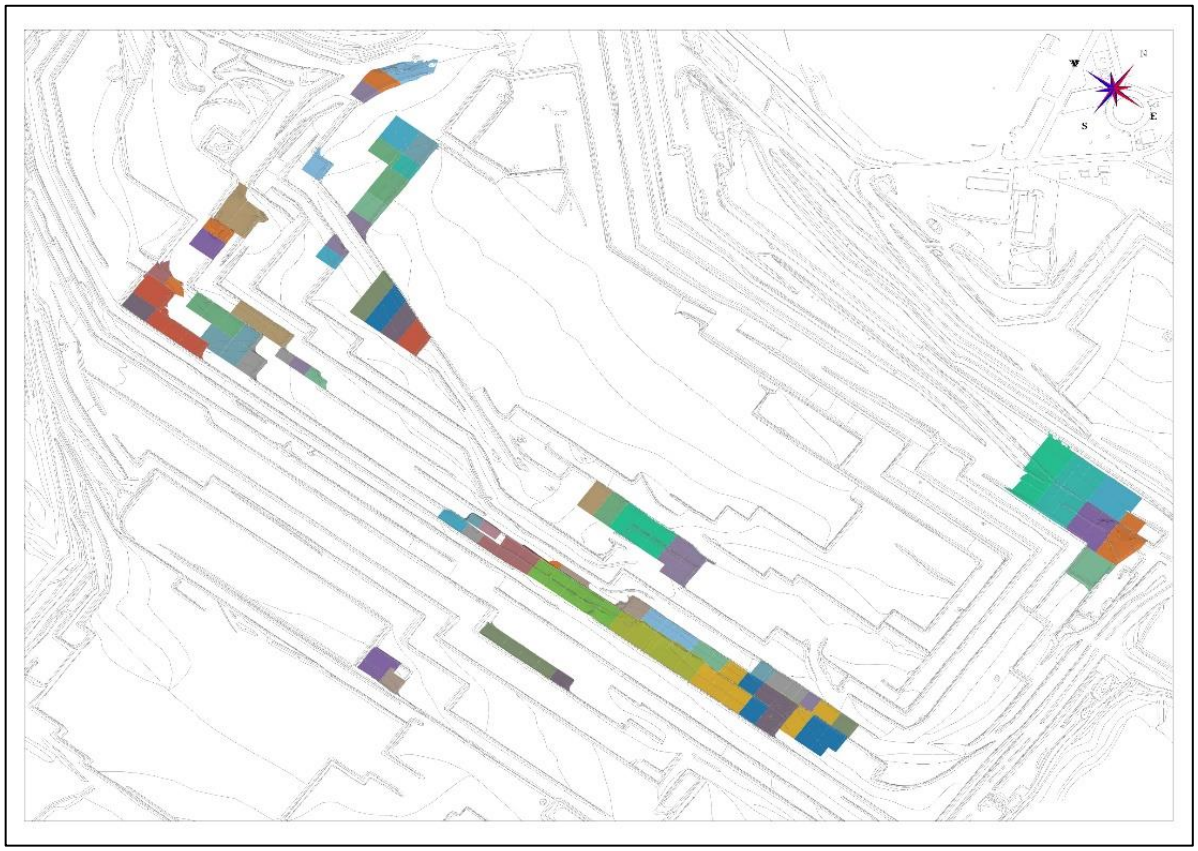
Figura 3.21 - Definição de precedências de fases



Fonte: elaboração do próprio autor

Após a inserção de todas as informações para o sequenciamento, o algoritmo é colocado em funcionamento e retorna com os resultados contendo pilhas programadas que estão representadas cada uma por uma cor diferente na Figura 3.22, levando em conta as restrições impostas e diglines desenhadas. As pilhas de minério podem ser consideradas como a junção de diferentes áreas da mina que serão lavradas para alimentar a usina de beneficiamento. As diversas sequências de simulações são geradas pelo algoritmo e analisadas até que o melhor resultado seja atingido. As análises operacionais e de atendimento da produção mensal são realizadas e o melhor cenário de acordo com a verificação dos programados é definido pelo planejador.

Figura 3.22 - Pilhas programadas pelo sequenciador matemático



Fonte: elaboração do próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados do trabalho realizado para o desenvolvimento da presente dissertação de mestrado, que teve como objetivo realizar estudo de caso utilizando sequenciador matemático para confecção de planos de lavra mensais buscando baixa variabilidade nas variáveis de interesse entre pilhas de minério (teor de nióbio, recuperação metalúrgica e volume). A metodologia empregada para coleta e análise dos dados foi descrita no capítulo anterior.

A Tabela 1 apresenta os resultados referentes a 21 períodos (pilhas), comparando os dados obtidos no sequenciamento do cenário automatizado com os resultados do método manual. As pilhas dos três meses sequenciados foram distribuídas da seguinte forma: períodos 1 a 7 correspondem a setembro, períodos 8 a 14 a outubro, e períodos 15 a 21 a novembro. Observa-se que os volumes das pilhas programadas para setembro permaneceram próximos aos limites superior e inferior estipulados. Este comportamento também se repete em outubro e novembro.

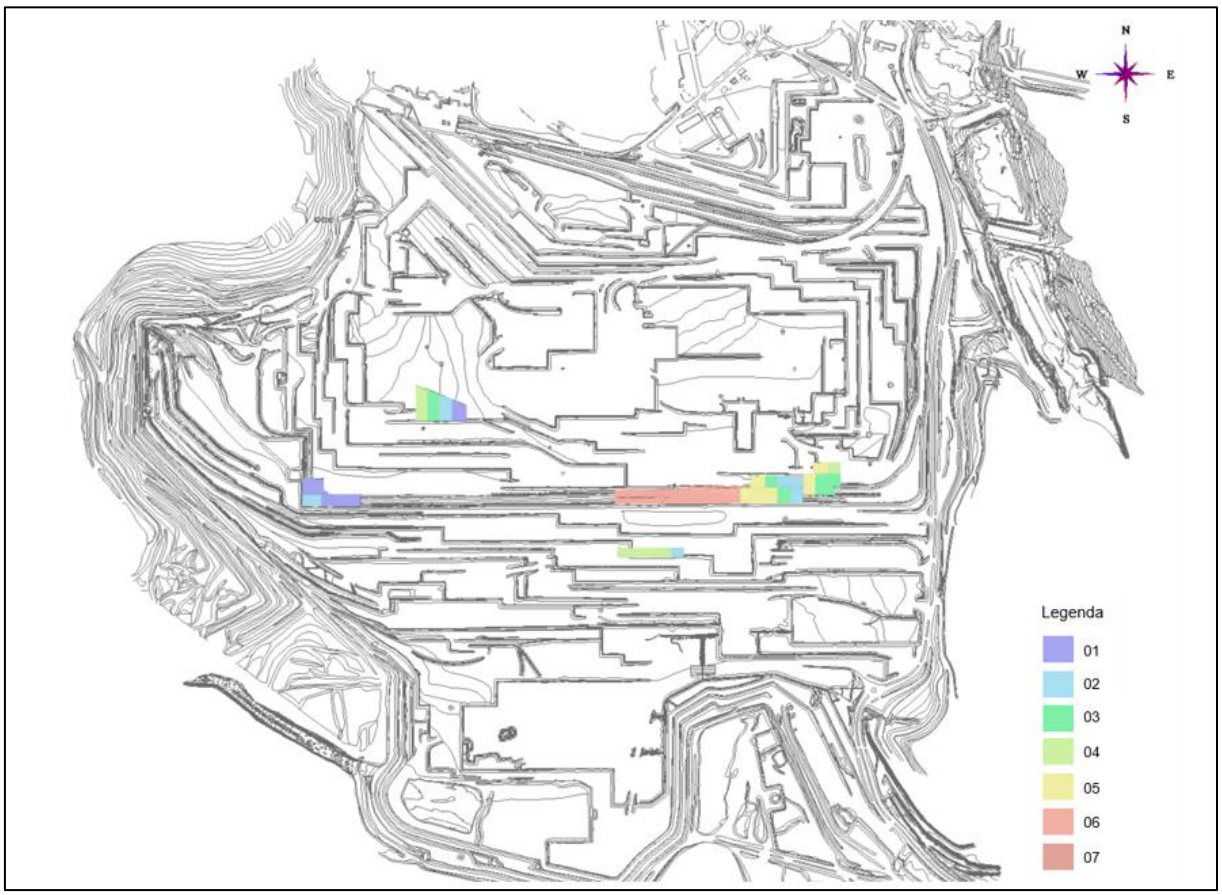
Tabela 1 - Resultados otimizados comparados ao método manual

Período	Volume (m^3)		Nb_2O_5 (%)		Recuperação Metalúrgica (%)	
	Manual	Cenário 01	Manual	Cenário 01	Manual	Cenário 01
1	32,506	30,114	1,52	1,37	32,07	32,36
2	30,356	30,196	1,45	1,38	32,90	34,94
3	30,642	30,393	1,31	1,37	33,67	32,85
4	31,238	31,386	1,35	1,29	33,92	34,37
5	30,962	31,532	1,39	1,40	34,83	32,29
6	32,201	29,032	1,14	1,28	35,24	34,10
7	31,799	30,810	1,21	1,34	33,76	34,21
8	30,484	31,376	1,39	1,29	36,10	35,50
9	30,603	31,901	1,34	1,30	35,24	35,33
10	30,725	31,966	1,57	1,29	34,22	35,35
11	31,581	30,720	1,18	1,29	30,56	35,86
12	31,174	31,756	1,28	1,31	33,14	35,51
13	30,399	30,592	1,38	1,21	35,17	35,37
14	30,947	30,411	1,36	1,31	33,96	35,47
15	31,990	30,031	1,52	1,37	33,70	38,24
16	31,418	31,381	1,30	1,43	34,47	37,01
17	31,245	29,363	1,31	1,40	36,03	35,05
18	30,824	29,863	1,40	1,38	34,17	36,15
19	32,084	30,292	1,55	1,19	35,09	36,55
20	30,658	29,745	1,43	1,43	35,55	39,73
21	31,019	30,591	1,43	1,68	35,08	42,63

Apesar de o sequenciador utilizar sempre as direções de lavra indicadas pelo planejador, é viável realizar a checagem das pilhas formadas pelo otimizador a fim de verificar a operacionalidade dos polígonos, as rotas de saída do material e oportunidades de redução de DMT junto à operação de mina. Com as validações concluídas junto as equipes interessadas, as pilhas podem ser exportadas como objetos geométricos para entrega à topografia e posterior locação em campo.

A Figura 4.23 traz as pilhas formadas no mês de setembro com a utilização do sequenciador matemático.

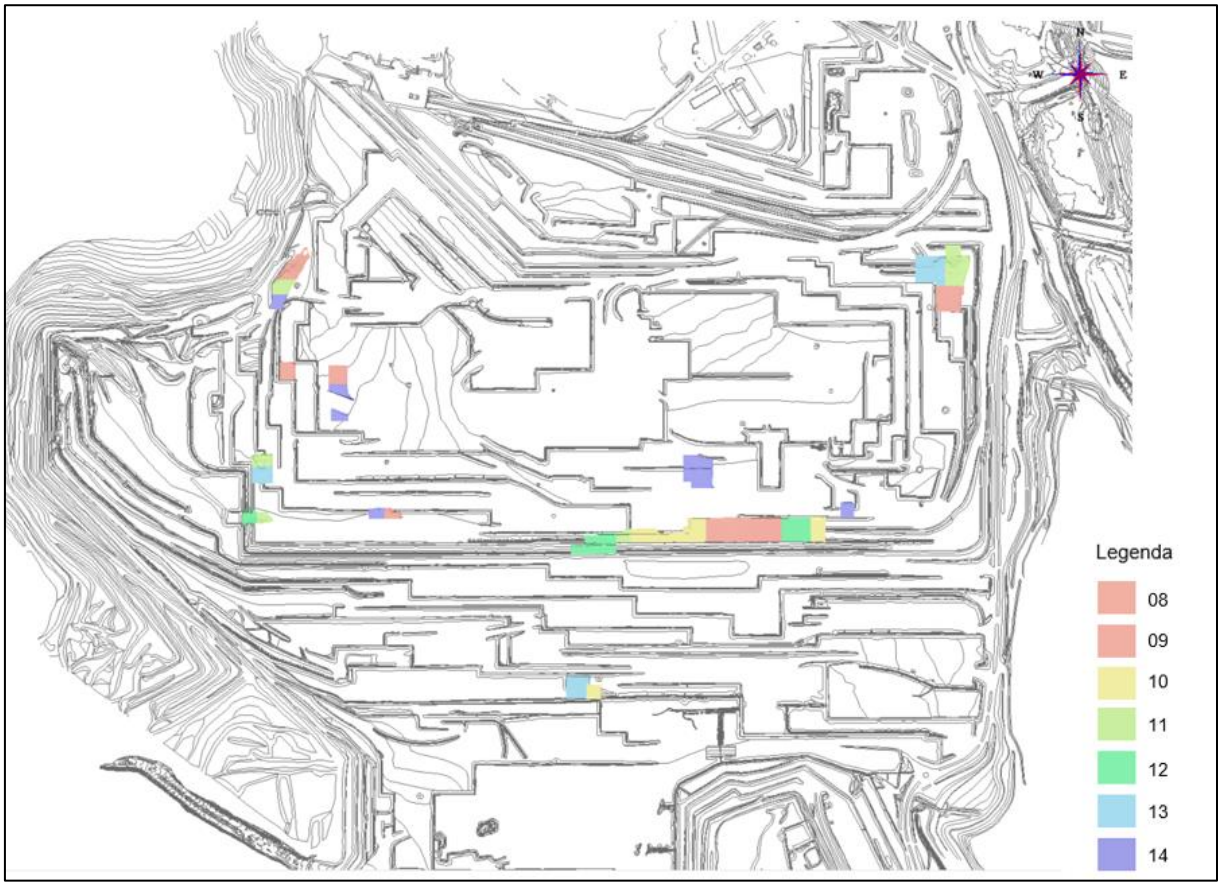
Figura 4.23 - Pilhas sequenciadas setembro



Fonte: elaboração do próprio autor

O plano de lavra do mês de outubro foi composto por sete pilhas de minério, assim como os meses de setembro e novembro. A Figura 4.24 evidencia as pilhas obtidas a partir do otimizador matemático.

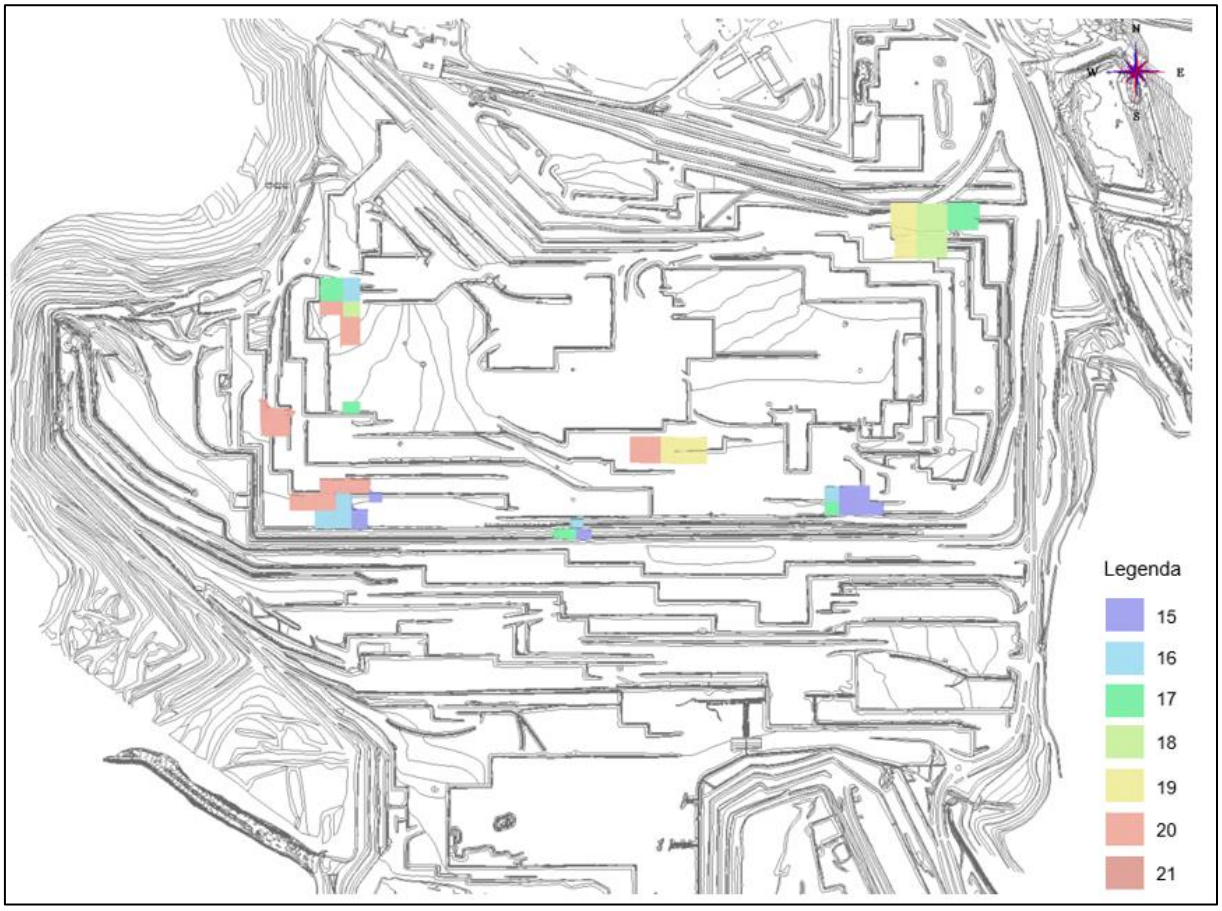
Figura 4.24 - Pilhas sequenciadas outubro



Fonte: elaboração do próprio autor

Abaixo, a Figura 4.25 traz o mapa com a localização dos polígonos definidos para composição das pilhas sequenciadas do mês de novembro.

Figura 4.25 - Pilhas sequenciadas novembro



Fonte: elaboração do próprio autor

O Gráfico 1 apresenta os erros absolutos medidos a partir do teor obtido no método manual e otimizado frente a média do teor de nióbio disponível para a confecção dos planos de lavra a fim de demonstrar o quão distante os teores das pilhas se afastaram desta média, conforme equação 1 abaixo.

$$Erro = \frac{valor\ verdadeiro - valor\ estimado}{valor\ verdadeiro} * 100 \qquad (8)$$

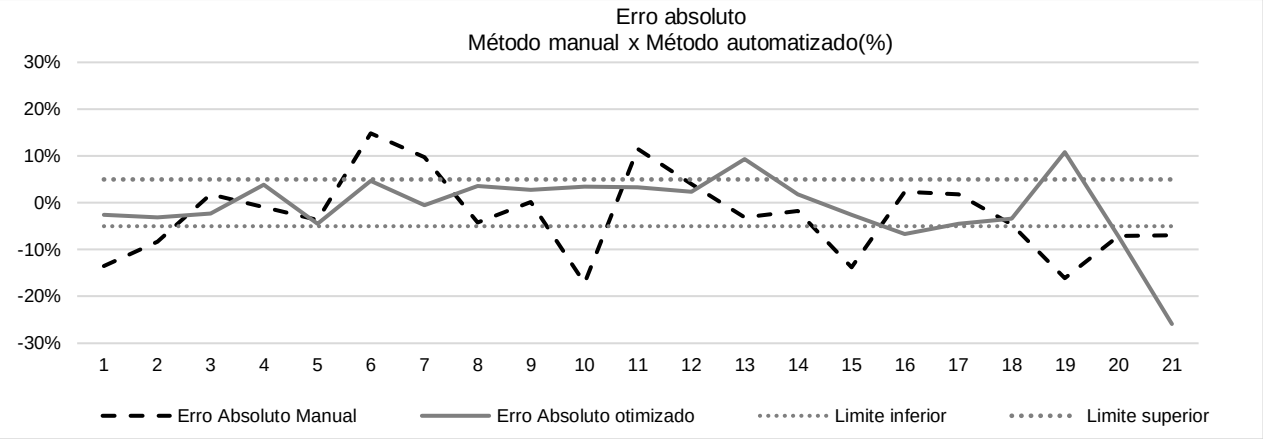
Valor verdadeiro = média do trimestre (plano de lavra)

Valor estimado = média da pilha obtida (manual / automatizado)

A média do teor de nióbio do material disponível para lavra nos períodos trabalhados é 1,34%. As áreas utilizadas para confecção das pilhas manuais foram

unidas com o intuito de oferecer ao sequenciador maior quantidade de frentes de lavra e liberdade para formar pilhas o mais próximas possível da meta estipulada para cada um dos períodos. Nota-se que as pilhas obtidas a partir do método otimizado mantem maior estabilidade entre si nos meses de setembro e outubro bastante em virtude das metas definidas de teor e recuperação serem menores para atendimento ao plano de produção para os períodos. Porém, como consequência para o último mês as áreas sobressalentes possuíam teor e recuperação mais altos o que impactou diretamente as pilhas 19, 20 e 21 do mês de novembro. Observa-se que ao longo dos três meses considerados para o estudo, o método automatizado mostrou maior estabilidade entre as pilhas.

Gráfico 1 - Gráfico comparativo dos erros absolutos entre método manual e automatizado



Fonte: elaboração do próprio autor

A partir do Gráfico 1, observa-se que o erro máximo para o método manual foi de 17% e o erro máximo do método otimizado foi 26%. Embora o erro máximo do método otimizado tenha sido maior, isso se deu em função da disponibilidade do material do período. Uma alternativa para atenuar essa variabilidade seria a utilização de médias móveis a partir dos planos trimestrais.

As Tabelas 2 a 4 apresentam os sumários estatísticos dos sequenciamentos tanto no método manual quanto no otimizado. Considerando o desvio padrão obtido a partir das pilhas resultantes no método otimizado nos meses de setembro e outubro nota-se uma redução considerável quando comparados ao método manual. No mês de novembro o desvio no método otimizado foi maior que no método manual em função do descolamento nas três últimas pilhas do período 19, 20 e 21 em virtude de

as áreas restantes serem mais ricas em teor e recuperação metalúrgica se comparadas aos meses anteriores.

Observa-se uma maior variação do erro nas três últimas pilhas (19, 20 e 21) devido à limitação na seleção dos blocos do período para otimização. Essa variação poderia ser mitigada com a sobreposição dos intervalos de lavra no sequenciamento anual. Um comportamento semelhante é identificado em relação ao teor, refletindo também na recuperação metalúrgica. As últimas pilhas de novembro (19, 20 e 21) apresentam desvios em relação aos limites definidos, novamente devido à qualidade do material restante destinado à sua lavra.

Tabela 2- Sumário estatístico manual x cenário 01 setembro

	Manual_Setembro			*Cenario 01_Setembro*		
	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met
Média	31,386	1,34	33,77	30,495	1,35	33,59
Erro padrão	305	0,05	0,41	322	0,02	0,40
Mediana	31,238	1,35	33,76	30,393	1,37	34,10
Desvio padrão	807	0,13	1,08	852	0,05	1,07
Variância da amostra	650,569	0,02	1,16	725,461	0,00	1,14
Intervalo	2,150	0,38	3,17	2,500	0,12	2,66
Mínimo	30,356	1,14	32,07	29,032	1,28	32,29
Máximo	32,506	1,52	35,24	31,532	1,40	34,94
Soma	219,704	9,36	236,40	213,463	9,42	235,12
Contagem	7	7	7	7	7	7

Tabela 3 - Sumário estatístico manual x cenário 01 outubro

	Manual_Outubro			*Cenario 01_Outubro*		
	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met
Média	30,845	1,36	34,06	31,246	1,29	35,48
Erro padrão	159	0,04	0,69	250	0,01	0,07
Mediana	30,725	1,36	34,22	31,376	1,29	35,47
Desvio padrão	421	0,12	1,82	661	0,03	0,18
Variância da amostra	176,960	0,01	3,32	437,582	0,00	0,03
Intervalo	1,182	0,38	5,54	1,555	0,10	0,53
Mínimo	30,399	1,18	30,56	30,411	1,21	35,33
Máximo	31,581	1,57	36,10	31,966	1,31	35,86
Soma	215,913	9,50	238,39	218,722	9,00	248,38
Contagem	7	7	7	7	7	7

Tabela 4 - Sumário estatístico manual x cenário 01 novembro

Manual_Novembro			
	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met
Média	31,319	1,42	34,87
Erro padrão	208	0,04	0,30
Mediana	31,245	1,43	35,08
Desvio padrão	551	0,09	0,81
Variância da amostra	303,794	0,01	0,65
Intervalo	1,426	0,25	2,32
Mínimo	30,658	1,30	33,70
Máximo	32,084	1,55	36,03
Soma	219,236	9,95	244,08
Contagem	7	7	7

Cenario 01_Novembro			
	Volume	Nb_2O_5	Rec. Met
Média	30,181	1,41	37,91
Erro padrão	249	0,05	0,97
Mediana	30,031	1,40	37,01
Desvio padrão	659	0,14	2,57
Variância da amostra	433,885	0,02	6,61
Intervalo	2,018	0,49	7,58
Mínimo	29,363	1,19	35,05
Máximo	31,381	1,68	42,63
Soma	211,267	9,89	265,37
Contagem	7	7	7

4.1 Comparativo Resultados método manual x otimizado

A Figuras 2, 3 e 4 trazem os resultados obtidos no método otimizado em comparação com os do método manual. Pode-se notar que, para o volume, o sequenciador manteve todas as pilhas programadas dentro dos limites superiores e inferiores estipulados para todas as pilhas de minério nos três meses trabalhados. Já para o método manual, nota-se que três pilhas programadas saíram dos limiares de volume.

Gráfico 2- Variação de volume (m^3) em setembro

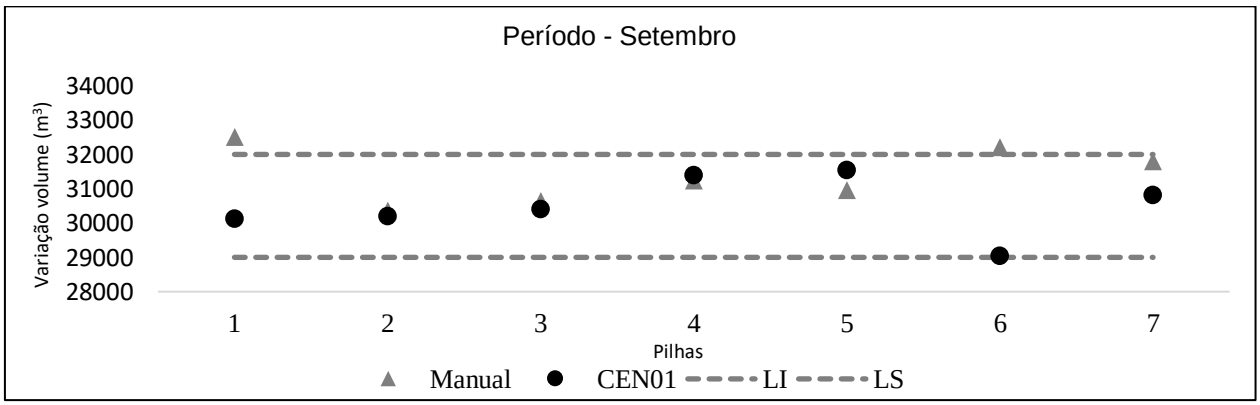


Gráfico 3 - Variação de volume (m3) em outubro

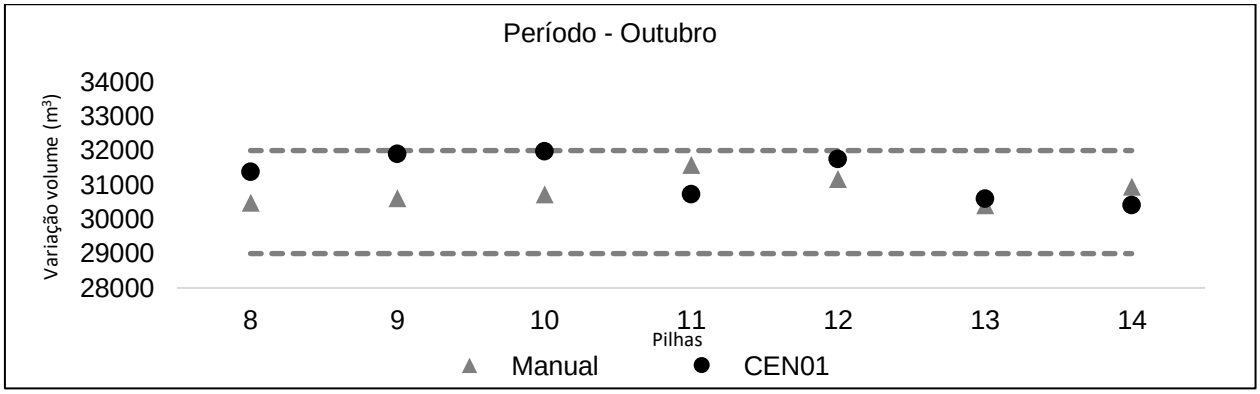
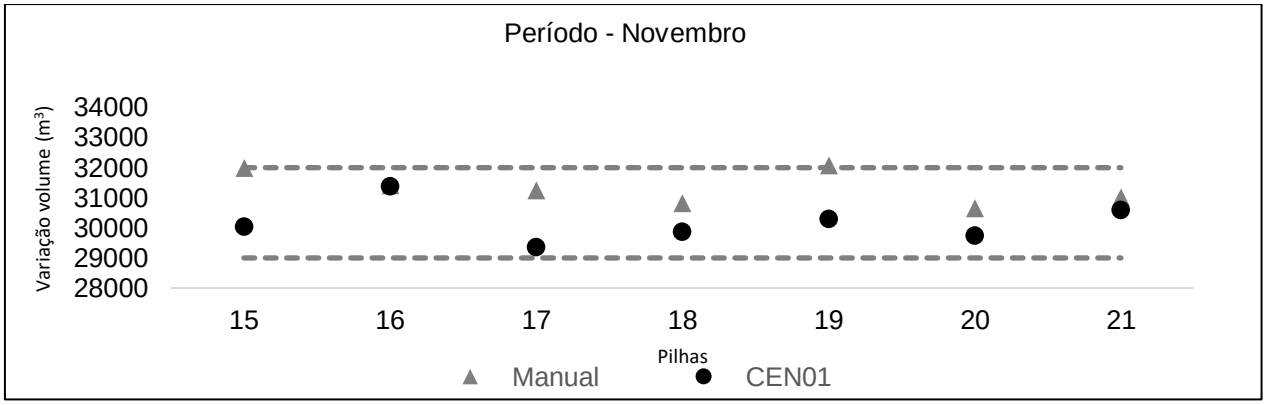
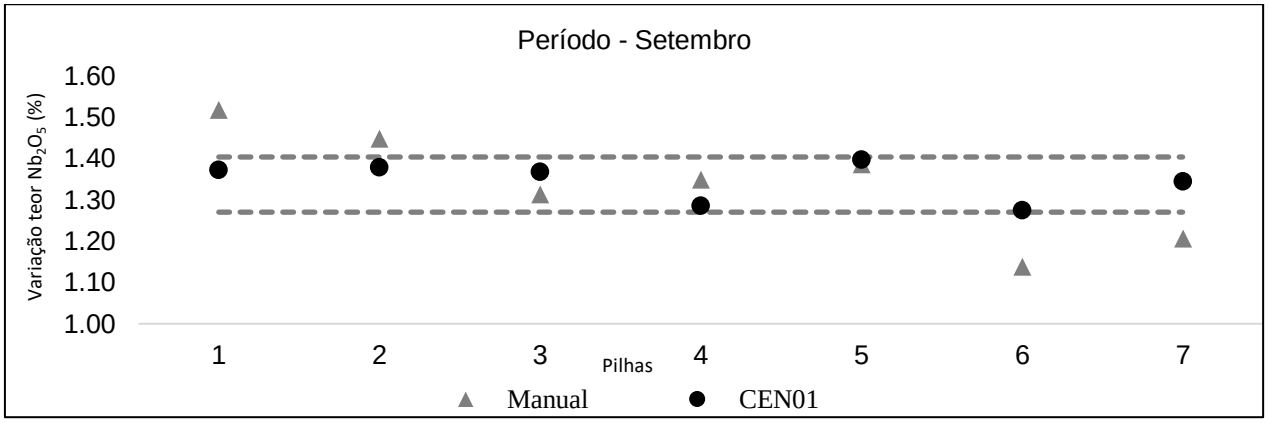


Gráfico 4 - Variação de volume (m3) em novembro



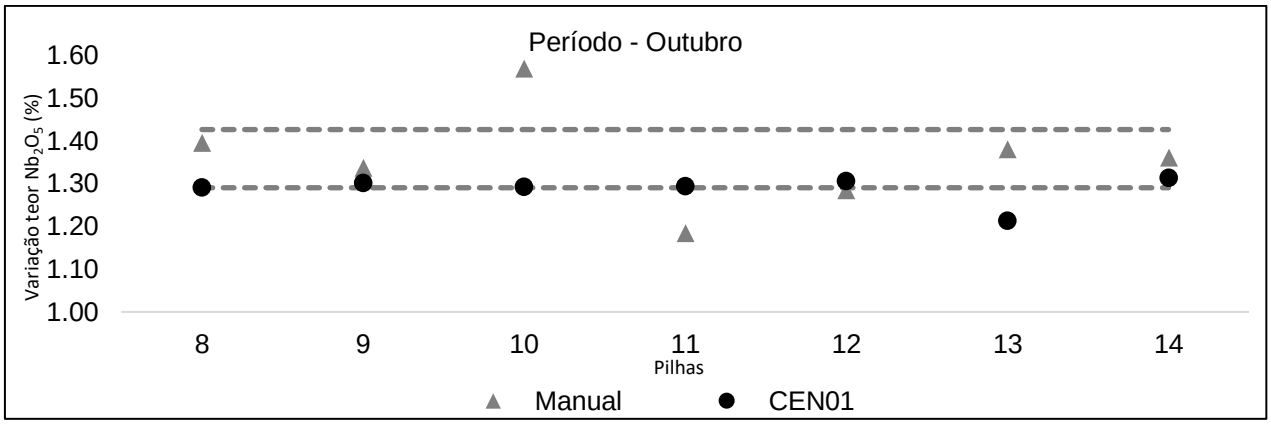
As Figuras 5, 6 e 7 trazem os dados de teor de Nb_2O_5 do método manual em comparação ao método otimizado (Cenário 01). Nota-se que no mês de setembro (Figura 8) todas as pilhas programadas pelo sequenciador no período tiveram o teor mantido dentro dos limites estipulados. Já no método manual, quatro das sete pilhas programadas no mês ficaram fora dos limites.

Gráfico 5 - Variação de teor de Nb_2O_5 em setembro



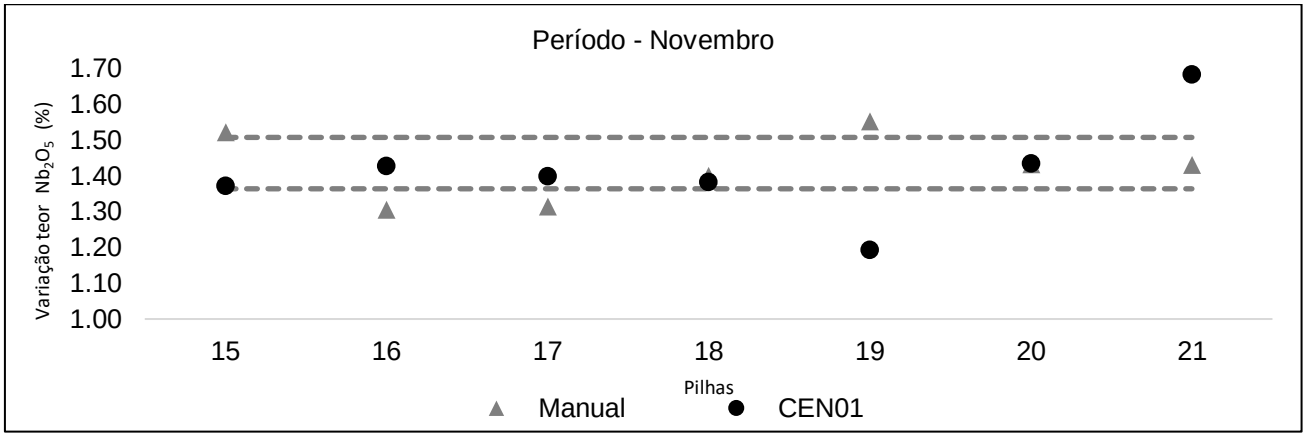
No mês de outubro, o gráfico 6 traz os resultados obtidos manualmente em conjunto aos dados sequenciados. Neste mês em específico a pilha 13 otimizada está fora dos limites pré-estabelecidos, se afastando do limite inferior proposto, porém, no método manual foram planejadas duas pilhas fora dos padrões com grandes desvios em relação às linhas limites. Pode-se observar que seis das sete pilhas programadas no período estiveram bastante próximas da linha de limite inferior estipulada, o que mostra uma variação bastante pequena entre pilhas no referido mês.

Gráfico 6 - Variação de teor de Nb_2O_5 em outubro



No mês de novembro o gráfico 7 apresenta os dados obtidos onde, pode-se observar que duas pilhas sequenciadas estão fora dos limites estabelecidos, enquanto o restante se manteve dentro das metas definidas. Observa-se que três pilhas das programadas manualmente saíram dos limiares definidos.

Gráfico 7 - Variação de teor de Nb_2O_5 em novembro



As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os dados de recuperação metalúrgica comparando o método manual ao método otimizado. Em setembro, todas as pilhas programadas pelos dois métodos permaneceram dentro dos limites estabelecidos, com desvios na variável recuperação metalúrgica bastante próximos entre si, alinhados aos encontrados no método manual. Em outubro, as pilhas programadas pelo método otimizado apresentaram pequenos desvios na recuperação metalúrgica de forma individual. Ao analisar os desvios padrão de ambos os métodos, observa-se uma redução significativa nesse indicador no método otimizado. No entanto, em novembro, o desvio dessa variável voltou a aumentar devido à qualidade superior do material restante para sequenciamento, com teores e recuperação metalúrgica superiores aos utilizados no método manual.

Gráfico 8 - Variação de recuperação metalúrgica em setembro

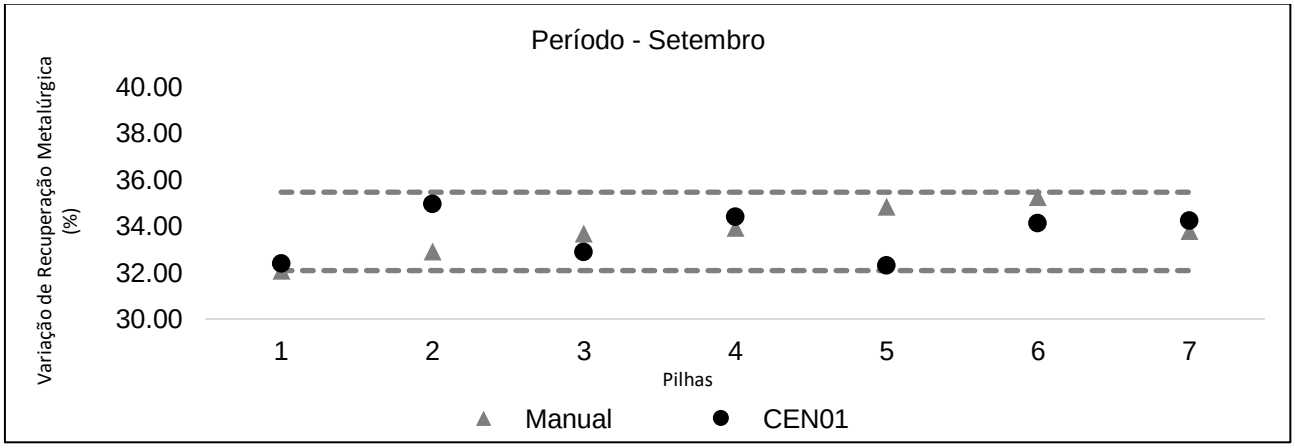


Gráfico 9 - Variação de recuperação metalúrgica em outubro

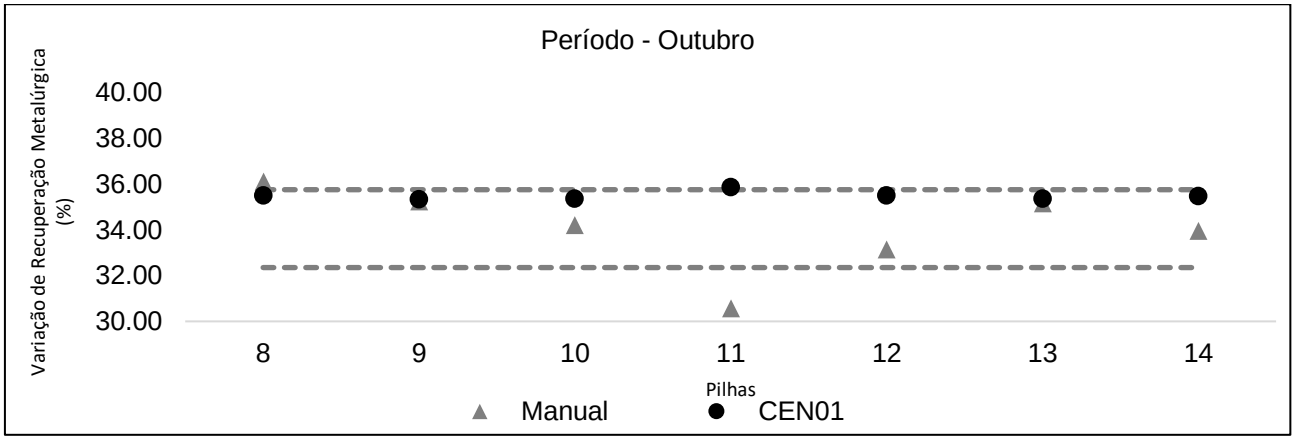
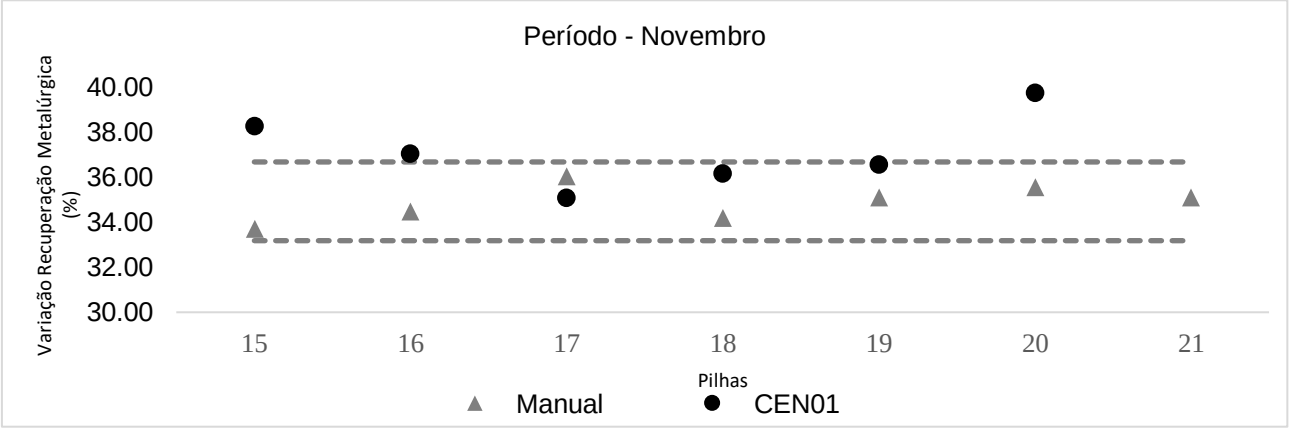


Gráfico 10 - Variação de recuperação metalúrgica em novembro



A elaboração de planos mensais utilizando o sequenciador matemático se mostrou eficaz para as pilhas programadas em setembro com redução de 67% na variabilidade do teor de Nb_2O_5 e 11% na Recuperação Metalúrgica em relação ao método manual. O resultado do sequenciamento do mês de outubro apresentou as maiores reduções dos desvios sendo eles de 74% para o teor de Nb_2O_5 e 91% para recuperação metalúrgica. Em novembro, o desvio padrão para as variáveis analisadas aumentaram em detrimento da qualidade do material disponível ser superior às das áreas lavradas nos outros períodos.

Em julho de 2024, a metodologia de otimização do planejamento de lavra de curto prazo utilizando a estacionarização de teores, foi integrada à rotina operacional. Desde então, até 30 de janeiro de 2025, foram identificados ganhos operacionais, que serão detalhados nos tópicos subsequentes.

4.2 Ganhos no tempo de planejamento

O planejamento de lavra de curto prazo realizado através do otimizador matemático traz a redução de tempo do planejador como ganho do projeto, oferecendo a ele tempo hábil para rodar um maior número de cenários buscando o melhor resultado tanto para a operação de mina quanto para a usina de beneficiamento.

A Tabela 5 apresenta a média de tempo gasto pelo planejador realizando planos de lavra manualmente em comparação com o método otimizado.

Tabela 5 - Tempo de confecção de plano de lavra método manual x método otimizado

Tempo estimado Plano Mensal média ano - 2022 (plano manual)	Tempo estimado Plano Mensal média ano – 2024 (plano otimizado)
(horas)	(horas)
480	192

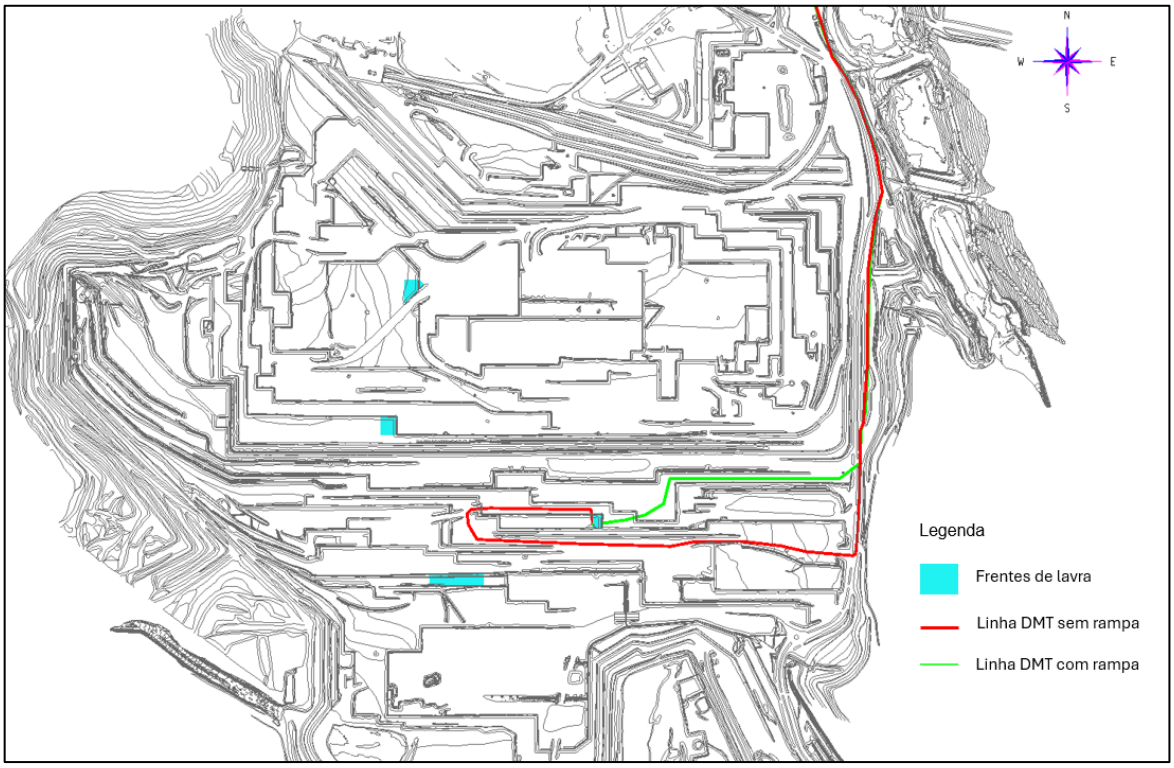
A Tabela demonstra uma redução aproximada de 60% do tempo dedicado pelo planejador para a elaboração do plano de lavra mensal. Em média no ano de 2022 eram dedicadas 40 horas mensais na atividade, após a implantação da rotina o tempo de dedicação foi reduzido a 16 horas mensais.

4.3 Ganhos operacionais de lavra

Com a entrega mais rápida e eficiente do plano de lavra contendo as pilhas de minério a serem lavradas durante o mês, a operação de mina tem tempo suficiente para avaliar as áreas contempladas no plano de lavra, sendo possível avaliar necessidades de obras de infraestrutura como canaletas de drenagem que garantem o escoamento da água de forma controlada durante o período chuvoso garantindo a segurança da operação de mina e de seus colaboradores e encontrar alternativas para rotas que reduzam a DMT impactando diretamente no aumento de produtividade e na redução do consumo de combustível.

A Figura 4.26 traz um mapa contendo uma área de lavra e suas possíveis rotas de saída de materiais com destino ao ponto de alimentação do pátio de homogeneização. Pode-se observar que a rota em vermelho possui 2,901 metros e é a rota que seria realizada pelos caminhões caso a operação de mina não tivesse tempo suficiente para realização de uma rampa de acesso. Já a rota em verde possui 1,956 metros e é a rota realizada pelos equipamentos após a avaliação do plano de lavra e a construção de uma rampa de acesso que reduziu a DMT em 945 metros. Com a redução da DMT pode-se manter a produtividade necessária com menos caminhões o que possibilita a operação de mina redirecionar os veículos para outras atividades realizando um melhor aproveitamento da frota disponível.

Figura 4.26 - Mapa de rotas de polígono de lavra



Fonte: Acervo do autor

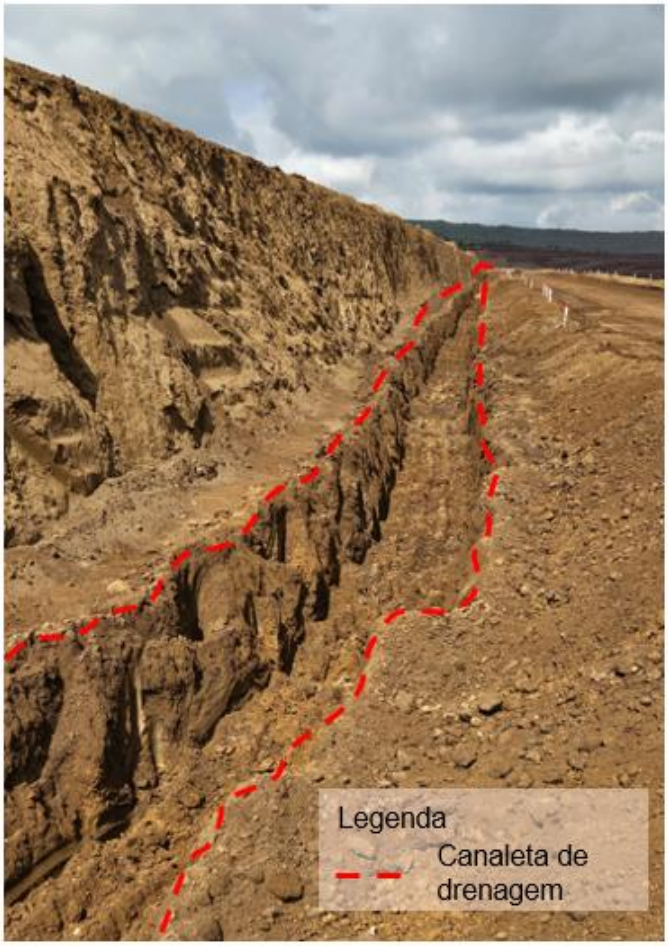
A Figura 4.27 traz o exemplo de uma rampa operacional construída com a finalidade de reduzir a DMT, a construção da rampa facilitou a realização das manobras necessárias na frente de lavra e melhorou a segurança e performance dos equipamentos.

Figura 4.27 - Rampa de acesso construída para redução de DMT

Fonte: Acervo do autor

A Figura 4.28 mostra uma canaleta de drenagem, construída em uma berma de circulação de equipamentos, garantindo a viabilidade do acesso e sua segurança.

Figura 4.28 - Canaleta de drenagem



Fonte: Acervo do autor

4.4 Ganhos no índice de recuperação metalúrgica

O índice de recuperação metalúrgica, denominado IRG (índice de desempenho global), se refere ao fator da recuperação metalúrgica planejada versus a realizada na usina, dada pela expressão abaixo:

$$IRG = \frac{Desempenho\ metalúrgico\ realizado}{Desempenho\ metalúrgico\ previsto} * 100 \qquad (9)$$

A Tabela 6 apresenta os resultados das médias de IRG do período de setembro a novembro de 2022 (plano manual) versus as médias do período de julho a dezembro de 2024 (plano otimizado).

Tabela 6 - Médias de IRG método manual x método otimizado

Média IRG setembro a novembro 2022 (plano manual)	Média IRG (%) julho a dezembro 2024 (plano otimizado)
(%)	(%)
95,81	98,9

Nota-se que houve uma maior aderência do desempenho metalúrgico planejado versus o realizado na planta em virtude da menor variabilidade dos parâmetros de lavra considerados no planejamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do trabalho proposto é a verificação da eficácia do sequenciador matemático na confecção de plano de lavra de curto prazo buscando obter planos de lavra mais acurados e assertivos e a redução do tempo dedicado a atividade pelo planejador. Para atingir as metas definidas se fez necessária a realização de revisão de conceitos fundamentais relativos ao planejamento de lavra de curto prazo e o entendimento dos conceitos que envolviam a ferramenta de otimização que seria utilizada, os quais estão destacados no capítulo de revisão de literatura deste trabalho. A aplicação da metodologia proposta em um cenário a partir de planos de lavra já executados anteriormente de forma manual que está ilustrada no capítulo que traz a metodologia aplicada no trabalho, e por fim, a realização de análises comparativas entre os métodos manual e automatizado buscando destacar as vantagens, limitações e divergências entre as abordagens que estão descritos no capítulo de resultados.

Conclui-se que, a variação de teor e recuperação metalúrgica entre pilhas, pode causar impactos principalmente na previsibilidade do material a ser alimentado e no tempo gasto para chegar ao ajuste de usina. O volume fora do especificado, impacta de diferentes formas, dentre elas estão: o tempo de residência da pilha na usina de beneficiamento impactando na produção prevista para ela, sobrecarga da retomadora gerando como consequência quebras ou atrasos para manutenção para pilhas acima do volume de capacidade total do pátio de homogeneização. Os impactos

mencionados acima justificam a necessidade de padronização de volume nas pilhas de minério.

A utilização de ferramentas que otimizam o trabalho tornando-o mais eficiente e rápido é busca constante das empresas atualmente. Como consequência de trabalhos realizados de forma otimizada pode-se listar uma série de vantagens como: identificação e eliminação de desperdícios, o que reduz os custos operacionais, entrega mais consistente e menos propensas a erros, entrega mais confiável de resultados e principalmente atua diretamente na gestão de tempo dos colaboradores permitindo-os a dedicação a tarefas mais estratégicas.

Percebe-se a partir do trabalho realizado que, o principal ganho observado com as simulações realizadas se dá no tempo investido para confecção do plano de lavra e na qualidade da entrega do trabalho. A ferramenta reduz de forma significativa o tempo dedicado a atividade, que, anteriormente demandava em média 40 horas no método manual para 16 horas médias para o método otimizado, o que permite ao planejador a confecção de um maior número de cenários e mais disponibilidade de tempo para avaliação e validação dos resultados. Além disso, os planos de lavra são entregues para a operação de mina com maior agilidade, permitindo a avaliação preliminar de acessos, drenagens, sistemas de bombeamentos e infraestrutura em geral. É importante destacar que, a utilização da ferramenta no horizonte de curto prazo na empresa onde o estudo foi realizado é pioneira e a partir da constatação de sua relevância e eficácia na entrega dos resultados, a utilização da ferramenta para confecção de planos de lavra se tornou rotineira. Pode-se concluir através da análise comparativa das médias do Índice de Recuperação Global (IRG) entre os períodos de setembro a novembro de 2022 e julho a dezembro de 2024 que a redução da variabilidade entre as pilhas de minério contribui significativamente para a maior conformidade entre o desempenho metalúrgico previsto e o obtido na usina de beneficiamento.

Como o objetivo do trabalho era utilizar áreas que já haviam sido programadas de forma manual para simular a utilização do sequenciador nelas, a quantidade de material disponível para a confecção das pilhas do último período sequenciado foi um fator limitante na entrega de pilhas com resultados melhores no período mencionado. Para resolver a limitação encontrada a melhor alternativa seria trabalhar com um

volume maior de material que o necessário sendo esta, uma alternativa para que o sequenciador encontre pilhas que sejam menos variáveis entre si.

O trabalho abre oportunidades para que planejadores de outras empresas conheçam e possam utilizar o sequenciador matemático como forma de otimizar o tempo gasto com a confecção de pilhas de minério adaptando o seu uso para as diferentes rotinas de trabalho. Os resultados obtidos reforçam a importância de revisitar e aprimorar continuamente os processos internos, buscando sempre a eficiência e a excelência.

Em suma, a utilização da ferramenta mostrou-se uma estratégia eficaz, melhorando a produtividade e a qualidade do trabalho oferecendo um modelo que poderá ser replicado em outras empresas.

5.1 Sugestões de pesquisas futuras

Entende-se que a exploração da ferramenta no sentido de reduzir ainda mais a variação entre pilhas precisa ser aprofundada buscando melhores resultados. É relevante realizar estudos estatísticos dos resultados obtidos nos cenários simulados e, além disso, estudar a variação do número de frentes buscando a otimização dos equipamentos aliados a estacionarização de teores. Adicionar como restrição ao sequenciador novos parâmetros que possam influenciar na produção da usina e realizar estudos que visem acompanhar e quantificar o desempenho das pilhas estacionarizadas na usina de beneficiamento e quais impactos elas trazem para o processo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABZALOV, M.Z.; MENZEL, B.; LASENKO, M.; PHILIPS, J. **Optimization of the grade control procedures at Yandi iron – ore mine, Western Australia: geoestatistical approach.** Applied Earth Science, Carlton, v.3, n.119, p.132-142, jul.2010.

ALMEIDA, F.F.M. 1967. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. D.N.P.M, 36p (Boletim 241).

ANDRADE, Tobias Cabral C. M. de; ROSA, Sérgio Ivan Viademonte. **Investigação de condicionantes da estabilidade de pilhas de minério de ferro em Serra Sul – S11D/Vale**. Belém: ITV, 2021. (Relatório Técnico N021/2021).

BARBOSA, O. 1955. **Guia das Excursões**. In: Congr. Bras. Geol, 9, 1955. São Paulo. SBG. Not.3.

BEZERRA, E.B, Nova metodologia de análise de indicadores operacionais do planejamento de lavra de curto prazo. 2022. 24 p, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BIONDI, J. C. 2015. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. 2ª edição revisada e atualizada. – São Paulo: Oficina de Textos.

BLOM M.; PEARCE R. A.; STUCKEY J. P. **Short-Term Planning for Open Pit Mines: a review**. International Journal of Mining Reclamation and Environment, Reino Unido, v33, n. 5, mar, 2018.

CAMPEAU, L. P.; GAMACHE, M. **Short – term planning optimization model for underground mines. Computers and Operation Research,** v. 115, p. 1-12, 2020. Article 104642.

CAMPOS, P.H.A.; Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. Planejamento tradicional. 2017, Dissertação (Mestrado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO.

CAMUS, J. **Management of Mineral Resources: creating alue in the mining business.** Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. (SME), 2002.

CAPPONI, L. **Planejamento estocástico de curto prazo incorporando a incerteza da estimativa no controle de teores**.2019.23 p, Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CHIMUCO, J. P. J., **Metodologia de Planejamento de Mina Para Retomada Das Operações de Lavra Das Jazidas de Kassinga Norte – Angola**. Ouro Preto 2010.

CONSUEGRA, F. A.; DIMITRAKOPOULOS, R. **Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons.** Mining Technology. Taylor & Francis, v.119, n.2, p.88-101,2010.

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

COUZENS, T.R. **Aspects of production planning: Operating layout and phase plans.** Open Pit Mine Planning and Design, New York, SME-AIME,p. 219-213, 1979.

CRAWFORD, J. T.; DAVEY, R. K. **Case study in open-pit limit analysis. Computer Methods for the 80' in the Mineral Industry,** New York, 1979.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra.** 1ª edição – São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CURI, A. **Fundamentos da Engenharia de Minas.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

DAGDELEN, K**. Open Pit Optimization–Strategies for Improving Economics of Mining Projects Through Mine Planning. In: 17TH INTERNATIONAL MINING CONGRESS AND EXHIBITION OF TURKEY**, 2001, Turquia, p. 117-121.

DIEDRICH, C., **Incorporação da variabilidade dos teores para análise de risco de recursos minerais e sequenciamento de lavra.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 36p.

DIMITRAOPOULOS, R.: FARRELLY, C. T.; GODOY, M. **Moving faoward from traditional optimization: grade uncertainly and risk effects in open-pit design**. Mining Technology: transaction of the institutions of mining and metallurgy, Philadelphia, USA,v. 111, n.1, p.82-88,2002.

DOMINY, S. C.; PLATTEN, I. M.; XE, Y.; & MINNITT, R. C. A. **Underground grade control protocol design: case study from the Liphichi gold Project, Larecaja, Bolivia**. Apllied Earth Science, Englewood, n. 119, v. 4, p. 205-219, jul, 2010.

FYTAS, K. G. **A computerized model of open pit long and short term production scheduling.** 1985. Tese (Pós-Doutorado) PhD – Queens University, Kingston, Ontario,Canadá, 1985.

GAMBIN, F., 2003. **Aperfeiçoamento da Estratégia de Homogeneização de Minérios Utilizando Simulação Geoestatística.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 96p.

GEN, M.; CHENG, R. **Genetic algorithms and engineering design.** New York, USA: John Wiley & Sons, 1997.

GIBSON S.A., THOMPSON R.N., LEONARDO O.H., DICKIN A.P., MITCHELL J.G., 1995b. **The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume - evidence from large volume, mafic, potassic magmatism** in SE Brazil. *J. Petrol.* p189-229.

GODOY,M. **Minimização de perdas em operações de lavra seletiva incorporando a incerteza da estimativa no controle de teores.**1998. 91 p, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOYCOOLEA, M.; MORENO, E.; RIVERA, O. **Direct optimization of an open cut scheduling policy.** Proceedings of APCOM 2013, p. 424–432, 2013.

HALATCHEV, R. **The time aspect of the optimum long-term open pit production sequencing. In: APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY**, 30. Littletown, SME, 2002

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M**. Introductory Mining Engineering. 2nd ed.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

ISSA FILHO, A., LIMA, P. S., & SOUZA, O. M. 1984. **Aspectos da Geologia do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil**. *In:* Rodrigues, C. S., Lima, P. S. (eds.) Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia. São Paulo, CBMM, p. 20-44.

ISSA FILHO, A., RIFFEL, B. F., & DE FARIA SOUSA, C. A. 2001. **Some aspects of the mineralogy of CBMM Niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing – Araxá, MG – Brazil.** In Niobium Science & Technology: Proceedings of the International Symposium Niobium.

JEWBAL, A., DIMITRAKOPOULOS, R. **Stochastic mine planning – example and value from integrating long – and short – term mine planning through simulated grade control.** Sunrise Dam, Western Australia. In: DIMITRAKOPOULOS, R. (Ed). Advances in apllied strategic mine planning. Cham: Springer Nature, 2018. P. 173-189.

KUMRAL, M. **Grade control in multi-variable ore deposits as a quality management problem under uncertainty**. International Journal of Quality & Reliability Management, v. 32, n. 4, p. 334-345, abr. 2015.

LANE, K. F. **Choosing the optimum cutoff grade**. Colorado School of Mines Quarterly, v. 59, n. 4, p. 811 – 829, 1964.

LANE, K. **The Economic Definition of Ore**. London: Mining Journal Books, 1988.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional.** Rio de Janeiro/RJ: Editora Brasport, 2006.

MOUSAVI, A.; KOZAN, E.; LIU, S. Q. **Open-pit block sequencing optimization: a mathematical model and solution technique.** Engineering Optimization, v. 48, n. 11, p.1932-1950, fev. 2016.

PERIOTTO A. J., **Determinação da Cava Otima em Mineração a Céu Aberto através de programação paralela**. Universidade Federal do Rio de Janeiro 1992.

PERONI, R. L., **Análise Da Sensibilidade Do Sequenciamento De Lavra Em Função Da Incerteza Do Modelo Geológico** Porto Alegre 2002.

PHILLIPS, D.A. **Optimum Design of an Open Pit.** Bulletin of the Australian Mathematical Society, 1991. 43v. 349-350.

RENDU, J. M. **An introduction to cut-off grade estimation.** Littleton, Colorado, USA. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2008.

RICHMOND, A. J.; BEASLEY, J. E. **An interactive construction heuristic for the ore selection problem.** Journal of Heuristics, n. 10, v. 2, p. 153-167, mar. 2004 Wiley & Sons, 1997.

ROSSI, M.; DEUTSCH, C.V. **Mineral resource estimation**. Dordrecth: Springer Science & Business Media, 2013.

SEER, H. J. 1999. **Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Minas Gerais.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 267 p.

SILVA, A. B., MARCHETTO M., SOUZA O.M. 1979. **Geologia do complexo carbonatítico de Araxá (Barreiro)**, MG. Mineração e Metalurgia, edição 415:14-18.

SILVA, L. D**., Análise de variabilidade de minério de nióbio e definição de estratégias de amostragem utilizando simulações estocásticas.** 2019 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, N. C. S., **Metodologia de Planejamento Estratégico de Lavra Incorporando Riscos e Incertezas para a Obtenção de Resultados Operacionais**. 2008. 118 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SMITH, G.L., **Strategic long term planning in mining.** 2012. Anglo American Platinum Limited, Johannesburg, South Africa. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2012. SA ISSN 2225-6253. Address presented at the Annual General Meeting on 15 August 2012.

SMITH, M. L.; WICKS, S.J., **Medium – term production scheduling of the Lumwana mining complex. Interfaces**, v.44, n.2, p.176-194,2014.

THORLEY, U., **Open Pit Mine Planning: Analysis and System Modeling of Conventional and Oil Sand Applicatins**. Tese (Pós-doutorado) PhD – Departament of Mining, Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá, 2012.

TOLEDO, A.A.T., **Desenho de polígonos e sequenciamento de blocos de minério para planejamento de curto prazo procurando estacionarização dos teores**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Valente, J.M.G.P., 1982. **Geomatemática: Lições de Geoestatística**. Fundação Gorceix, Ouro Preto, Vol. 6, 323p.

VALERIANO C.M., DARDENNE M.A., FONSECA M.A., SIMÕES L.S.A., SEER H.J. 2004. **A evolução tectônica da Faixa Brasília**. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução e obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p.575-59 MME/DNPM, 456-462.

WHITTLE, J. 2009 **O otimizador global funciona – e depois? Avanços Modelagem de jazidas e planejamento estratégico de minas.** Instituto Australásio de Mineração e Metalurgia, Melbourne, 3-5.

WILKE, F. L.; REIMER, T**. Optimizing the short-term production schedule for an open pit iron ore mining operation. Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry**. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York. p. 642-646, 1979.

WRIGHT, G. **Mineral Resources and Economics Development. Conference on Sector Reform in Latin America.** Stanford Center for International Development, 2011.39p.

YAVARZADEH, S.; ABODALLHEINSHARIF, J.; NEISHABOURI, **A. Modeling of shortterm production scheduling with the objective grade control.** In: DREBENSTEDT, C; SINGHAL, R. (Eds.). Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th – 19th October 2013. Cham: Springer International Publishing, 2014.

ZHANYOU, H., CAI, W., BANFIELD, F., **A New Short and Medium Term Production Planning Tool** 2009 Mintec, Inc. 26th Seminar, Tucson, Arizona, EUA,May 2009.