

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Sequenciamento Direto de Blocos: Impactos, Limitações e
Benefícios Para Aderência ao Planejamento de Lavra**

AUTOR: FELIPE RIBEIRO SOUZA
ORIENTADOR: ROBERTO GALERY
COORIENTADOR: BECK NADER

Setembro 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
Felipe Ribeiro Souza

Sequenciamento Direto de Blocos: Impactos, Limitações e Benefícios Para Aderência
ao Planejamento de Lavra

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da
escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Roberto Galery

Coorientador: Prof. Beck Nader

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia

2016

S729s

Souza, Felipe Ribeiro.

Sequenciamento direto de blocos [manuscrito]: impactos, limitações e benefícios para aderência ao planejamento de lavra / Felipe Ribeiro Souza. - 2016.

xi, 82 f., enc.: il.

Orientador: Roberto Galery.

Coorientador: Beck Nader.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.80-82.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Sequenciamento direto de blocos - Teses. 4. Lavra de minas - Planejamento - Teses. I. Galery, Roberto. II. Nader, Beck.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 622(043)

DEDICATÓRIA

A Deus,
aos meus pais Maurino e Márcia,
ao meu irmão Matheus.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade da vida, uma inestimável dádiva.

A minha família pelo apoio incondicional, mesmo nos momentos em que acreditava não precisar. Márcia, Maurino e Matheus com certeza a caminhada seria muito mais difícil sem vocês.

A todos os professores que fizeram parte da minha caminhada. Especialmente Michel Melo, mestre que se transformou em amigo, pelos valorosos incentivos e conselhos importantes para minha formação acadêmica e humana.

Ao professor e amigo Cláudio Lúcio, pelo incentivo e auxílio ao longo da minha formação acadêmica.

Aos professores Beck Nader e Roberto Galery, grandes incentivadores e responsáveis pela minha participação neste programa. O fruto deste trabalho possui vocês como base. Agradeço também pelo auxílio no desenvolvimento das minhas capacidades de lecionar.

Ao amigo e mestrando Hudson Burgarelli, pelos momentos enriquecedores de debate sobre Engenharia de Minas.

Ao Departamento de Engenharia de Minas, CAPES e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas por fornecerem todo suporte necessário.

SUMÁRIO

RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. CONCEITO DE SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS	6
3.2. CONSTRUÇÃO E LIMITAÇÃO ESPACIAL DO PROBLEMA	8
3.2.1. GRAFOS.....	8
3.2.2. SUPERFÍCIES	12
3.3. FORMULAÇÃO GERAL DO SEQUENCIAMENTO	14
3.3.1. FORMULAÇÃO GERAL DO SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS	15
3.4. SOLUÇÃO EXATA.....	17
3.5. HEURÍSTICA.....	19
3.6. META HEURÍSTICA.....	20
3.7. RELAXAÇÃO LAGRANGIANA.....	21
3.8. FRONTEIRA DO CONHECIMENTO.....	22
3.9. RESTRIÇÕES PARA A FORMULAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS	23
3.9.1. Minimização dos custos.....	23
3.9.2. Restrições de Precedência.....	24
3.9.3. Restrição de capacidade de produção.....	27
3.9.4. Restrição de capacidade de processamento	27
3.9.5. Restrição de pilha de estoque.....	28
3.9.6. Restrição de teor para a planta	28
3.9.7. Restrição multi período.....	29
3.10. Aproximações Para Resolução do Problema.....	30
3.10.1. Blocos Acessíveis.....	31
3.10.2. Construção de Pré Candidatos.....	32
3.10.3. Metaheurística	33

3.10.4. Simulated Annealing	33
3.10.5. Busca em Tabu (Tabu Search)	35
3.10.6. Busca em Tabu Aplicado ao Sequenciamento Direto de Blocos	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1. Banco de Dados	37
4.2. Atividades e Recursos necessários	38
4.3. Metodologia	39
5. TESTES OPERACIONAIS	41
5.1. Tamanho de Praça	41
5.1.1. Análise do Impacto Financeiro	42
5.1.2. Análise da Operacionalidade.....	Erro! Indicador não definido.
5.2. Taxa de Avanço	49
5.2.1. Análise do Impacto Financeiro	49
5.2.2. Análise da Operacionalidade.....	Erro! Indicador não definido.
5.3. Controle de Material Movimentado	55
5.3.1. Análise do Impacto Financeiro	57
5.3.2. Análise da Operacionalidade.....	Erro! Indicador não definido.
5.4. Superfície de Controle.....	62
5.4.1. Análise do Impacto Financeiro	64
5.4.1.1. Cenário base x Restrição espacial.....	64
5.4.1.2. Diferentes períodos de restrição espacial.....	66
5.4.1.1. Restrição Geral	68
5.4.2. Análise da Operacionalidade.....	Erro! Indicador não definido.
5.5. Fluxo de Trabalho	75
6. CONCLUSÕES.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Balanço do Setor Mineral	5
Figura 2-2 - Cadeia de Valor Mineral.....	6
Figura 3-1 - Exemplo de Grafo orientado	9
Figura 3-2 - Diagrama de árvore com raiz	10
Figura 3-3 – Closures 2D.....	11
Figura 3-4 - Diagrama de árvore com arcos classificados	12
Figura 3-5 - DTM Representação	13
Figura 3-6 - Construção de superfície pela cota dos pontos	13
Figura 3-7 - Determinação do período de acordo com a elevação	14
Figura 3-8 - Modelo de Blocos não simplificado.....	19
Figura 3-9 - Modelo de Blocos simplificado por faixa de teor	19
Figura 3-10 - Precedência de blocos por grafo.....	25
Figura 3-11 - Precedência de blocos por superfície.....	25
Figura 3-12 - Bloco de precedência vertical	26
Figura 3-13 - Frente liberada para ataque frontal	26
Figura 3-14 - Sequenciamento sem pilha de estoque.	29
Figura 3-15 - Sequenciamento com pilha de estoque e multi período.....	30
Figura 3-16 - Blocos Originais	31
Figura 3-17 - Blocos Lavráveis de Amarelo.	31
Figura 3-18 - Blocos liberados de Verde.	32
Figura 3-19 - Bloco Acessível e Liberado após a Lavra do Bloco 10.	32
Figura 3-20 - Algoritmo de genérico de <i>Simulated Annealing</i>	35
Figura 3-21 - Algoritmo genérico de busca tabu.....	37
Figura 4-1 - Modelo de Blocos e Classificação Mineral	38
Figura 5-1 - Precedência com tamanho mínimo de praça.....	42
Figura 5-2 - R.O.M - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m).....	43
Figura 5-3 - Estéril - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m)	44
Figura 5-4 - Teor De Fe - Impacto do Tamanho De Praça Operacional (50 M X 200 M)	45
Figura 5-5 - VPL - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m)	45

Figura 5-6 - Análise de tamanho de praça (50m) Nível 1380.....	46
Figura 5-7 - Análise de tamanho de praça (200m) Nível 1380.....	47
Figura 5-8 - SDB vista de topo do cenário com restrição de praça de 50 metros.	47
Figura 5-9 - SDB vista de topo do cenário com restrição de praça de 200 metros.	48
Figura 5-10 - SDB média da praça de trabalho do cenário com restrição de praça de 50 metros.....	48
Figura 5-11 - SDB média da praça de trabalho do cenário com restrição de praça de 200 metros.....	48
Figura 5-12 - Produção de R.O.M considerando restrições de taxa de avanço.....	50
Figura 5-13 - Produção de estéril considerando restrições de taxa de avanço.....	50
Figura 5-14 - Teor de Ferro no R.O.M considerando restrições de taxa de avanço.....	51
Figura 5-15 - VPL considerando restrições de taxa de avanço.....	52
Figura 5-16 - Seção utilizada para verificar o avanço vertical.....	52
Figura 5-17 - Sistema de medida de avanço vertical.....	53
Figura 5-18 - Controle do Avanço Vertical 40 metros.....	53
Figura 5-19 - Controle do Avanço Vertical 60 metros.....	54
Figura 5-20 - Controle do Avanço Vertical 80 metros.....	54
Figura 5-21 - Controle do Avanço Vertical 100 metros.....	54
Figura 5-22 - Modelo de Blocos: Avanços verticais limitados a 40 metros.....	55
Figura 5-23 - Modelo de Blocos: Avanços verticais limitados a 100 metros.....	55
Figura 5-24 - Produção de R.O.M – limitação de movimentação de massa.....	58
Figura 5-25 - Produção de Estéril – limitação de movimentação de massa.....	58
Figura 5-26 - Teor de Fe – limitação de movimentação de massa.....	59
Figura 5-27 - VPL – limitação de movimentação de massa.....	59
Figura 5-28 - VPL acumulado – limitação de movimentação de massa.....	60
Figura 5-29 - Seção R.E.M Constante – Movimentação de Massa Restrita.....	61
Figura 5-30 - Seção R.E.M Crescente – Movimentação de Massa Restrita.....	61
Figura 5-31 - Seção R.E.M Decrescente – Movimentação de Massa Restrita.....	62
Figura 5-32 - Produção de R.O.M limitação espacial ano 1.....	64
Figura 5-33 - Produção de ESTÉRIL limitação espacial ano 1.....	65
Figura 5-34 – Teor de fe - Limitação espacial ano 1.....	65

Figura 5-35 – NPV acumulado - limitação espacial ano 1.....	66
Figura 5-36 - Produção de R.O.M limitação espacial dos anos 1 e 2.....	67
Figura 5-37 – Teor de FE de R.O.M limitação espacial dos anos 1 e 2.	67
Figura 5-38 – NPV acumulado - limitação espacial dos anos 1 e 2.	68
Figura 5-39 - Produção de R.O.M cenário de restrição geral.....	69
Figura 5-40 - Teor de Fe no R.O.M, cenário restrição geral.	69
Figura 5-41 - NPV acumulado, cenário restrição geral.	70
Figura 5-42 - Cenário base restrição espacial	71
Figura 5-43 - Cenário com restrição forçada no ano 01	71
Figura 5-44 - Cenário com restrição não forçada no ano 01	72
Figura 5-45 - Cenário com restrição não forçada limite final	73
Figura 5-46 - Cenário com restrição forçada limite final.....	74
Figura 5-47 – Sugestão de variáveis iniciais de acordo com o corpo geológico.....	76
Figura 5-48 – Fluxograma de trabalho proposto para realização de sequenciamento direto de blocos.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II-1 – Saldo da Balança Comercial Brasileira 2015.....	5
Tabela III-1 - Nomenclatura de arcos	11
Tabela IV-1 - Características do Modelo de Blocos.....	38
Tabela IV-2 - Atividades e recursos necessários.....	39
Tabela V-1 - Parâmetros utilizados no cenário de sensibilidade de praça de trabalho...	42
Tabela V-2 - Parâmetros utilizados no cenário de sensibilidade de taxa de avanço.	49
Tabela V-3 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M Decrescente.....	56
Tabela V-4 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M crescente.	57
Tabela V-5 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M Constante.	57
Tabela V-6 - Parâmetros utilizados no cenário base com ramp-up	63

RESUMO

O sequenciamento de lavra é um importante procedimento do planejamento de lavra, que determina qual material será lavrado, a quantidade, e em qual período. Estas variáveis são altamente influentes no fluxo de caixa e conseqüentemente podem conduzir um empreendimento ao sucesso ou ao fracasso. Uma metodologia clássica, proposta inicialmente por Lerchs-Grossmann, define a quantidade total de material a ser lavrado sem considerar o período em que será executada a atividade e as restrições operacionais inerentes deste processo. Para suprimir as inconsistências desta metodologia, o Sequenciamento Direto de Blocos (SDB) propõe executar o planejamento de maneira mais eficiente e precisa, considerando os principais problemas da metodologia clássica: o fato da taxa de desconto e operacionalidade não estarem presentes na metodologia. O SDB é capaz de analisar cada bloco individualmente e aplicar-lhe as restrições econômicas e operacionais de maneira mais assertiva. Essa metodologia é capaz, em etapa única, de determinar o sequenciamento, não há a necessidade de determinar cava final e *pushbacks* antes do sequenciamento de lavra. A correta aplicação da taxa de desconto é responsável por diminuir a reserva mineral. Os blocos lavrados em tempos futuros são submetidos a um correto fator de desconto que reduzem a sua função benefício individual. Dessa forma, a busca por um melhor resultado financeiro promove a escolha dos blocos mais ricos de modo a contribuir para o aumento do Valor Presente Líquido. O aumento do valor econômico é acompanhado por restrições operacionais de modo a determinar um cenário mais assertivo a longo prazo com o sequenciamento direto de blocos. O presente trabalho propõe elaborar uma metodologia de trabalho de modo a executar um planejamento de lavra mais assertivo considerando as restrições operacionais e a correta taxa de desconto.

ABSTRACT

Mining scheduling is an important mining planning procedure, which determines which material will be mined, in what quantity, and during which period. These variables are highly influenced by cash flow and can therefore lead to the success or failure of the undertaken. A classical methodology, initially proposed by Lerchs-Grossmann, defines the total amount of material mined without considering the correct discount factor and the operational restrictions of this process. To suppress the inconsistencies of this methodology, Direct Block Sequencing (SDB) proposes to execute the planning in a more efficient and precise manner, considering the main problems of the classical methodology: the discount rate and operational aspects are not present in the classical methodology. The SDB methodology is able to analyze each block individually and apply discount factor and operational constraints more assertively. This methodology is able, in a single step, to determine the sequencing since there is no need to determine final pit and pushbacks before the mining sequencing is established. The correct application of the discount rate is responsible for reducing the mineral reserves. The blocks mined in future times are settled to a correct discount factor that reduces their individual benefit function. In this way, the search for a better financial result promotes the choice of the richest blocks in order to contribute to the increase of the Net Present Value. The economic value grow is followed by operational constraints in order to determine a more assertive long-term scenario with direct block sequencing. The present dissertation proposes to elaborate a methodology of work in order to execute a more assertive mining plan considering the operational restrictions and the correct discount rate.

1. INTRODUÇÃO

A análise da viabilidade econômica de um projeto é importante para decidir sobre a implementação de um empreendimento mineral. Toda análise econômica mineral depende diretamente da quantidade de mineral lavrado e de quando este mineral será lavrado (HUSTRULID & KUCHTA, 1995). A capacidade de alimentar a planta de beneficiamento é limitada pelo sequenciamento de lavra e o sucesso financeiro é resultado da programação de produção da usina de beneficiamento. Para um correto planejamento da produção é necessário considerar a taxa de desconto financeiro adequado ao período de operação. Outro importante aspecto a ser observado é a aderência entre a programação da produção e a viabilidade operacional do planejamento. Restrições operacionais estão relacionadas a tamanho mínimo de praça de trabalho para equipamentos, número de níveis em que as etapas de produção serão realizadas, regiões de restrição operacional, razão entre as quantidades de estéril e minério, limite de contaminantes, alocação dos equipamentos, etc. (HARTMAN, 1987). Programações cuja as restrições operacionais não sejam respeitadas podem conduzir a cenários capazes de, erroneamente, viabilizar empreendimentos economicamente inexecutáveis.

A metodologia de planejamento de lavra adotada pela indústria como padrão considera o algoritmo de determinação da cava final proposto por Lerchs-Grossmann. Para definição da programação da produção, são realizadas duas etapas diferentes:

1. Determinação do limite final de lavra;
2. Utilização do limite final de lavra definido como fronteira para o sequenciamento de produção.

Esta metodologia apresenta algumas considerações nocivas ao planejamento da produção. Para determinar o limite de escavação, definido como cava final, é considerado que todo o minério será lavrado instantaneamente no momento da abertura da mina (Lerchs, 1965). Esta consideração deixa de penalizar economicamente todos os blocos a serem lavrados em tempos futuros por não lhes aplicar, corretamente, um fator de desconto. Considere um bloco de receita de 100 US\$ e uma taxa de juros entre 8% a 12% ao ano em média. Devido a premissa do algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann de considerar que o bloco é lavrado instantaneamente a taxa de desconto aplicada a esse bloco será de 0%. Em um empreendimento de 20 anos, por exemplo, em que esse bloco fosse lavrado no último ano, dever-se-ia considerar uma taxa de desconto de 772%, admitindo-se 10% ao ano, conduzindo

o valor do bloco de 100 US\$ para 14,86 US\$. Esta diferença permite ao algoritmo proposto selecionar blocos que não seriam viáveis economicamente ao final do empreendimento.

Para melhor aderência entre o planejamento de lavra e a operação a metodologia de sequenciamento direto de blocos apresenta um mecanismo de construção capaz de diminuir as aproximações utilizadas pela metodologia clássica. O sequenciamento direto de blocos é capaz de obter um resultado de planejamento de lavra em um processo de otimização global de todos os períodos simultaneamente, diferentemente da metodologia tradicional, executada em etapas sob direção de um engenheiro de minas experiente (Nader et al (2015)).

O sistema é capaz de tratar cada bloco de maneira independente e definir seu envio para cada um dos destinos possíveis, entre os quais: planta de processamento, pilha de estéril, pilha de estoque ou mantê-lo *in situ* (Almeida, 2013). A metodologia tradicionalmente utilizada no mercado determina primeiro o destino do bloco e depois determina o período em que será lavrado (HUSTRULID & KUCHTA, 1995). Este processo clássico não espelha a ordem natural das operações de lavra, pois primeiro são lavrados os blocos mais superficiais e sucessivamente os demais até atingir o limite de escavação (Almeida, 2013).

A atividade no sequenciamento direto é reduzida em uma etapa única em que o algoritmo é capaz de definir em uma otimização global o destino do bloco e o período de sua lavra simultaneamente, sem a necessidade de retroalimentação do sistema (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2013).

A metodologia tradicional possui limitações como a dificuldade para atingir a meta de produção no sequenciamento, determinação de uma taxa de desconto incorreta, utilização de modelos puramente determinísticos, predefinição de destino dos blocos, incapacidade de incorporação de restrições aditivas, etc. (C. Meagher, 2014).

Essa nova metodologia possibilita a aplicação da correta taxa de desconto financeiro em cada unidade de lavra lavrada, contribuindo para o aumento de confiabilidade do Valor Presente Líquido definido pelo algoritmo (Farmer & Dimitrakopoulos, 2015). Como o destino do bloco será decidido individualmente é possível redefinir o destino de um bloco que apresente maior benefício financeiro ao ser combinado com outro. Um bloco com elevado teor de contaminante, não lavrável pela metodologia clássica, pode ser considerado minério se combinado com um bloco lavrado no mesmo período avaliando proporcionando a diluição do contaminante a níveis aceitáveis. (Ramazan S. D., 2012).

Os resultados apresentados pelo Laboratório Cosmos da Universidade *McGill* e o projeto *Delphos* da Universidade do Chile apresentam claras vantagens na aplicação desta nova

tecnologia quanto ao valor financeiro estimado para o projeto. Algumas das principais mineradoras como Vale, BHP e Rio Tinto estão patrocinando grupos de estudo em diferentes países para desenvolvimento desta metodologia de maior assertividade. O DEMIN-UFMG faz parte do grupo de pesquisa constituído pelo Instituto Tecnológico Vale que apresenta como uma das suas missões, particularmente desse grupo de pesquisa, determinar a viabilidade operacional do Sequenciamento Direto de Blocos (SDB).

Ainda não há estudos suficientes para garantir que os resultados financeiros determinados pelo sequenciamento direto de blocos possuam aplicabilidade operacional. É objetivo do estudo determinar a viabilidade operacional da metodologia para que a metodologia possa ser aplicada a novos empreendimentos minerais.

Para testar a estratégia de Sequenciamento Direto de Blocos (SDB) será utilizado o algoritmo desenvolvido pela empresa Mining Math. A utilização do algoritmo foi autorizada em um acordo entre o DEMIN-UFMG e a empresa detentora dos direitos do algoritmo.

Para o trabalho será utilizado um modelo de blocos e parâmetros fornecidos pelo patrocinador do grupo de pesquisa. Os testes consistem em determinar o sequenciamento de produção utilizando o sequenciamento direto de blocos com ênfase nos parâmetros operacionais. Serão avaliados os impactos econômicos e resultados operacionais das restrições, com objetivo de verificar a variação econômica e se o sistema cumpre as metas estabelecidas.

Em uma primeira etapa, variando-se um único parâmetro por teste, pretende-se determinar o impacto desse parâmetro na operacionalidade do projeto, na seguinte ordem:

- Dimensões de Praça de Trabalho;
- Taxa de Avanço Vertical;
- Superfícies de Restrição Operacional;
- Controle da Relação Estéril/Minério;

Após a determinação dos impactos de cada variável investigada, será sugerido um procedimento capaz de determinar uma rotina de trabalho para o desenvolvimento do sequenciamento respeitando-se as restrições operacionais. O objetivo do fluxo de trabalho é orientar estudantes e profissionais da área sobre como utilizar esta nova ferramenta, o Sequenciamento Direto de Blocos, capaz de planejar a produção com maior assertividade devido ao correto fator de desconto imposto a cada bloco e a capacidade de incorporar diretamente as restrições operacionais.

Outros parâmetros de controle como praça de trabalho, ângulo de talude, movimentação de material, teor, valor presente líquido, taxa de avanço vertical, capeamento, pilhas de homogeneização serão importantes variáveis que devem ser avaliadas (Almeida, 2013) (Ramazan S and Dimitrakopoulos R, 2004).

A etapa crítica do decapeamento e a definição do tamanho de praça de trabalho serão estudadas com a utilização dos mecanismos de superfície de treinamento e clusterização de blocos (Farmer & Dimitrakopoulow, 2015).

A quantidade de frentes de trabalho será avaliada considerando a taxa de avanço horizontal e vertical configurada no próprio algoritmo de sequenciamento direto.

Os parâmetros de controle serão ajustados de modo a determinar a sensibilidade e os limites dos resultados operacionais. Com objetivo de determinar uma metodologia de trabalho capaz de aumentar a qualidade do planejamento através do ajuste dos parâmetros operacionais. Desta forma reduzindo os constantes conflitos existentes que atravessam as fazes de capeamento, *ramp-up* e operação.

2. OBJETIVOS

A metodologia clássica de planejamento possui uma sequência de trabalho bem conhecida: determinação de cava final, *pushback* e sequenciamento dos blocos. Porém, para o sequenciamento direto de blocos (SDB) não há uma metodologia estruturada para orientar o trabalho. O objetivo principal deste trabalho é elaborar uma rotina capaz de orientar o processo de sequenciamento baseado nessa metodologia de modo a obter o melhor resultado econômico respeitando as restrições operacionais do empreendimento.

Como objetivos secundários destacam-se:

- Avaliar a influência de superfícies de restrição para forçar ou restringir a lavra preferencial em determinadas regiões.
- Determinar a influência do avanço vertical.
- Determinar a influência da praça de trabalho.
- Avaliar a precisão do controle da relação estéril/minério.

2.1. MOTIVAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO TEMA

O Brasil possui em sua economia o relevante impacto de diversas substâncias minerais, algumas são exportadas em grandes volumes e outras não tanto. A quantidade de recursos minerais Brasileiros é mundialmente expressiva. A produção atinge cerca de 72

substâncias minerais, 23 minerais metálicos, 45 não metálicos e 4 energéticos. São operados na forma de lava garimpeira 1.820 empreendimentos, 830 complexos de água mineral e 13.250 licenciamentos (*IBRAM, 2015*).

A Figura 2-1 apresenta o saldo da balança comercial brasileira focada no setor mineral. O gráfico mostra que o saldo do setor mineral brasileiro nos últimos períodos vem sendo positivo em favor da economia brasileira.

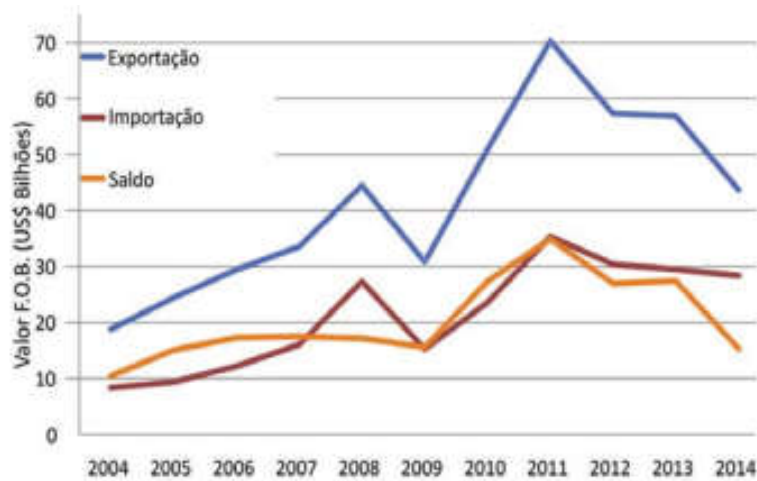


Figura 2-1 - Balanço do Setor Mineral (Fonte: DNPM (2015))

O produto interno bruto (PIB) gerado pela mineração não é significativa quando confrontado ao valor absoluto do PIB brasileiro, porém o saldo brasileiro seria deficitário caso não ocorresse a contribuição da mineração (DNPM, 2015). A Tabela II-1 confirma esta análise capaz de apresentar a importância no saldo comercial.

	Mineração 2015	Todo Brasil 2015
	US\$ milhões	US\$ milhões
Exportação	43.690	225.101
Importação	28.353	229.031
Saldo	15.337	-3.930

Tabela II-1 – Saldo da Balança Comercial Brasileira 2015 (Fonte: DNPM (2015))

Para atender a demanda do mercado por minerais é necessário lavar, processar e entregar o produto ao destino final. Esta cadeia de operações necessárias a comercialização do bem mineral é chamada de cadeia de valor mineral (Nader A. , 2012).

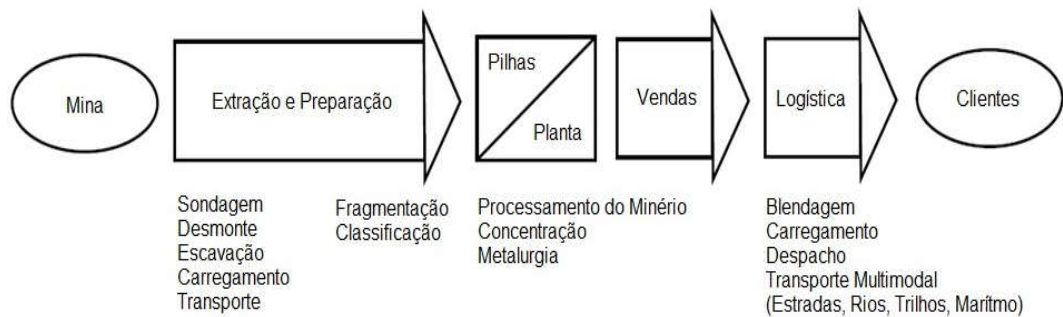


Figura 2-2 - Cadeia de Valor Mineral (Nader A. , 2012)

O presente trabalho aborda a atividade de lavra, qual está representado na Figura 2-2 como o segundo elo do fluxograma. Este trabalho aborda uma importante etapa para lavra do material demandado pelo mercado. O planejamento de lavra também e responsável por planejar quanto produto será lavrado em cada período. Desta forma o planejamento de lavra planeja qual produto pode ser vendido em cada período de atividade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONCEITO DE SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

O sequenciamento direto de blocos (SBM) é uma nova metodologia de planejamento de lavra que se contrapõe à metodologia clássica, composta pelo encadeamento da determinação da cava final, *pushback* e sequenciamento. Essa metodologia não aplica o desconto financeiro relativo ao período de lavra corretamente, considerando que todos os blocos são lavrados no tempo zero. Podem ocorrer variações significativas dos blocos selecionados entre essas diferentes metodologias devido a incorreta aplicação da taxa de desconto na metodologia clássica (Nader et al (2015)). O SDB é capaz de resolver este problema tratando cada bloco individualmente no sequenciamento de cava. Essa metodologia trata o conceito de cava final e sequenciamento como um resultado natural da lavra de cada bloco assim como ocorre em um empreendimento.

O problema global passa ser resolvido com maior eficiência, pois é dividido em subproblemas, associados a um período. Os subproblemas são resolvidos sequencialmente em ordem crescente de modo a gerar uma solução global do empreendimento (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2013).

O sequenciamento dos blocos e as restrições operacionais associadas a cada período começaram a ser resolvidos pelo controle do desvio de produção e metas (Goodfellow &

Dimitrakopoulos, 2012). A solução desenvolvida por Goodfellow baseia-se nos estudos de Programação Inteira Mista (P.I.M) estocástica desenvolvidos por Dimitrakopoulos iniciado em 2005. Desta forma o sistema proposto por Goodfellow & Dimitrakopoulos (2013) já era capaz de controlar a produção utilizando variáveis binárias para decidir se o bloco seria lavrado e em qual o período, com base em todos os períodos do sequenciamento.

Para determinação do resultado com maior aderência a realidade operacional Almeida (2013) introduz o conceito de superfície de controle. Estas superfícies funcionam como barreiras capazes de separar os blocos em diferentes períodos e dividir o problema principal em problemas menores (Almeida, 2013).

Os problemas resolvidos por Almeida (2013) e Goodfellow (2013) são de grande complexibilidade computacional. Modelos de blocos industriais possuem, facilmente, mais de 5.000 blocos, considerando cada bloco como uma variável de decisão é possível estimar o tamanho do problema computacional.

O problema de sequenciamento direto se for resolvido considerando apenas programação inteira mista (P.I.M) é impraticável a modelos reais e devido ao consumo de tempo computacional requerido (HUSTRULID & KUCHTA, 1995). Ramazan (2004) propõe simplificar o depósito ao considerar os blocos de estéril como uma variável contínua, considerando o valor do bloco como um valor negativo. Esta adaptação força o sistema a investigar somente os blocos a serem retirados compulsoriamente devido a lavra de blocos lucrativos (Almeida, 2013).

Boland (2008) e Menabde (2007) propuseram simplificações relacionadas ao teor de *cut-off* para aglomerar teores semelhantes e mecanismos de clusterização de blocos com intuito de diminuir a quantidade de variáveis do sistema. Os autores também discutem o tamanho de praça de trabalho, posteriormente retomado por Farmer (2015). Leite (2007) apresenta um importante trabalho que contribui para a diminuição do tamanho do problema e para a determinação da operacionalidade do talude da solução adotando uma metodologia denominada "*simulated annealing*".

A solução do problema começa a parecer promissora para modelos de larga escala com os trabalhos de Lamghari (2012) e Asad (2012). A procura hierárquica do espaço de busca pode substituir a solução do sistema de programação inteira estocástica como uma estratégia mais eficiente computacionalmente (Lamghari & Dimitrakopoulos, 2012). A utilização de metodologia proposta por Lamghari (2012) pode ser utilizada em um algoritmo de parametrização de fluxo máximo com intuito de apresentar uma metodologia capaz de utilizar

as superfícies somente nas regiões de fronteira e controlar as unidades de lavra por meio de mecanismos de precedência de blocos.

A revisão do estado da arte não aponta para um único algoritmo capaz de resolver qualquer modelo por sequenciamento direto de blocos, os sistemas disponíveis utilizam algoritmos de convergência múltipla. A medida que uma metodologia não consegue resolver o problema outra estratégia assume a convergência em um mecanismo de permuta automático.

A revisão bibliográfica descreve os passos necessários para a completa formulação do problema, iniciando com os mecanismos de estruturação espacial.

Inicialmente, a teoria dos grafos demonstra como construir o arranjo espacial dos blocos, desta forma o sistema será capaz de localizar as unidades de tomada de decisão. Para restrição espacial será utilizada uma proposição capaz de limitar o avanço do sequenciamento em regiões em que a busca por solução está proibida temporariamente.

Um importante fator que diferencia o Sequenciamento Direto de Blocos da metodologia clássica é a construção da função benefício. O SDB é capaz de abrigar mais do que apenas a variável binária presente na programação inteira mista (P.I.M). Há a possibilidade de considerar mecanismos de convergência como heurísticas, metaheurísticas e relaxação lagrangeana para facilitar a convergência da solução.

3.2. CONSTRUÇÃO E LIMITAÇÃO ESPACIAL DO PROBLEMA

A primeira etapa do problema consiste em determinar o posicionamento espacial dos blocos. Esta etapa é responsável por determinar quais blocos são vizinhos laterais ou superiores. Estas informações são utilizadas para determinar a precedência vertical e horizontal dos blocos e para o definir as restrições geométricas (ângulo de talude e tamanho de praça). Os grafos e as superfícies de controle são ferramentas capazes de realizar orientação espacial com facilidade de processamento e simplicidade.

3.2.1. GRAFOS

O método dos grafos e grafo direcionado são utilizados na resolução de problemas em áreas como engenharia elétrica e civil, redes de comunicação, gerenciamento de indústrias, pesquisa operacional e ciência da computação. Em sua forma mais simples são representados por um diagrama composto de nós interligados por linhas, estas linhas indicam quais “nós” estão relacionados (Danzig, 1967). Na resolução do problema de cava final ou

sequenciamento, os grafos são utilizados para definir a precedência dos blocos e assim definir qual a sua vizinhança. Podem ser representados por meio de uma matriz de adjacência ou de vetor de vizinhança. Alguns conceitos básicos relativos a esta teoria são:

- O Grafo $G = (X, E)$ consiste em um conjunto de elementos denominados de nós (X), conectados por linhas (E), chamadas arestas de tal forma que cada aresta conecta dois vértices (Khalokakaie, 1999).
- O Grafo Orientado é o grafo em que as arestas possuem direção denominadas arcos. O Grafo orientado é representado por $G = (X, A)$; X é o conjunto de vértices e A o conjunto de arcos (Khalokakaie, 1999). A Figura 3-1, é composta pelos seguintes conjuntos: Vértices: $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ e Arcos: $\{(x_2, x_1), (x_2, x_3), (x_3, x_4), (x_4, x_5), (x_5, x_6), (x_6, x_4), (x_6, x_3)\}$, exemplificam um Grafo Orientado.

Cada arco é utilizado para conectar dois vértices. Para um arco, $a_i = (X, Y)$, o vértice x define o seu ponto inicial e o vértice y o seu ponto final. O vértice y é o sucessor do vértice x e caso exista um arco entre eles, ele estará apontado para o vértice X (Figura 3-1).

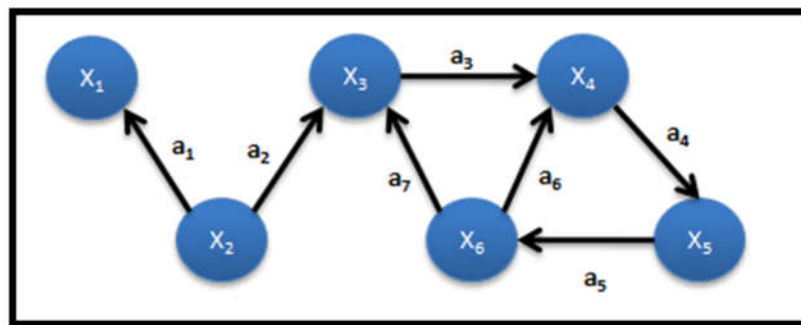


Figura 3-1 - Exemplo de Grafo orientado (Fonte: Adaptado de Khalokakaie (1999))

- Uma sequência de arcos é denominada caminho, de modo que o final de cada vértice corresponde ao início do próximo arco (Danzig, 1967). O conjunto formado pelos arcos a_2, a_3, a_4, a_5 na Figura 3-1 constituem um caminho.
- Um circuito é definido por um caminho fechado. Em outras palavras, o caminho deve possuir o vértice inicial coincidente ao vértice terminal. Por exemplo, os arcos a_4, a_5, a_6 , na figura 3-1, constituem um circuito.
- Uma corrente é uma sequência de arestas, em que cada extremidade tem um vértice comum com uma ponta adjacente (Danzig, 1967).

De acordo com Danzig (1967) o fechamento de um Grafo direcionado $G(X, A)$ é um Sub-Grafo $G(Y)$ em que o Y pertence a X , ou seja, a clusura é um sub Grafo de um Grafo orientado. Este estado de clusura representa um bloco ou conjunto de blocos, cujo indica sua viabilidade de lavra. Neste gráfico o valor dentro das esferas representa o valor do bloco, no nó este valor é chamado de massa. O valor da clusura é a soma das massas de todos os vértices compreendidos dentro dela. Acima da esfera está assinalado um valor de sequência, este número indica a localização dentro do modelo de blocos. Os vértices determinam as possíveis conexões, estas limitações se devem a fatores de acessibilidade e/ou lavra.

Para construção dos arcos que representam as relações entre blocos regulares, temos arcos com precedência que representam o ângulo de talude de 45° . A limitação para lavra do bloco 11 deve-se a retirada anterior dos blocos superiores 4,5 e 6. Para esta clusura temos um valor acumulado de +2, obtido somando-se os valores dos vértices. A clusura $G(Y)$, do Grafo orientado $G(X, A)$, representa o máximo valor qual é chamado de clusura máxima de $G(X, A)$ e representa o limite ótimo de um pit (Khalokakaie, 1999).

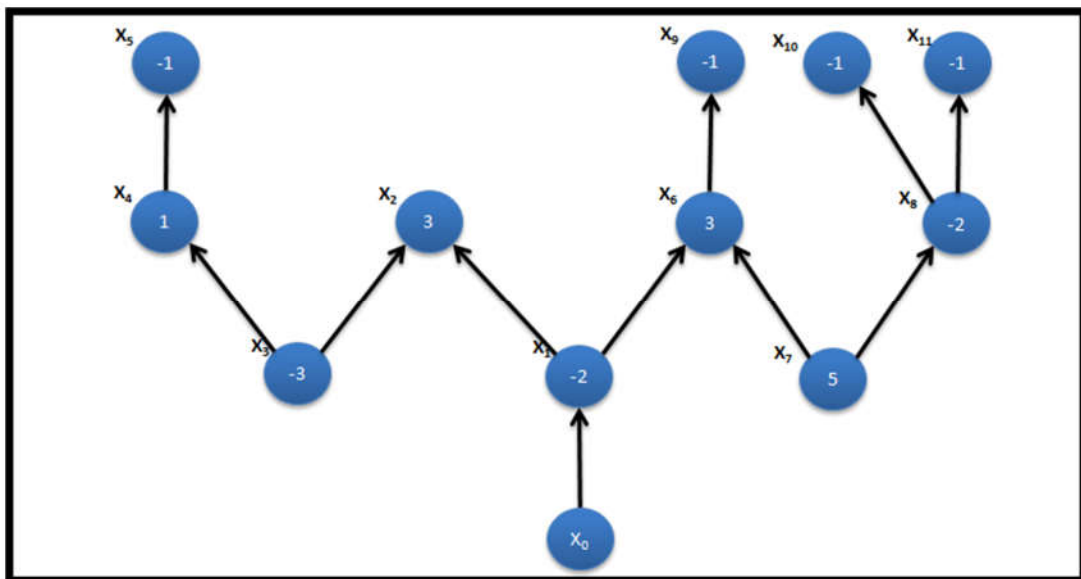


Figura 3-2 - Diagrama de árvore com raiz (Fonte: Adaptado de Khalokakaie (1999))

Árvore com raiz é uma árvore que contém um vértice único chamado raiz, qualquer vértice pode ser designado como raiz dependendo do propósito a 5 é um exemplo.

Cada arco a_i de uma árvore T define um galho, com a notação $T_i = (X_i, A_i)$. Se valores numéricos são determinados aos vértices, podemos obter a massa do galho ao somar as massas. Por exemplo, as massas do galho proveniente da poda do arco (X_1, X_6) na Figura 3-3 é $+3+5-2-1-1-1 = +3$.

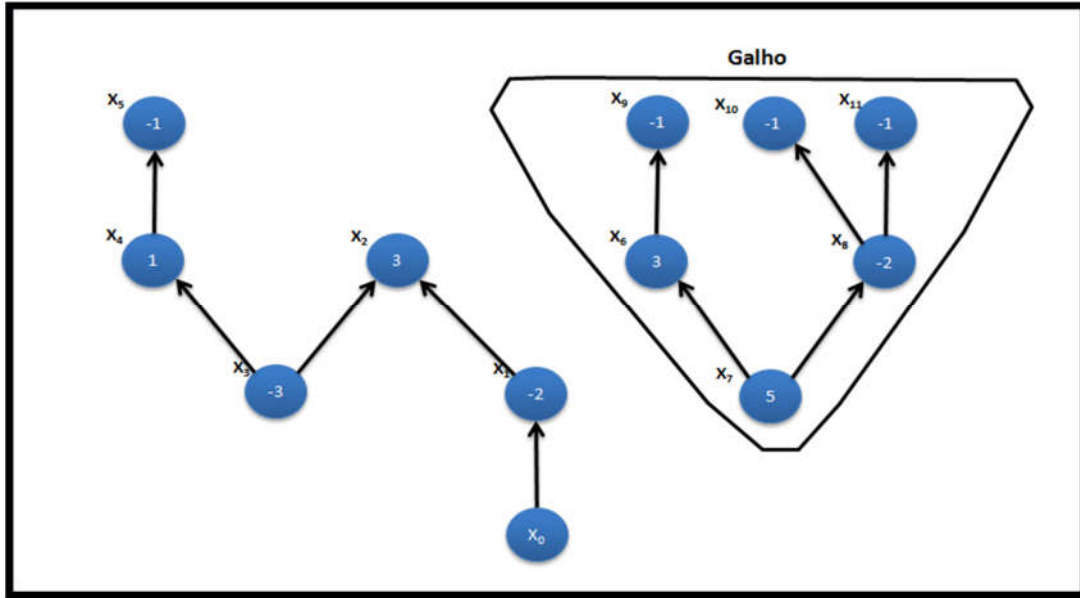


Figura 3-3 – Closures 2D (Fonte: Adaptado de Khalokakaie (1999))

Em um arco a_i , os pontos do galho podem ser classificados em galhos fortes. São galhos em que a soma dos vértices gera valores positivos, assim como mostrado no galho proveniente da poda do arco (X_1, X_6) da Figura 3-4. Caso a soma das massas seja negativa ou nula temos um galho fraco, por exemplo, consideremos o galho da poda do arco (X_3, X_5) .

Os arcos podem ser classificados como forte ou fraco de acordo com a direção e a soma das massas, assim como mostrado na Tabela 3-I:

Tabela III-1 - Nomenclatura de arcos

Caso	Direção	Suporte	Classificação
1	Incremento	Positivo	Forte
2	Incremento	Nulo ou negativo	Fraco
3	Subtração	Positivo	Fraco
4	Subtração	Nulo ou negativo	Forte

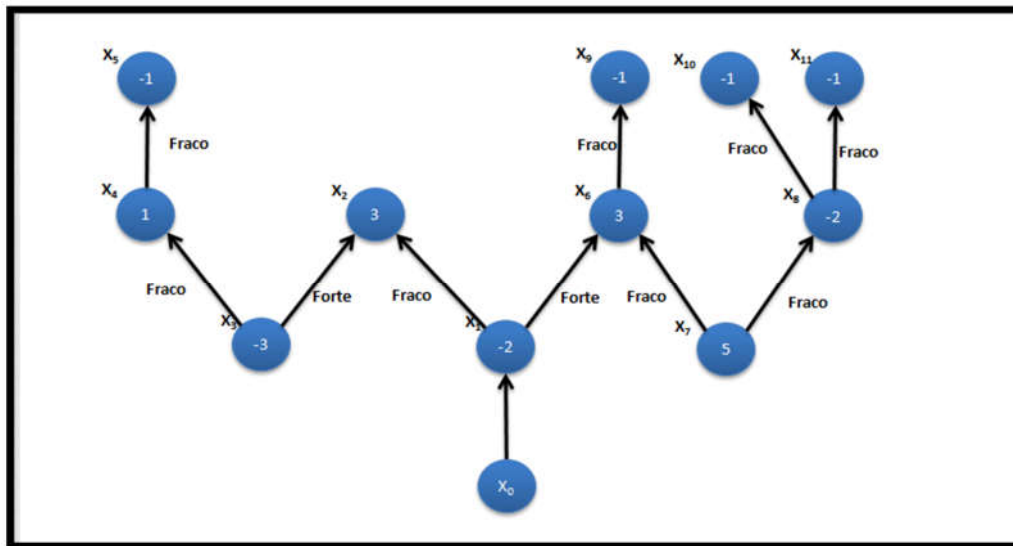


Figura 3-4 - Diagrama de árvore com arcos classificados (Fonte: Adaptado de Khalokakaie (1999))

Em termos de teoria de Grafos o problema do pit ótimo torna-se a encontrar o fechamento máximo, ou seja, encontrar os galhos fortes e podar do sistema os galhos fracos. A árvore representa o corpo de minério no formato de modelo de blocos, os vértices representam os blocos. Em que a massa (m_i) representa o valor do bloco. O pit ótimo resume em encontrar o $\sum_{i=0}^n m_i$ qual maximize o sistema, respeitando as restrições impostas (Danzig, 1967).

3.2.2. SUPERFÍCIES

O conceito mais comum de superfície tridimensional é baseado em uma área contínua. Entretanto, a sua representação computacional pode ser associada a variáveis discretas. Uma das metodologias mais utilizadas - Digital Elevation Model (DTM) - é um modelo tridimensional baseado na representação da elevação da superfície (GFDRR, 2016). Os pontos da superfície em diferentes localizações de Longitude e Latitude são interpolados com objetivo de construir a superfície desejada.

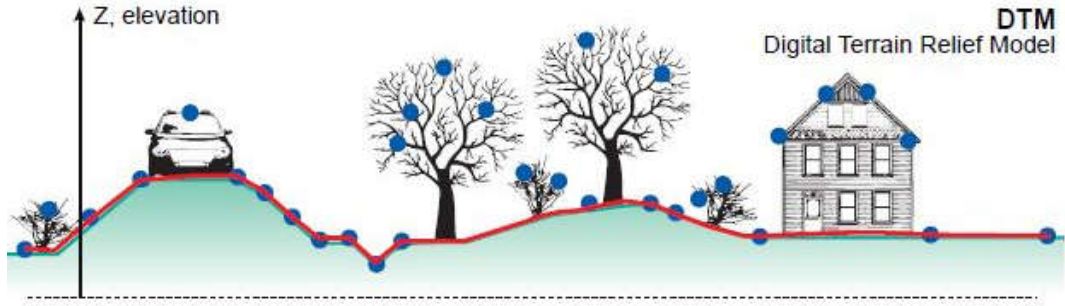


Figura 3-5 - DTM Representação (GFDRR,2016)

A metodologia de construção de DTM pode ser adaptada para determinação de limite para superfícies de lavra, ângulo de talude, sequenciamento de lavra. Um aspecto central desta adaptação é associar os blocos de lavra e nós às elevações no espaço. Os centroides dos blocos comportam-se como os pontos medidos de uma topografia convencional (Almeida, 2013). Desse modo, a superfície passa a ser controlada elevação em cada coluna de blocos, assim como exemplificado na Figura 3-6.

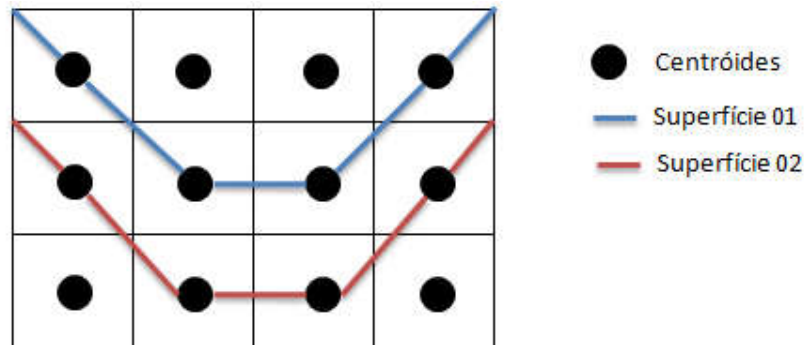


Figura 3-6 - Construção de superfície pela cota dos pontos (Fonte: Contribuição do autor).

Ao considerar o problema do sequenciamento devemos observar que cada coluna de blocos, com coordenadas de longitude e latitude fixas, pode dividir o espaço por T superfícies em T+1 grupos de blocos. Cada superfície (T) representa um período de lavra em que os blocos acima da superfície serão lavrados no período T e os blocos abaixo em períodos posteriores.

A definição das superfícies pode ser refinada com a utilização de um vetor de variáveis binárias, em que $X_{i,t} = 1$, se o bloco i será lavrado na etapa t e valor zero caso contrário. Outra notação $X_{c,t}^z$, em que c corresponde a coluna e z a cota do bloco, como exemplificado na

Figura 3-7, apresenta-se mais eficiente computacionalmente (Almeida, 2013).

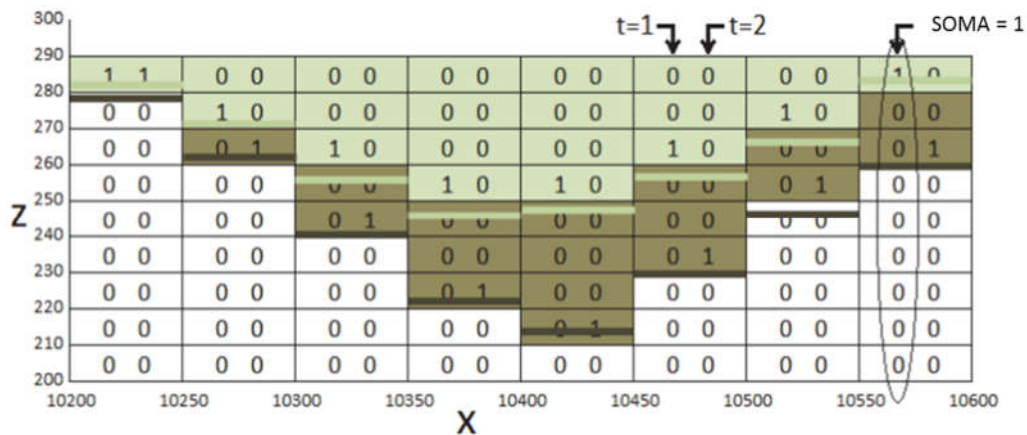


Figura 3-7 - Determinação do período de acordo com a elevação (Traduzido de Almeida (2013))

3.3. FORMULAÇÃO GERAL DO SEQUENCIAMENTO

O sequenciamento de lavra é uma tentativa de determinar a ordem de remoção dos blocos em determinados períodos (HARTMAN, 1987). Contrariamente ao sequenciamento, os métodos de determinação de cava final não se preocupam com quando o bloco será lavrado. O foco da metodologia é somente determinar se o bloco será lavrado (HISTRULID & KUCHTA, 1995). A solução proposta pelo sequenciamento direto de blocos compreende a simultaneamente de determinar se o bloco será lavrado e qual o período mais adequado para lavrá-lo (Nogholi, 2015).

Esta metodologia resolve algumas das mais importantes questões da engenharia de minas: Definição da reserva e sequenciamento de maior lucratividade.

Para a tomada de decisão de lavra de um bloco, um importante parâmetro é definido a partir de seu valor econômico, contabilizando-se todas as receitas e despesas associadas diretamente a lavra do bloco (HISTRULID & KUCHTA, 1995). Para calcular este valor são necessários alguns conceitos:

- Receita (R): Valor econômico obtido com a venda de uma unidade do produto;
- Custo de Lavra (C_L): Quantidade financeira gasta para lavar uma unidade do material;
- Custo de Venda (C_V): Valor econômico despendido para colocar o produto no mercado, como transporte, taxas portuárias, etc;

- Custo de Processo (C_P): Valor financeiro gasto para processar o material (Classificação, fragmentação, concentração), por unidade de material que alimenta a planta;
- Recuperação (r): Representação, em percentual, da quantidade de minério que pode ser recuperada na lavra (r_M) ou processamento (r_P);
- Preço (P): Valor pago por cada unidade do produto;
- Teor (g): Valor percentual da substância de interesse;
- Tonelada (T): Quantidade de material bruto no bloco.

A Receita (R) e o valor econômico (V) podem ser determinados por (Noghli, 2015):

r : Recuperação mássica.

g : Teor de metal contido.

$$R = (P - C_V) r g \quad (3.1)$$

$$V = - T \cdot C_L, \text{ se estéril.} \quad (3.2)$$

$$V = T \cdot (R - C_P - C_L), \text{ se minério.} \quad (3.3)$$

$$V = \begin{cases} T \cdot C_L & \text{se estéril} \\ T \cdot (R - C_L - C_P) & \text{se Minério} \end{cases} \quad (3.4)$$

A soma dos valores econômicos de todos os blocos considerados é denominada valor presente líquido. Para determinar o valor presente líquido de cada bloco, a seu valor econômico deve-se aplicar uma taxa de desconto referente ao período de sua lavra. Considerando d como a taxa de desconto e n como o período podemos calcular da seguinte forma (HARTMAN, 1987):

$$NPV = \frac{V}{(1+d)^n} \quad (3.5)$$

3.3.1. FORMULAÇÃO GERAL DO SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

A formulação do sequenciamento direto de blocos é solucionada em diferentes horizontes de tempo simultaneamente além de considerar diferentes funções objetivo e restrições. Os princípios desta formulação foram discutidos por Johnson (1968). Porém, não havia como resolver o problema em tempo computacionalmente hábil. Serão apresentados nos capítulos

seguintes desse trabalho algumas simplificações e estratégias que transformaram a formulação de Johnson (1968) na metodologia utilizada atualmente.

Como essa metodologia, assim como a sua formulação geral, reflete o valor do dinheiro no tempo, os valores descontados dos blocos devem ser considerados no modelo.

Uma formulação geral presente na literatura pode ser descrita a seguir:

- t: Período de tempo, $t=1, \dots, T$.
- I: Quantidade total de blocos no modelo.
- M_m : Capacidade de produção.
- M_p : Capacidade máxima de produção da lavra.
- M_L : Demanda mínima do processo.
- M_U : Demanda máxima do processo.
- g_L : Teor mínimo do processo.
- g_U : Teor máximo do processo.
- b_i : Tonelada do bloco i.
- g_i : Teor do bloco i.
- T_i : Conjunto de blocos que deve ser lavrado antes do bloco b_i .
- V_i : Valor econômico do bloco i.
- d: Taxa de desconto.
- O: Conjunto de blocos de minério.

$X_i^t = 0$; Caso o bloco i não seja lavrado no período t;

$X_i^t = 1$; Caso o bloco i seja lavrado no período t;

O objetivo da formulação é maximizar o valor presente líquido definindo-se o fator $X_i^t = 1$ em um arranjo de blocos de forma a contribuir no aumento do somatório do valor presente dos blocos, direcionando a lavra do bloco para o período t capaz de contribuir mais significativamente para este aumento. Matematicamente pode-se definir:

Maximize:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{V_i}{(1+d)^t} X_i^t \quad (3.6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{r=1}^t (x_j^r - x_i^r) \geq 0 \quad \forall i, j \in T; t = 1, 2, \dots, T; j \in T_i \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^I (b_i x_i^t) \leq M_m \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.8)$$

$$M_l \leq \sum_{i=1}^I b_i x_i^t \leq M_u \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=0}^0 (g_i - g_l) x_i^t b_i \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=0}^0 (g_i - g_{lu}) x_i^t b_i \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.11)$$

$$\sum_{t=1}^T x_i^t \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.12)$$

$$x_i^t \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, I \quad (3.13)$$

A equação 3.7 é responsável por definir a precedência dos blocos garantindo que se um bloco de posição inferior for lavrado, devido a decisão binária, o bloco superior deve ser lavrado anteriormente. Os valores demandados pelo processamento são considerados nas equações 3.8 e 3.9 ao utilizar que os blocos lavrados devem respeitar a desigualdade. Além garantir uma meta em massa de material produzido, devem ser considerados também máximos e mínimos de teor alimentado na usina, controlados pelas desigualdades 3.10 e 3.11. A restrição 3.12 garante que o bloco será lavrado apenas em um período. Outra importante consideração de controle é a restrição 3.13 que garante que a variável de decisão possui comportamento binário (Whittle, 1999).

3.4. SOLUÇÃO EXATA

Conforme discutido nas sessões anteriores, a formulação do Sequenciamento Direto de Blocos não é um problema de difícil entendimento e a construção do seu modelo básico também não apresenta grandes desafios (Nogholi, 2015). Porém, esse problema é muito grande para ser resolvido computacionalmente por Programação Inteira Mista (P.I.M). Por este motivo diversos pesquisadores se dedicam a modificar a estrutura básica da PIM buscando utilizar simplificações para diminuir a quantidade variáveis e momentos de decisão (Ramazan S. , 2007).

Um mecanismo simples para reduzir a quantidade de variáveis de decisão pode ser utilizado reunindo-se blocos criando unidades de tamanhos maiores. A combinação de blocos é capaz de agregar/simplificar os grafos de diferentes blocos em um arco único, tornando a decisão dependente de apenas um arco para representar um galho maior.

Ramazan (2007) propôs um mecanismo denominado "*Fundamental Tree Algorithm*" com objetivo de reduzir o tamanho da PIM. O mecanismo proposto combina os blocos presentes no mesmo *push back* em uns conjuntos de galhos agregados, reduzindo a quantidade de variáveis de decisão e possibilitando resolver o problema em sua formulação geral.

Weintraub (2008) descreve a possibilidade de dois métodos serem utilizados para simplificação do problema inicial. A primeira proposição consiste em um mecanismo de agregação para blocos com valor de benefício e localização semelhantes. A segunda alternativa consiste em agrupar os blocos de uma mesma coluna em um processo de agregação posterior. Segundo o mesmo autor o processo de agregação posterior é de difícil formulação.

Ramazan e Dimitrakopoulos (2004) propuseram um mecanismo de Programação Inteira Mista (P.I.M) com menor número de variáveis binárias. Na formulação apresentada pelos autores, somente os blocos de minério são considerados como variável binária de decisão, os blocos de estéril são considerados como variáveis contínuas na decisão. Um ponto fraco dessa simplificação refere-se à tendência de maximizar da PIM. O sistema encontra problemas para buscar soluções que estejam limitadas por esses grupos de estéril. Outro problema está relacionado a geometria do agrupamento que pode conduzir a uma lavra com baixa aderência operacional.

O mecanismo de agregação é uma importante ferramenta para diminuir o tamanho do problema assim como da complexibilidade dos grafos e precedências. A agregação tende a gerar um volume de frente liberada considerável para a solução do problema, porém pode reduzir consideravelmente a exatidão da solução. A exatidão dos teores dos blocos agregados é reduzida comprometendo a confiabilidade em um material que potencialmente poderia alimentar uma pilha de homogeneização no futuro (Cullenbine, 2011).

Nas Figura 3-8 e Figura 3-9 é possível observar um modelo de blocos bidimensional, em que as faixas de cores correspondem a teores. A diferente codificação de cor não está relacionada a teores específicos, é apenas uma representação gráfica de faixas teóricas. Na Figura 3-9, em que foi aplicado um mecanismo de agregação segundo a faixa de teor, é possível observar que, devido a simplificação, o teor médio dos blocos, possivelmente, não é respeitado. Assim como a faixa de teor foi alterada causando prejuízo ao sistema podemos considerar que o destino dos blocos também sofria alterações (Nogholi, 2015).

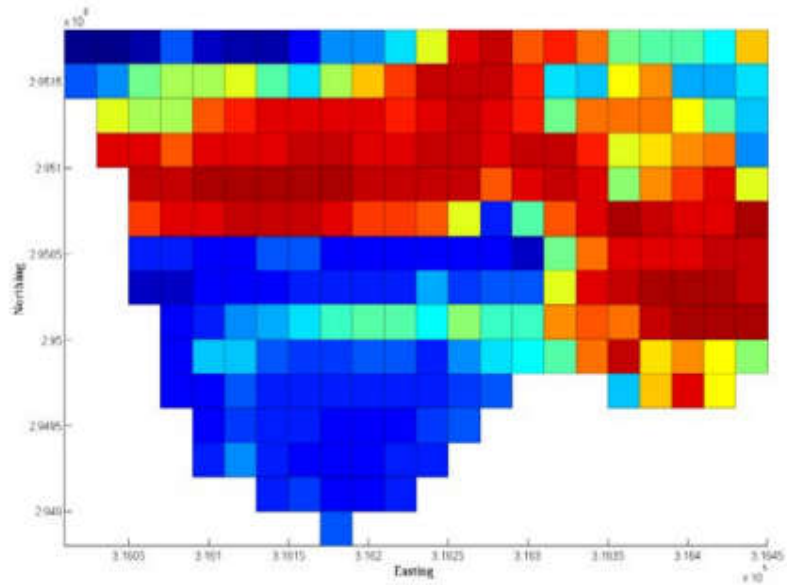


Figura 3-8 - Modelo de Blocos não simplificado (Nogholi, 2015)

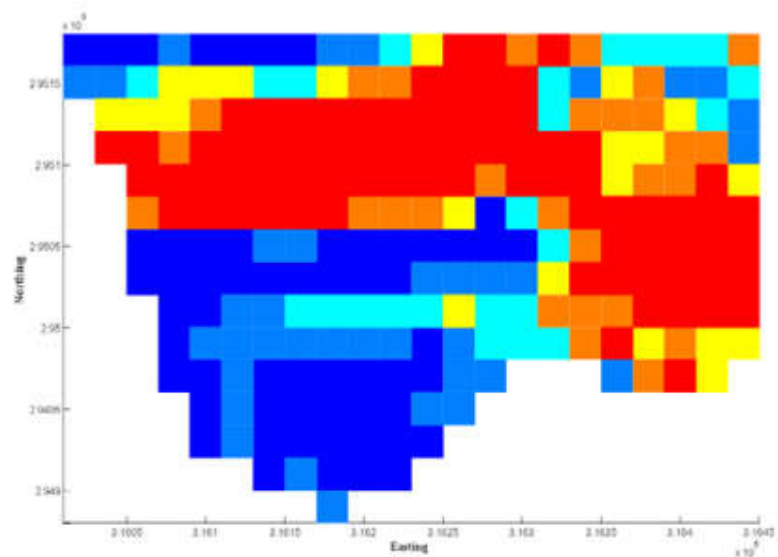


Figura 3-9 - Modelo de Blocos simplificado por faixa de teor (Nogholi, 2015)

3.5. CONCEITOS DE HEURÍSTICA

Os mecanismos heurísticos possuem a vantagem de conseguir tratar problemas de elevado tamanho, porém as simplificações da realidade não conseguem garantir a uma solução ótima (W. Brian Lambert, 2014).

Gerson (1987) propôs utilizar o valor econômico do bloco para criar um mecanismo de classificação dos blocos de modo a determinar maior prioridade aos blocos mais rentáveis. A classificação determina prioridade no algoritmo de busca de forma que os blocos de maiores valores sempre vão para o topo do vetor de busca da solução.

Moreno (2010) utilizou o conceito de programação inteira mista (PIM) baseado no problema da mochila de modo a considerar cada período de tempo separadamente. No método proposto há um mecanismo de relaxação linear do modelo e uma pré-classificação dos blocos de acordo com a posição topográfica que facilitaria o processo de busca. O mecanismo de hierarquia topográfica contribui para a viabilidade operacional da solução, uma vez que os blocos mais superficiais são posicionados na fração superior do vetor de busca. Uma técnica semelhante à adotada por Lambert (2014) em que há uma construção dos blocos viáveis tecnicamente antes do início da otimização.

O processo heurístico adotado consiste em adotar um mecanismo de redução do tamanho do problema de modo a torná-lo mais simples do ponto de vista computacional.

3.6. META HEURÍSTICA

A Meta Heurística é um mecanismo Heurístico utilizado para resolver de maneira aproximada problemas de otimização de difícil solução de forma exata. É um sistema de otimização combinatória para solução de problemas por meio de mecanismos aleatórios e conhecimento histórico do problema. O conhecimento histórico deve ser determinado simultaneamente à resolução do problema, o espaço de pesquisa previamente explorado gera informações para a busca de solução. O histórico do processo de busca auxilia para escapar de zonas de atratividade que podem causar paradas prematuras em ótimos locais (Blum & Roli, 2003).

Uma abordagem interessante sobre o aprendizado durante a solução do problema foi apresentada por Lamghari (2012) utilizando o mecanismo de busca baseada em tabu, denominado *Tabu Search* (TS). As soluções menos significativas são ranqueadas durante o processo de busca, definindo que os novos elementos e soluções mais significativas, previamente verificadas, sejam priorizadas durante a busca. O trabalho conjuga o mecanismo de memória de longo prazo e variável vizinha, assim as soluções mais próximas, considerando distância euclidiana, e mais significativas pela classificação são priorizadas. A solução inicial

é submetida a um refinamento da fronteira por meio do mecanismo de troca dos blocos utilizando um algoritmo de *Simulated Annealing*.

Sattarvand (2009) utilizou uma estratégia diferente baseada em *Ant Colony Optimisation*. Nessa aplicação as regiões de maior retorno são utilizadas para guiar a solução do problema. Regiões promissoras tornam-se zonas de atração para o mecanismo de busca. Assim como as formigas tendem a seguir o feromônio do companheiro de colônia, o sistema segue as soluções de maior valor já determinadas. O trabalho do autor demonstra a capacidade de resolver problema dessa natureza, mesmo com grande quantidade de blocos.

3.7. RELAXAÇÃO LAGRANGIANA

Existe uma outra abordagem capaz de fornecer uma solução para sistemas que apresentem dificuldades de convergir para uma solução exata. A estratégia do coeficiente de Lagrange consiste em relaxar/afrouxar o sistema ao remover algumas restrições do sistema (Almeida, 2013) (Nogholi, 2015). As restrições laterais para a resolução do problema são retiradas das equações restritivas e inseridas na função objetivo. O fator inserido na função objetivo com o intuito de substituir a restrição é denominado Multiplicador de Lagrange (Blum & Roli, 2003). Essa substituição facilita a resolução do sistema devido à natureza proibitiva das equações restritivas. O coeficiente de Lagrange força que a restrição seja cumprida, porém não impede que ocorra a convergência da solução.

A cada bloco que a sua seleção transgredir uma das equações de restrição o coeficiente de Lagrange diminui o valor da função benefício, de modo que o sistema tende a utilizar a menor quantidade de unidades fora das restrições possível para maximizar o sistema. Alguns trabalhos utilizaram desta metodologia com sucesso no sequenciamento direto de blocos.

Caccetta (1998) em seu trabalho comprovou o potencial de convergência deste método ao comparar um mecanismo otimizador por programação inteira mista (PIM) com um mecanismo com Multiplicadores de Lagrange. O trabalho mostra a maior capacidade de processamento em termos de tempo e uma diferença de valor de convergência da ordem de 5%.

Bienstock (2010) utilizou o multiplicador de Lagrange em uma etapa de "pré otimização" encontrado uma pré solução ótima, que não representa a solução ótima. A pré solução da primeira etapa é utilizada com semente em uma segunda etapa.

A relaxação de Lagrange é um importante mecanismo que pode ser aplicado em uma etapa inicial para selecionar os blocos viáveis, candidatos iniciais em uma etapa posterior que utilizaria, por exemplo, um algoritmo heurístico para refinar a solução do sistema.

3.8. FRONTEIRA DO CONHECIMENTO

Para aproximar o modelo proposto ao executado na operação de lavra, de acordo com metodologia clássica, devem ser resolvidos subproblemas relacionados a cava final, *pushbacks* e sequenciamento de blocos. A resolução deste problema por meio da metodologia de Lerchs-Grossmann e Fluxo Máximo tem sido plenamente discutida nos meios acadêmico e industrial. Estes métodos se preocupam em Maximizar o NPV sem o correto desconto financeiro para determinação da cava final. As restrições operacionais são as únicas restrições contempladas durante a execução do algoritmo clássico. Para obedecer às condições operacionais são inseridos mecanismos de pós processamento. Estes pós processamento acaba por limitar o universo de soluções possíveis por este método.

Com objetivo de maximizar o Valor Presente Líquido e criar locais de operação a cava final é dividida em zonas de trabalho denominadas *pushbacks*. Os *pushbacks* são gerados pelo mecanismo de parametrização em que o preço de venda é ajustado para criar cavas intermediárias que estão contidas espacialmente na cava final. A determinação do *pushback* ideal baseia-se em duas aproximações: Cavas Aninhadas e PIM/Heurísticas. As cavas aninhadas são produto da parametrização de reservas e são mecanismos que alimentam o processo heurístico.

Após determinação do *pushback* ideal é realizado o sequenciamento dos blocos dentro de cada zona de trabalho com objetivos operacionais, de obedecer às metas de produção e maximizar o valor presente líquido. Como nessa etapa já foram determinados quais blocos devem ser lavrados e dividido em avanços, o sistema de otimização apresenta uma maior facilidade para resolver o problema. Apesar das simplificações a solução do problema ainda é computacionalmente complicada.

O sequenciamento direto de blocos é uma tentativa de substituir as aproximações provenientes da sequência de trabalho apresentada acima utilizando simplificações no modelo e técnicas heurísticas para solução dos problemas simultaneamente.

Para atender as necessidades operacionais é importante considerar, primeiramente, fatores importantes como tamanho mínimo de praça, quantidade de frentes lavradas, número

de níveis lavrados, alocação e disponibilidade de equipamentos, liberação de frentes de lavras, etc.

Posteriormente, devem ser considerados os destinos para os blocos que não devem ser estáticos. É necessário considerar as opções de bendagem com outros blocos com intuito de maximizar o aproveitamento da reserva e as opções de estocar os blocos para serem retomados em um período posterior. As pilhas devem ser construídas também com intuito de regularizar a alimentação da planta em períodos de baixa produção de minério.

Idealmente o problema de sequenciamento direto de blocos deve resolver o sistema considerando o tamanho original dos blocos, porém os pacotes comerciais existentes não resolvem este problema com todas as restrições necessárias sem alterar o tamanho do problema ou agrupar blocos.

A fronteira do conhecimento está associada a encontrar soluções capazes de atender as restrições sem que seja necessário utilizar simplificações que causem prejuízos a solução.

3.9. RESTRIÇÕES PARA A FORMULAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

No item 3.3.1 foi apresentado a formulação geral para o Sequenciamento Direto de Blocos contendo restrições gerais relacionados a maximização da função benefício. As restrições apresentadas até o momento são capazes de controlar apenas as necessidades de produção e alimentação da usina. Caso fosse implementada apenas a formulação geral o resultado do algoritmo iria convergir para uma lavra de pouca aderência operacional, já que não estão contemplados tamanhos mínimos de praça e de fundo de cava, pilha de regularização de teor, pilha pulmão para usina, quantidade e tempo de equipamentos de lavra, quantidade de bancadas lavradas.

Neste tópico serão abordadas as restrições necessárias para aproximar a lavra planejada à lavra executada contribuindo para a maior aderência do planejamento.

3.9.1. Minimização dos custos

Um dos mais importantes conceitos utilizados em programação é o da dualidade. Os problemas que possuem um outro problema associado são classificados como Duais. O problema original é denominado Primal, que nesse contexto é a maximização do valor

presente líquido de blocos, como objetivo principal. Objetivo secundário pode ser determinado como a minimização dos custos, a possibilidade de um problema ser minimizado e maximizado simultaneamente é definido como Dual (Souza & Melo, 2014). O sequenciamento direto de blocos obedece este esquema de restrição em que a formulação geral objetiva maximizar o fluxo de material processado de modo a obter o maior retorno financeiro com objetivo secundário de minimizar as restrições de várias ordens. Custos de carregamento e de transporte, abertura de frentes de lavras, retomada da pilha, estocagem da pilha são restrições importantes não só para correta contabilização dos custos, mas são capazes de aumentar a aderência do problema a realidade.

Caso o sequenciamento direto de blocos não resulte em um sistema operacional viável, custos adicionais seriam necessários para torná-lo operacional garantindo o gerenciamento das variáveis que não foram corretamente inseridas no sistema.

3.9.2. Restrições de Precedência

A precedência de blocos está relacionada a dois diferentes tipos de restrição: Horizontal e Vertical. A restrição horizontal ou *Top/Down* afeta diretamente a inclinação do talude geral e da face. O controle da precedência é realizado pelo centroide do bloco e o cálculo do ângulo entre os blocos pode ser realizado de duas formas distintas:

- Precedência entre blocos.
- Superfície de controle.

A precedência entre blocos é definida ao considerarmos o vetor entre os centroides dos blocos vizinhos, determinado com referência a um plano horizontal, como mostra a Figura 3-10 (Beretta & Marinho, 2014).

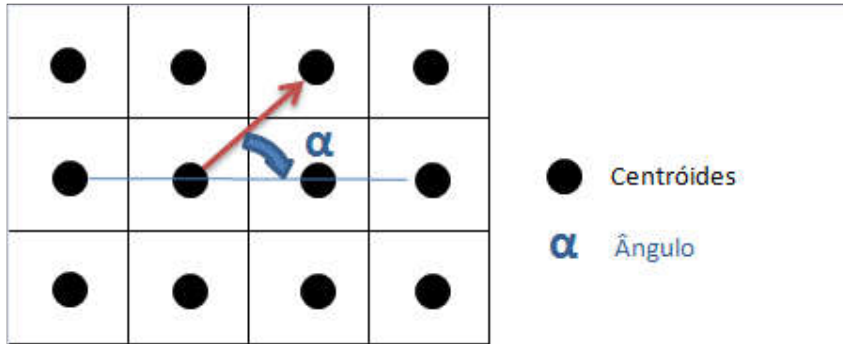


Figura 3-10 - Precedência de blocos por grafo (Fonte: Contribuição do autor).

Com objetivo de se evitar os problemas de aproximação dos ângulos em blocos profundos (Almeida, 2013) propõe a utilização de superfícies de controle para construção da precedência entre os blocos. Este mecanismo funciona como um "gabarito" capaz de selecionar os blocos que devem compor a face, evitando, assim, erros de aproximação em maiores profundidades (figura 3-11).

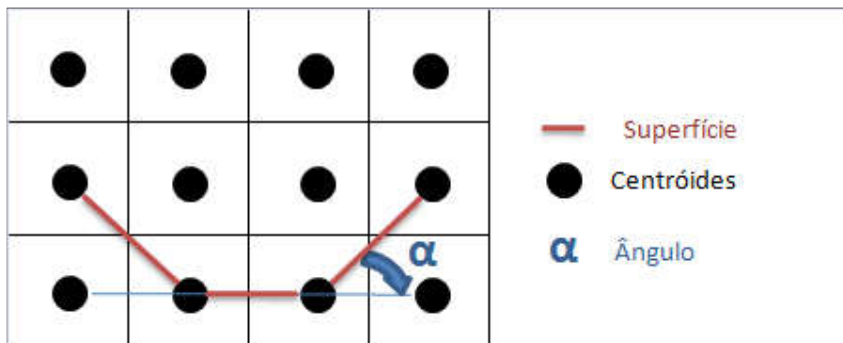


Figura 3-11 - Precedência de blocos por superfície (Fonte: Contribuição do autor).

Além da precedência Horizontal deve-se analisar a restrição Vertical. Essa restrição é de extrema importância para avaliar os blocos que devem ser retirados acima do bloco analisado. O conjunto (bloco analisado mais blocos precedentes) deve apresentar receita favorável para ser lavrado, exemplificado na figura 3-12 (Nogholi, 2015).

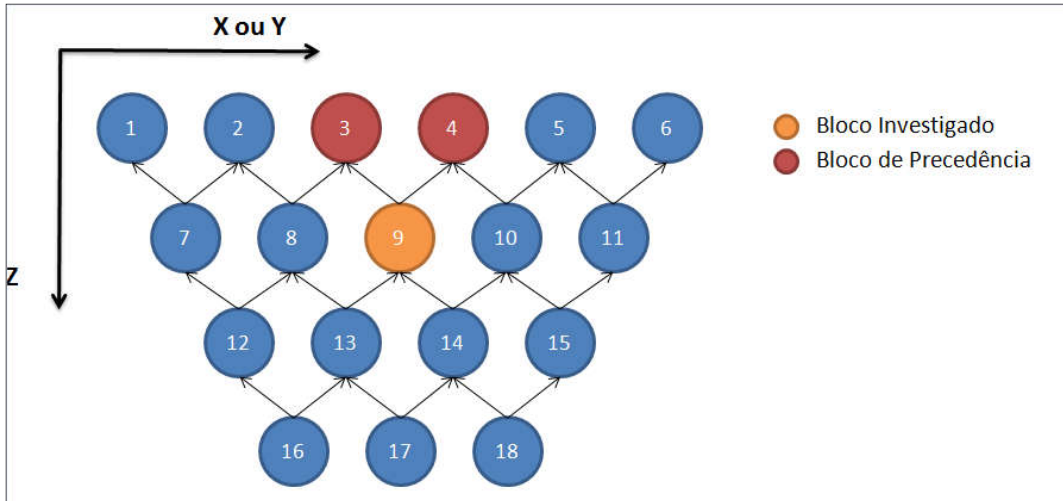


Figura 3-12 - Bloco de precedência vertical (Fonte: Contribuição do Autor)

A restrição horizontal se preocupa com a definição de frentes de trabalho abertas para liberação de um determinado bloco (figura 3-13). Caso não existam frentes disponíveis a lavra será realizada a partir de um banco superior. Este procedimento possui um custo maior devido as dificuldades operacionais e ao tempo maior necessário para realizar este avanço (Noghli, 2015) (Farmer & Dimitrakopoulow, 2015).

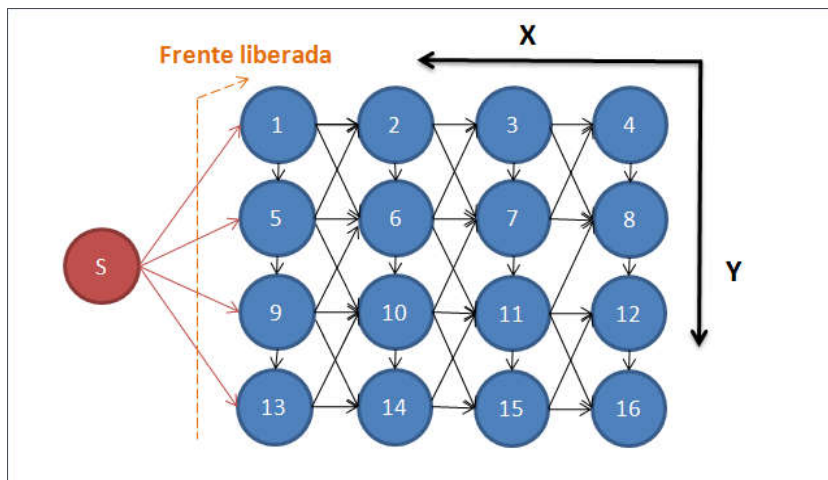


Figura 3-13 - Frente liberada para ataque frontal (Fonte: Contribuição do Autor)

Para desencorajar o sistema a abrir frentes de lavra a partir de acessos superiores podemos adotar uma restrição capaz de favorecer a lavra dos blocos liberados garantindo que a adjacência lateral sobreponha-se a precedência vertical. Esta restrição pode ser descrita matematicamente por (Noghli, 2015):

$$\sum_{r=1}^t \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D x_{jmd}^r - \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D x_{imd}^t \geq 0 \quad \forall \{i, j \in I \mid j \neq i \in p_i\}, t = 1, \dots, T \quad (3.14)$$

Quando o sistema decidir por um avanço a partir de um acesso superior será necessário contabilizar os blocos adicionais que serão lavrados por esta decisão garantindo um tamanho mínimo de praça para operação dos equipamentos de lavra. Como solução para este problema podem-se clusterizar os blocos candidatos, de modo que a investigação avalie somente grupo de blocos cujo os custos contabilizem o grupo para correta tomada de decisão (Farmer & Dimitrakopoulow, 2015).

3.9.3. Restrição de capacidade de produção

Para garantir que a produção mínima seja de acordo com a taxa de utilização física dos equipamentos de lavra e que a aderência entre utilização planejada e a executada seja satisfatória, devemos utilizar restrições de mínimo e máximo (W. Brian Lambert, 2014). As restrições de mínimo e máximo são utilizadas concomitantemente a relaxação Lagrangeana para minimizar os possíveis desvios do sistema entre os máximos e mínimos, de modo que a meta de produção seja atinja (Lamghari & Dimitrakopoulos, 2012).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D b_i x_{imd}^t \geq M_m^t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.15)$$

3.9.4. Restrição de capacidade de processamento

A quantidade de material lavrado e destinada a planta de processamento deve ser limitada pela capacidade instalada da usina. De modo a não ultrapassar os limites superiores e inferiores de alimentação da usina a seguinte formulação deve ser respeitada (Nogholi, 2015):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{imp}^t b_i + \sum_{s=1}^{Sp} Z_{sp}^t \leq M_p^{max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; p = 1, 2, \dots, P \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{imp}^t b_i + \sum_{s=1}^{Sp} Z_{sp}^t \geq M_p^{min} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; p = 1, 2, \dots, P \quad (3.17)$$

3.9.5. Restrição de pilha de estoque

Assim como realizado para a usina de processamento, valores mínimo e máximo devem ser aplicados para garantir que as pilhas operem entre as capacidades mínimas e máximas. A tomada de decisão sobre quais blocos deverão alimentar a pilha não é satisfeita somente pelas restrições de máximo e de mínimo. Idealmente um bloco que não irá alimentar a usina de beneficiamento no período de sua lavra deveria ser analisado como possibilidade de estoque e processamento posterior devido o processo de cut-off dinâmico. Simultaneamente esse processo deve avaliar a possibilidade de combinar este bloco com outro com intuito de obedecer a especificação da planta, além de verificar qual a melhor oportunidade de sua retomada da pilha, caso seja este seu destino, em relação ao tempo (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2013).

$$I_s^t \leq M_s \quad \forall t = 1, 2 \dots T; s = 1, 2 \dots S \quad (3.18)$$

$$Z_{sp}^t \leq I_s^{t-1} \quad \forall t = 2, 3 \dots T; s = 1, 2 \dots S; p = 1, 2 \dots P \quad (3.19)$$

$$Z_{sp}^1 \leq I_s^0 + \sum_{i=1}^l \sum_{m=1}^M x_{ims}^1 b_i \quad \forall s = 1, 2 \dots S; p = 1, 2 \dots P \quad (3.20)$$

Sujeito a

$$I_s^t = I_s^0 + \sum_{r=1}^t \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^l x_{ims}^r b_i - \sum_{r=1}^t \sum_{p=1}^P Z_{sp}^r \quad \forall t = 2, 3 \dots T; s = 1, 2 \dots S \quad (3.21)$$

3.9.6. Restrição de teor para a planta

Para que o sistema possa ser completamente aproveitado deve ser considerado o sistema de cut-off dinâmico, qual é capaz de avaliar se é melhor direcionar o bloco para usina ou pilha de estoque de acordo com a decisão do melhor período para retomada deste bloco. Considerando este sistema dinâmico podemos observar que na equação 3.22 que o teor da pilha (g_s^a) influencia diretamente o teor a ser alimentado na usina, em que é parte do controle de cut-off dinâmico (Noghli, 2015).

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^l (g_i^\alpha - g_{\alpha p}^{max}) x_{imp}^t b_i + \sum_{s=1}^{Sp} (g_s^\alpha - g_{\alpha p}^{max}) z_{sp}^t \leq 0 \quad \forall t = 1, \dots T; \quad (3.22)$$

$$p = 1, \dots P; \alpha = 1, \dots A$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L (g_i^\alpha \quad g_{\alpha p}^{max}) x_{imp}^t b_i + \sum_{s=1}^{Sp} (g_s^\alpha \quad g_{\alpha p}^{max}) z_{sp}^t \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T; \quad (3.23)$$

$$p = 1, \dots, P; \quad \alpha = 1, \dots, A$$

3.9.7. Restrição multi período

O objetivo deste tópico é apresentar as restrições para construção cumprir as metas de produção de cada período de modo a desenvolver o sequenciamento da cava. Validar as restrições de todos os períodos simultaneamente é uma vantagem apresentada por este método qual se propõe construir todo sequenciamento e limite final de escavação em uma etapa única (Almeida, 2013). As estratégias combinatórias e otimizadoras serão explicadas futuramente no capítulo adequado. Para que esta estratégia resulte em um planejamento factível deve ser considerada restrições capazes de atender as necessidades de produção e restrições operacionais (Ramazan S. D., 2012).

A possibilidade de controlar a produção com auxílio de pilhas de estoque provoca uma perturbação no sistema capaz de alterar todo o sequenciamento, uma vez que existe a possibilidade de armazenar o material com teor mais elevado para combiná-los com blocos de baixos teores em um período específico, contribuindo para o aumento da reserva. Tal experimento foi realizado por Nogholi (2015) de modo a exemplificar como restrições corretas e *cut-off* dinâmico contribuem para o resultado do planejamento como apresentado nas figuras 3-14 e 3-15.

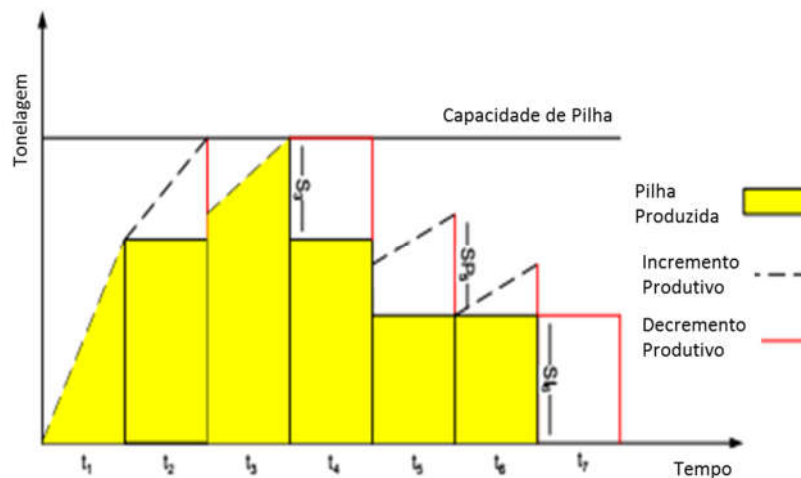


Figura 3-14 - Sequenciamento sem pilha de estoque (Traduzido de Nogholi (2015)).

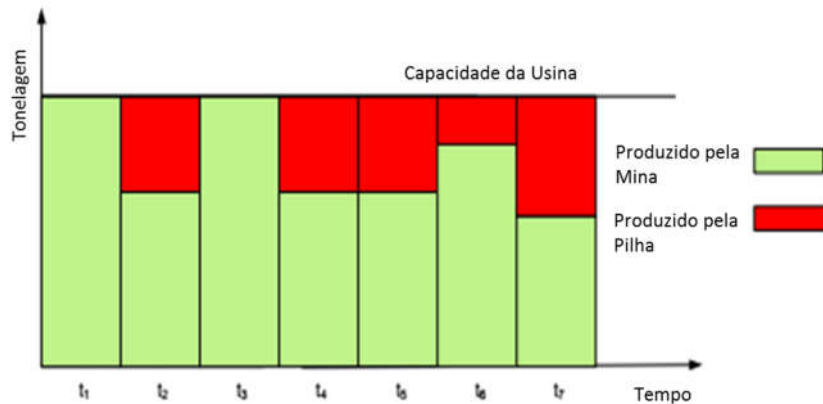


Figura 3-15 - Sequenciamento com pilha de estoque e multi período (Nogholi, 2015).

Para atender a demanda devem ser considerados parâmetros operacionais com o intuito de aproximar o planejamento da operação de lavra:

1. A quantidade de material enviada diretamente a planta de processamento deve ser maior que a capacidade de processamento da planta;
2. A capacidade de material estocado não deve ser maior que a capacidade das pilhas;
3. A quantidade de material enviado para o processamento somado a quantidade retomada das pilhas não deve ser maior que a capacidade de processamento;

Os teores do material que alimenta a planta devem estar entre os limites inferiores e superiores de modo que a meta de produção de metal seja atingida. (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2013)

3.10. Aproximações Para Resolução do Problema

Problemas de otimização de grande complexidade podem utilizar mecanismos aproximativos para encontrar uma solução viável frente a grande quantidade de restrições (Bienstock, 2010). Os mecanismos para construção da vizinhança, simplificações, aproximações para a convergência metodologias matemáticas amplamente utilizadas no sequenciamento direto de blocos.

Os mecanismos aproximativos basicamente aperfeiçoam a solução inicial que se comporta como um rascunho, por meio de sucessivas tentativas de melhora a partir da utilização de um conjunto de modificações candidatas. O algoritmo aproximativo ou heurístico interrompe o processo quando encontra uma solução aceitável de acordo com as restrições impostas (Sattarvand, 2009).

3.10.1. Blocos Acessíveis

Os blocos acessíveis são blocos que estão liberados na superfície e podem ser removidos diretamente sem a necessidade de retirada de blocos intermediários. Estes são os blocos candidatos a serem contabilizados na lista de possível solução durante a resolução do problema (Nader et al (2015)). Além da precedência vertical, deverá ser verificado, para cada bloco lavrado, se a praça de trabalho apresenta dimensões suficientes para a operação dos equipamentos. Esse problema pode ser resolvido de diferentes maneiras. Farmer (2015) indica um processo de clusterização dos blocos candidatos de forma que sejam aglomerados em grupos com o tamanho mínimo da praça de trabalho. Nogholi (2015) indica a construção de uma restrição espacial utilizando-se uma desigualdade, exemplificada nas figuras 3-16 a 3-. É importante considerar que blocos acessíveis apresentam liberação vertical e horizontal.

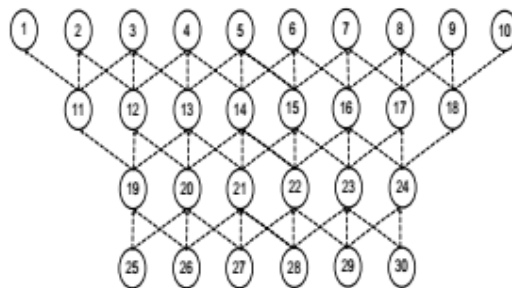


Figura 3-16 - Blocos Originais (Nogholi, 2015).

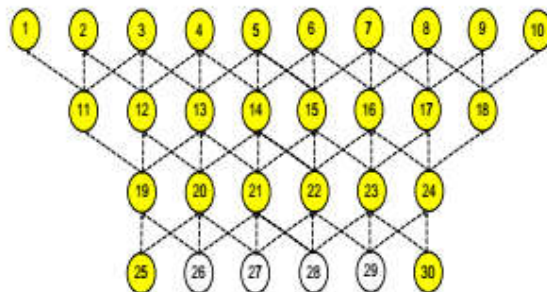


Figura 3-17 - Blocos Lavráveis de Amarelo (Nogholi, 2015).

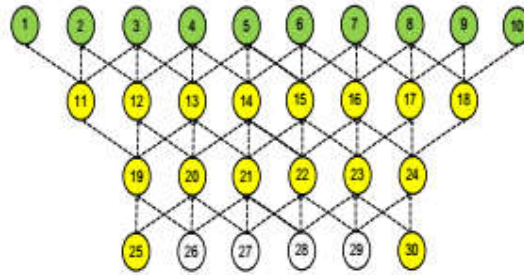


Figura 3-18 - Blocos liberados de Verde (Noghli, 2015).

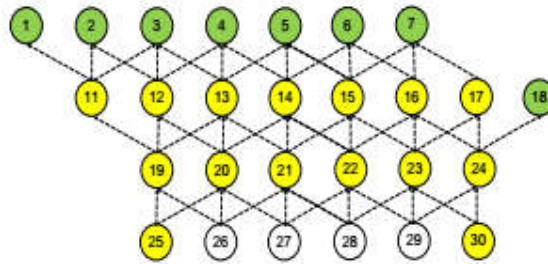


Figura 3-19 - Bloco Acessível e Liberado após a Lavra do Bloco 10 (Noghli, 2015).

3.10.2. Construção de Pré Candidatos

Existem diversos mecanismos capazes de construir um conjunto de blocos pré-candidatos de modo a tornar o algoritmo mais eficiente. Pois o sistema irá passear somente por regiões do universo de solução em que os blocos obedeçam às restrições. Caso seja utilizado algum mecanismo de simplificação como demonstrado no capítulo 3.4 será parte integrante do candidato a solução. Um interessante mecanismo de simplificação foi apresentado por Noghli (2015) em que é construído um vetor de busca semelhante a uma pilha em que a cada interação capaz de resolver um período a lista seja atualizada com blocos candidatos com uma hierarquia determinada.

Durante a execução deve ser construída uma matriz capaz de armazenar as informações de restrições e meta de teor que podem ser alimentadas no sistema, de modo que seja priorizado os blocos capazes de atender as necessidades da usina. O peso capaz de contabilizar a prioridade do bloco é determinado com base no desvio em relação ao valor considerado objetivo (Noghli, 2015) (Lamghari & Dimitrakopoulos, 2012). Para elementos contaminantes pode ser aplicado a formulação geral proposta por Noghli (2015) representada pela equação 3.24.

$$Pr_i = \sum_{\alpha=1; \alpha \neq \theta}^A \varpi_{\alpha} |\varphi_{\alpha\rho}^{min} - g_i^{\alpha}| \quad (3.24)$$

em que:

ϖ_{α} : Ponderador do atributo α .

g_i^{α} : Fração do atributo α no bloco i .

$\varphi_{\alpha\rho}^{min}$: Mínimo do atributo α requerido pelo processamento ρ .

O processo deve continuar até que a combinação de blocos satisfaça a necessidade do processamento e restrições alimentadas ao sistema. O material estocado na pilha de estéril deve ser utilizado se o sistema de hierarquia no vetor de busca não for capaz de suprir a demanda necessária a solução do sistema.

3.10.3. Metaheurística Aplicada ao Problema

A Metaheurística é considerada uma importante extensão da área de otimização para sistemas estocásticos. São estratégias capazes de resolução dos problemas de difícil solução não contemplados pelos sistemas lineares (Luzia & Rodrigues, 2009).

Os sistemas metaheurísticos são capazes de adotar procedimentos de busca local com a habilidade de escapar de zonas de atratividade local, mínima ou máxima. Os avanços matemáticos dos principais centros de pesquisa resultaram no aprimoramento das estratégias capazes de realizar busca em espaços complexos, além da capacidade de fugir de mínimos locais. Para evitar estas zonas de mínimo foram incorporados conceitos de vizinhança com intuito de mapear possibilidades de fugir de zonas capazes de conduzir a atração de uma solução não ótima (GLOVER, 2003).

A metaheurística é um mecanismo capaz de produzir um resultado ótimo satisfatório de problemas de difícil solução com respeito as restrições sem garantir a otimalidade do sistema.

São normalmente aplicadas para encontrar respostas a problemas sobre os quais há poucas informações: não se sabe como é a aparência de uma solução ótima, há pouca informação heurística disponível e força-bruta é desconsiderada devido ao espaço de solução ser muito grande. Porém, dada uma solução candidata ao problema, esta pode ser testada e sua otimalidade, averiguada (Luzia & Rodrigues (2009) et all).

3.10.4. Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é uma estratégia Metaheurística de solução de problemas de difícil convergência. O algoritmo compõe a etapa de busca local de soluções baseado no conceito de recozimento ("*annealing*"). O recozimento metalúrgico é uma metodologia de trabalho qual o metal é aquecido até o ponto de fusão, posteriormente de forma lenta deve ser resfriado. Este processo objetiva ajustar a estrutura do metal de modo a diminuir as imperfeições (GLOVER, 2003). No sistema a ser otimizado este processo busca ajustar o sistema de modo a garantir o melhor ótimo global possível dentro das restrições ajustadas.

Assim como no ciclo de recozimento metalúrgico há a verificação da estrutura a cada interação no processo de *Simulated Annealing* deve ser comparado a nova solução com a solução anterior. Cada interação ocorre um ajuste das variáveis em que há duas soluções: anterior e a nova. Sempre que o sistema encontrar uma nova solução ela deve ser aceita como a ideal momentânea (Luzia & Rodrigues, 2009). O processo deve evitar que o recozimento permaneça próximo a mínimos/máximos locais. É de extrema importância permitir movimentos ascendentes mesmo em regiões que pioram a solução local na esperança de encontrar um máximo global além da zona de piora de solução. Podemos fazer um paralelo com o problema de sequenciamento de lavra em que é importante investigar se a liberação de um grupo de blocos de estéril pode conduzir a um minério capaz de pagar os blocos de estéril e incrementar a função objetivo.

O tempo em que o sistema permanece na tentativa de aprimorar a solução é baseado na probabilidade de encontrar uma solução promissora. Glover (2003) propõe uma formulação inspirada na temperatura do processo de recozimento, em que probabilidade de se aceitar uma solução R de qualidade inferior à solução atual S é dada pela fórmula 3.25 (T é um parâmetro chamado temperatura, em analogia ao recozimento, e é tipicamente decrementado a cada iteração do algoritmo).

$$P(R, S, T) = \frac{e^{(Qualidade(R) - Qualidade(S))}}{T} \quad (3.25)$$

Em cada interação há a tendência de diminuição da temperatura devido a estabilização da solução, o que diminui a probabilidade de escolha de uma solução menos promissora e aumenta a tendência de se melhorar a solução atual.

Considerando as explicações acima podemos resumir o comportamento deste algoritmo da seguinte forma:

1. Solução inicial criada;
2. Determinação dos vizinhos disponíveis e determinação de hierarquia entre os vizinhos;
3. Nova solução viável é criada;
4. Caso o valor da solução objetivo nova é melhor que a anterior será substituída pela nova solução de acordo com a probabilidade determinada na equação 3.25;
5. Após uma quantidade de interações o sistema deve ser capaz de não evitar buscas apenas em regiões de menor temperatura com objetivo de não ficar preso em regiões de mínimo/máximo local;
6. O processo termina quando os critérios de parada forem atingidos (Adaptado de Nogholi (2015)).

```

01: T ← temperatura com valor elevado
02: S ← solução candidata inicial qualquer
03: Melhor ← S
04: repita
05:   R ← GerarVizinho( S )
06:   se Qualidade(R) > Qualidade(S) ou se Aleatorio() < P(R,S,T) então
07:     S ← R
08:   T ← NovaTemperatura(T)
09:   se Qualidade(S) > Qualidade(Melhor) então
10:     Melhor ← S
11: até que Melhor seja a solução ideal, ou o tempo tenha esgotado, ou T < 0
12: devolva Melhor

```

Figura 3-20 - Algoritmo de genérico de *Simulated Annealing* (Luzia & Rodrigues, 2009).

3.10.5. Busca em Tabu (*Tabu Search*)

O mecanismo de busca em tabu pode ser classificado como uma técnica de vizinhança dinâmica qual será atualizada de acordo com o histórico de busca. Esta etapa é responsável a fornecer para o mecanismo de solução exata ou heurístico o grupo de elementos candidatos a solução ótima. A busca em tabu inicia em um ponto inicial do sistema qual será suavemente alterado de modo que ocorra uma busca em sua vizinhança. Caso um elemento tenha sido visitado ou viole uma restrição é classificado como tabu. Tabu conceitualmente é um limite qual não é permitido aproximações (Nogholi, 2015).

Um bom sistema de busca em tabu deve ser capaz de balancear entre uma intensa busca local e diversidade regional no momento adequado. A intensidade deve ser explorada quando encontrado uma região espacial promissora, porém há a necessidade de estratégias diversificadas capazes de investigar áreas inexploradas. O tabu local consiste em um movimento local recentemente realizado qual não deve ser repetido. No conceito global

consiste em movimentos capazes de investigar áreas inexploradas, sendo capaz de fugir de máximos/mínimos locais que podem induzir o sistema a realizar passeios somente nesta região (Gomes, 2013).

A busca em tabu possui dois tipos de memória: longo e curto prazo. A memória de curto prazo é substituída durante as visitas que permitem a construção do problema. A memória de longo prazo é constituída por soluções que recursivamente não apresentam incremento de solução ao problema principal (Glover, 2000).

3.10.6. Busca em Tabu Aplicado ao Sequenciamento Direto de Blocos

Para utilização da busca em tabu Nogholi (2015) propôs um algoritmo genérico. As notações para o algoritmo são apresentadas a seguir:

x^0 = Solução Inicial;

x = Solução atual;

x' = Solução Vizinha;

x^* = Melhor solução encontrada;

$N(x)$ = Vizinho da solução x ;

$f(x)$ = Valor da solução objetivo x ;

f^* = Melhor valor da solução objetivo encontrado;

$\bar{N}(x)$ = Soluções não proibidas pelo tabu;

\hat{T} = Lista do tabu.

```

Entrada: Solução Inicial  $x^0$ 
Saída: Solução X
 $X \leftarrow x^0, f^* \leftarrow f(x^0)$ 
While critério de parada não satisfeito
  Selecione  $x' \in N(x)$ 
  If  $f(x') < f^*$  then
     $x \leftarrow x', f^* \leftarrow f(x')$ 
  End
End
Return x

```

Figura 3-21 - Algoritmo genérico de busca tabu (Adaptado de Nogholi (2015)).

Em um sistema em que o tabu seja determinado pelo tempo em que o bloco foi investigado, os blocos mais recentes tendem a ocupar as posições finais do vetor. A medida que os blocos mais antigos vão sendo utilizados os que possuem maior tabu tendem a ser deslocado para porções mais privilegiadas. As listas de tabu são muito eficientes quando comparadas a outros sistemas, pois em um vetor somente as posições que foram investigadas são armazenadas. O contrário acontece em sistemas de matriz de vizinhança em que há alocação de memória para todos os elementos do modelo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Banco de Dados

Para este estudo foi utilizado um modelo de blocos baseado em um banco de dados real. O banco de dados foi fornecido por uma mineradora qual resguarda o direito de anonimato sobre o depósito mineral. O empreendimento relacionado a este banco de dados é um depósito de minério de ferro formado no Pré-Cambriano dentro do "Quadrilátero Ferrífero". Esta é uma formação típica de *greenstone belt*, formado por rochas Meta Vulcânicas e Meta Sedimentares (CPRM, 2014).

Com intuito de preservar as informações estratégicas da empresa o banco de dados foi reduzido em termos de região espacial através de limitações nos meridianos e paralelos que

cortam a região. As litologias foram suprimidas e foi realizado um pequeno ajuste nos teores de Fe e SiO₂ para preservar os dados e resultados da empresa.

Tabela IV-1 - Características do Modelo de Blocos

Nº de Blocos	Leste Dim.	Norte Dim.	Z Dim.	Volume m ³	Fe (%)	SiO ₂ (%)
3,019,104	12.5	12.5	15	7,076,025,000	41.10	32.32

Para a proteção dos dados também foi utilizado uma simplificação na litologia do modelo. Todas as litologias do modelo que são mineralizadas foram simplificadas para a classificação do FFB, uma vez que a classificação original apontava para subclassificações da litologia FFB. Desta forma o agrupamento de litologias semelhantes não causa grandes complicações para o sistema.

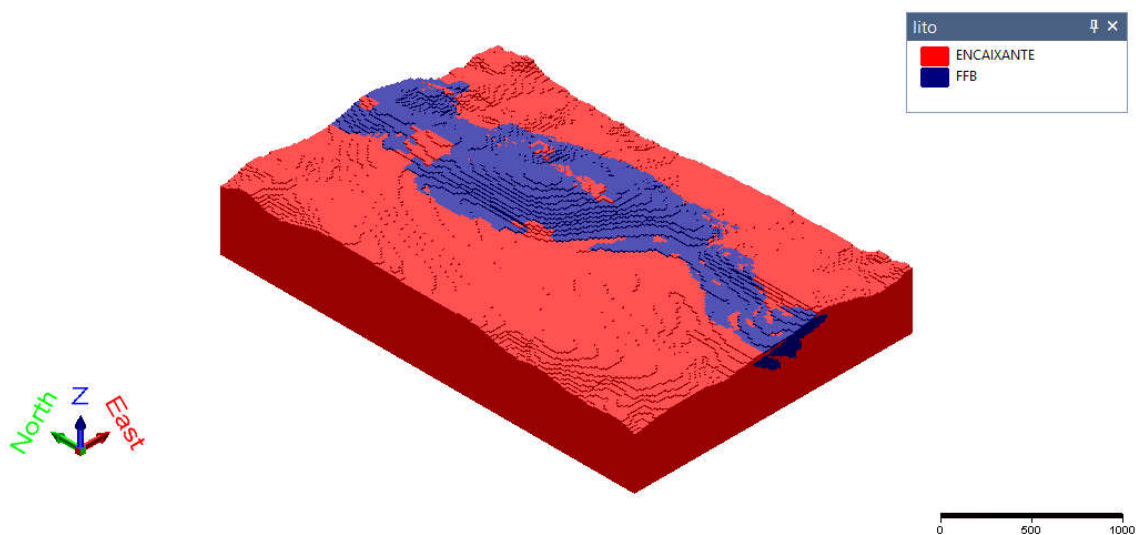


Figura 4-1 - Modelo de Blocos e Classificação Mineral (Fonte: Contribuição do autor)

4.2. Atividades e Recursos necessários

Os principais recursos e a infraestrutura necessários para execução da pesquisa estão apresentados na Tabela IV-2.

Tabela IV-2 - Atividades e recursos necessários.

Nº Atividade	Atividade	Recurso	Fornecedor
1	Análise de Restrição Operacional: Taxa de Avanço Vertical.	Algoritmo de SDB e computador.	Dep. Engenharia de Minas
2	Análise de Restrição Operacional: Tamanho Mínimo de Praça.	Algoritmo de SDB e computador.	Dep. Engenharia de Minas
3	Análise de Restrição Operacional: Superfície de Restrição.	Algoritmo de SDB e computador.	Dep. Engenharia de Minas
4	Análise de Restrição Operacional: Controle da Relação Estéril/Minério	Algoritmo de SDB e computador.	Dep. Engenharia de Minas
5	Sugestão de fluxo de trabalho para utilização do SDB.	Algoritmo de SDB e computador.	Dep. Engenharia de Minas

4.3. Metodologia

A análise será dividida em duas etapas principais: Análise do impacto financeiro e Análise da operacionalidade. A primeira análise consiste em avaliar o impacto das variáveis operacionais nos resultados econômicos. A etapa seguinte consiste em verificar se o algoritmo foi capaz de

atender as restrições propostas ou relaxou o problema. Para verificar se o algoritmo atendeu as restrições propostas serão realizadas medições nas superfícies construídas pelo algoritmo. As atividades planejadas estão descritas na Tabela IV-. As atividades de 1 até 4 irão avaliar os impactos das restrições operacionais com intuito de avaliar o impacto econômico. Atividade 1 compara cenários cujo a taxa de avanço vertical varia de 40 a 100 metros.

O tamanho mínimo de praça descrito na atividade 2 será comparado por dois cenários extremos. O primeiro cenário será construído com um tamanho mínimo de praça de 50 metros, tamanho comum em operações de minério de ferro de médio porte. Para o cenário extremo foi adotado um tamanho de praça comum para minas de classe mundial com 200 metros operacional.

Para a superfície de restrição será utilizado uma prática comum na indústria mineral: restringir o primeiro ano de lavra a uma região específica. A restrição inicial pode ser necessária devido à ausência de acordo com um superficiário ou falta de estrutura. Pela metodologia clássica apenas os blocos dentro da superfície de restrição são alterados, porém pelo sequenciamento direto de blocos é esperado uma reorganização de todo empreendimento. Esta restrição operacional pode ser aplicada a qualquer etapa do sequenciamento de produção apesar do cenário escolhido restringir apenas no início do empreendimento. Este controle de restrição operacional atende a atividade 3 descrita no quadro de atividades.

O controle da relação entre a quantidade de estéril e minério previsto na atividade 4 é uma ferramenta simultaneamente operacional e econômica. A alteração desta relação é capaz de alterar a viabilidade técnica e econômica do projeto simultaneamente. Serão testadas as habilidades de atingir três cenários: Relação crescente, Relação decrescente e Relação constante.

As atividades 1, 2, 3 e 4 fornecerão o subsídio para determinação de um fluxo de trabalho sugerido para utilização dos algoritmos de sequenciamento direto de blocos. O fluxo de trabalho deve ser capaz de fornecer uma rotina eficaz para resolução de problemas da ordem econômica e operacional assim como previsto na atividade 5.

5. TESTES OPERACIONAIS

5.1. Tamanho de Praça

O tamanho de praça é um importante fator operacional capaz de influenciar o desempenho econômico do empreendimento. Quanto maior o tamanho da praça mais fácil é a manobra dos equipamentos, de modo que o tempo de ciclo tende a diminuir (HARTMAN, 1987). A diminuição do tempo de ciclo leva a um aumento de produtividade, e a medição deste ganho de produtividade gerado pelo tamanho de praça durante o sequenciamento de lavra é muito difícil. O fluxo de caixa é capaz de contabilizar o benefício ao estimar o gasto específico de cada equipamento (Nader et al (2015)).

O aumento da praça gera aumento do volume lavrado devido aos blocos de precedência, qual devem ser lavrados compulsoriamente. Uma vez que o banco horizontal mínimo pode possuir tamanho maior que o bloco de lavra, o sistema pode obrigar o planejamento de lavra a adiantar a lavra de um bloco de estéril vizinho. Este aumento conduz à diminuição da seletividade das operações de lavra (HARTMAN, 1987).

Computacionalmente, o tamanho da praça de trabalho está ligado diretamente à precedência horizontal dos blocos. O conceito de precedência vertical de blocos pode ter seu uso estendido para precedência horizontal. A precedência vertical se baseia no conceito básico de que os blocos superiores devem ser lavrados antes dos blocos inferiores. Já a precedência horizontal aglomera blocos de um mesmo nível em um conjunto de nós individuais. Neste caso para lavar um bloco inferior devem ser contabilizados os blocos aglomerados do nível superior para tomar a decisão de lavra (Nogholi, 2015). Este modelo pode alterar o conceito de bloco de precedência, pois a representação gráfica dos blocos com apenas uma precedência por arco pode ser alterada para um grupo de blocos (Farmer & Dimitrakopoulos, 2015).

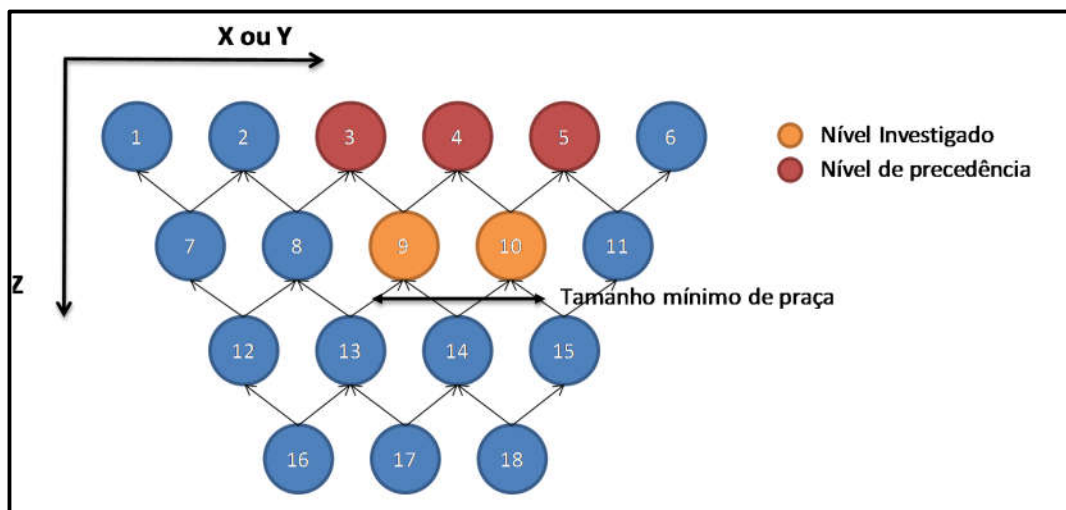


Figura 5-1 - Precedência com tamanho mínimo de praça

A Figura 5-1 exibe a relação de precedência baseada em mais de um bloco no nível investigado. O galho que deve ser construído para verificar a viabilidade deve conter a quantidade de blocos que atenda a necessidade de tamanho mínimo de praça. De acordo com o novo fundo mínimo a quantidade de blocos a ser lavrado é alterada para garantir o tamanho desejado. Para agrupar os blocos, podem ser adotadas estratégias de clusterização e superfícies de treinamento (Farmer & Dimitrakopoulos, 2015). O tamanho mínimo obriga o sistema a encontrar uma solução tecnicamente viável capaz de otimizar financeiramente o problema, de modo a ser operacional e com o maior valor presente líquido possível.

Para entender este comportamento foram realizados testes operacionais com os tamanhos de praça de 50 metros e 200 metros com objetivo de investigar o impacto financeiro das grandes e pequenas praças de trabalho.

Tabela V-1 - Parâmetros utilizados no cenário de sensibilidade de praça de trabalho.

Meta de Produção	50 Mi ton
Tamanho de Praça	50-200 m
Fundo de Cava	50-200 m
Ângulo de Talude (Geral)	30 °
Taxa de avanço vertical – Máximo e Preferencial	40 m

5.1.1. Análise do Impacto Financeiro

Foram realizados testes cujas únicas restrições utilizadas estão apresentadas na **Tabela V**-. Para este trabalho, a única premissa adotada foi a taxa de produção de minério, com objetivo de observar o comportamento do sistema perante a restrição de tamanho de praça de trabalho com a menor influência possível de outras restrições.

A Figura 5-2 demonstra que o sistema naturalmente possui maior dificuldade para atender as metas de produção à medida que o tamanho da praça aumenta. Quanto maior o tamanho de praça mínima, maior é a quantidade de blocos que devem ser lavrados compulsoriamente, dificultando o sistema a encontrar uma solução capaz de atender todas as restrições. A maior flutuação de massa observada na praça de 200 metros deve-se a maior quantidade de blocos compulsórios lavrados.

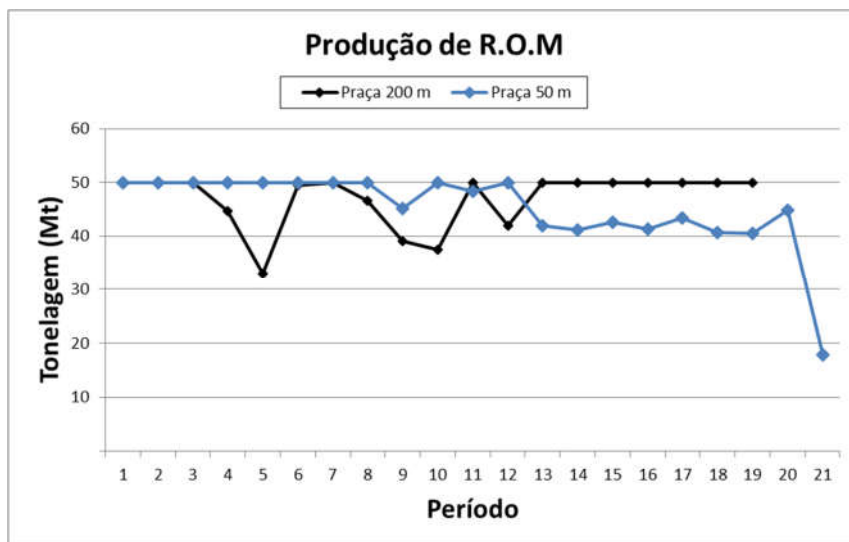


Figura 5-2 - R.O.M - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m)

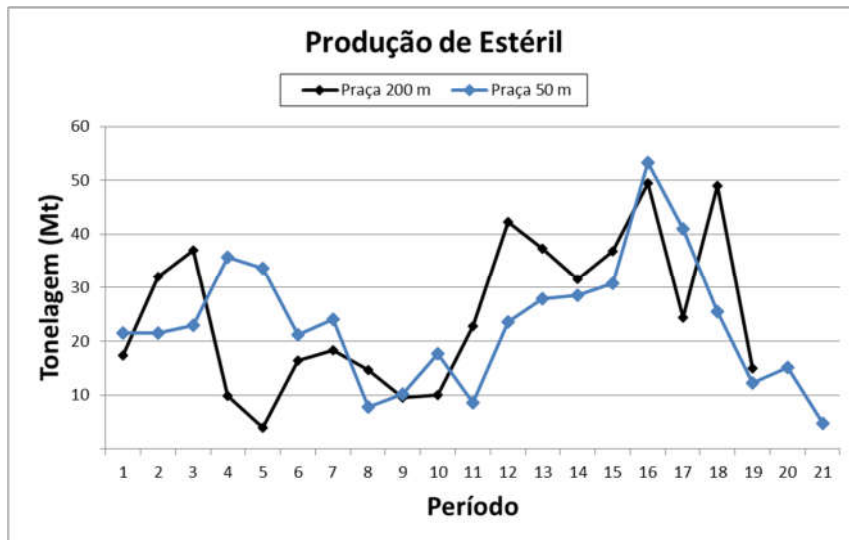


Figura 5-3 - Estéril - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m)

Devido à maior quantidade de blocos compulsórios, há um adiantamento do estéril nos primeiros anos. Pode ser visto uma maior quantidade de estéril nos anos 2 e 3, devido a este adiantamento, os anos 4, 5 e 6 lavram menos estéril.

A Figura 5-4 demonstra que o aumento do tamanho de praça causou uma dificuldade de selecionar os blocos mais ricos nos primeiros anos de modo a impactar o fluxo de caixa. A seletividade dos minérios mais ricos é um importante fator para impacto do fluxo de caixa, pois os blocos iniciais recebem menor fator de desconto. Esses blocos, devido ao maior fator de desconto, podem contribuir mais significativamente para incremento do valor presente líquido (VPL ou NPV).

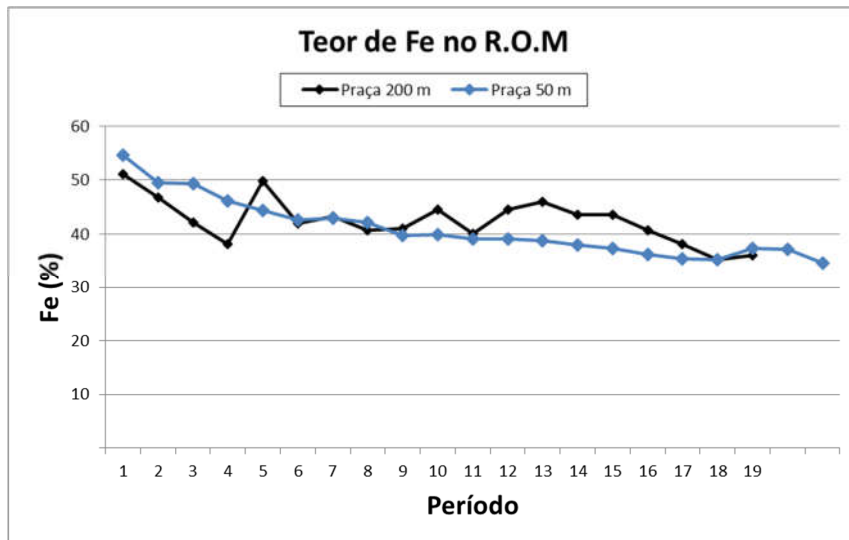


Figura 5-4 - Teor De Fe - Impacto do Tamanho De Praça Operacional (50 M X 200 M)

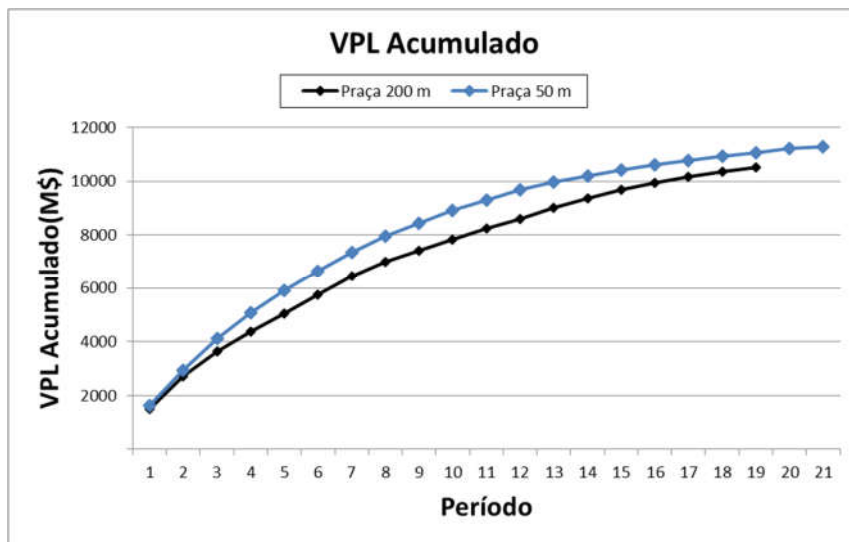


Figura 5-5 - VPL - Impacto do tamanho de praça operacional (50 m x 200 m)

A diferente restrição operacional provocou uma diferença de 6,64% do VPL entre as praças de 200 m e 50 m. A maior seletividade de minério nos anos 4, 5 e 6 contribuiu para o incremento do VPL para a praça de 50m. Porém, para empreendimentos de mineração, essa pequena diferença pode ser compensada pelo menor custo operacional da praça de maior tamanho, pois uma praça maior pode receber equipamentos maiores e conseqüentemente apresentar maior produtividade. Equipamentos de maior produtividade podem contribuir para o fluxo de caixa positivamente devido ao menor custo operacional, conduzindo até para um fluxo de caixa de maior valor.

A maior praça de trabalho mínima de trabalho dificulta ao aprofundamento da cava e aumenta os custos relativos a esta operação. Por este motivo a reserva disponível acaba sendo penalizada, de modo a diminuir a quantidade de material disponível.

Este exercício objetiva comparar apenas o comportamento do SDB na presença da restrição e não há intenção de determinar o fluxo de caixa de um empreendimento devido à infinidade de possibilidades. Maiores praças de trabalho resultaram em maior dificuldade para atingir as restrições de produção devido às possíveis variações negativas de produção que podem ocorrer nos primeiros anos, levando a uma diminuição no VPL.

5.1.2. Resultado Operacional

Este tópico objetiva analisar a operacionalidade dos resultados gerados de modo a verificar se o valor econômico gerado é confiável do ponto de vista técnico. O resultado da análise de operacionalidade é importante se considerarmos que o SDB tem por premissa atingir o sequenciamento ótimo considerando as restrições operacionais em um processo único.

O teste de operacionalidade consistiu em medir amostras das praças em cada nível de trabalho, em todos os anos de operação. O processo foi realizado manualmente através de seções definidas de acordo com as cotas das bancadas. Podemos observar na Figura 5-6 que o sistema tende a cumprir o tamanho mínimo de praça definido. Porém a Figura 5-7 demonstra uma tendência de maior uniformidade de blocos quando trabalhamos com praças maiores.

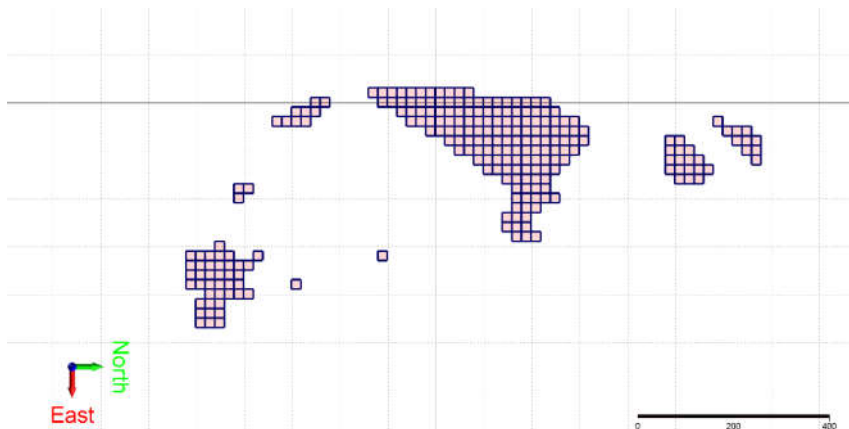


Figura 5-6 - Análise de tamanho de praça (50m) Nível 1380

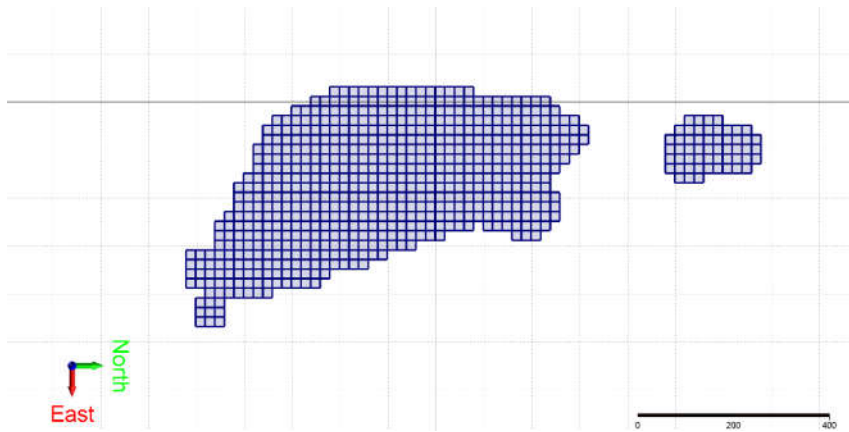


Figura 5-7 - Análise de tamanho de praça (200m) Nível 1380

A distribuição dos blocos é mais contínua para praça de 200 metros comparado à praça de 50 metros. Porém, como demonstrado no capítulo 5.1 deste documento, a praça menor é capaz de atingir maior seletividade de blocos devido a menor quantidade blocos de precedência horizontal.

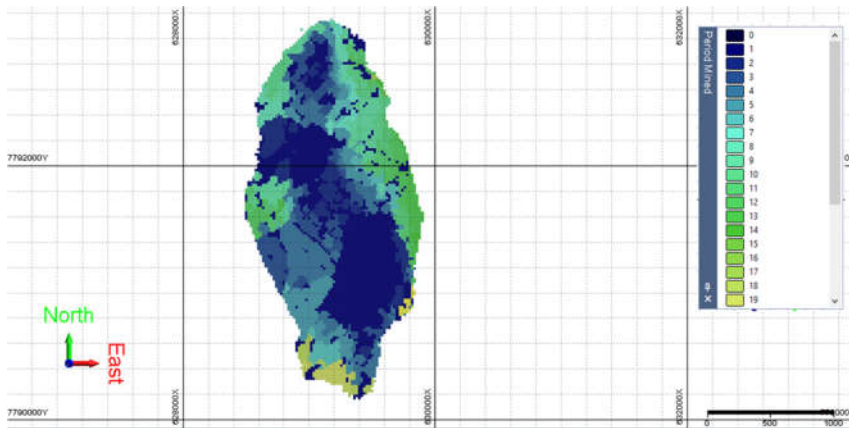


Figura 5-8 - SDB vista de topo do cenário com restrição de praça de 50 metros.

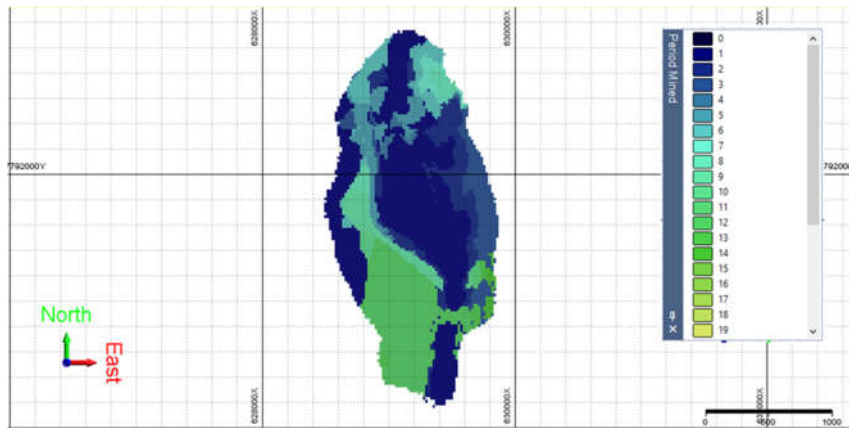


Figura 5-9 - SDB vista de topo do cenário com restrição de praça de 200 metros.

Pode ser visto que a Figura 5-8 e a Figura 5-9 corroboram com a tendência de conformação mais contínua de cava à medida que o tamanho da praça de trabalho aumenta.

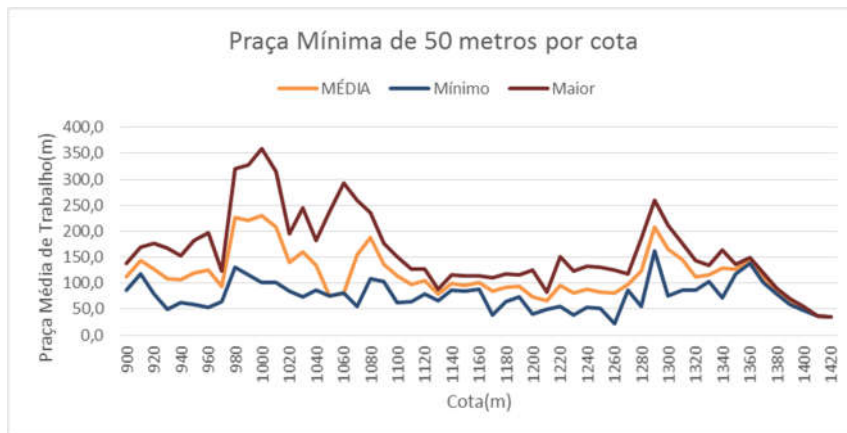


Figura 5-10 - SDB média da praça de trabalho do cenário com restrição de praça de 50 metros.

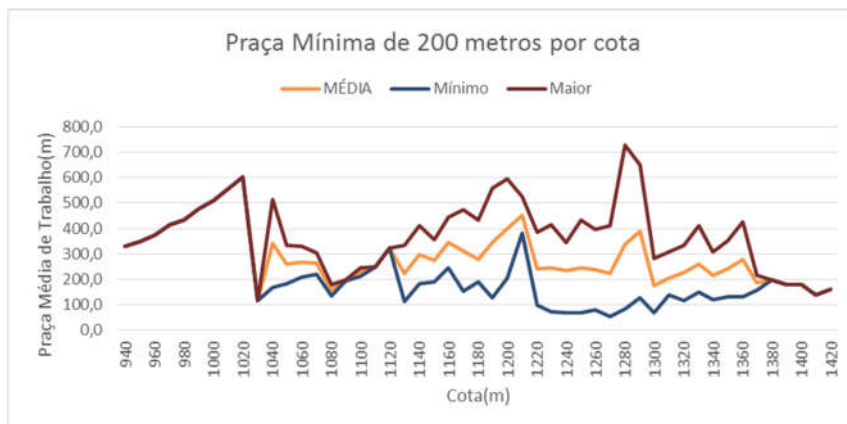


Figura 5-11 - SDB média da praça de trabalho do cenário com restrição de praça de 200 metros.

O tamanho de praça de 50 metros apresentou maior facilidade em atingir o tamanho mínimo proposto conforme demonstrado na Figura 5-10. Não foi possível concluir se a profundidade de lavra influencia na tendência do sistema em atingir a meta de tamanho de praça proposto, pois os desvios de tamanho apresentados na Figura 5-10 e na Figura 5-11 não apresentam uma tendência clara. Porém, no tamanho de praça de 200 metros, pode ser observada uma maior quantidade de praças abaixo do mínimo solicitado, quando comparado à praça de 50 metros.

5.2. Taxa de Avanço

A taxa de avanço vertical está ligada diretamente à precedência vertical dos blocos. O avanço vertical indica quantos níveis de blocos podem ser lavrados simultaneamente. Esta variável é importante para o controle operacional de curto prazo, pois controla a quantidade de níveis operacionais que devem ser lavrados. Quanto mais níveis lavrados simultaneamente, maior tende a ser o custo de lavra.

O controle da taxa de avanço obriga o sistema a encontrar uma solução tecnicamente viável e otimiza financeiramente o problema. Este controle de avanço de acordo com a metodologia clássica de planejamento de lavra tende a ser realizado em um pós-processamento. Normalmente, os sistemas de agendamento de tarefas tentam corrigir a incapacidade do sistema de sequenciamento de considerar esta limitação. Porém, qualquer restrição operacional força um rearranjo do sistema, pois o sequenciamento e limite final de escavação sofrem alteração sempre que uma das variáveis econômicas ou operacionais são alteradas. Foram realizados testes operacionais com avanços de 40 metros a 100 metros, com objetivo de investigar o impacto financeiro das variadas taxas de avanço.

Tabela V-2 - Parâmetros utilizados no cenário de sensibilidade de taxa de avanço.

Meta de Produção	50 Mi ton
Tamanho de Praça	50 m
Fundo de Cava	50 m
Ângulo de Talude (Geral)	30 °
Taxa de avanço vertical – Máximo e Preferencial	40 – 100 m

5.2.1. Análise do Impacto Financeiro

Para análise, foram realizados testes cuja as únicas restrições estão presentes na Tabela V-. Para melhor observar o comportamento do sistema, a restrição de movimentação foi limitada à quantidade de minério lavrada.

A Figura 5-12 demonstra que o sistema possui maior facilidade em obedecer à meta de produção quanto maior for o avanço permitido, pois o avanço maior aumenta a quantidade de frentes de lavras disponíveis para cumprir as metas estabelecidas.

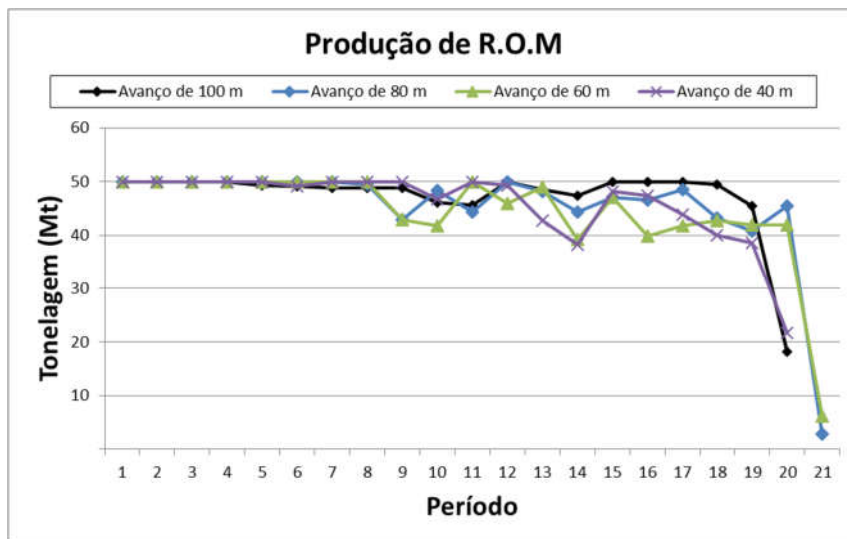


Figura 5-12 - Produção de R.O.M considerando restrições de taxa de avanço.

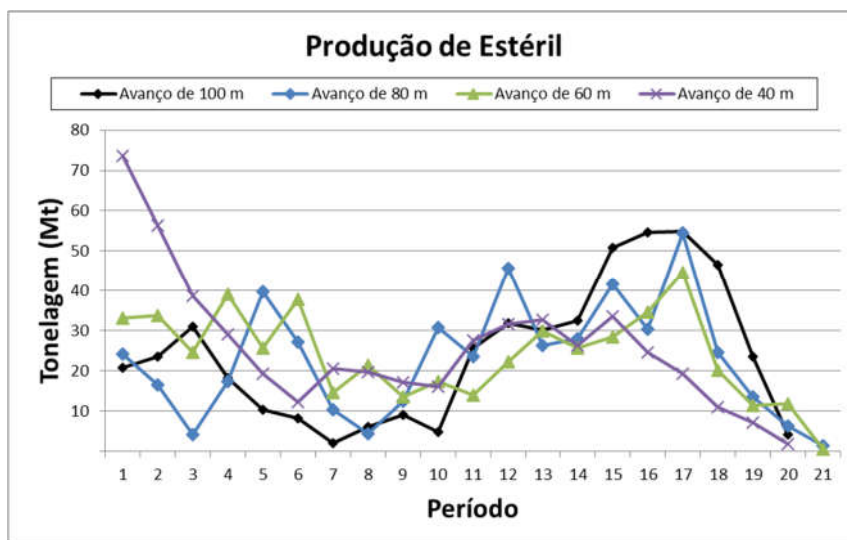


Figura 5-13 - Produção de estéril considerando restrições de taxa de avanço.

A Figura 5-13 mostra o resultado da produção de estéril, que não foi limitado por uma meta pré-determinada. Pode ser observado que nos primeiros anos há uma maior diferença entre os

avanços de 40 metros e 100 metros. Devido à necessidade de liberar minério para cumprir a meta de produção, o avanço menor (40 metros) é obrigado a lavrar mais estéril nas bancadas acessíveis. O resultado de movimentação de estéril demonstra que, quanto maior a quantidade de níveis lavrados, mais suave é a variação de movimentação.

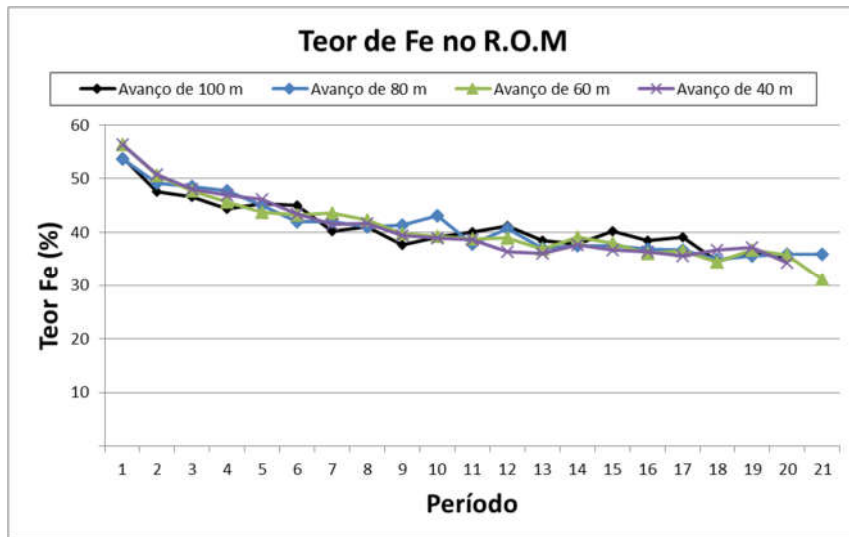


Figura 5-14 - Teor de Ferro no R.O.M considerando restrições de taxa de avanço.

Devido à convergência dos valores de teor, pode ser concluído que o sistema cumpre com sucesso a meta de atingir teores necessários para incrementar o VPL. O sistema foi capaz de adiantar o minério mais rico, tanto em avanços mais curtos quanto os mais longos. Porém, em avanços mais curtos, há a necessidade de retirar mais estéril para atingir essa meta de teor. A Figura 5-15 demonstra que, devido à capacidade de atingir teores similares entre os diferentes cenários e à movimentação de minério da mesma ordem de grandeza nos primeiros anos, o VPL é semelhante. A diferença máxima é de 2,1% entre os diferentes cenários. Porém, a menor taxa de avanço encurta a vida da mina em um ano, devido à incapacidade do sistema de manter a taxa de produção de minério em quantidades econômicas.

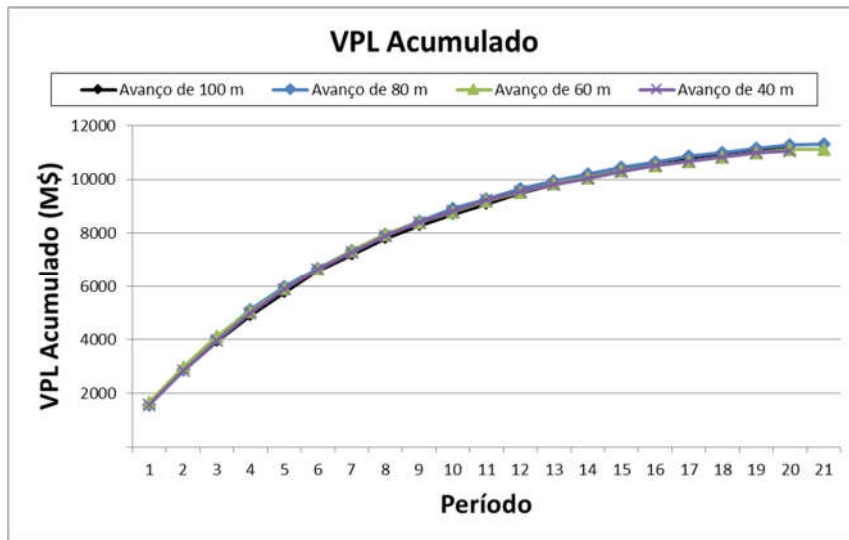


Figura 5-15 - VPL considerando restrições de taxa de avanço.

5.2.2. Resultado Operacional

Para avaliar o sucesso do controle da taxa de avanço, foram realizadas medições da distância perpendicular entre as superfícies de avanços subsequentes. O teste de operacionalidade consistiu em medir o avanço considerando uma seção típica. Esta seção foi utilizada para validar todas as taxas de avanço. As medidas foram realizadas através da distância perpendicular entre os pontos das superfícies de avanço entre os diferentes períodos, como é possível observar na Figura 5-16 e na Figura 5-17. Foi construído um algoritmo simples capaz de medir a distância euclidiana entre os pontos que compõem a malha triangulada superior até a malha inferior.

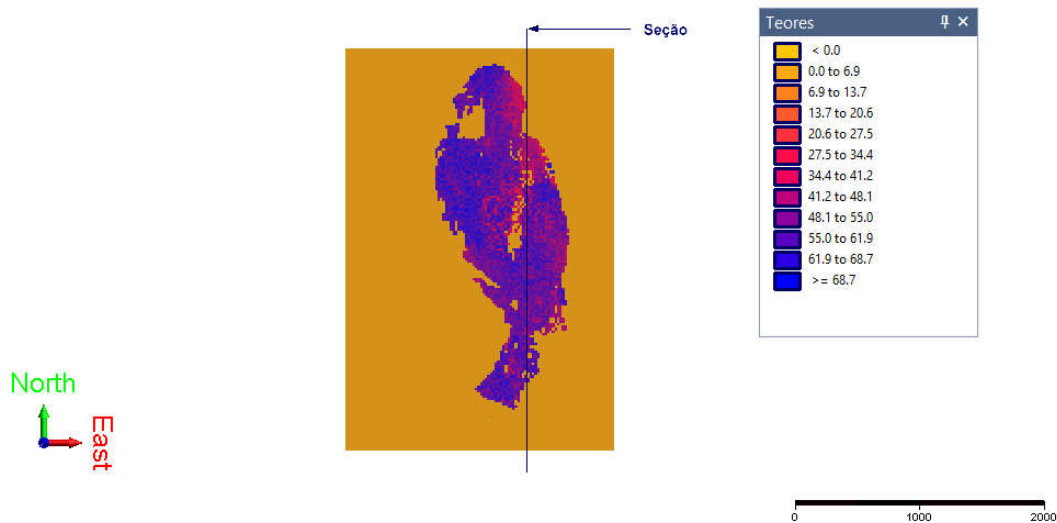


Figura 5-16 - Seção utilizada para verificar o avanço vertical

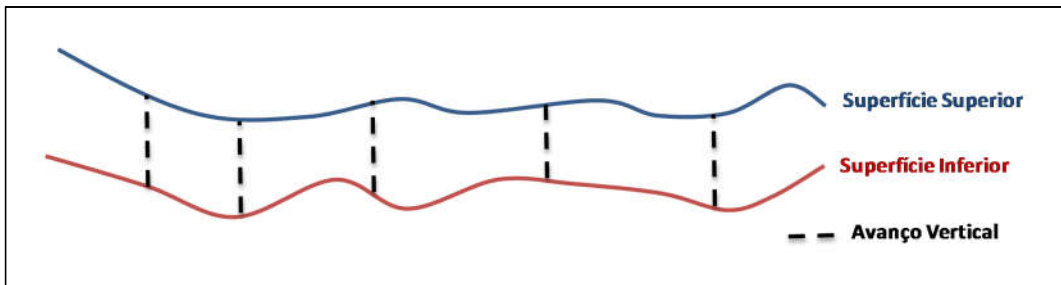


Figura 5-17 - Sistema de medição de avanço vertical.

O resultado foi elaborado com base na quantidade de níveis de blocos lavrados simultaneamente. O objetivo da comparação de blocos avançados é determinar a capacidade de avanço em termos dos nós dos grafos criado pelos algoritmos.

Da Figura 5-18 até a Figura 5-21, é possível verificar que o sistema preferencialmente tende a lavar apenas 1º nível de blocos abaixo da superfície. Há uma tendência de retirar os blocos próximos à superfície ou retirar apenas 1 bloco abaixo da superfície, configurando a preferência pela alternativa de menor custo operacional. É possível concluir tal fato ao observar que a profundidade média lavrada é de apenas 1 bloco. Quanto maior a profundidade do avanço vertical maior é a dificuldade do algoritmo de cumprir o avanço solicitado pelo sistema.

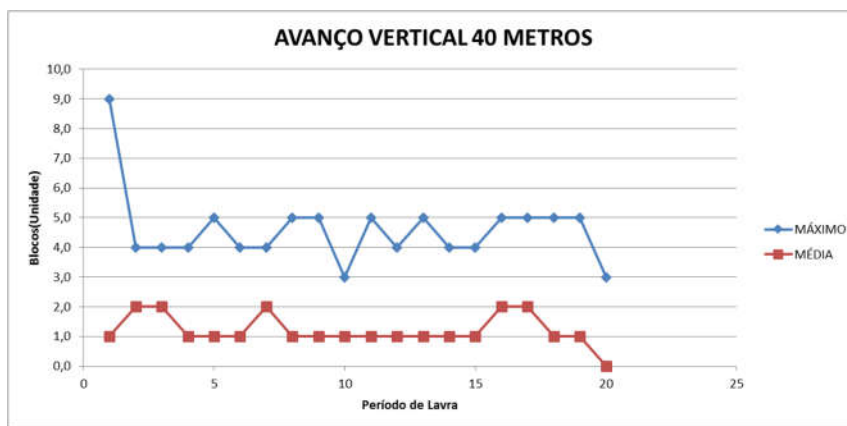


Figura 5-18 - Controle do Avanço Vertical 40 metros

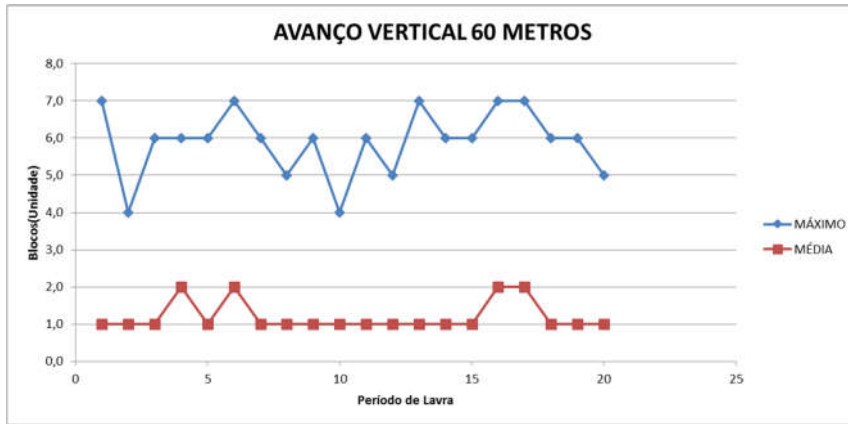


Figura 5-19 - Controle do Avanço Vertical 60 metros

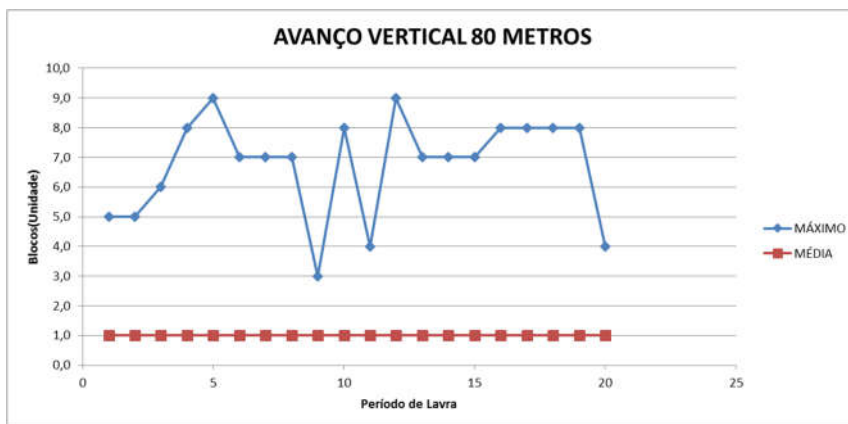


Figura 5-20 - Controle do Avanço Vertical 80 metros

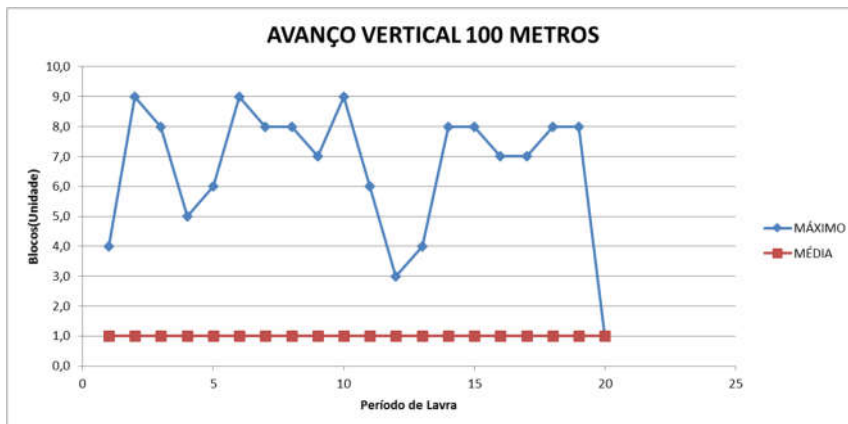


Figura 5-21 - Controle do Avanço Vertical 100 metros

O aumento da taxa de avanço vertical máxima ou da quantidade de bancos disponíveis para a lavra naturalmente aumenta a variância do avanço máximo permitido. A medida em que a quantidade de níveis permitidos para lavra é ampliada, a variação de nível máximo permitido

é naturalmente variada. Por exemplo, a taxa de 100 metros é naturalmente de maior variabilidade se comparada ao avanço de 20 metros. A variabilidade cresce, pois, o sistema tende a lavar menos níveis naturalmente devido ao maior custo, porém, para atender às restrições de produto, podem ocorrer avanços não uniformes.

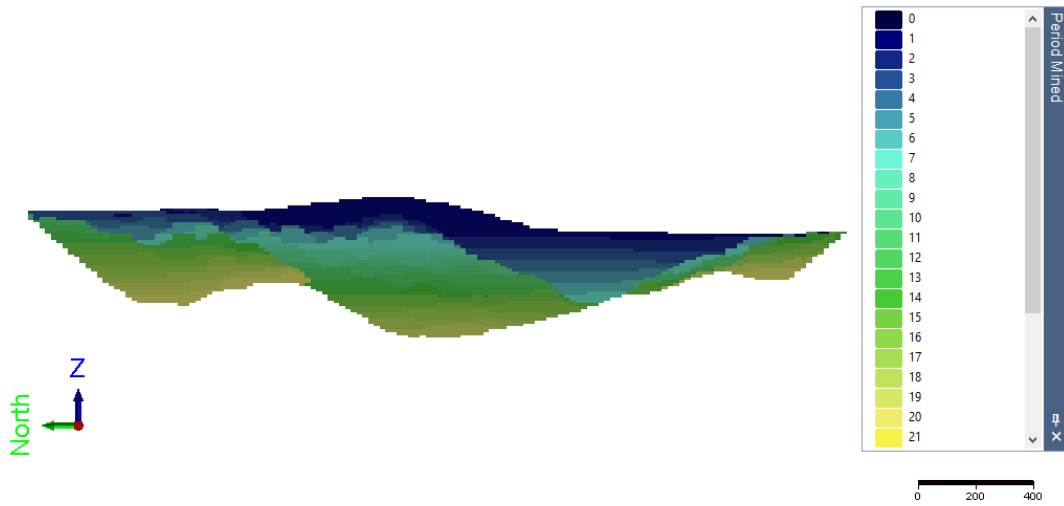


Figura 5-22 - Modelo de Blocos: Avanços verticais limitados a 40 metros.

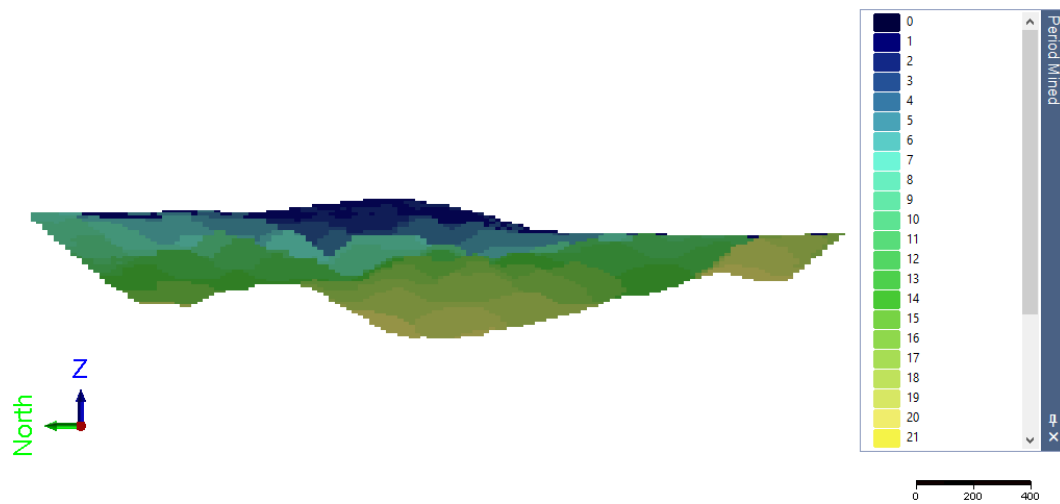


Figura 5-23 - Modelo de Blocos: Avanços verticais limitados a 100 metros.

A Figura 5-22 e a Figura 5-23 demonstram que menores avanços verticais tendem a favorecer praças maiores. Ao observar as imagens é possível perceber que, quanto maior o avanço vertical, menos contínua se torna a frente de lavra.

5.3. Controle de Material Movimentado

O controle de movimentação pode ser realizado através do controle da relação entre a quantidade de estéril e minério. O controle dessa relação é um mecanismo para forçar o sistema a remover uma quantidade de material estéril para lavar uma fração de minério. O controle entre as variáveis objetiva manter a saúde econômica da operação, podendo ser controlado através de relações baseadas em massa ou volume. O controle da relação pode ocorrer em um período de lavra ou *pushback*, contudo é importante controlar a economicidade durante toda vida do empreendimento (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

Durante o desenvolvimento do empreendimento, a relação entre as quantidades de estéril e minério podem assumir 3 comportamentos: Crescente, Decrescente e Constante. O mecanismo de relação estéril/minério (R.E.M) decrescente implica em lavar uma maior quantidade de estéril nos anos iniciais do empreendimento. O maior volume de estéril lavado nos primeiros anos impacta negativamente o fluxo de caixa devido ao menor valor nos primeiros anos, o que diminui a lucratividade do empreendimento.

A relação estéril/minério constante consiste em uma taxa de lavra aproximada da quantidade de minério e estéril. Devido à movimentação de material praticamente constante ao longo do empreendimento, o tamanho da frota e da equipe permanece constante. Porém, esses custos se apresentam elevados durante os primeiros períodos do empreendimento devido à taxa de desconto financeiro.

A metodologia de R.E.M crescente permite maior lucratividade devido à maior produção de minério nos anos iniciais. A menor quantidade de estéril nos primeiros anos diminui o custo de lavra inicial, impactando positivamente o fluxo de caixa. Este método costuma apresentar uma grande quantidade de frentes de lavra simultâneas para atingir a demanda de produção (Nader et al (2015)).

Para análise do impacto da movimentação de material foram avaliados 3 cenários: R.E.M constante, R.E.M crescente, R.E.M decrescente. Em todos os cenários a meta de movimentação foi de 30 milhões de toneladas, com a única diferença que a movimentação de estéril para o cenário decrescente foi inversamente proporcional ao cenário crescente.

Tabela V-3 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M Decrescente.

Período	Movimentação de Minério	Movimentação de Estéril
---------	-------------------------	-------------------------

1-5	30 milhões toneladas	20 milhões toneladas
6-10	30 milhões toneladas	18 milhões toneladas
11-Final	30 milhões toneladas	15 milhões toneladas

Tabela V-4 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M Crescente.

Período	Movimentação de Minério	Movimentação de Estéril
1-5	30 milhões toneladas	15 milhões toneladas
6-10	30 milhões toneladas	18 milhões toneladas
11-Final	30 milhões toneladas	20 milhões toneladas

Tabela V-5 - Parâmetros utilizados no cenário de R.E.M Constante.

Período	Movimentação de Minério	Movimentação de Estéril
1-5	30 milhões toneladas	20 milhões toneladas
6-10	30 milhões toneladas	20 milhões toneladas
11-Final	30 milhões toneladas	20 milhões toneladas

5.3.1. Análise do Impacto Financeiro

A primeira variável a ser analisada será a meta de produção de 30 milhões de toneladas de R.O.M produzido. A Figura 5-24 demonstra que até o período 14, todos cenários foram capazes de atingir a meta de produção. Porém, os cenários com maior restrição de movimentação de material no período, constante e decrescente, apresentaram inicialmente uma flutuação de massa. Quanto mais cedo ocorrer a flutuação negativa da quantidade de minério, maior é o impacto no fluxo de caixa.

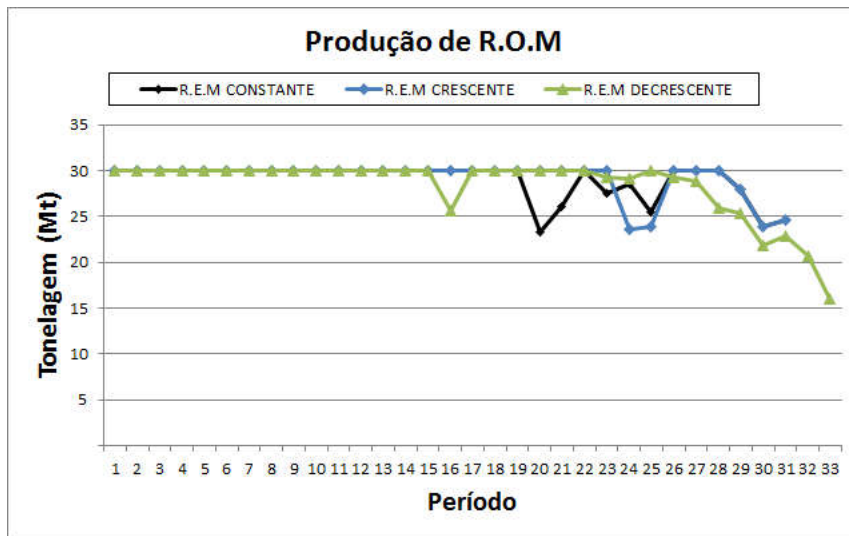


Figura 5-24 - Produção de R.O.M – limitação de movimentação de massa.

A produção de estéril demonstrou seguir a meta de produção com bastante flutuação de massa, principalmente no período inicial e final do cenário decrescente, em que as massas demonstraram maiores flutuações.

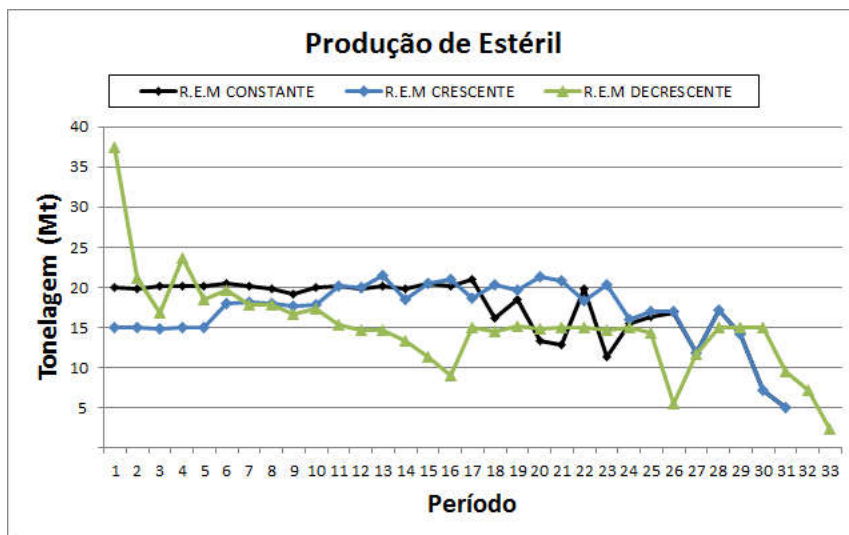


Figura 5-25 - Produção de Estéril – limitação de movimentação de massa.

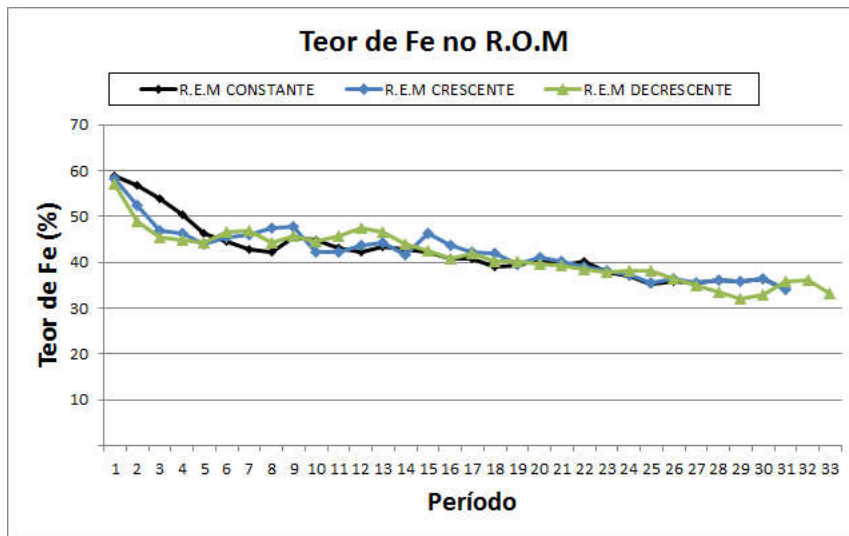


Figura 5-26 - Teor de Fe – limitação de movimentação de massa.

O VPL e o teor estão diretamente relacionados, neste cenário em que a movimentação de minério é limitada ao mesmo valor em todas as situações. O cenário de menor teor (R.E.M Decrescente) apresentou menor VPL devido ao menor teor e ao maior custo total para movimentação de estéril.

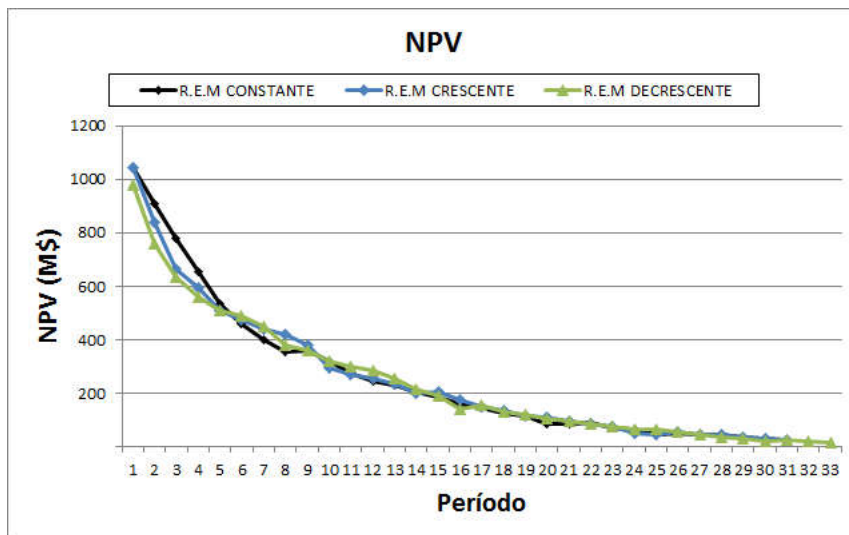


Figura 5-27 - VPL – limitação de movimentação de massa.

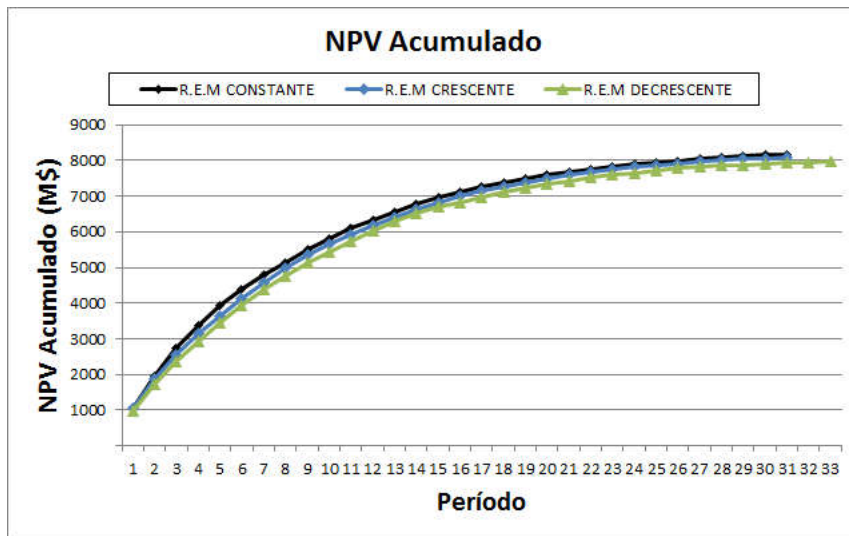


Figura 5-28 - VPL acumulado – limitação de movimentação de massa.

O teste aconteceu conforme esperado, pois nos cenários constante e crescente os valores de VPL possuem ordem de grandeza semelhante. Devido à estratégia de lavar menos estéril nos períodos iniciais, foi obtida uma menor vida útil do empreendimento, com maior patamar de VPL.

Os cenários de R.E.M constante e crescente atingiram maior NPV devido a menor quantidade de estéril lavrado inicialmente. Esta estratégia conduz ao sistema a maior lucro nos primeiros períodos e consequentemente aumentando o patamar final do NPV. Como explicado inicialmente a antecipação de receita no sequenciamento direto de blocos conduz a antecipação do final do empreendimento e maior NPV.

5.3.2. Resultado Operacional

A verificação de operacionalidade neste tópico está concentrada na conformação da cava resultante e a forma do seu avanço. A Figura 5-29 demonstra que a relação estéril/minério constante resultou em uma menor taxa de avanço vertical da cava, como esperado teoricamente.

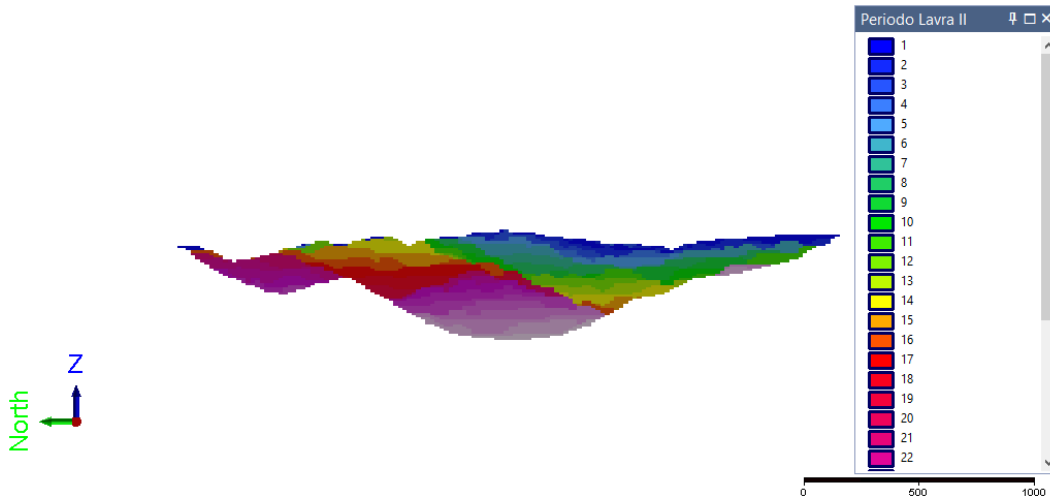


Figura 5-29 - Seção R.E.M Constante – Movimentação de Massa Restrita

Os cenários de R.E.M crescente e decrescente apresentaram uma taxa de avanço vertical mais vigorosa. A necessidade de retirar maior quantidade de estéril nos períodos iniciais do cenário crescente forçou o aprofundamento da cava.

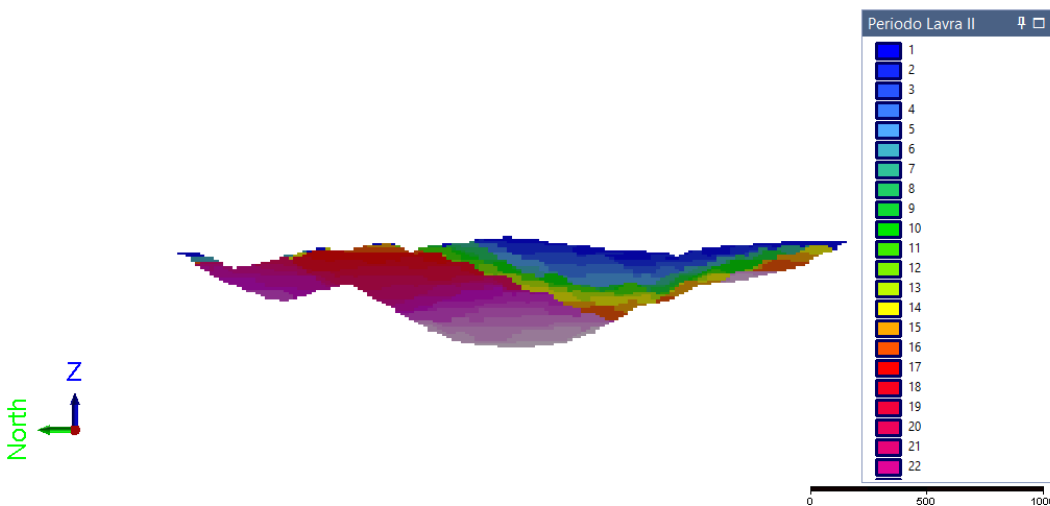


Figura 5-30 - Seção R.E.M Crescente – Movimentação de Massa Restrita

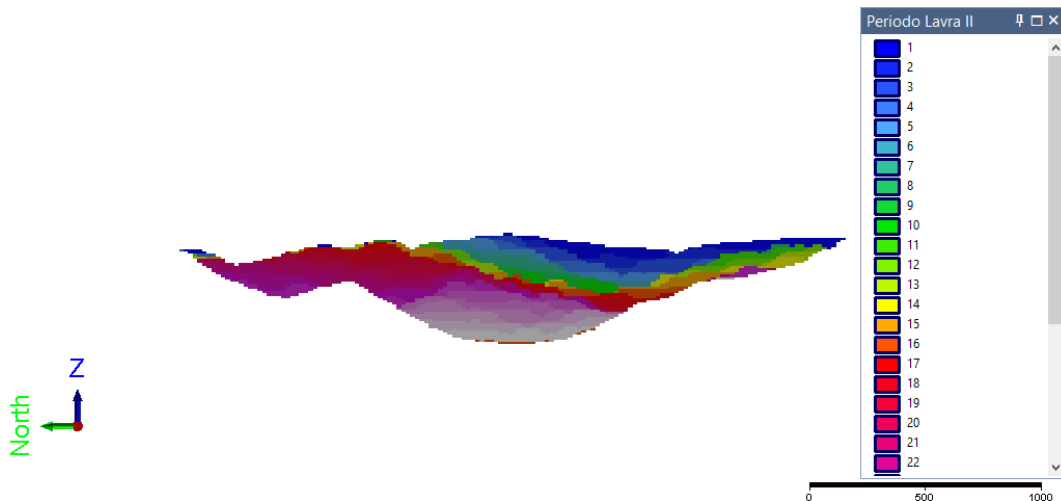


Figura 5-31 - Seção R.E.M Decrescente – Movimentação de Massa Restrita

O sistema obedeceu a relação entre as quantidades de estéril e minério propostas, porém, em alguns períodos a razão ocasionou a escassez de material para o período seguinte. Esta escassez força o sistema a lavrar uma maior quantidade de material para liberação da massa de interesse. Para resolver este problema deve ser implementado ao sistema um conjunto de restrições capaz de atingir os cenários propostos automaticamente, diminuindo as oscilações ocorridas para razões crescentes e decrescentes.

5.4. Superfície de Controle

As superfícies de controle são mecanismos úteis para fracionar e conduzir o sequenciamento do depósito mineral de acordo com a necessidade. Podem ser utilizadas para restringir a região de lavra devido a impedimentos legais, operacionais, etc. O trabalho de Beretta & Marinho (2014) ampliou o uso de restrição espacial proposto por Goodwina (2006). O trabalho inicial de Goodwina (2006) propôs a utilização das superfícies de controle como um mecanismo para o sequenciamento de lavra, em que podem ser utilizadas duas funções: Restrição e Forçado. O mecanismo baseado em restrição induz que a solução do problema preferencialmente esteja dentro dos limites estabelecidos. O regime obrigatoriamente forçado obriga o sistema a obedecer a restrição espacial imposta pela superfície. O conceito proposto por Beretta & Marinho (2014) objetiva utilizar este conceito de limitação espacial por superfície para ajustar o ângulo de talude que a sequência de lavra pode apresentar. O sistema não forçado permite que sejam avaliadas soluções fora da superfície de solução, contudo, a preferência é para os

blocos dentro dos limites. O presente trabalho não irá analisar o sucesso da inclinação da superfície, o objetivo principal será a aderência à limitação espacial.

Serão desenvolvidos os seguintes cenários:

1. Cenário sem restrição espacial;
2. Cenário com o mecanismo de Restrição para um período específico;
3. Cenário com o mecanismo Forçado para um período específico;
4. Cenário com o mecanismo de Restrição para todos os períodos;
5. Cenário com o mecanismo Forçado para todos os períodos;

O cenário 1 será realizado como modo de determinar um cenário base. Devido ao fenômeno de espalhamento de blocos, será realizada uma tentativa de agrupamento de blocos utilizando superfície de controle. O agrupamento de blocos será realizado pelos cenários 2 e 3. O espalhamento de blocos será testado através de um mecanismo de controle de todos os blocos do sistema através dos cenários 4 e 5. Em todos os cenários será avaliado o fenômeno de espalhamento em conjunto com a capacidade de cumprir a restrição espacial proposta pela superfície.

A restrição espacial pode ser determinada por dois modos diferentes: Restrita e Forçada. O mecanismo forçado não permite que os blocos fora da superfície de restrição sejam avaliados. O mecanismo chamado restrito preferencialmente obedece a limitação espacial, porém avalia a possibilidade de lavar blocos externos “pagando” a penalidade na função objetivo.

Para execução dos testes foi determinado um cenário base sem restrição espacial. As configurações para determinação deste cenário base com *ramp-up* estão presentes na Tabela V-6

Tabela V-6 - Parâmetros utilizados no cenário base com ramp-up

Produção Ano 01	2,5 Milhões de Toneladas
Produção Ano 02	5,0 Milhões de Toneladas
Produção Ano 03	15,0 Milhões de Toneladas
Produção até final	50,0 Milhões de Toneladas
Tamanho de Praça	50 Metros
Fundo de Cava	50 Metros
Ângulo de Talude (Geral)	30 Graus
Taxa de avanço vertical – Máximo e Preferencial	60 Metros

5.4.1. Análise do Impacto Financeiro

5.4.1.1. Cenário base x Restrição espacial

Para comparar o efeito da restrição espacial foi utilizado o cenário base como referência. A superfície de lavra construída corresponde à região do primeiro ao terceiro período, aproximadamente. Foi escolhido o ano 1 como referência, devido ao maior impacto no VPL, apesar da menor massa movimentada.

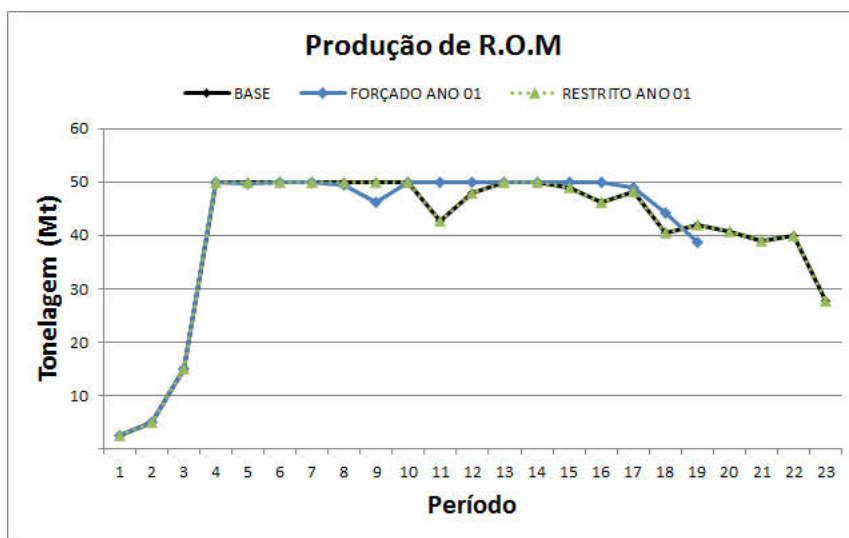


Figura 5-32 - Produção de R.O.M limitação espacial ano 1.

A análise da Figura 5-32 permite verificar vantagens da restrição não forçada (restrita), ao invés de utilizar o método capaz de forçar o sistema a obedecer a limitação. Apesar da menor

flutuação de massa utilizada pelo método forçado, percebe-se que ocorre uma diminuição da reserva de 23 para 19 períodos. A restrição não forçada (restrita) atingiu meta similar ao cenário base com a mesma quantidade de períodos.

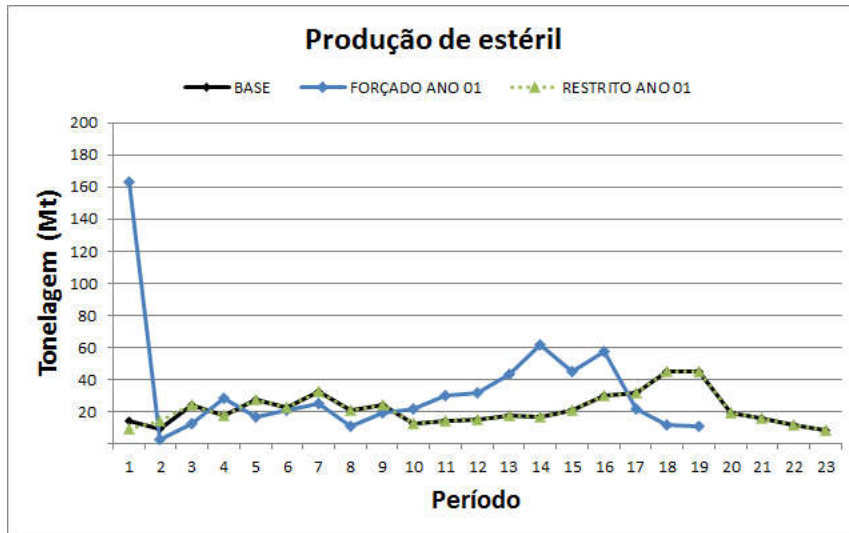


Figura 5-33 - Produção de ESTÉRIL limitação espacial ano 1.

A movimentação de estéril, assim como no cenário não forçado (restrita) mostra-se capaz de seguir o proposto no cenário base. Há apenas uma pequena diferença no período 1, no qual o sistema não foi capaz de atingir a mesma movimentação de estéril.

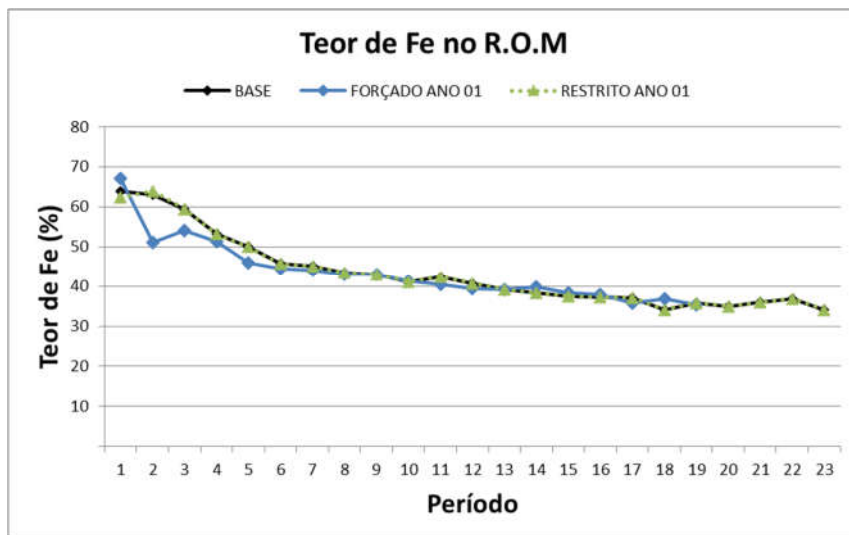


Figura 5-34 – Teor de fe - Limitação espacial ano 1.

A análise simultânea da Figura 5-32 até a Figura 5-34 permite concluir que para atingir o teor alcançado no cenário base, o sistema forçado retira uma grande quantidade de estéril para

lavar os blocos ricos. É importante salientar que no período 1, o teor lavrado é até maior que os demais cenários. Porém, mesmo com o esforço do sistema para lavar os blocos e corrigir o prejuízo determinado pela restrição inicial, a Figura 5-35 demonstra que o VPL fica abaixo do caso base, quando comparado ao cenário não forçado (restrita).

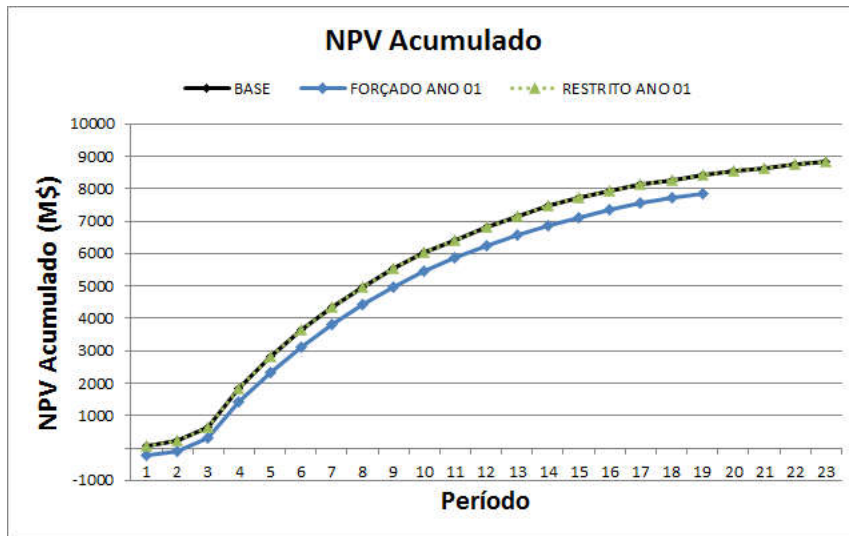


Figura 5-35 – NPV acumulado - limitação espacial ano 1.

5.4.1.2. Diferentes períodos de restrição espacial

A primeira etapa de testes das superfícies de restrição apontou para uma maior dificuldade de o algoritmo conseguir manter o mesmo VPL, quando ocorre a obrigatoriedade de lavar uma região. Este resultado era esperado, pois o sistema não permite ajustar os blocos do período restrito globalmente, existe somente a possibilidade de utilizar as etapas seguintes para ajustar a perda da primeira etapa. Este tópico irá analisar se há uma diminuição ou aumento de dificuldade ao se restringir o segundo período.

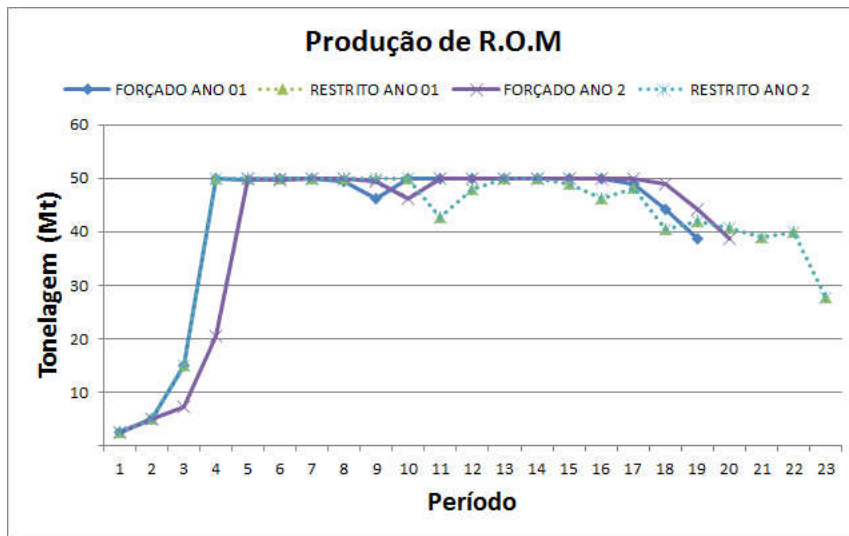


Figura 5-36 - Produção de R.O.M limitação espacial dos anos 1 e 2.

O mecanismo de restrição não forçada (restrita) foi capaz de apresentar um resultado muito semelhante nas restrições dos dois períodos, consequentemente muito próximo do cenário base. O mecanismo forçado inicia os dois primeiros períodos com movimentação similar ao não forçado, porém nos períodos seguintes existe uma dificuldade em manter a movimentação maior. A restrição forçada no período 1 impõe menor dificuldade ao sistema comparado a restrição imposta no período 2.

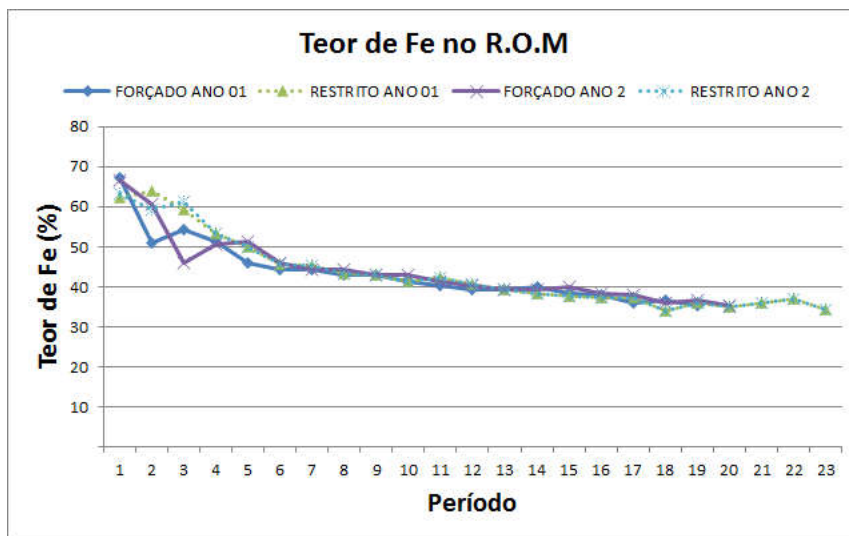


Figura 5-37 – Teor de FE de R.O.M limitação espacial dos anos 1 e 2.

A limitação espacial forçada impõe dificuldade de atingir a qualidade do material no período seguinte à imposição de restrição. É possível observar na Figura 5-37 que no período após aplicação de restrição forçada, ocorre a queda do teor para os anos 1 e 2. Isso ocorre devido

ao sistema validar globalmente a solução, onde são avaliadas as possibilidades de continuidade de lavra de um período para o outro com menor impacto possível no teor.

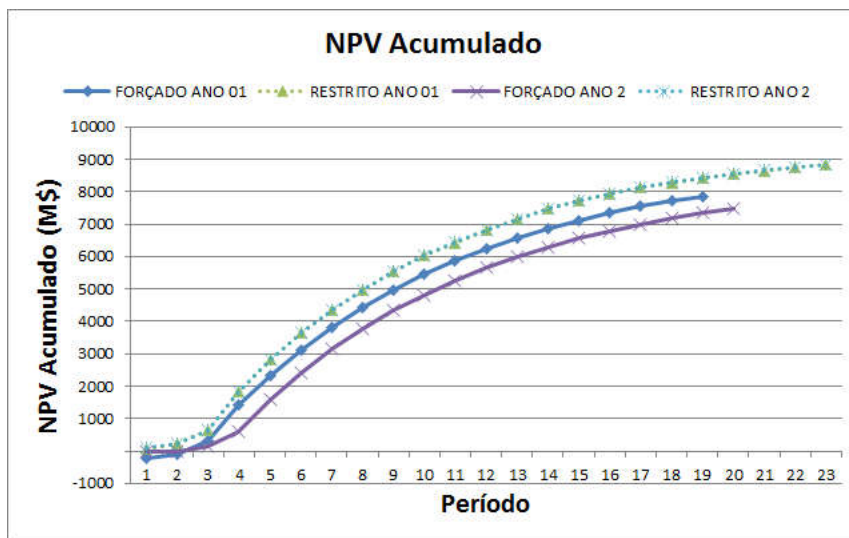


Figura 5-38 – NPV acumulado - limitação espacial dos anos 1 e 2.

Assim como esperado, a Figura 5-38 demonstra que o cenário forçado para o período 2 apresenta uma maior dificuldade para atingir o maior NPV, devido à dificuldade com teor e volume movimentado. A dificuldade apresentada neste estudo de caso conduz à recomendação de cautela ao utilizar a restrição forçada, que deve ser aplicada somente em casos de extrema necessidade, pois pode não haver mecanismo para atingir o mesmo patamar financeiro caso seja imposta uma obrigatoriedade de lavra nos períodos iniciais.

5.4.1.1. Restrição Geral

Restringir todos os períodos de sequenciamento de lavra pode ser a realidade de empreendimentos com restrições legais e operacionais. Até mesmo pode ser considerado o limite em que a lavra a céu aberto não seja viável economicamente em relação à subterrânea. Este método ainda apresenta uma grande vantagem secundária que será retratada no tópico relacionado à operacionalidade.

Para restrição, foi utilizado o limite final de escavação determinado pelo cenário base, de modo que os períodos de sequenciamento de lavra devem ser limitados pela cava final.

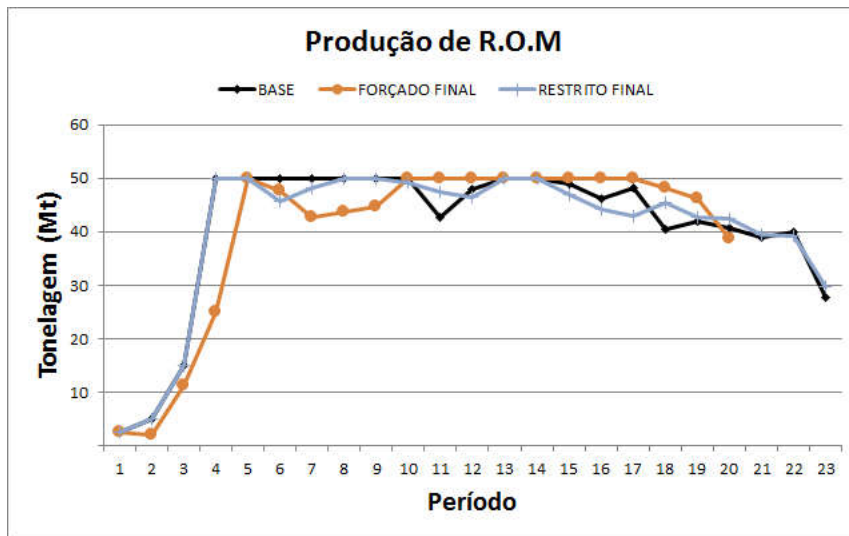


Figura 5-39 - Produção de R.O.M cenário de restrição geral.

A metodologia de lavra forçada apresenta neste cenário de restrição geral as mesmas dificuldades relatadas nos cenários em que foram considerados somente os períodos 1 e 2. Nos primeiros períodos a movimentação de minério é menor que no cenário base e conseqüentemente este impacto inicial causa a diminuição do tempo de vida do empreendimento. No cenário em que não há restrição forçada, há uma suavização entre os picos de movimentação apresentados pelo cenário base, conforme demonstrado na Figura 5-39.

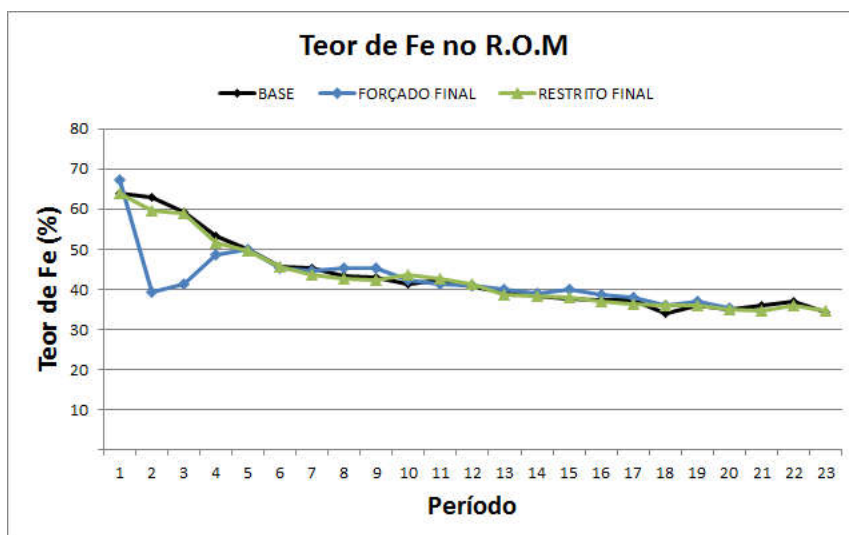


Figura 5-40 - Teor de Fe no R.O.M, cenário restrição geral.

O cenário forçado apresenta dificuldade em manter o teor de Fe no início do sequenciamento, ou seja, o sistema diminui a capacidade de lavar os blocos mais ricos nos períodos mais

importantes. As dificuldades relacionadas a teor e quantidade de minério irão impactar negativamente o NPV do empreendimento assim como demonstrado na Figura 5-41.

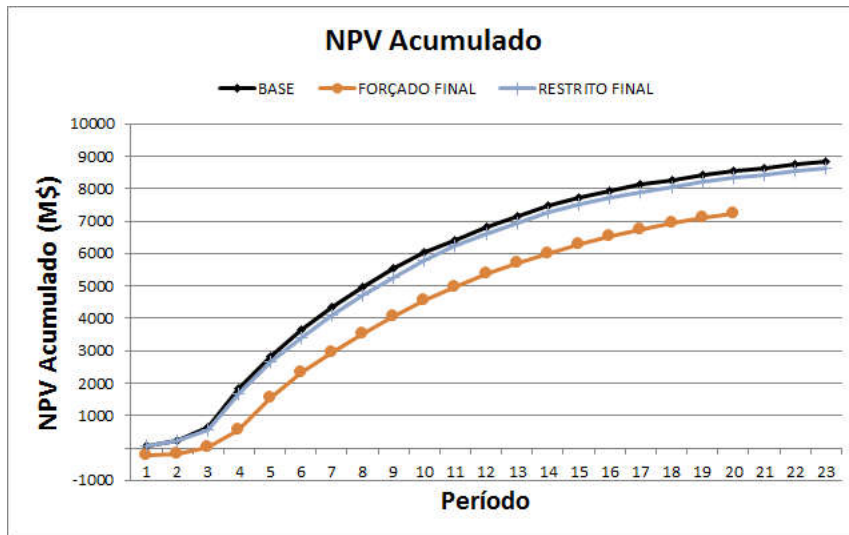


Figura 5-41 - NPV acumulado, cenário restrição geral.

Este teste demonstrou que forçar a lavra para todos os períodos aumentou a diferença entre o cenário base, pois os cenários com restrição para os anos 1 e 2 demonstraram uma menor diferença. Porém, a opção de restrição não forçada demonstrou ser importante, pois foi capaz de reduzir as flutuações de massa em relação ao cenário base, sem grande impacto no valor presente líquido do empreendimento. A opção de restrição não forçada pode ser utilizada como mecanismo para refinar uma primeira etapa de sequenciamento.

5.4.2. Resultado Operacional

Os cenários desenvolvidos para análise da superfície de controle, para validação da análise econômica realizada no tópico anterior, devem obedecer às restrições superficiais propostas. O cenário base servirá como objeto de comparação com os cenários de restrição espacial.

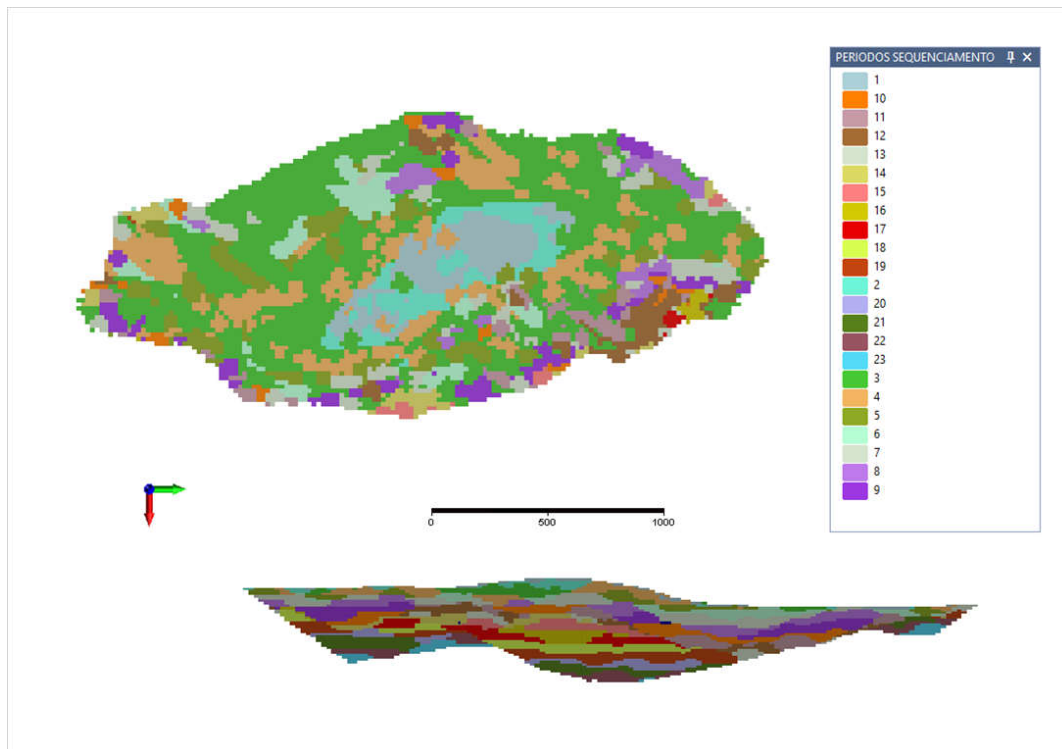


Figura 5-42 - Cenário base restrição espacial

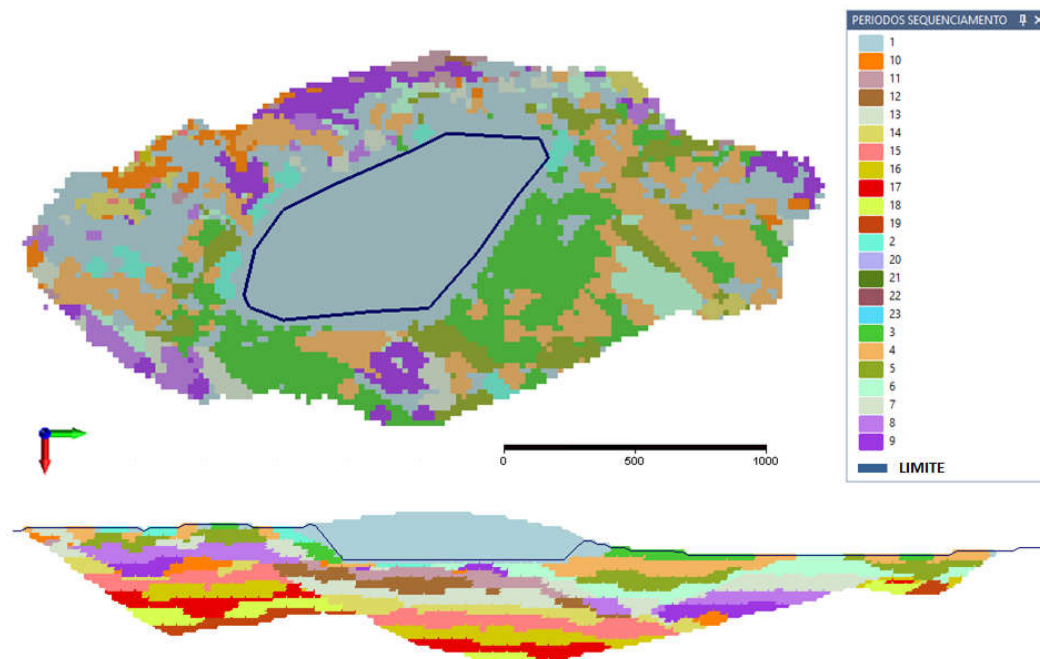


Figura 5-43 - Cenário com restrição forçada no ano 01

A comparação das imagens Figura 5-42 e Figura 5-43 permite observar que apesar do pior desempenho financeiro e de movimentação que a superfície de restrição forçada apresenta, o sistema cumpre satisfatoriamente a restrição. O algoritmo inicialmente procura lavar todo material existente dentro da cava no período restrito, e após lavar todo material dentro da superfície de restrição, é permitido avaliar soluções fora da superfície para atingir a meta de produção. A restrição de lavra forçada no período 1 significa que dentro da superfície de restrição deve conter apenas blocos para esta etapa, porém não impede que algum material também seja lavado fora da superfície. É possível notar que o sistema atendeu corretamente à restrição proposta.

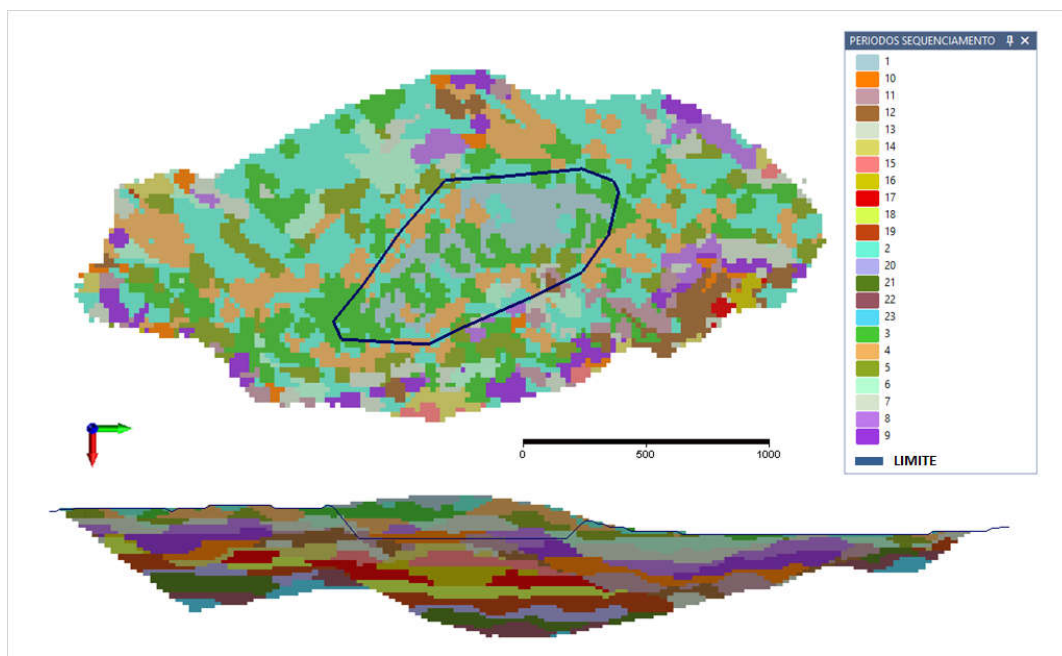


Figura 5-44 - Cenário com restrição não forçada no ano 01

Apesar da restrição não forçada apresentar resultados semelhantes ao cenário base e obedecer às restrições impostas pela superfície, é possível notar o espalhamento de blocos nos períodos iniciais. Este problema consiste em lavar blocos de modo não contínuo, acarretando um aumento de custo devido ao aumento do tempo de deslocamento de modo não operacional.

O cenário em que foi aplicada restrição para o período 2 apresentou resultado operacional muito semelhante à restrição do período 1. Porém, ao adotar restrição para todos os períodos, foi possível observar que ao inserir o mecanismo de restrição não forçada, o espalhamento dos blocos foi praticamente resolvido, uma vez que o sequenciamento resultante apresenta maior continuidade dos blocos lavrados conforme demonstrado na Figura 5-45.

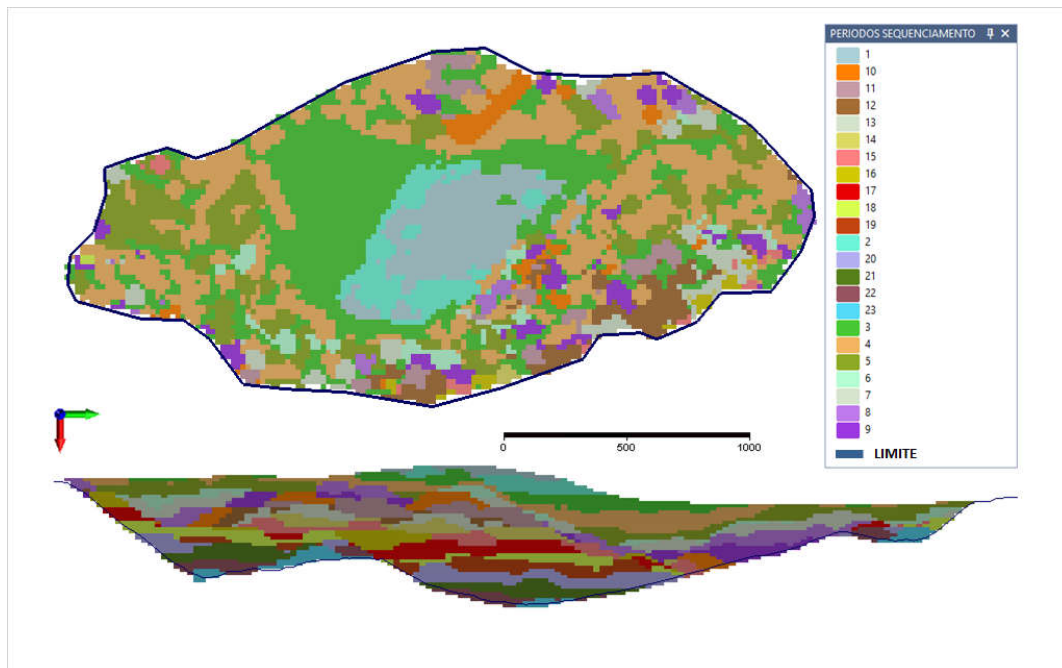


Figura 5-45 - Cenário com restrição não forçada limite final

Ao observar o resultado dos cenários que objetivam avaliar o impacto de restrição da superfície final, representados na Figura 5-45 e na Figura 5-46, conclui-se que o cenário de restrição não forçada impediu a dispersão dos blocos de lavra. Dessa forma, a restrição com a superfície final pode ser utilizada para melhorar o resultado econômico de um sequenciamento realizado, caso ocorra dispersão dos blocos no cenário inicial.

Em todos os cenários foi observada a tendência em obedecer à restrição espacial proposta independentemente do método e período.

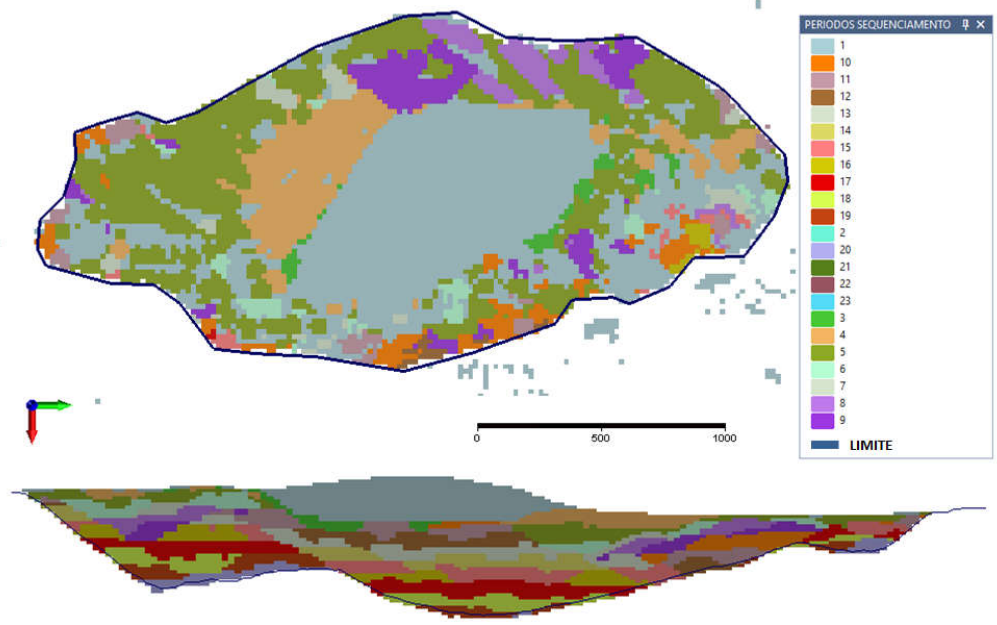


Figura 5-46 - Cenário com restrição forçada limite final

5.5. Fluxo de Trabalho

Os resultados gerados durante as etapas de análise das variáveis operacionais nos capítulos 5.1 Tamanho de Praça, 5.2 Taxa de Avanço, 5.3 Controle de Material Movimentado e 5.4 Superfície de Controle serão utilizados para determinar uma rotina operacional de trabalho. O fluxo de trabalho gerado objetiva criar uma estratégia capaz de atender as demandas operacionais e financeiras. As demandas operacionais estão relacionadas as necessidades operacionais das atividades de planejamento de lavra. Os parâmetros financeiros estão relacionados ao valor gerado pelo projeto de forma que seja viável economicamente.

É necessário ponderar sobre a geologia devido as particularidades de cada corpo mineral conduzirem os resultados do sequenciamento direto de blocos. Os diferentes hábitos e distribuições de teor conduzem a resultados que devem ser ajustados com base nos parâmetros operacionais. Deste modo podemos afirmar que os resultados de sequenciamento direto de blocos estão restritos as particularidades de cada depósito. Os resultados atingidos neste trabalho estão vinculados a geologia e distribuição dos teores deste depósito.

A determinação de um fluxo de trabalho objetiva instruir o engenheiro de minas a elaborar um sequenciamento de lavra capaz de atingir o maior valor econômico considerando o cenário operacional.

O fluxo de trabalho proposto deve ser composto por três etapas:

1. Primeira Etapa: Parâmetros iniciais baseados no corpo mineral e metas operacionais;
2. Segunda Etapa (Opcional): Refino dos parâmetros e resultados;
3. Terceira Etapa: Ajuste das fronteiras.

Os parâmetros iniciais estabelecidos na primeira etapa podem ser determinados de acordo com o esquema apresentado na Figura 5-47:

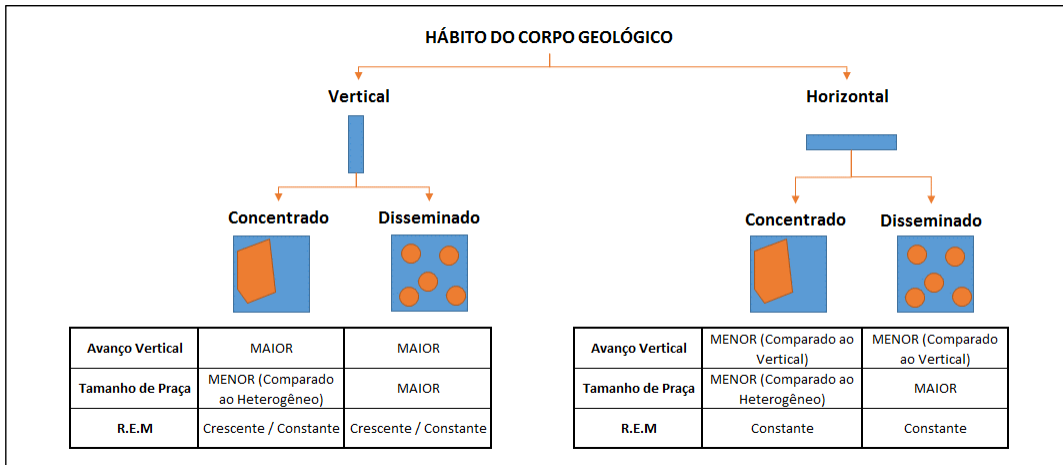


Figura 5-47 – Sugestão de variáveis iniciais de acordo com o corpo geológico.

A proposta de ajuste das variáveis de acordo com o hábito do corpo geológico objetiva facilitar o aprofundamento do corpo vertical, levando a retirada de material logo nos anos iniciais do empreendimento de modo a contribuir com o fluxo de caixa. O tamanho de praça é maior em corpos heterogêneos objetiva evitar avanços pontuais pouco operacionais. Pois a praça mínima de trabalho maior desfavorece o desenvolvimento de pequenos avanços provenientes por pequenas regiões de teor elevado.

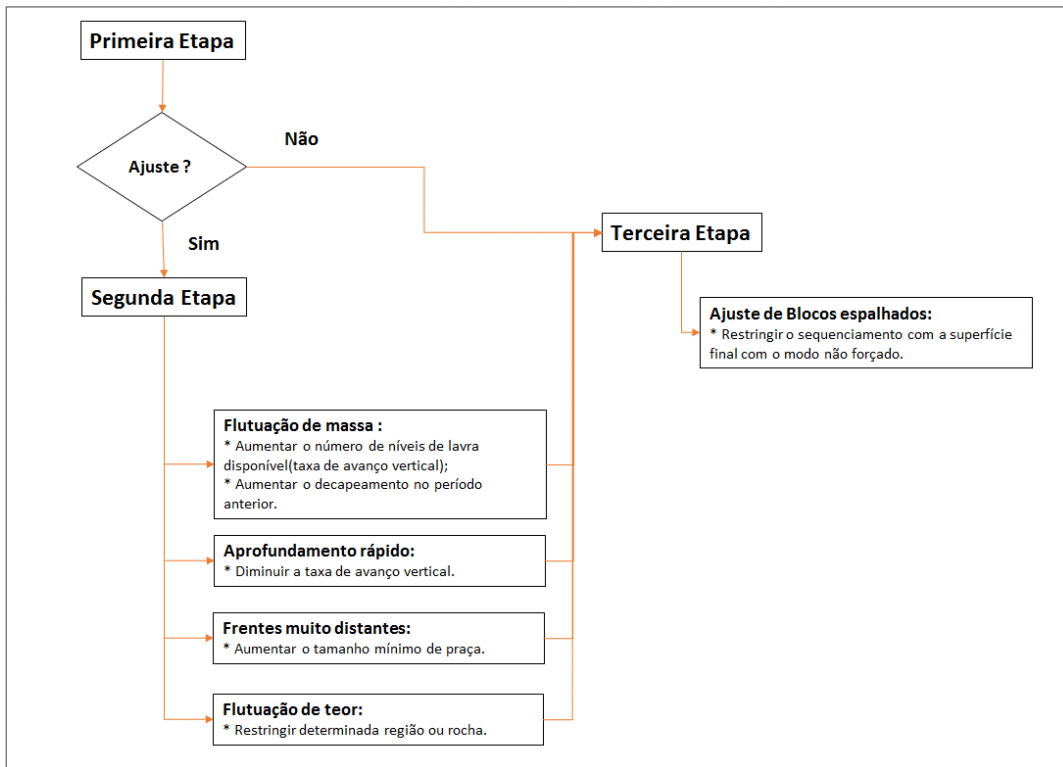


Figura 5-48 – Fluxograma de trabalho proposto para realização de sequenciamento direto de blocos

O fluxograma de trabalho sugerido na Figura 5-48 objetiva corrigir pontos de pouca aderência as metas econômicas e operacionais. A segunda etapa não se propõe a corrigir o problema de espalhamento de blocos que é um fato recorrente em sistemas de sequenciamento direto de blocos em diversos centros de pesquisa. Por este motivo a terceira etapa é necessária para ajustar a dispersão dos blocos de lavra. Os testes utilizando a cava final resultante da segunda etapa como limite sem restrição para o sequenciamento direto de blocos mostrou ser bastante promissor.

6. CONCLUSÕES

O sistema de sequenciamento direto de blocos é uma metodologia nova cujos os resultados e potencialidades ainda são pouco conhecidas no meio acadêmico e industrial. Para melhor determinar o conhecimento deste sistema o usuário deverá compreender as bases geológicas do modelo a ser analisado, além de compreender os fundamentos de otimização linear e técnicas de heurística.

O enfoque dado neste trabalho foi unir o conhecimento teórico do comportamento do sistema com os resultados práticos de modo a determinar um fluxo de trabalho para o engenheiro atingir os resultados desejados.

Os ajustes operacionais abordados neste trabalho, pela metodologia clássica, eram ajustados em um pós-processamento. Primeiro deveria ser definido o limite de cava final e sequenciamento para ser aplicado uma heurística posterior. Este processo é aplicado posteriormente de modo imperceptível ao usuário, porém com prejuízo financeiro.

A metodologia de trabalho proposta é capaz de adequar as variáveis operacionais a realidade operacional do empreendimento. A primeira etapa serve como avaliação do impacto econômico e operacional das variáveis determinadas. A etapa posterior de refino da solução é capaz de ajustar as variáveis operacionais as metas de produção, teor e qualidade quaisquer. A última etapa é capaz de ajustar o efeito de blocos espalhados através da agregação espacial. O fluxograma de trabalho apresentou uma metodologia de construção do sequenciamento direto de blocos capaz de atender as demandas produtivas e operacionais.

O parâmetro que apresentou maior impacto no valor financeiro foi o tamanho de praça, quanto maior o tamanho da praça maior a flutuação de massa e teor. O aumento do tamanho de praça diminui a seletividade, porém permite a utilização de equipamentos mais robustos e de maior produtividade.

A taxa de avanço vertical maior permite maior quantidade de frentes de lavra operacionais e conseqüentemente maior facilidade para atingir o teor desejado. Porém maior quantidade de frentes de lavra implica maior custo operacional. Os testes mostraram que a variação da taxa de avanço vertical facilita atingir o teor ideal quanto maior a taxa de avanço, porém o impacto no valor presente líquido foi pouco expressivo.

O controle da relação de movimento de material, relação estéril/minério, é um parâmetro altamente relacionado com a estratégia da empresa. Pois a antecipação de minério está relacionada com a estratégia de investimento do empreendimento e da disposição do corpo mineralizado no espaço. A antecipação de material causa impacto positivo no fluxo de caixa,

porém pode dificultar a operação de lavra devido a diminuição da quantidade de minério liberado.

A utilização de superfície de restrição apresentou comportamento diferente de acordo com a fase de lavra em que a restrição foi imposta. Aplicação da restrição em fases intermediárias de lavra causou uma diminuição do valor presente líquido. A diminuição do valor deve-se ao fato do sistema não ser capaz de atingir a sequência ótima devido a imposição por utilizar uma determinada região de lavra. A utilização da restrição não forçada considerando a superfície de cava final para o depósito mostrou ser uma ótima alternativa para aglomerar blocos durante o sequenciamento. Esta estratégia é um pós-processamento para refinar a aglomeração dos blocos dispersos com baixíssimo impacto no valor presente líquido.

É possível concluir que a metodologia clássica de Lerchs-Grossmann quando comparada ao Sequenciamento Direto de Blocos com restrições operacionais tende a superestimar a reserva. Pois não considera o fator de desconto adequado ao período de lavra e não considera a operacionalidade. O fator de desconto inadequado leva a seleção inadequada dos blocos de fronteira. A operacionalidade contabiliza os blocos que devem ser lavrados compulsoriamente para que o empreendimento seja executado, de modo a contabilizar corretamente os custos de lavra. Estes dois fatores conduzem a diminuição da reserva devido a diminuição do benefício dos blocos finais e o aumento do custo para manter a operacionalidade.

O sistema de sequenciamento direto de blocos utilizado cumpre as restrições operacionais impostas pelo usuário. Porém estas restrições devem ser adicionadas com cautela, pois afastam o resultado do valor ótimo econômico, apesar de contribuírem para aderência do sistema planejado ao executado operacionalmente. O aumento de aderência entre o planejado e o executado é uma contribuição muito significativa desta metodologia.

Para continuar o estudo apresentado neste trabalho será utilizado um trabalho de Doutorado com o intuito de verificar o comportamento do sistema de sequenciamento direto quando adicionamos os custos e restrições operacionais dos equipamentos de lavra. Para continuidade será desenvolvido um sistema próprio de Sequenciamento Direto de Blocos para melhor controle das variáveis.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 28 Th APCOM Symposium , Golden, USA, 1999, Whittle, J.. A decade of open pit mine planning and optimization - The craft of turning algorithms into packages.,Ed. APCOM, 15-22.
- Albor, F., & Dimitrakopoulos, R., Algoritmico approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons. *IMM Transactions, Mining Technology*, N° 2, pp 88-101, 2010.
- Almeida, M., Surface constrained stochastic life-of-mine production scheduling, McGill University, Master Thesis, 2013, <http://digitool.library.mcgill.ca/thesisfile117214.pdf>
- Asad, M., & Dimitrakopoulos, R., Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal open pit mine design under uncertain supply and demand. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 64, Issue 2, 2012, doi:10.1057/jors.2012.26.
- Bienstock, D., *Solving LP relaxations of large-scale.*, 2° Ed., Springer Editora , 2010,(pp. 1-14): Springer.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, pp. 268-308.
- Boland, N., & Dumitrescu, I. (2008). A multistage stochastic programming approach to open pit mine production scheduling with uncertain geology. *Optimization Online*.
- C. Meagher, R. D. (2014). Optimized Open Pit Mine Design, Pushbacks and the Gap Problem - A review. *Journal Of Mining Science, Vol. 50, N°3*, pp. 508-526.
- Caccetta, L. K., *Open pit mine production. Computer Applications in the Mineral Industries*,1998 , London: Institution of Mining and Metallurgy, pp. 65-72.
- CPRM, *Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG)*, CPRM, 2014.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO E O CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, Belo Horizonte, *The Impacts Of Slope Angle Approximations on Pit Optimization*, Beretta, F., & Marinho, A., 2014
- Cullenbine, C. W., *A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing*. *Optimization Letters*, 5, 365–377, 2011.
- Danzig, G., *All shortest routes from j fixex origin in a graph, in: Theory of graphs*. New York, Gordon and Beach, Pg. 85-90, 1967.

- Farmer, I., & Dimitrakopoulos, R. (2015), Schedule-Based Pushback Design with Varying Geotechnical Constrains in the Stochastic Optimization Framework., *McGill Research Report n°9*, Volume 2, pp. 312-335, 2015.
- Gershon, M., Heuristic approaches for mine planning and production. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 5(1), 1-13, 1987.
- GFDRR. (27 de 06 de 2016). <http://www.charim.net/>. Fonte: Data Management: <http://www.charim.net/datamanagement/32>
- Glover, F., *Handbook of Metaheuristics*, Ed. Boston: Kluwer Academic, 2003
- Glover, F. L., Diversification-driven tabu search for unconstrained binary quadratic problems. *Journal of Operational Research*, 240-253, 2000.
- Gomes, A., *Uma Introdução à Busca Tabu*. São Paulo: Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2013.
- Goodfellow, R., & Dimitrakopoulos, R., Mining supply chain optimization under geological uncertain, *Reserach Report N°6*, Montreal, 2012, ED. McGill , 2012.
- Goodfellow, R., & Dimitrakopoulos, R., Global Asset Optimization of Open Pit Mining Complexes Under Uncertain. Montreal, Qc, Canada: COSMOS-Stochastic Mine Planning Laboratory, *Research Report N° 7* , Vol. 1, 2013.
- Goodwina, G. et all, Receding horizon control applied to optimal mine planning. Austrália/Melbourne: AUTOMATICA, N°42, PP 1337-1342, 2006.
- Hartman, H. L., *Introductory Mining Engineering*. John Willey & Sons,. Ed. New York, 1987.
- Hustrulid, W., & KUCHTA, M. , *Open pit mine – Planning & design* ., Balkema, Rotterdam, 2v, 836p, 1995.
- Johnson, B., *Optimum Open Pit Mine Production Scheduling* , University of California, Berkley, 1968 (Dissertação de Doutorado).
- Khalokakaie, R. (1999). *Computer-Aided Optimal Open Pit Design With Variable Slope Angles*, The University of Leeds(Dissertação de Doutorado).
- Lamghari, A., & Dimitrakopoulos, R., A diversified tabu search approach for the open pit mine production scheduling problem with metal uncertain. *European Journal of Operational Research* , 642-652, 2012.
- Leite, A., & Dimitrakopoulos, R. (2007), A stochastic mine optimization model for open pit mine planning: Application and risk analysis at copper deposit. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 109-118, 2007.

- Lerchs, H. & Grossmann, L., Optimum design of open pit mines. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, Canada.*, v. LXVIII, p.17-24, 1965.
- Luzia, L., & Rodrigues, M.. *Introdução ao Escalonamento e Aplicações - Estudo sobre as Metaheurísticas*. São Paulo: Editora IME, 2009.
- Menabde, M., & Froyland, G., Mining Schedule optimisation for conditionally simulated ore bodies. *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 379-383, 2007.
- Moreno, E. E., Large-scale multi-period precedence constrained knapsack problem: A mining application. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 407–414, 2010.
- Nogholi, A. (2015). *Optimisation Of Open Pit Mine Block Sequencing*. Queensland University of Technology, 2015,(Tese de Doutorado).
- Ramazan S and Dimitrakopoulos R., Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining, *SME Transactions* 316, Ed. SME, Montreal, 2004
- Ramazan, S., The new fundamental tree algorithm for production scheduling. *European Journal of Operational Research*, pp. 1153-1166, 2007.
- Ramazan, S. D., Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optimization and Engineering Vol. 13*, pp. 1-20, 2012.
- Sattarvand, J., *Long term open pit planning by ant colony optimization.*, RWTH Aachen University, Aachen, 2009, (Dissertação de Doutorado).
- Souza, F., & Melo, M. (2014). A Proposal To Find The Ultimate Pit Using Ford Fulkersson, *R.E.M*, Volume 67, nº4, Ouro Preto, 359-377.
- Nader, A. et al, *Estado Da Arte E Modelamento Matemático Para Osequenciamento Direto De Blocos.* , Relatório de Pesquisa nº1, Belo Horizonte: UFMG, 2015.
- W. Brian, L., Open-Pit Block-Sequencing Formulations: A Tutorial. *Interfaces* 44(2):127-142. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.2013.0731>., 2014
- Weintraub, A & Schultz, X., A priori and a posteriori aggregation procedures to reduce model size in MIP mine planning models. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 30, 297-302, 2008.