

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,  
MATERIAIS E DE MINAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação da Metodologia de Sequenciamento Direto de  
Blocos Aplicada em Depósitos De Minério de Ferro**

**AUTOR:** HUDSON RODRIGUES BURGARELLI

**ORIENTADOR:** ROBERTO GALERY

**COORIENTADOR:** BECK NADER

**Fevereiro 2018**

Hudson Rodrigues Burgarelli

**Avaliação da Metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos Aplicada em  
Depósitos De Minério de Ferro**

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 obrigatório para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Roberto Galery

Coorientador: Prof. Dr. Beck Nader

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, irmãos e minha esposa Celina Caldeira, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Aos professores Beck Nader, Roberto Galery e Carlos Arroyo pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

Aos colegas Felipe Ribeiro, Luís Alberto e Leonardo Soares que tiveram papel fundamental na obtenção dos resultados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG pela oportunidade de obter o título de mestre e a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1. Conceitos de um Plano de Lavra .....	5
3.2. Aplicação do Ângulo de Talude na Geração da Cava Final .....	7
3.3. Definição de Cava Final .....	9
3.3.1. Algoritmos Heurísticos .....	10
3.3.2. Algoritmos de Programação Dinâmica.....	10
3.3.3. Teoria dos Grafos.....	12
3.4. Geração de <i>Pushbacks</i> e Sequencia de Produção Pela Metodologia Clássica ....	13
3.5. Novas Metodologias Para Definição da Sequência de Produção .....	15
3.5.1. Programação Inteira Mista (PIM).....	16
3.5.2. Relaxação Lagrangeana .....	17
3.5.3. Meta-heurísticas.....	17
3.6. Sequenciamento da Produção Sob Incertezas Geológicas.....	18
3.7. Sequenciamento Direto de Blocos .....	21
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
4.1. Propriedades dos Modelos e Parâmetros Utilizados nos Testes .....	24
<b>5. DISCUSSÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>28</b>
5.1. Resultados Depósito A.....	28
5.1.1. Sequenciamento de Produção Com Recuperação Mássica Variável.....	33
5.2. Resultados Depósito B.....	36
5.3. Resultados Depósito C.....	41
5.3.1. Modelo Estimado (Determinístico) - Depósito C.....	42
5.3.2. Modelo Simulado - Depósito C .....	46
5.3.3. Testes com Pilhas de Estoque - Depósito C .....	50
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>

<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO I – TABELAS COMPLETAS DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Exemplo de restrições de ângulos gerais de taludes.....	7
Figura 3.2 Imprecisão associada a utilização do método de blocos de precedência .....	8
Figura 3.3 Exemplo de uma seção de blocos sendo representadas por células .....	9
Figura 3.4 Programação Dinâmica aplicada a definição de cava final.....	11
Figura 3.5 Exemplo dos riscos associados a uma sequência de produção derivada de um modelo determinístico.....	21
Figura 4.1 Histograma Teor de Ferro – Depósito A.....	26
Figura 4.2 Histograma Teor de Ferro – Depósito B .....	26
Figura 4.3 Histograma Teor de Ferro – Depósito C .....	27
Figura 5.1 Resultados Produção de Minério – Depósito A .....	30
Figura 5.2 Resultados Produção de Estéril – Depósito A.....	30
Figura 5.3 Resultados Teores de Ferro – Depósito A.....	31
Figura 5.4 Resultados VPL – Depósito A.....	31
Figura 5.5 Resultados VPL Acumulado – Depósito A.....	32
Figura 5.6 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Depósito A.....	32
Figura 5.7 Resultados Produção de Minério – Recuperação Mássica Variável .....	34
Figura 5.8 Resultados Produção de Estéril – Recuperação Mássica Variável.....	34
Figura 5.9 Resultados Teores de Ferro – Recuperação Mássica Variável.....	35
Figura 5.10 Resultados VPL – Recuperação Mássica Variável .....	35
Figura 5.11 Resultados VPL Acumulado – Recuperação Mássica Variável.....	36
Figura 5.12 Resultados Produção de Minério – Depósito B.....	38
Figura 5.13 Resultados Produção de Estéril – Depósito B .....	38
Figura 5.14 Resultados Teores de Ferro – Depósito B .....	39
Figura 5.15 Resultados VPL – Depósito B.....	39
Figura 5.16 Resultados VPL Acumulado – Depósito B .....	40
Figura 5.17 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Depósito B .....	41
Figura 5.18 Resultados Produção de Minério – Modelo Estimado Depósito C.....	43
Figura 5.19 Resultados Produção de Estéril – Modelo Estimado Depósito C .....	43
Figura 5.20 Resultados Teores de Ferro – Modelo Estimado Depósito C .....	44
Figura 5.21 Resultados VPL – Modelo Estimado Depósito C .....	44

Figura 5.22 Resultados VPL Acumulado – Modelo Estimado Depósito C.....	45
Figura 5.23 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Modelo Estimado Depósito C ..	46
Figura 5.24 Resultados Produção de Minério – Modelo Simulado Depósito C.....	47
Figura 5.25 Resultados Produção de Estéril – Modelo Simulado Depósito C .....	47
Figura 5.26 Resultados Teores de Ferro – Modelo Simulado Depósito C .....	48
Figura 5.27 Resultados VPL – Modelo Simulado Depósito C .....	48
Figura 5.28 Resultados VPL Acumulado – Modelo Simulado Depósito C .....	49
Figura 5.29 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Modelo Simulado Depósito C ..	50
Figura 5.30 Resultados Produção de Minério – Testes com Pilhas de Estoque .....	51
Figura 5.31 Resultados Produção de Estéril – Testes com Pilhas de Estoque.....	51
Figura 5.32 Resultados Teores de Ferro – Testes com Pilhas de Estoque.....	52
Figura 5.33 Pilha de Estoque 100 Mt .....	52
Figura 5.34 Pilha de Estoque 10 Mt .....	53
Figura 5.35 Pilha de Estoque 5 Mt .....	53
Figura 5.36 Resultados VPL – Testes com Pilhas de Estoque .....	54
Figura 5.37 Resultados VPL Acumulado – Testes com Pilhas de Estoque.....	54

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela IV.1 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito A...	24
Tabela IV.2 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito B...	25
Tabela IV.3 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito C...	25
Tabela V.1 - Características do Modelo de Blocos do Depósito A .....	28
Tabela V.2 - Características do Modelo de Blocos Regularizado do Depósito A.....	29
Tabela V.3 - Parâmetros para Cálculo da Recuperação Mássica Bloco a Bloco – Depósito A .....	33
Tabela V.4 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B .....	37
Tabela V.5 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 25 x 25 x 15 m .....	37
Tabela V.6 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 50 x 50 x 15 m .....	37
Tabela V.7 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C .....	41
Tabela V.8 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 10 x 10 x 10 m .....	42
Tabela V.9 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 20 x 20 x 10 m .....	42
Tabela V.10 - Parâmetros para Cálculo da Recuperação Mássica Bloco a Bloco – Depósito C .....	42



## RESUMO

A presente pesquisa pretendeu avaliar a aplicabilidade da metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos em depósitos de minério de ferro. Para isso, foram realizados três estudos de caso em depósitos reais, comparando este método com a metodologia clássica de planejamento de lavra, que utiliza a aplicação do algoritmo de Lerchs-Grossmann. O Sequenciamento Direto de Blocos aplica um único processo de otimização, que engloba todas as etapas desenvolvidas na metodologia clássica, podendo levar em consideração a incerteza geológica na geração da sequência de produção. Nos estudos de caso foram utilizados dois depósitos representados por um único modelo estimado e um depósito representando tanto por um modelo estimado quanto por um modelo simulado. O objetivo foi avaliar as vantagens desta nova metodologia, levando em consideração as características e a forma de representação de cada um dos depósitos. Os resultados indicam que, ao aplicar a metodologia do Sequenciamento Direto de Blocos, é possível obter sequências de lavra com maior valor presente líquido, aumentando o valor do empreendimento, mesmo em depósitos representados por modelos estimados (determinísticos). Esse aumento se deve principalmente a capacidade desta metodologia de aplicar corretamente o fator de desconto, o que permite que a decisão de retirada do bloco seja avaliada de acordo com o período em que realmente este bloco será lavrado. Esta consideração faz com que o material lavrado em períodos posteriores seja penalizado com um maior fator de desconto, assim como esperado na realidade. Desta forma, o sistema tende a buscar o material que irá gerar uma maior receita nos primeiros períodos, mesmo que em alguns casos isto também aumente ligeiramente a quantidade de estéril lavrada, mas que resultem em um maior valor do empreendimento. Esse aumento no valor do projeto também está relacionado com a heterogeneidade dos teores do depósito, de forma que depósitos mais heterogêneos tendem a apresentar maiores ganhos. Além disso, ao se utilizar modelos simulados, é possível avaliar os riscos associados a sequência de lavra definida, de forma a minimizar estes riscos nos primeiros períodos do empreendimento.

Palavras Chaves: Planejamento de Lavra; Lerchs-Grossmann; Sequenciamento Direto de Blocos; Modelos Simulados

## **ABSTRACT**

This study aims to evaluate the applicability of Direct Block Scheduling methodology in iron ore deposits. Three case studies in real deposits were conducted, comparing the Direct Blok Scheduling with the conventional mine planning method, which uses the Lerchs-Grossmann algorithm. Direct Blok Scheduling applies a unique optimization process that encompasses all stages developed in the classical methodology, taking into account the geological uncertainty in the generation of the mine plan. In the case studies, we made use of two geological deposits represented by a estimated model and a deposit representing both by a estimated and by a simulated model. The objective is to evaluate the advantages of this new methodology, taking into account the characteristics of each deposit. The results indicate that, applying the Direct Block Scheduling methodology, it is possible to obtain mining sequences with higher net present value, increasing the project value, even in deposits represented by deterministic models. This increase is due to the capabilities of this methodology to correctly apply the discount factor, which allows the decision to mine the block to be evaluated according to the period in which the block will be mined. This causes the material mined in later periods to be penalized with a larger discount factor, as expected in reality. In this way, the system tends to mine the material that will generate a higher revenue in the first periods, even if in some cases this also slightly increases the amount of waste mined, but that result in a higher value of the project. This increase in the project value is related to the grade heterogeneity of the deposit, so deposits that are more heterogeneous tend to present greater gains. In addition, when using simulated models, it is possible to evaluate the risks associated with the defined mining sequence, in order to minimize these risks in the first periods of the project.

**Key words:** Mine Planning; Lerchs-Grossmann; Direct Block Scheduling; Simulated Models

## 1. INTRODUÇÃO

Um plano de lavra pode ser definido como a programação das atividades da mina, indicando os avanços a serem feitos ao longo do tempo, prevendo a quantidade de minério e estéril e a qualidade do material que serão lavrados nesses avanços. Os planos de lavra podem ser classificados como de longo, médio e curto prazo, dependendo do horizonte de tempo e dos objetivos de cada plano.

A importância do planejamento de lavra está relacionada a diversas etapas ao longo de todo o horizonte de exploração da mina, compreendendo desde os primeiros estudos de viabilidade econômica até o encerramento das operações (AMARAL, 2008). É o planejamento de lavra que irá definir qual material será enviado para a planta de beneficiamento e qual material será enviado para as pilhas de estéril ou estocado para sua utilização futura. Desta forma ele está relacionado diretamente à exequibilidade econômica do projeto.

Pela metodologia clássica de planejamento de lavra de longo/médio prazo, para minas a céu aberto, o fluxo de trabalho pode ser dividido resumidamente nas seguintes etapas: definição da cava final, geração dos *pushbacks* (cavas intermediárias contidas dentro da cava final) ou fases de lavra e definição da sequência de produção em determinados períodos. A cava final define qual a parcela do depósito mineral será lavrada durante toda a vida da mina (HISTRULID & KUCHTA, 2006). Como existe um grande número de blocos dentro do limite da cava final, esta pode ser dividida em uma série de cavas intermediárias, comumente chamadas de *pushbacks* (GHOLAMNEJAD & OSANLOO, 2007). Estes representam a expansão da mina até a cava final, tendo um papel muito importante na geração do fluxo de caixa do empreendimento. Para definição dos *pushbacks*, geralmente são utilizadas as cavas aninhadas, que são um conjunto de cavas menores que a cava final, geradas através da variação do preço de venda do produto final (de maneira crescente) de modo a definir um limite de cava para cada um desses preços (ELKINGTON & DURHAM, 2011). É importante ressaltar que, na metodologia clássica, a cava final e as cavas aninhadas são geradas a partir da maximização do fluxo de caixa não-descontado, sendo que a taxa de desconto somente é aplicada na geração da sequência de produção.

Geralmente os planos de lavra são derivados de um modelo determinístico do corpo de minério, e muitas vezes este modelo é incapaz de reproduzir a variabilidade intrínseca do depósito mineralizado, resultando em planos de lavras que podem estar comprometidos. Modelos geoestatísticos, criados a partir de simulações, oferecem, a partir das estimativas dos riscos, bom contraponto para a avaliação das incertezas para os empreendimentos de mineração. Tais modelos podem, por exemplo, representar a possível variação dos teores em setores específicos do depósito estudado, compondo uma função da curva de probabilidade, e desta forma, permitir que se calcule seus índices de riscos envolvidos (SENHORINHO, 2008).

A metodologia tradicional pode ser aprimorada com a adoção de um único processo de otimização, denominado Sequenciamento Direto de Blocos, que englobe todas as etapas desenvolvidas na metodologia clássica em um único processo.

Além disso, esta nova metodologia permite incorporar as incertezas geológicas aos resultados, ao permitir que modelos simulados possam ser utilizados na geração dos planos de lavra em um único processo. Esta metodologia considera todos os modelos simulados simultaneamente dentro de um processo de otimização que retorna uma única sequência de lavra.

Como mencionado, a metodologia clássica utiliza a maximização do fluxo de caixa não-descontado para geração da cava final e das cavas aninhadas, que darão origem aos *pushbacks*. Já a metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos é capaz de aplicar a taxa de desconto na geração dos planos de produção. Desta forma, os blocos com maior valor econômico são forçados a serem lavrados o mais rapidamente possível, com um efeito oposto para blocos com valores mais baixos (ALMEIDA, 2013). Esta diferença pode alterar significativamente os resultados, gerando planos de lavra com maiores VPL (valor presente líquido), no Sequenciamento Direto de Blocos.

Modelos para sequenciamento direto de blocos existem há décadas, mas as dificuldades computacionais impediam a aplicação dessas técnicas em modelos reais de grande porte. Com os recentes avanços tecnológicos na área computacional, incluindo melhorias nos processadores, tecnologia 64 bits, processamento paralelo, dentre outras, além da evolução dos algoritmos, técnicas para sequenciamento direto de blocos vêm se tornando

mais atraentes (GUIMARÃES & MARINHO, 2014). Embora existam trabalhos que aplicam estas novas metodologias em depósitos conhecidos, como em SPLEIT (2014), estes modelos e algoritmos carecem de estudos mais aprofundados em depósitos minerais específicos para mensurar os ganhos obtidos a partir da sua utilização.

Os estudos de casos sobre Sequenciamento Direto de Blocos encontrados na literatura normalmente focam na utilização de modelos simulados no sequenciamento da produção. Desta forma, não é possível avaliar o impacto que a aplicação correta da taxa de desconto pode ocasionar, mesmo em depósitos representados por modelos estimados (determinísticos). Este estudo visou avaliar ambos os aspectos separadamente, comparando os resultados obtidos com os resultados gerados pela aplicação da metodologia clássica de planejamento de lavra.

Os estudos de caso presentes neste estudo foram realizados em três depósitos de minério de ferro, sendo dois depósitos representados por modelos estimados e um depósito representando tanto por um modelo estimado quanto por um modelo simulado. Foi analisado como as características próprias de cada depósito afetam os resultados obtidos em ambas metodologias. Foram avaliados os ganhos obtidos pela aplicação do Sequenciamento Direto de Blocos em cada um dos depósitos estudados, de maneira a correlacionar estes ganhos com características específicas do depósito.

De modo geral, o presente trabalho pretendeu avaliar a aplicabilidade desta nova metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos em depósitos de minério de ferro reais, comparando-a com a metodologia clássica de definição de cava final e *pushbacks*. Foram analisados principalmente os resultados financeiros dos planos gerados e como a incorporação da incerteza geológica (a partir de modelos simulados) afetam estes planos.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo primário deste estudo foi avaliar a aplicabilidade da metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos em depósitos reais de minério de ferro, analisando as vantagens e desvantagens deste método, quando comparada com a metodologia clássica. Serão avaliados especialmente os seguintes aspectos:

- Ganhos no VPL do empreendimento, resultantes da aplicação da taxa de desconto no Sequenciamento Direto de Blocos;
- Evolução dos planos de lavra, avaliando principalmente as taxas de produção de minério e estéril, e teores dos elementos úteis;
- Impactos gerados ao se utilizar modelos simulados, que tendem a minimizar a incerteza associada aos planos de lavra gerados para os primeiros períodos;
- Impactos gerados pela inserção de pilhas de estoque, que visa postergar o aproveitamento do minério mais pobre;
- Correlação entre as características próprias de cada depósito, como por exemplo a distribuição dos teores, e as diferenças nos resultados obtidos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Conceitos de um Plano de Lavra

A avaliação tradicional de projetos de mineração inclui a sondagem e amostragem, geração de um modelo do depósito mineral, definição dos métodos de lavra e processamento do minério, estimativa dos custos de capital e operacionais e desenvolvimento de um estudo de exequibilidade técnica e econômica do empreendimento (DIMITRAKOPOULOS et al. (2002)).

O modelo do depósito mineral geralmente é representado por blocos tridimensionais (paralelepípedos), contendo informações sobre a posição e tamanho de cada bloco. O tamanho dos blocos geralmente é definido pelo espaçamento da sua malha de sondagem. Estes blocos podem armazenar quaisquer tipos de informações que sejam relevantes para a caracterização do depósito, como por exemplo densidade, teores dos elementos úteis, definição do tipo de material que compõe o bloco, etc.

Para definição do estudo de exequibilidade técnica e econômica, deve-se definir o plano de produção do empreendimento. Estes planos podem ser classificados como de longo, médio e curto prazos, dependendo do horizonte de tempo e dos objetivos de cada plano. Normalmente, no planejamento de longo prazo é definida a cava final do projeto. Para geração desta cava, são utilizados parâmetros econômicos, geotécnicos e de processamento mineral. O propósito, nessa etapa, é projetar o *layout* da mina, estudar cenários e prever os custos de operação, de forma a reduzir os investimentos em instalações e equipamentos, e maximizar o retorno financeiro do empreendimento (HUSTRULID & KUCHTA, 2006).

A próxima etapa do planejamento consiste em determinar a evolução da cava final. Os planos de lavra de médio e curto prazos têm como objetivo estabelecer a sequência de operações de lavra anualmente, semestralmente e/ou mensalmente. O planejamento de curto prazo se refere aos aspectos operacionais da lavra da mina, como a determinação do ritmo de lavra nas diversas frentes em atividade e a alocação de equipamentos de carga e transporte (PINTO & MERSCHMANN, 2001). O horizonte de tempo estabelecido para cada etapa do planejamento de lavra pode variar, dependendo da estratégia definida pela empresa.

Pela metodologia clássica de planejamento de lavra de longo/médio prazo, para minas a céu aberto, o fluxo de trabalho pode ser dividido resumidamente nas seguintes etapas: definição da cava final, geração dos *pushbacks* ou fases de lavra e definição da sequência de produção em determinados períodos.

Para geração da cava final e dos *pushbacks* deve-se respeitar o ângulo geral de talude, que é definido como o ângulo medido na horizontal entre o pé do banco inferior e a crista do banco superior da cava. Este ângulo de talude deve ser respeitado por questões de segurança, e o valor adotado deve garantir a estabilidade dos taludes da cava.

Normalmente o critério utilizado para definição da cava final e dos *pushbacks* é a maximização do valor econômico do empreendimento. Para isto, é preciso conhecer o valor de cada um dos blocos que compõe o modelo do depósito mineral, que pode ser calculado de maneira genérica da seguinte forma (SME, 2002):

$$R = (P - C_S)rg \quad (1.1)$$

Onde:

$R$  = receita obtida pela venda da unidade do produto final

$P$  = preço de venda da unidade do produto final

$C_S$  = custos relacionados a venda do produto final

$r$  = recuperação, em percentagem, do elemento útil nas etapas de lavra e processamento mineral

$g$  = teor do blocos

$$v_i = -bC_m \quad \text{para blocos de estéril} \quad (1.2)$$

$$v_i = bR - bC_m - bC_p \quad \text{para blocos de minério}$$

Onde:

$v_i$  = valor de cada bloco

$b$  = tonelagem de cada bloco

$C_m$  = custo unitário de lavra do material

$C_p$  = custo unitário de processamento do material



A equação acima é genérica e deve ser adaptada, se necessário, para cada depósito em questão. Esta equação é comumente conhecida como Função Benefício.

Os algoritmos existentes para geração de cava final e *pushbacks* determinam quais blocos deverão ser lavrados. Desta forma o resultado final é uma superfície que segue o contorno destes blocos, respeitando um ângulo geral de talude predefinido, chamada de cava matemática. As faces dos bancos (ângulo de face do talude) normalmente não são verticais, por questões de estabilidade dos taludes. A cava matemática não respeita o ângulo de face do talude, além de não conter estradas para o seu acesso.

A partir da cava matemática é realizado um processo chamado de operacionalização, que consiste em desenhar a cava operacional respeitando os limites da cava matemática. Em outras palavras, o engenheiro de minas tem de transformar esta cava matemática em uma cava operacional, buscando ficar próximo do ótimo matemático (GALLAGHER & KEAR, 2001). Nesta operacionalização são inserindo os acessos, respeitando todos os parâmetros operacionais e geométricos do projeto.

### 3.2. Aplicação do Ângulo de Talude na Geração da Cava Final

Para a geração da cava final e dos *pushbacks* deve-se respeitar o ângulo geral de talude, que pode variar dependendo da região do depósito, como ilustrado na Figura 3.1:

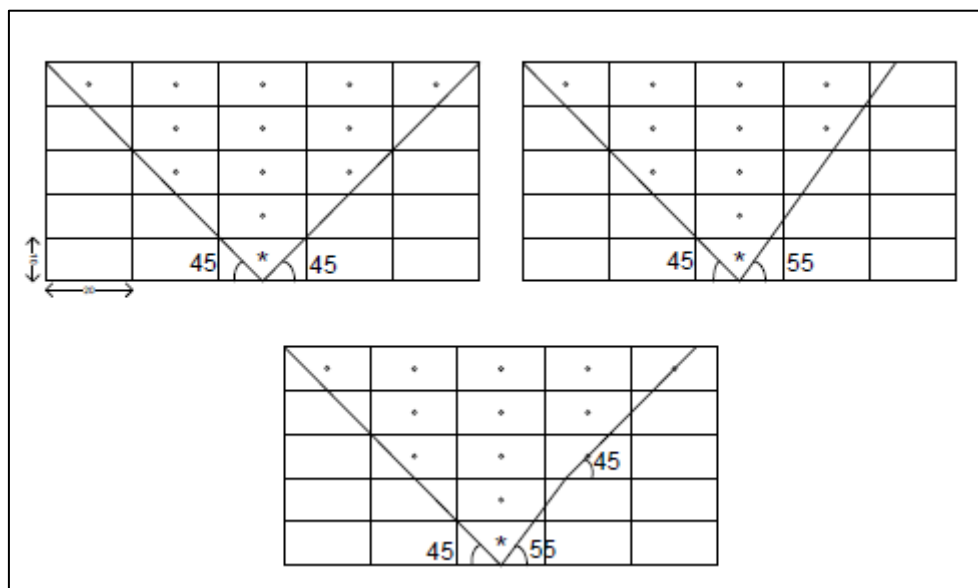
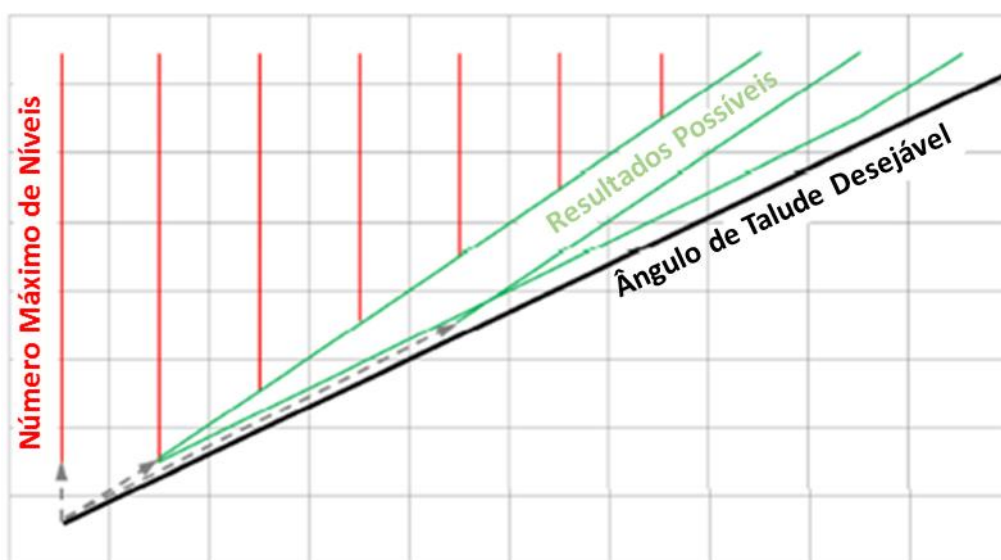


Figura 3.1 Exemplo de restrições de ângulos gerais de taludes  
Fonte: Adaptado de NOGHOLI (2015)

Para aplicação da restrição do ângulo de talude, o método mais utilizado é chamado de blocos de precedência, no qual é criada uma lista de precedência para cada bloco,

indicando quais blocos devem ser retirados para se acessar determinado bloco. O ângulo de talude é aplicado a partir do centroide de cada bloco, de maneira a definir esta lista. A fim de limitar a distância vertical desta busca, o método de blocos de precedência usa um parâmetro referido como o "número máximo de níveis de precedência". Este parâmetro determina o número máximo de blocos que serão analisados verticalmente (MARINHO & BERETTA, 2014). Mas pode haver uma imprecisão relacionada à aplicação deste método, conforme ilustra a Figura 3.2. Se o número máximo de níveis de precedência for 1, somente os blocos contidos na linha vermelha serão retirados, pois somente será avaliado um bloco verticalmente. Mas se este valor for muito alto, maior ou igual ao número total de blocos contidos verticalmente no depósito, o ângulo de talude será aplicado corretamente (linha preta). Os blocos contidos entre as linhas verde são os blocos possíveis de serem lavrados, dependendo do número máximo de níveis de precedência definido.



**Figura 3.2** Imprecisão associada a utilização do método de blocos de precedência  
 Fonte: Adaptado de WHITTLE (1998)

Outra alternativa para controlar o ângulo geral de talude é a utilização de superfícies. A superfície é definida a partir de *grids*, que podem ser considerados células que representam cada coluna de blocos do modelo, definidos por um par de coordenadas  $x$  e  $y$  e uma elevação  $e_{c,t}$ , onde  $c$  é a célula associada e  $t$  é um determinado período do plano de lavra. Esta variável é contínua e pode assumir qualquer valor entre a maior e a menor elevação do modelo. Os atributos dos blocos são acumulados a partir da topografia até o último bloco de cada coluna, com valores cumulativos sendo armazenados em cada nível. Atributos para blocos individuais são descartados para o processo de otimização, o que

permite operações rápidas entre as superfícies, pelo cálculo da diferença entre elas (ALMEIDA, 2013). Desta forma, para controlar o ângulo geral de talude basta comparar a elevação de cada célula com as células adjacentes.

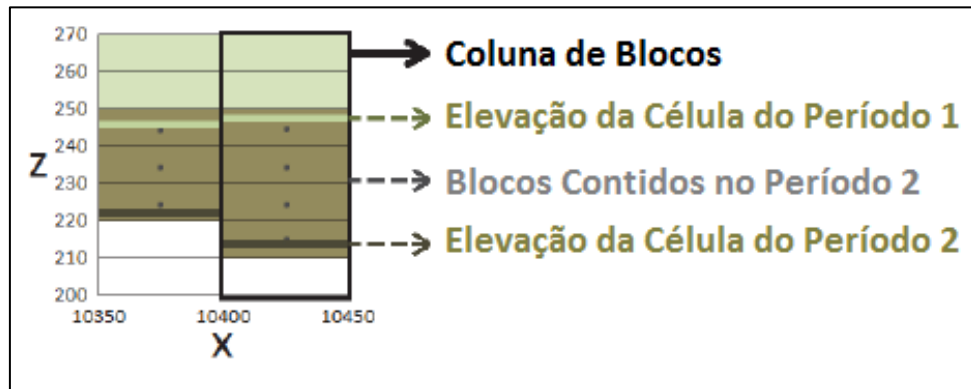


Figura 3.3 Exemplo de uma seção de blocos sendo representadas por células  
Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2013)

### 3.3. Definição de Cava Final

O limite da cava final determina quais blocos serão lavrados durante toda a vida útil da mina. O método mais utilizado para definição deste limite é a maximização do valor econômico da cava, respeitando as restrições geométricas que tornam o resultado factível. Desta forma, o problema pode ser definido em um modelo de programação inteira (TOLWINSKI & UNDERWOOD, 1996):

$$\text{Max } \sum_{i=1}^I v_i x_i \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$x_j - x_i \geq 0 \quad \forall i, j \in I; j \in \gamma. \quad (3.2)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, I. \quad (3.3)$$

Onde:

$I$  = número de blocos do modelo

$\gamma$  = conjunto de blocos a ser extraído antes do bloco  $i$

$v_i$  = valor econômico do bloco  $i$

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se o bloco for extraído} \\ 0 & \text{se o bloco não for extraído} \end{cases}$$

Durante as últimas décadas diversos algoritmos foram desenvolvidos para definir os limites da cava final, que podem ser divididos de maneira geral em heurísticos, programação dinâmica e teoria dos grafos. Nos itens a seguir serão apresentados os principais algoritmos desenvolvidos nas últimas décadas.

### **3.3.1. Algoritmos Heurísticos**

Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável (CORDENONSI, 2008). O principal método heurístico desenvolvido para definição de cava final é chamado de Cones Flutuantes, proposto por PANA (1965). Este método utiliza a construção de cones invertidos, localizados nos centroides dos blocos de minério, que incluem todos blocos que devem ser removidos para se acessar este bloco. O ângulo deste cone é controlado pelo valor definido para o ângulo geral de talude. Podemos resumir o método dos Cones Flutuantes nos seguintes passos (WRIGHT, 1990):

- 1 – A partir da topografia, procura-se os blocos de minério (blocos com valor econômico positivo).
- 2 – O cone é construído a partir destes blocos de minério.
- 3 – Se o valor do cone (definido como a soma do valor econômico de todos os blocos do cone) for positivo, este cone será retirado.
- 4 – Continua-se com a busca até que todos os blocos de minério tenham sido avaliados.
- 5 – A cava final é definida pela retirada de todos os cones positivos.

Este algoritmo é de simples implementação, mas possui alguns problemas que impedem a obtenção de uma solução ótima (HUSTRULID & KUCHTA, 2006). Estes problemas estão relacionados aos blocos que estão localizados em mais de um cone, chamados de cones sobrepostos. Alguns autores propuseram versões modificadas deste método na tentativa de resolver este problema, como por exemplo: Algoritmo de Korobov (DOWD & ONUR, 1993), Cones Flutuantes II (WRIGHT, 1999) e Cones Flutuantes III [ZEYNI et al. (2011)].

### **3.3.2. Algoritmos de Programação Dinâmica**

A aplicação de Programação Dinâmica para solucionar o problema de definição de cava final foi primeiramente proposta por Lerchs & Grossmann (1965). Mas inicialmente este

método era aplicável somente em modelos 2D. A Figura 3.4 ilustra o passo a passo deste método. O primeiro passo é calcular o valor econômico para cada bloco, representado na Figura 3.4a. O segundo passo é adicionar uma linha de ar (com valor 0) no topo do modelo, e em seguida é calculado o valor acumulado ( $M_{ij}$ ) para cada coluna de blocos (Figura 3.4b). O terceiro passo, Figura 3.4c, é escolher o bloco de maior valor localizado imediatamente a esquerda, que será somado ao bloco original ( $P_{ij}$ ). Podemos definir o valor  $P_{ij}$  como:

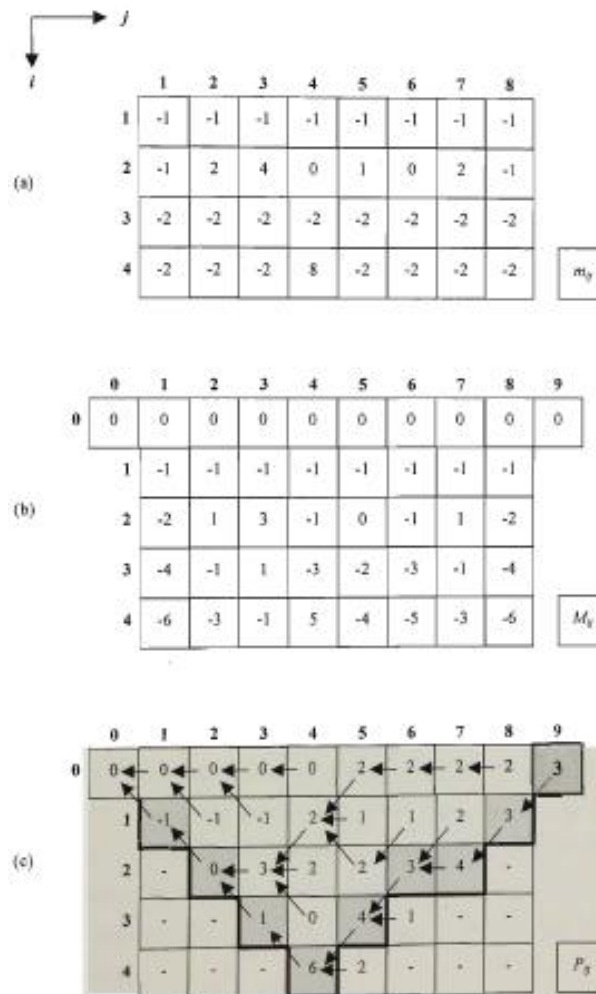


Figura 3.4 Programação Dinâmica aplicada a definição de cava final  
Fonte: Adaptado de POUR (2000)

$$P_{ij} = M_{ij} + \max \begin{cases} P_{i-1,j-1} \\ P_{i,j-1} \\ P_{i+1,j-1} \end{cases} \quad (3.4)$$

Para determinar o contorno da cava ótima, é escolhido o bloco localizado na linha de ar com valor  $P_{0j}$  máximo. Em seguida, é construído um arco, a partir deste bloco, no sentido da direita para a esquerda, direcionado para o bloco vizinho de maior valor. O contorno da cava ótima é obtido seguindo estes arcos gerados.

Para aplicação deste algoritmo em modelos 3D, algumas modificações são necessárias, o que pode desviar o resultado do valor ótimo. Alguns exemplos destes algoritmos modificados podem ser encontrados em Koenigsberg (1982) e Erarslan & Celebi (2001).

### 3.3.3. Teoria dos Grafos

A aplicação de teoria dos Grafos para definição da cava final foi primeiramente proposta por Lerchs & Grossmann (1965) devido à dificuldade de aplicar programação dinâmica em modelos 3D. Este método ficou conhecido na literatura como algoritmo de Lerchs-Grossmann. Este algoritmo transforma o modelo de blocos em um grafo direcionado e procura pelo fechamento máximo deste grafo (LERCHS & GROSSMANN, 1965).

Um grafo consiste em um conjunto de pontos de junção chamados de nós (ou vértices), com certos pares de nós unidos por linhas chamadas de ramos (ou arcos). Uma cadeia de nós  $i$  e  $j$  são uma sequência de ramos conectando estes dois nós. Um ciclo é uma cadeia conectando um nó a ele mesmo sem retornar nos seus passos. Uma árvore é um grafo conectado que não contém nenhum ciclo (CARMO, 2001).

No algoritmo de Lerchs-Grossmann, cada bloco do modelo é considerado um nó, e os arcos são criados de maneira a satisfazer as restrições de precedência. É criada uma raiz imaginária, que é conectada a todos os nós do modelo. Inicialmente são avaliados os blocos do primeiro nível. Os arcos são considerados fortes, se conectados a ramos positivos, ou fracos caso contrário. Na árvore não pode haver vértices fracos sobrepondo-se a arcos fortes ou vértices, então os arcos fortes do primeiro nível são apagados e adicionados a solução do sistema. Em seguida, são adicionados os blocos do segundo nível, e os arcos são novamente avaliados como fortes ou fracos. Os arcos fortes serão conectados aos seus predecessores, de maneira a respeitar as restrições de ângulo geral de talude. Estes novos ramos são reclassificados, e caso se configurem em galhos fortes, serão adicionados à solução do sistema. O algoritmo continua com as interações, conectando arcos fortes aos seus predecessores, até que todos os arcos fortes do sistema tenham sido avaliados.

Devido às restrições computacionais da época, várias modificações do algoritmo de Lerchs-Grossmann foram surgindo ao longo das décadas. Alford e Whittle (1986) avaliaram a implementação deste algoritmo em um pacote para definição de cava final, que posteriormente foi aprimorado e comercialmente chamado de Whittle Three-D, obtendo um grande sucesso na indústria mineral. Gianini (1990) aplicou um algoritmo de fluxo máximo para resolver o problema, demonstrando que fluxo de redes é mais eficiente que o algoritmo de Lerchs-Grossmann. Zhao e Kim (1992) propuseram um algoritmo baseado em Lerchs-Grossmann, aplicando heurísticas para reduzir o tempo computacional de resolução do sistema.

### **3.4. Geração de *Pushbacks* e Sequencia de Produção Pela Metodologia Clássica**

*Pushbacks* ou fases de lavra podem ser definidos como cavas intermediárias criadas a partir da cava final. Os *pushbacks* normalmente são gerados por dois motivos (NOGHOLI, 2015):

- Para guiar o sequenciamento da produção;
- Para melhorar a operacionalidade das soluções encontradas.

Definir o sequenciamento da produção pode ser um problema complexo, pois normalmente existe um grande número de blocos dentro do limite da cava final. Ao se restringir este sequenciamento aos *pushbacks*, ocorre uma diminuição da complexidade do problema, permitindo encontrar soluções satisfatórias. Além disto, pode-se tentar controlar algumas restrições operacionais na criação dos *pushbacks*, com o objetivo de obter soluções operacionalmente viáveis para o sequenciamento de produção.

O método clássico para geração dos *pushbacks* é a utilização das cavas aninhadas, que são um conjunto de cavas menores que a cava final, geradas através da variação do preço de venda do produto final (de maneira crescente), de modo a definir um limite de cava para cada um desses preços (ELKINGTON & DURHAM, 2011). Estas cavas aninhadas são geradas a partir da maximização do fluxo de caixa não-descontado, sendo que a taxa de desconto somente é aplicada na geração da sequência de produção.

Um problema relacionado às cavas aninhadas é que uma pequena variação do preço de venda pode ocasionar um grande aumento de volume de material entre as cavas. Da mesma forma, grandes variações do preço de venda podem gerar cavas praticamente iguais. Este problema é chamado de efeito Gap (ALBOR & DIMITRAKOPOULOS, 2010), e pode ocasionar problemas na operacionalização da sequência de produção.

Whittle (2011) sugeriu duas metodologias para aplicação das cavas aninhadas na geração da sequência de produção, chamados de Pior e Melhor caso. No Melhor Caso, a sequência é definida seguindo a ordem natural das cavas aninhadas. Desta forma, inicialmente será lavrada a primeira cava gerada, seguida pela segunda, e assim consecutivamente. Como preços de vendas menores (utilizados na geração das primeiras cavas aninhadas) forçam que seja lavrado o material com maior valor econômico, este método tende a maximizar o fluxo de caixa da sequência de produção. O problema com esta metodologia está relacionado ao Efeito Gap, pois muitas vezes estes resultados obtidos não são viáveis do ponto de vista operacional.

O Pior Caso considera que a cava final será lavrada banco a banco, ou seja, todo o primeiro banco deverá ser retirado para que se possa acessar o segundo banco, e assim consecutivamente. Esta metodologia garante a operacionalidade da sequência de produção, mas desfavorece o fluxo de caixa, pois normalmente os primeiros bancos da cava final possuem uma grande quantidade de estéril, adicionando custos aos primeiros períodos do empreendimento.

Foram propostas algumas alternativas entre o Melhor e o Pior caso, como por exemplo o *Constant Lag*. Neste método, a sequência é definida seguindo a ordem natural das cavas aninhadas, mas existe uma restrição relativa ao número de bancos que podem ser lavrados em uma mesma cava. Este número de bancos é um *input* do sistema. Por exemplo, para um valor de 4, após serem lavrados 4 bancos de uma mesma cava, o sistema automaticamente irá avançar para a próxima. Este método é uma tentativa de garantir a operacionalidade da sequência de produção gerada.

A utilização das cavas aninhadas como *pushbacks* é amplamente utilizada na indústria mineral. Mas existem outras metodologias para geração destes *pushbacks*, como, por exemplo, em Askari-Nasab (2006), Gholamenejad e Osanloo (2007), e Meagher et al. (2009).



### 3.5. Novas Metodologias Para Definição da Sequência de Produção

Várias novas metodologias para definição da sequência de produção foram desenvolvidas, principalmente nos últimos anos. A sequência de produção deve definir quais e quando determinados blocos devem ser lavrados, buscando maximizar o VPL do empreendimento e obedecendo todas as restrições envolvidas no problema. A equação abaixo mostra uma formulação matemática típica para este tipo de problema (NOGHOLI, 2015):

Maximizar:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{v_i}{(1+d)^t} x_i^t \quad (3.5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{r=1}^t x_j^r - x_i^t \geq 0 \quad \forall i, j \in I; t = 1, 2, \dots, T; j \in \Gamma_i \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^I b_i x_i^t \leq M_m \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (3.7)$$

$$M_l \leq \sum_{i=1}^O b_i x_i^t \leq M_u \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^O (g_i - g_l) b_i x_i^t \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1}^O (g_i - g_u) b_i x_i^t \leq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (3.10)$$

$$\sum_{t=1}^T x_i^t \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, I. \quad (3.11)$$

$$x_i^t \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, I, t = 1, \dots, T. \quad (3.12)$$

Onde:

$t$ : índice do período,  $t = 1, \dots, T$ .

$I$ : número total de blocos nos dados de entrada.

$M_m$ : capacidade de produção da lavra.

$M_l$ : demanda mínima do processamento mineral.

$M_u$ : demanda máxima do processamento mineral.

- $g_l$ : teor mínimo permitido para o processamento mineral.  
 $g_u$ : teor máximo permitido para o processamento mineral.  
 $b_i$ : tonelagem do bloco  $i^{\text{th}}$ .  
 $g_i$ : teor do bloco  $i^{\text{th}}$ .  
 $\Gamma_i$ : conjunto de blocos que deve ser retirado antes do bloco  $i$ .  
 $v_i$ : valor econômico do bloco  $i$ .  
 $d$ : taxa de desconto  
 $O$ : conjunto de blocos de minério.

$$x_i^t = \begin{cases} 1 & \text{se o bloco for extraído no período } t \\ 0 & \text{se o bloco não for extraído} \end{cases}$$

A equação 3,6 controla as restrições de precedência. As restrições 3,7 e 3,8 controlam as capacidades de produção da lavra e do processamento mineral. As restrições 3,9 e 3,10 controlam os limites de teores permitidos para o processamento mineral. A restrição 3,11 determina que cada bloco pode ser lavrado somente uma vez, e a restrição 3,12 representa que a variável de decisão é binária.

A definição de sequência de produção é um problema complexo devido à grande quantidade de blocos que compõe o modelo e ao número de restrições envolvidas. Nos subtítulos abaixo serão abordadas diferentes metodologias para resolução deste problema.

### 3.5.1. Programação Inteira Mista (PIM)

A Programação Inteira Mista pode ser considerada como um método exato para resolução do problema, mas a complexidade envolvida nesta situação faz necessária a utilização de técnicas para a sua simplificação, como por exemplo a aglomeração ou agrupamento de blocos. Nesta agregação, blocos são combinados em unidades maiores, normalmente baseados em critérios de similaridades.

Pourrahimian et al. (2012) utilizaram um algoritmo de aglomeração hierárquica de blocos para criar os chamados Cortes de Lavra. Segundo os autores, esta aglomeração é necessária por dois motivos:

- Para gerar uma sequência prática de produção, que se baseia em unidades seletivas de lavra;

- Para reduzir o número de variáveis na formulação da PIM, especialmente as variáveis binárias, para torná-las computacionalmente tratáveis.

Ramazan e Dimitrakopoulos (2004) definiram os blocos de estéril como variáveis contínuas para resolução do problema. Caccetta e Hill (2003) definiram um modelo de programação linear inteira mista, propondo a utilização de um algoritmo de “Branch and Cut”. Boland et al. (2007) propuseram um algoritmo para agregação dos blocos e sua posterior desagregação, após encontrada a solução para o problema.

### **3.5.2. Relaxação Lagrangeana**

A Relaxação Lagrangeana consiste em relaxar o problema removendo algumas restrições, conhecidas como restrições laterais, e atribuí-las à função objetivo como pesos, conhecidos como multiplicadores de Lagrange. Cada peso define uma penalidade que deve ser considerada na função objetivo como resultado do desvio de uma restrição em particular (NOGHOLI, 2015).

Asad e Dimitrakopoulos (2012) propuseram uma estrutura em grafo, considerando as incertezas de mercado e geológicas, resolvendo o problema através da utilização de algoritmo de fluxo máximo, integrado à Relaxação Lagrangeana.

Moosavi et al. (2014) apresentaram um modelo híbrido entre Relaxação Lagrangeana e algoritmo genético para resolver o problema de sequenciamento de produção. Neste caso, a Relaxação Lagrangeana é utilizada para melhorar o desempenho e acelerar a convergência do sistema, enquanto o algoritmo genético é usado para atualizar os multiplicadores de Lagrange.

### **3.5.3. Meta-heurísticas**

Segundo a definição original, meta-heurísticas são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema (GLOVER & KOCHENBERGER, 2003).

Posteriormente, a definição passou a abranger quaisquer procedimentos que empreguem estratégias para escapar de mínimos locais em espaços de busca de soluções complexas.

Em especial, foram incorporados procedimentos que utilizam o conceito de vizinhança para estabelecer meios de fugir dos mínimos locais. Uma meta-heurística, portanto, visa produzir um resultado satisfatório para um problema, porém sem qualquer garantia de otimalidade (LUZIA & RODRIGUES, 2009).

Muitos autores discutiram a aplicação de meta-heurísticas no problema de otimização da sequência de produção. Um dos métodos mais estudados é o chamado *Simulated Annealing*, que pode ser definido como uma meta-heurística para otimização que consiste em uma técnica de busca local probabilística. Esta técnica é uma metáfora de um processo térmico, chamado de recozimento, utilizado em metalurgia para obtenção de estados de baixa energia em um sólido. *Simulated Annealing* permite movimentos ocasionais de subida (mudanças que pioram a solução), em uma tentativa de reduzir a probabilidade de o sistema ficar preso em uma solução pobre, mas localmente ideal (JOHNSON et al. (1989)). Kumral e Dowd (2004) propuseram uma otimização da sequência de produção realizada em duas etapas: parametrização Lagrangeana, resultando em uma solução inicial não-ótima, e a utilização de *Simulated Annealing*, com o objetivo de refinar esta sequência inicial. Outros exemplos de aplicação desta técnica podem ser encontrados em Consuegra e Dimitrakopoulos (2009) e Kumral (2013).

Outro exemplo de meta-heurística utilizada na otimização da sequência de produção é a chamada Busca Tabu, uma meta-heurística que orienta um procedimento de busca heurística local para explorar o espaço de solução além do ótimo local. Um dos principais componentes de Busca Tabu é o uso de memória adaptativa, que cria um comportamento de procura mais flexível (GLOVER & LAGUNA, 1995). Lamghari e Dimitrakopoulos (2012) apresentaram uma abordagem baseada em Busca Tabu, de forma que, para varrer o domínio de soluções viáveis de maneira mais extensiva, duas estratégias diferentes foram utilizadas para gerar várias soluções iniciais, que foram refinadas pelo procedimento de Busca Tabu. A primeira estratégia utiliza memória de longo prazo e a segunda baseia-se no método de busca de vizinhança variável.

### **3.6. Sequenciamento da Produção Sob Incertezas Geológicas**

Geralmente os planos de lavra são derivados de um único modelo determinístico do corpo de minério, e muitas vezes este modelo é incapaz de reproduzir a variabilidade intrínseca do depósito mineralizado, resultando em planos de lavras que podem estar

comprometidos. Modelos geoestatísticos, criados a partir de simulações condicionais, oferecem bom contraponto para a avaliação das incertezas, a partir das estimativas dos riscos, para os empreendimentos de mineração. Tais modelos podem, por exemplo, representar a possível variação dos teores em setores específicos do depósito estudado, compondo uma função da curva de probabilidade, e desta forma permitir que se calcule seus índices de riscos envolvidos (SENHORINHO, 2008).

Técnicas de simulação estocásticas disponíveis para a modelagem dos atributos dos corpos de minério podem quantificar a incerteza geológica, gerando cenários equiprováveis da jazida, ajudando na melhoria do planejamento de lavra. A disponibilidade destas técnicas leva ao desenvolvimento de novos modelos de programação para integração da incerteza no planejamento de lavra (LEITE & DIMITRAKOPOULOS, 2007).

Segue abaixo uma formulação genérica para introduzir a incerteza geológica no problema de otimização da sequência de produção (ALMEIDA, 2013):

$$\text{Max } \sum_{t=i}^P [Parte1 - Parte2 + Parte3 - Parte4] \quad (3.13)$$

Onde:

$$Parte1 = \sum_{i=1}^N E\{NPV_i^t\} b_i^t$$

$$Parte2 = \sum_{j=1}^U E\{NPV_j^t + MC_j^t\} w_j^t$$

$$Parte3 = \sum_{s=1}^M E\left\{\frac{SV^t}{M}\right\} k_s^t$$

$$Parte4 = \sum_{s=1}^M \{C_u^{to} d_{su}^{to} + C_l^{to} d_{sl}^{to} + C_u^{tg} d_{su}^{tg} + C_l^{tg} d_{sl}^{tg} + C_u^{tq} d_{su}^{tq} + C_l^{tq} d_{sl}^{tq}\}$$

A *Parte1* corresponde ao VPL obtido a partir do valor econômico dos blocos  $b$ . A *Parte2* é responsável pela perda de VPL gerada pelo direcionamento dos blocos  $w$  para a pilha de estoque. A *Parte3* representa o ganho de VPL pelo processamento dos blocos  $k$ , retomados da pilha de estoque. A *Parte4* é responsável por penalizar os blocos a partir de

um custo de risco, que é definido baseado na incerteza geológica quantificada pelos cenários simulados. Desta forma, os blocos que apresentarem maior incerteza serão mais penalizados, de maneira a tentar postergar a lavra destes blocos. Os desvios na função objetivo são calculados a partir das seguintes equações:

$$\sum_{i=1}^N O_{si} b_i^t - \sum_{j=1}^U O_{sj} w_j^t + k_s^t + d_{sl}^{to} - d_{su}^{to} = O_{tar}$$

$$s = 1, \dots, M; t = 1, \dots, P. \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^N (G_{si} - G_{tar}) O_{si} b_i^t - \sum_{j=1}^U (G_{sj} - G_{tar}) O_{sj} w_j^t + \sum_{i=1}^N (GST - ) k_s^t + d_{sl}^{tg} - d_{su}^{tg} = 0$$

$$s = 1, \dots, M; t = 1, \dots, P. \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{si} b_i^t - \sum_{j=1}^U Q_{sj} w_j^t + QST^t k_s^t + d_{sl}^{tq} - d_{su}^{tq} = Q_{tar}$$

$$s = 1, \dots, M; t = 1, \dots, P. \quad (3.16)$$

Onde:

$P$ : número de períodos.

$b_i^t$ : bloco  $i$  lavrado no período  $t$  e processado no mesmo período.

$N$ : número total de blocos.

$w_j^t$ : bloco  $j$  lavrado no período  $t$  e enviado para pilha de estoque.

$MC_j^t$ : custo para enviar o bloco  $j$  para a pilha de estoque, no período  $t$ .

$U$ : número de blocos estocado.

$k_s^t$ : bloco  $s$  retomado pilha de estoque e processado no período  $t$ .

$SV^t$ : receita (por tonelada) obtida pelo processamento dos blocos retomados no período  $t$ .

$M$ : número de modelos simulados

$d_{su}^{t-}$ : quantidade em excesso de minério, teor, ou metal contido, no período  $t$ , em cada cenário  $s$

$d_{sl}^{t-}$ : quantidade em falta de minério, teor, ou metal contido, no período  $t$ , em cada cenário  $s$

$C_u^{t-}$ : custo que irá penalizar a função objetivo pelo excesso de minério, teor, ou metal contido.

$C_l^{t-}$ : custo que irá penalizar a função objetivo pelo falta de minério, teor, ou metal contido.

$o$ : tonelagem de minério.

$g$ : teor do minério.

$q$ : metal contido.

A equação 3,14 calcula os desvios relacionado à quantidade de minério. A equação 3,15 calcula os desvios relacionado aos teores, onde  $GST$  é o teor médio da pilha de estoque. A equação 3,16 calcula os desvios relacionado à quantidade de metal, onde  $QST'$  é a quantidade de metal da pilha de estoque.

A utilização de modelos simulados permite que se quantifique as incertezas geológicas, de forma a avaliar os riscos e incertezas associadas à sequência de produção definida. A Figura 3.5 exemplifica os riscos associados a um modelo estimado (determinístico). A linha em preto representa uma sequência de produção para um modelo estimado (determinístico), enquanto a linha em cinza representa sequências para modelos estocásticos. Pode-se perceber que existe uma baixa probabilidade de que a sequência definida para o modelo determinístico se realize.

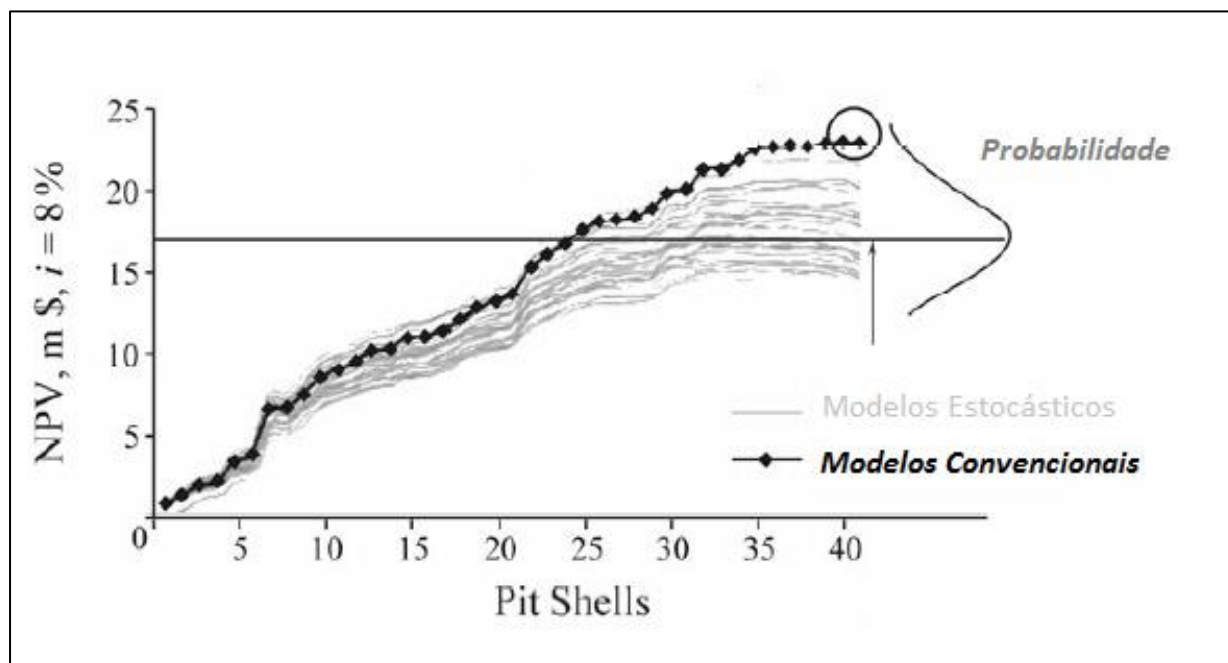


Figura 3.5 Exemplo dos riscos associados a uma sequência de produção derivada de um modelo determinístico

Fonte: Adaptado de DIMITRAKOPOULOS (2011)

Exemplos de aplicações do sequenciamento de lavra estocástico podem ser encontrados em Leite e Dimitrakopoulos (2007), Consuegra e Dimitrakopoulos (2009) e Spleit (2014).

### 3.7. Sequenciamento Direto de Blocos

As três etapas convencionais para a geração de uma sequência de produção são: definir da cava final, subdividir a cava final em fases ou *pushbacks* e sequenciar os blocos em cada fase, levando em consideração as capacidades de lavra, processo e mercado. Embora

cada uma dessas etapas seja em si um problema de otimização, os três passos, quando colocados juntos, constituem uma abordagem para parcelar o problema completo. Os recentes desenvolvimentos tornam possível a implementação de uma metodologia de otimização direta, englobando todas etapas descritas, podendo resolver o problema em modelos de tamanho real (GOYCOOLEA et al. (2013)). Esta nova metodologia é chamada de Sequenciamento Direto de Blocos.

Desde a década de 1960, por exemplo em Johnson (131 f. 1968), é conhecido que o problema de sequenciamento da produção pode ser moldado como um modelo de programação inteira. No entanto, o grande tamanho de alguns casos reais (3-10 milhões de blocos, 15-20 períodos) tornaram estes modelos impraticáveis, levando assim à utilização de numerosos métodos heurísticos (CHICOISNE et al. (2012)). Desta forma, a maioria das soluções propostas tratam o problema em duas etapas: a geração de uma solução inicial não-ótima (utilizando PIM, por exemplo), e refino desta solução, normalmente utilizando modelos heurísticos.

O Sequenciamento Direto de Blocos permite a aplicação da taxa de desconto na geração dos planos de produção, além de incorporar as incertezas geológicas aos resultados em um único processo, permitindo que modelos simulados possam ser utilizados na geração dos planos de produção. Outro ponto importante a ser ressaltado é que nesta metodologia os destinos dos blocos não são pré-definidos, diferentemente da metodologia clássica, onde o destino dos blocos deve ser definido antes do início do processo de otimização.



#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi avaliada a aplicabilidade da metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos em depósitos reais de minério de ferro, analisando as vantagens e desvantagens deste método. Para isso, foram realizados três estudos de caso, comparando esta nova metodologia com o método clássico de planejamento de lavra, que utiliza o algoritmo de Lerchs-Grossmann.

Os estudos de caso foram realizados em três depósitos de minério de ferro, sendo dois depósitos representados por modelos estimados, chamados de Depósitos A e B, e o último representando tanto por um modelo estimado quanto por um modelo simulado, chamado de Depósito C.

Em todos os cenários foi comparada a metodologia do método clássico conhecida como Melhor Caso, com os resultados obtidos no Sequenciamento Direto de Blocos, sem a aplicação de restrições operacionais.

Nos estudos utilizando os modelos estimados, o principal objetivo foi avaliar o impacto na sequência de produção ao se aplicar a taxa de desconto na geração dos planos, que é possível somente com o Sequenciamento Direto de Blocos. A aplicação correta desta taxa força os blocos com maior valor econômico a serem lavrados o mais rapidamente possível, podendo alterar a sequência de produção obtida.

No modelo simulado, foi avaliado como a incerteza geológica pode afetar os planos de produção. Esta incerteza foi utilizada na geração destes planos, de maneira a minimizá-la nos primeiros períodos da sequência. Com isso, deve-se aumentar a assertividade dos planos gerados, ou seja, estes planos terão uma maior probabilidade de serem atingidos. Além disto, ao se mensurar a incerteza dos planos, é possível avaliar o risco envolvido nesta etapa do empreendimento.

Outro aspecto avaliado neste estudo foi a utilização de pilhas de estoque. Na metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos a decisão do destino dos blocos não é predefinida, ou seja, o próprio sistema irá decidir o destino destes blocos. Desta forma, determinados blocos podem ser enviados para a pilha de estoque, caso o sistema avalie que esta medida

possa aumentar o VPL da sequência. Neste estudo será avaliado como este aspecto pode impactar na sequência de produção final.

Para aplicação do método clássico de planejamento de lavra (algoritmo de Lerchs-Grossman), será utilizado o software Micromine, versão 15.0.4, pertencente a empresa MICROMINE PTY LTDA. Já para aplicação da metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos, será utilizado o software Simsched, versão 0.9.9.2, pertencente a empresa MININGMATH. Todos os softwares utilizados pertencem ao Laboratório de Pesquisa Mineral (LPM) do departamento de engenharia de minas da UFMG.

Os modelos dos depósitos de ferro, tanto os estimados quanto os simulados, e os parâmetros técnicos e econômicos utilizados, foram fornecidos por uma empresa de mineração brasileira, cujo nome não pode ser citado devido a cláusulas de confidencialidade.

#### 4.1. Propriedades dos Modelos e Parâmetros Utilizados nos Testes

As tabelas abaixo listam os parâmetros econômicos, geotécnicos e de processamento mineral utilizados em cada um dos depósitos. Para base de comparação, serão utilizados os mesmos parâmetros em ambas metodologias.

**Tabela IV.1 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito A**

<b>Parâmetros Utilizados - Depósito A</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diluição	0,00
Recuperação de Lavra	100,00
Preço de Venda do (s) Produto (s)	US\$ 70,00/ t produto
Custo de Lavra - Minério e Estéril	US\$ 1,51/ t movimentada
Custo SG&A e Venda	US\$ 18,13/ t produto
Custo de Processo	US\$ 2,37/ t produto
CutoffMin. (Fegl)	35,00%
Recuperação Mássica Hematita	80,00%
Recuperação Mássica Itabiritos Ricos	63,00%
Recuperação Mássica Itabiritos Pobres	48,00%
Ângulo Geral de Talude	40º para minério e 30º para estéril
Taxa de Produção	40 Mt ROM / ano
Taxa de Desconto	10% ao ano

**Tabela IV.2 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito B**

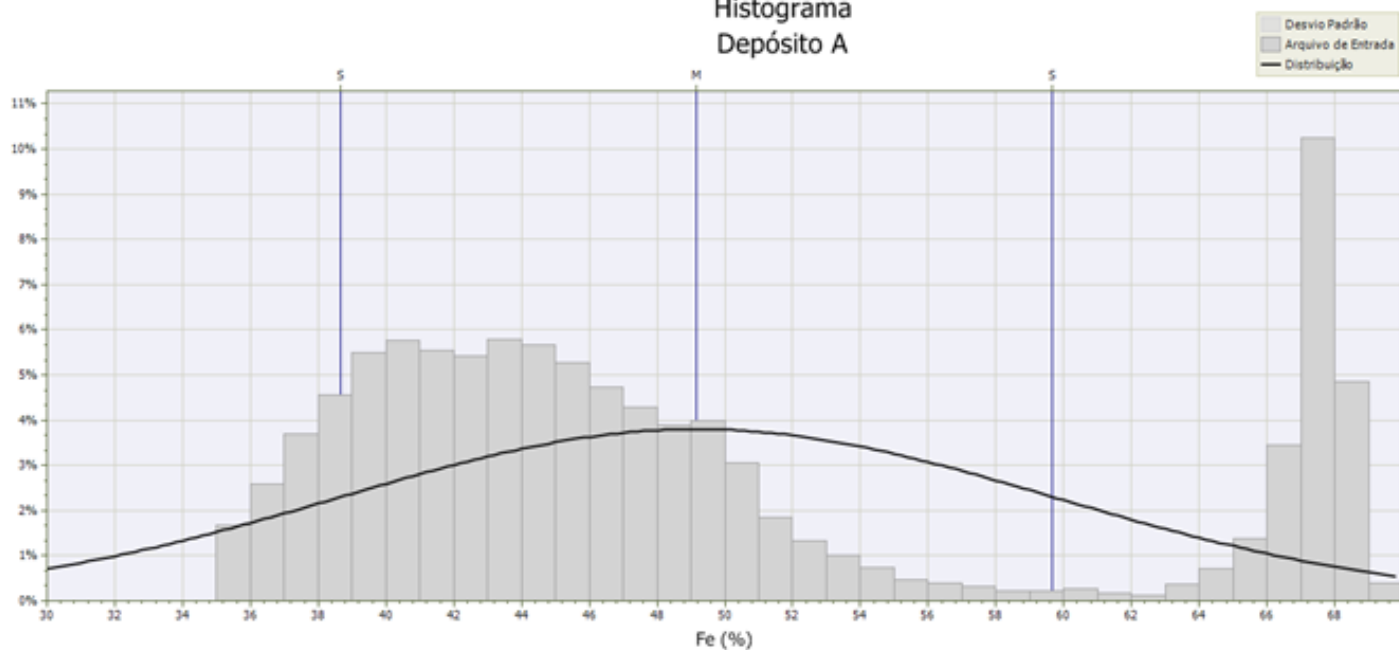
<b>Parâmetros Utilizados - Depósito B</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diluição	0,00
Recuperação de Lavra	100,00
Preço de Venda do(s) Produto(s)	US\$ 70,00/ t produto
Custo de Lavra - Minério e Estéril	US\$ 2,41/ t movimentada
Custo SG&A	US\$ 0,63/ t produto
Custo de Processo	US\$ 1,08/ t de ROM
Custo de venda	US\$ 18,13/ t produto
CutoffMin. (Fegl)	42,00%
Recuperação Mássica	96,91%
Ângulo Geral de Talude	40º para minério e 30º para estéril
Taxa de Produção	40 Mt ROM / ano
Taxa de Desconto	10% ao ano

**Tabela IV.3 - Parâmetros utilizados no sequenciamento de produção do Depósito C**

<b>Parâmetros Utilizados - Depósito C</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diluição	0.00
Recuperação de Lavra	100.00
Preço de Venda do (s) Produto (s)	US\$ 70,00/ t produto
Custo de Lavra - Minério e Estéril	US\$ 2,19/ t movimentada
Custo SG&A	US\$ 0,63/ t produto
Custo de Processo	US\$ 3,85/ t de ROM
Custo de venda	US\$ 18,13/ t produto
CutoffMin. Rico (Fegl)	52,00%
CutoffMin. Pobre (Fegl)	30,00%
Recuperação Mássica Média Min. Rico	83,38%
Recuperação Mássica Média Min. Pobre	52,00%
Ângulo Geral de Talude	40º para minério e 30º para estéril
Taxa de Produção	40 Mt ROM / ano
Taxa de Desconto	10% ao ano

Para entender a distribuição de teores de ferro dos três depósitos foram gerados histogramas, que são mostrados nas imagens abaixo:

### Histograma Depósito A

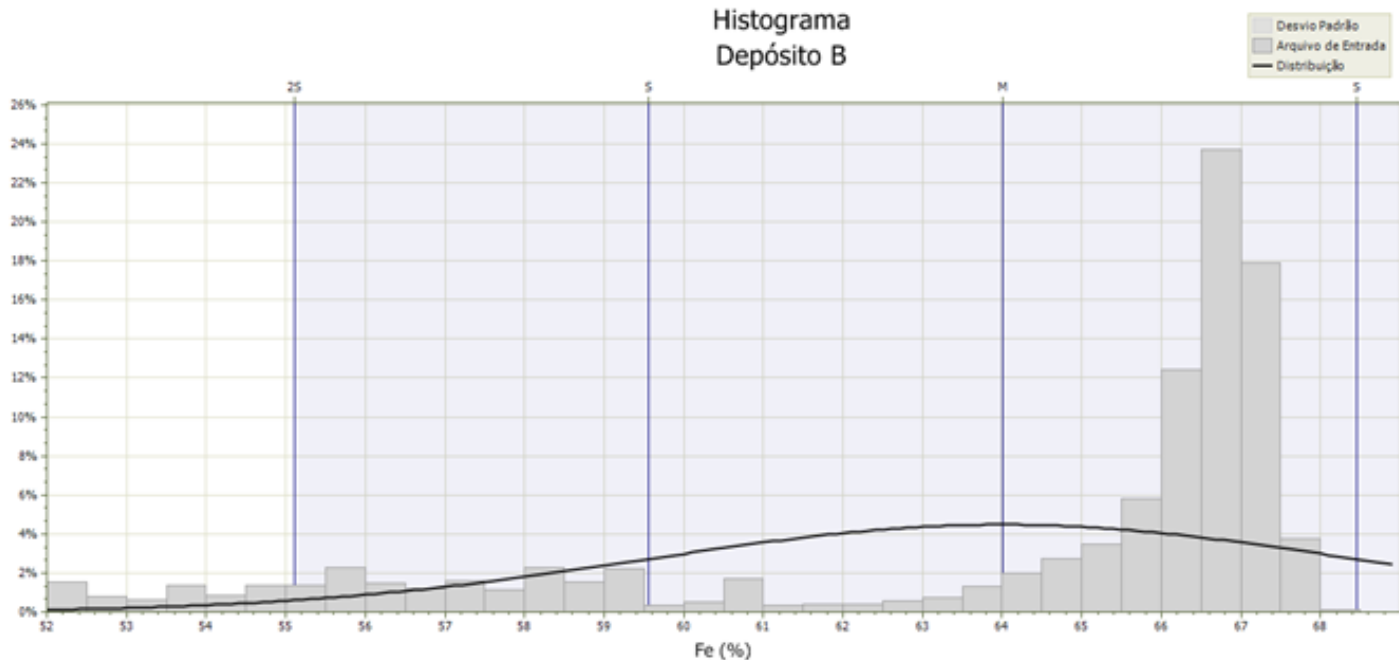


Valor Mínimo :	35.001	Variancia	110.176	Desvio Padrão Geométrico	1.223
Valor Máximo :	69.813	Desvio padrão	10.496	Estimador de Sichel	49.137
2o maior	69.812	Coef. de variação	0.213	V de Sichel	0.041
3º maior	69.812	Mediana	45.710	Gamma de Sichel	1.021
4o maior :	69.809	Ln Média	3.874	Teste qui-quadrado	499590.282
N	234666	Ln desvio padrão	0.202	Graus de liberdade	39
Média	49.176	Média geométrica	48.149		

**Figura 4.1 Histograma Teor de Ferro – Depósito A**

Fonte: Contribuição do Autor

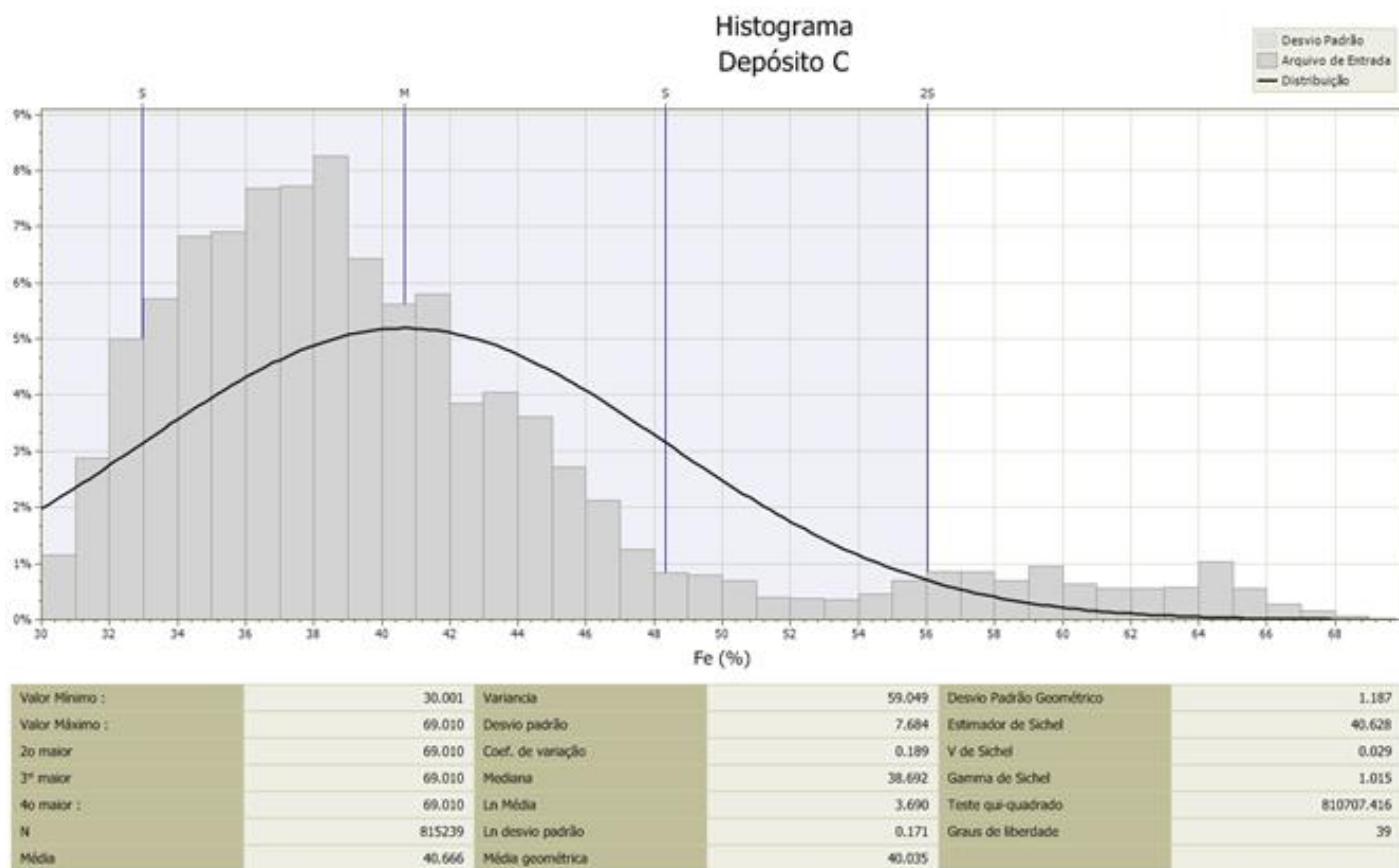
### Histograma Depósito B



Valor Mínimo :	52.007	Variancia	19.797	Desvio Padrão Geométrico	1.076
Valor Máximo :	68.328	Desvio padrão	4.449	Estimador de Sichel	64.008
2o maior	68.290	Coef. de variação	0.070	V de Sichel	0.005
3º maior	68.278	Mediana	66.361	Gamma de Sichel	1.003
4o maior :	68.225	Ln Média	4.156	Teste qui-quadrado	275710.878
N	105636	Ln desvio padrão	0.073	Graus de liberdade	33
Média	64.003	Média geométrica	63.837		

**Figura 4.2 Histograma Teor de Ferro – Depósito B**

Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 4.3 Histograma Teor de Ferro – Depósito C**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

## 5. DISCUSSÕES E RESULTADOS

### 5.1. Resultados Depósito A

O Depósito A é representado por um modelo estimado (determinístico), e suas características iniciais se encontram na Tabela V.1:

**Tabela V.1 - Características do Modelo de Blocos do Depósito A**

<b>Características do Modelo de Blocos do Depósito A</b>	
Tamanho do bloco em X	12,5 - 50 m
Tamanho do bloco em Y	12,5 - 50 m
Tamanho do bloco em Z	15 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em x	12,5 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em y	12,5 m
Número de blocos	839.369
Rotação do Modelo	28º

O modelo original estava rotacionado e sublocado. O software de Sequenciamento Direto de Blocos utilizado neste estudo somente consegue tratar problemas com modelos de blocos regulares e não rotacionados. Desta forma o modelo original foi ajustado para atender estes requisitos.

Idealmente tentou-se regularizar os blocos para o tamanho original dos blocos (50 x 50 x 15 metros), de modo a evitar uma suavização excessiva da variabilidade dos teores do depósito. Mas verificou-se que ao se regularizar os blocos para este tamanho, se descaracterizavam alguns domínios geológicos do modelo. Desta forma, para regularização do tamanho dos blocos, foi utilizado o tamanho mínimo do sub-bloco, com intuito de manter a representatividade de todas as litologias. A regularização dos blocos provocou um aumento na quantidade de blocos, tornando o sistema de maior complexibilidade computacional, porém mais fidedigna ao modelo original. Como o intuito deste estudo é a comparação entre as metodologias, esta abordagem foi considerada adequada para prosseguimento dos estudos. As características do modelo regularizado se encontram na Tabela V.2:

**Tabela V.2 - Características do Modelo de Blocos Regularizado do Depósito A**

<b>Características do Modelo de Blocos de Conceição Regularizado</b>	
Tamanho do bloco em X	12,5 m
Tamanho do bloco em Y	12,5 m
Tamanho do bloco em Z	15 m
Número de blocos	3.019.104

Para execução dos testes utilizando as duas metodologias propostas, Sequenciamento Direto de Blocos (SDB) e Lerchs-Grossmann (LG), foi utilizado o modelo regularizado. O software que utiliza a metodologia LG suporta modelos sub-blocados e rotacionados, mas para efeito comparativo decidiu-se utilizar o mesmo modelo em ambos os testes.

A Figura 5.3 mostra que o SDB possui tendência a lavar os teores mais ricos nos primeiros anos do sequenciamento. Em compensação, a quantidade de estéril também é superior neste período. Sistemas que aplicam corretamente o fator de desconto se tornam mais ávidos por teores mais elevados (MATHERON, 1963). O algoritmo de LG aplica a taxa de desconto somente na definição da sequência de produção, de modo que esta taxa não é aplicada na geração dos *pushbacks*. Como a sequência está limitada a seguir os *pushbacks*, esta “avidez” causada pela taxa de desconto é suavizada. Analisando a Figura 5.4 percebe-se que o VPL destes primeiros anos é superior no Cenário SDB, de forma que em termos de fluxo de caixa esta estratégia apresenta melhores resultados. Ao se analisar o VPL acumulado (Figura 5.5), o Cenário SDB gerou um valor 9,18% maior que o Cenário LG.

Outro ponto a ser destacado é que a vida útil do empreendimento é menor no Cenário SDB. Isto se deve ao fato do sistema não está preso a uma Cava Final já definida, de modo que ele pode paralisar a sequência quando o VPL não aumentar mais significativamente. É importante ressaltar que neste estudo, na metodologia de LG, a cava final escolhida foi gerada para o preço de venda final. Muitas vezes se escolhe uma cava final gerada para valores menores que o preço de venda final, pois percebe-se que a partir de um determinado ponto, o VPL das cavas tende a estabilizar ou decrescer. Mas para efeito comparativo, este aspecto não afeta drasticamente o VPL da sequência, pois as maiores diferenças entre os valores obtidos pelas duas metodologias ocorrem justamente nos primeiros anos do empreendimento.

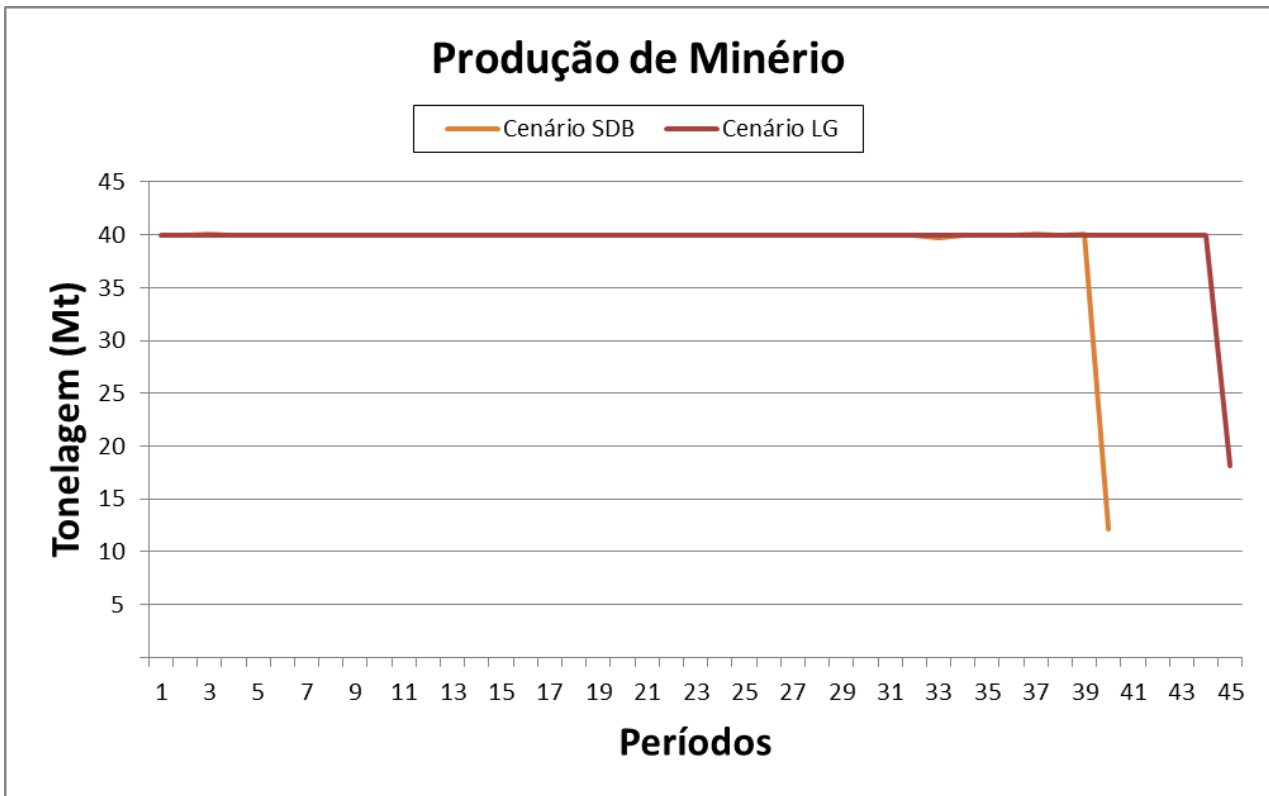


Figura 5.1 Resultados Produção de Minério – Depósito A  
Fonte: Contribuição do Autor

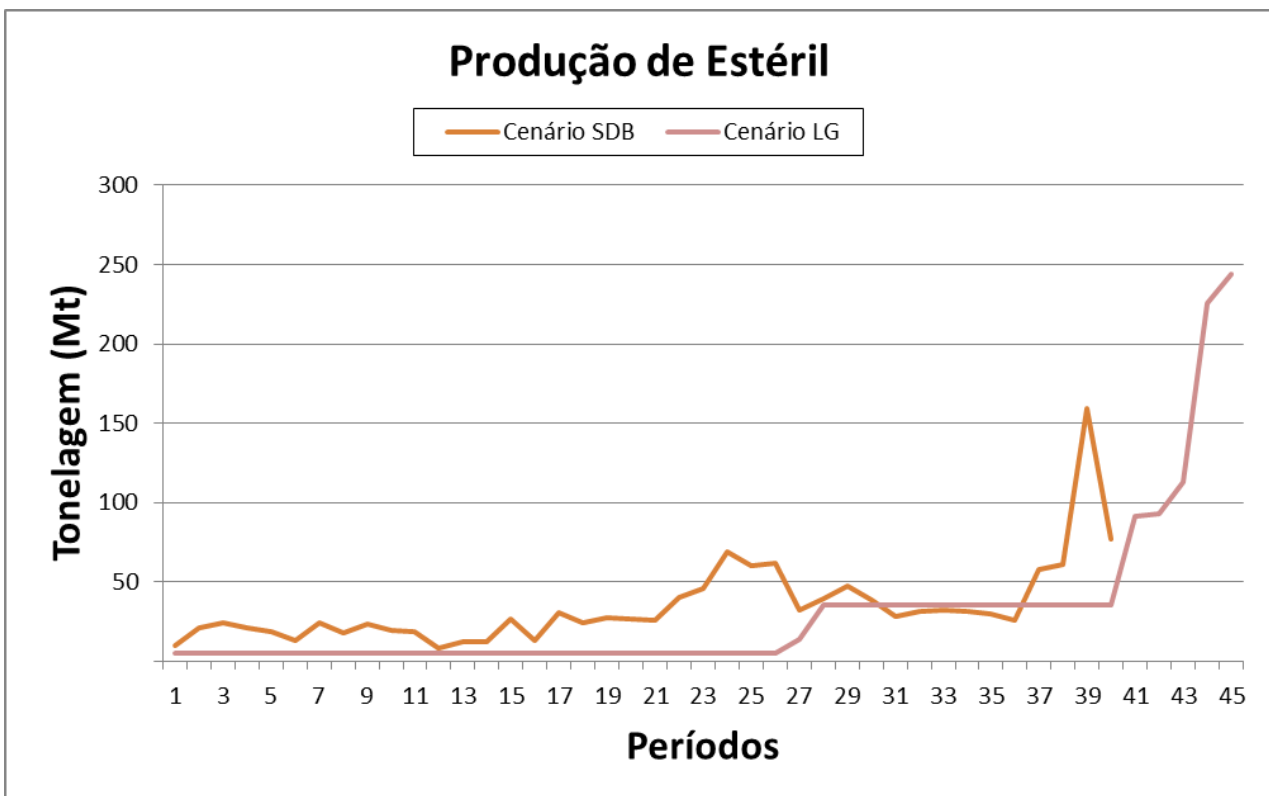
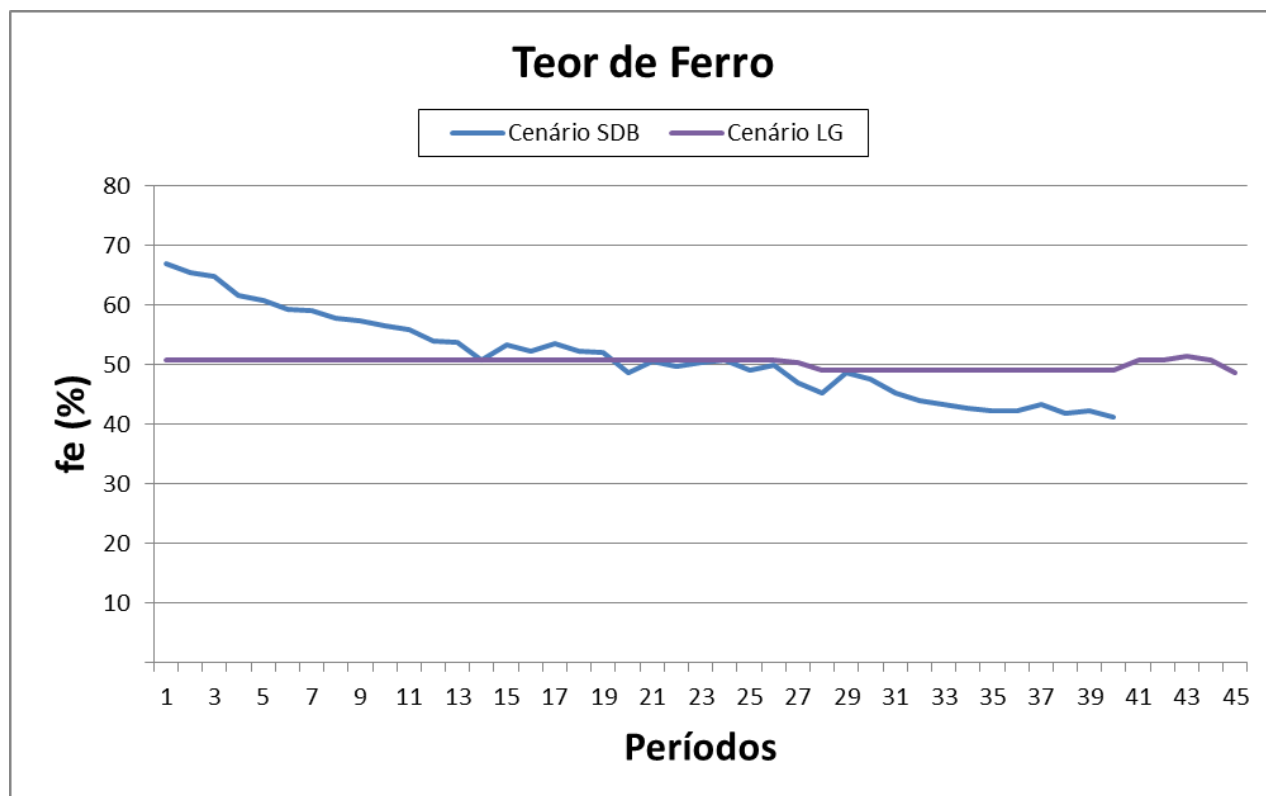
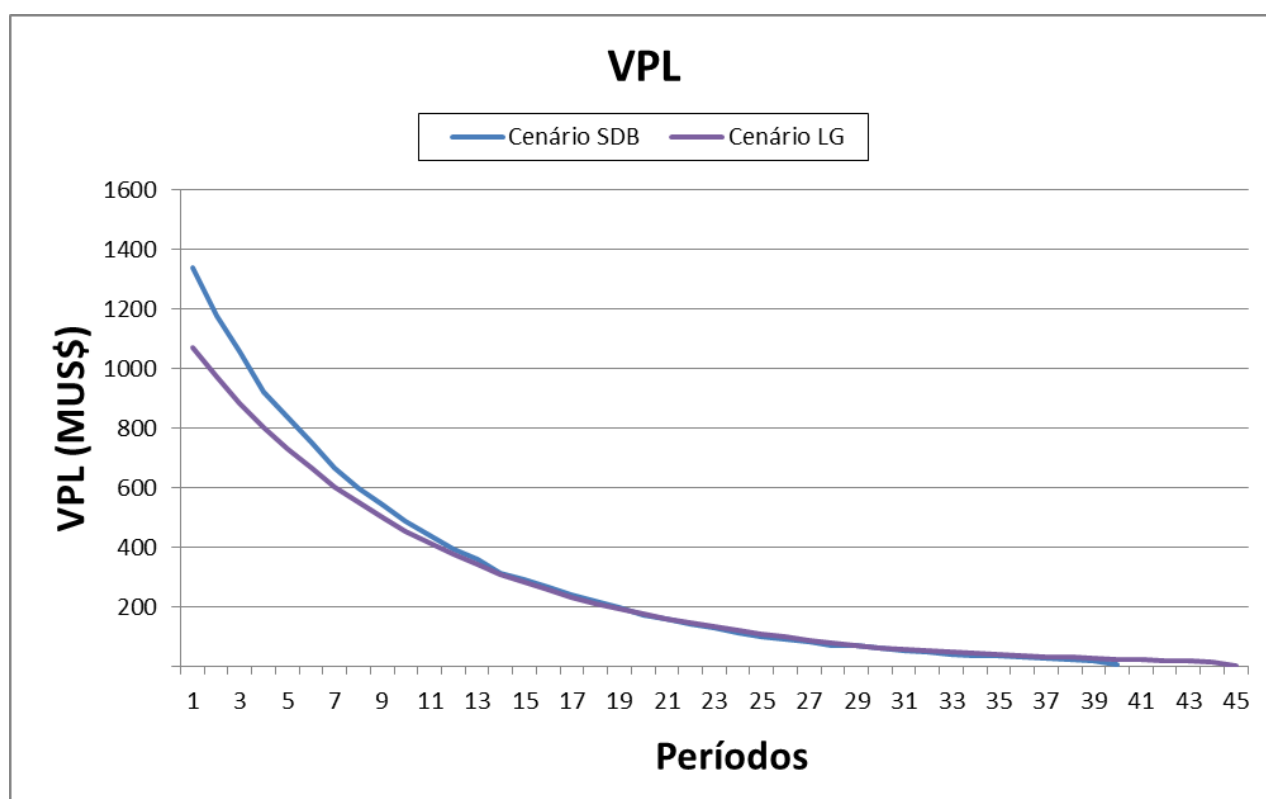


Figura 5.2 Resultados Produção de Estéril – Depósito A  
Fonte: Contribuição do Autor

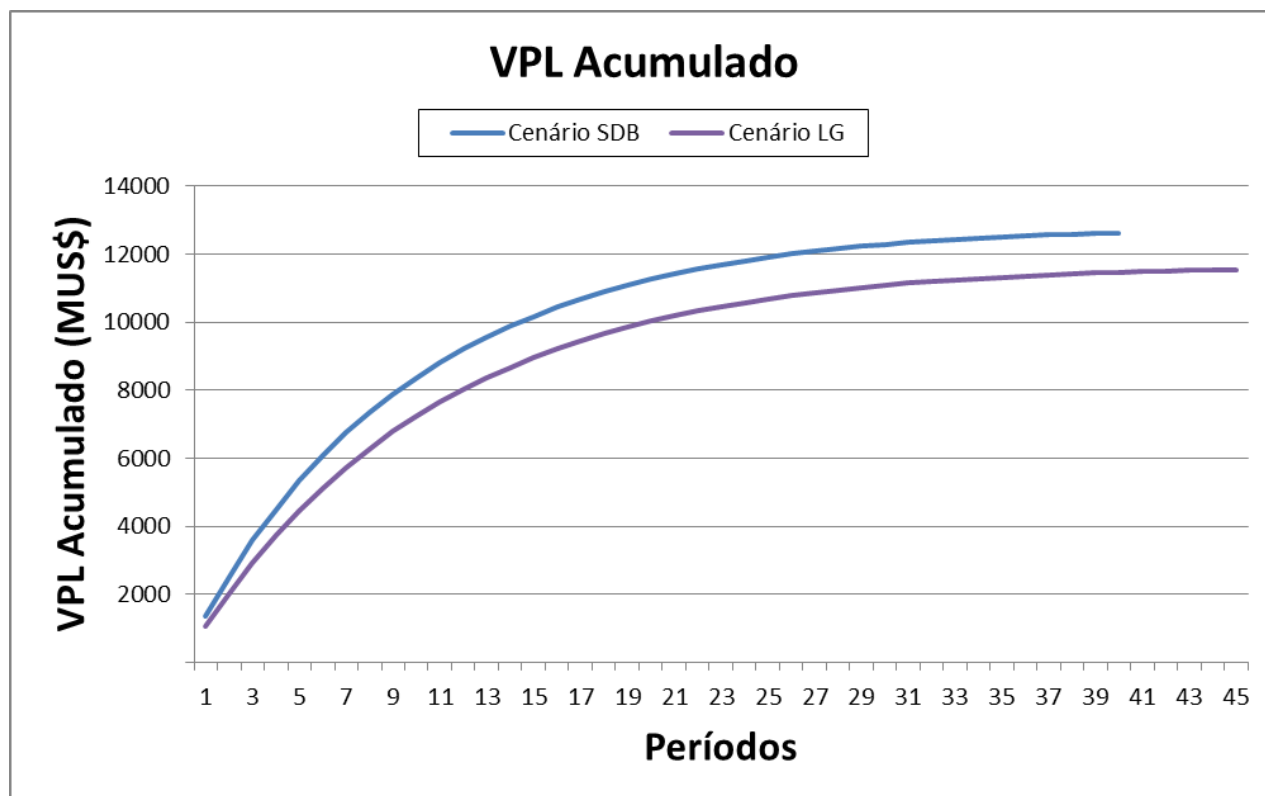




**Figura 5.3 Resultados Teores de Ferro – Depósito A**  
 Fonte: Contribuição do Autor

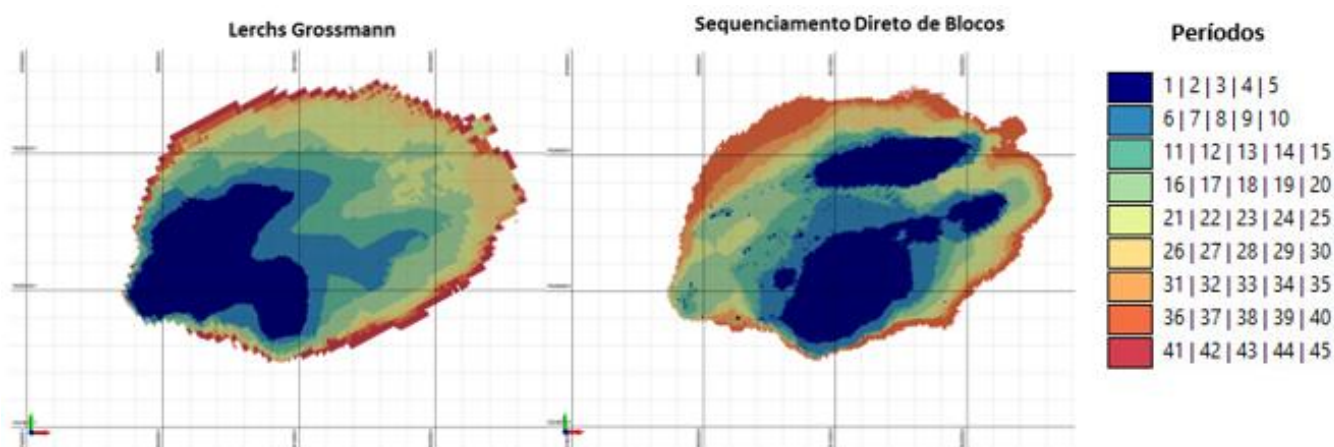


**Figura 5.4 Resultados VPL – Depósito A**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.5 Resultados VPL Acumulado – Depósito A**  
 Fonte: Contribuição do Autor

A Figura 5.6 mostra os blocos lavrados por faixas de períodos, para as duas metodologias. Percebe-se que existe uma grande diferença, principalmente nos primeiros períodos, com relação a região que cada método decidiu lavar. Este aspecto demonstra que, somente a aplicação correta da taxa de desconto, pode afetar drasticamente os resultados.



**Figura 5.6 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Depósito A**  
 Fonte: Contribuição do Autor

### 5.1.1. Sequenciamento de Produção Com Recuperação Mássica Variável

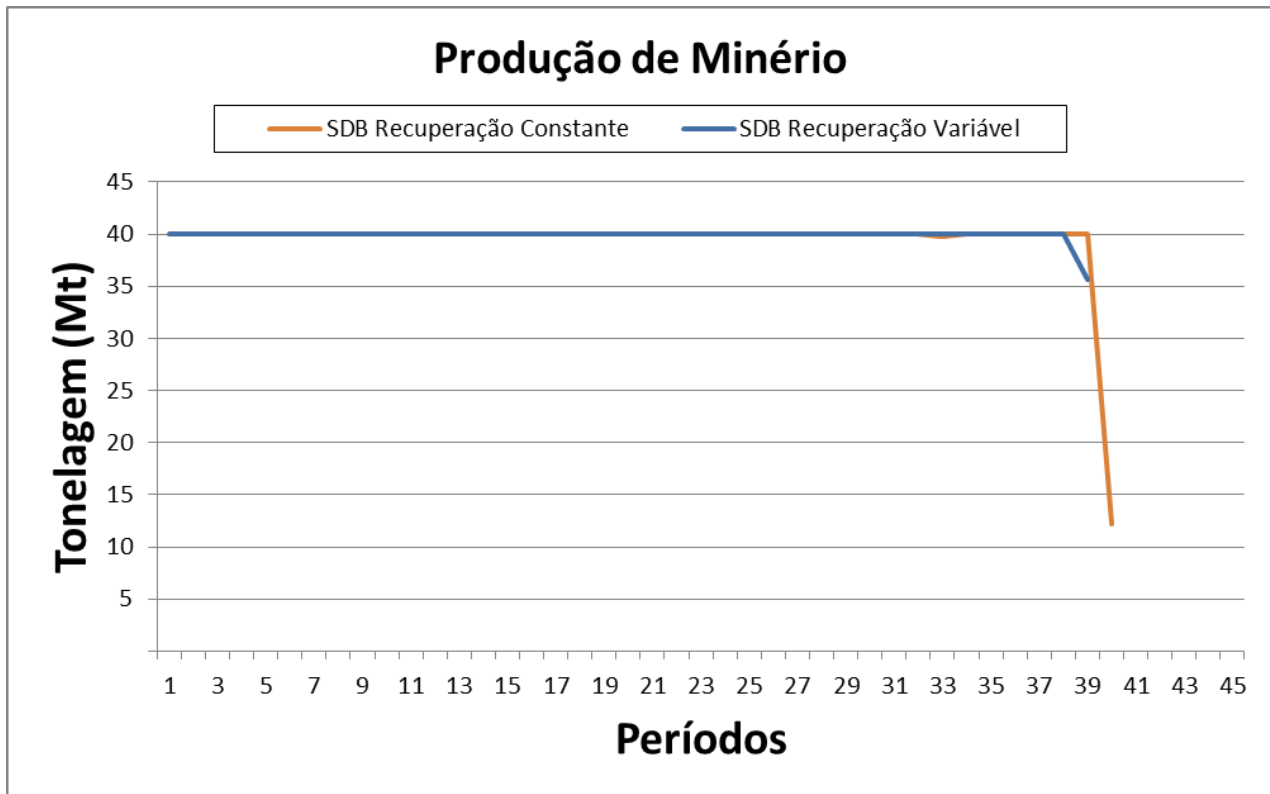
Ao se analisar os resultados obtidos no primeiro teste de sequenciamento realizado no Depósito A, percebeu-se que o SDB conseguiu vantagens no VPL do projeto, ao lavar as regiões mais ricas do depósito primeiramente. Esta característica também ocorre no LG, mas ela é melhor explorada no SDB, pelo fato que este trabalha aplicando a taxa de desconto já na geração de cada período.

O primeiro teste de sequenciamento realizado no Depósito A utilizou uma recuperação mássica constante para as litologias, conforme Tabela IV.1. Desta forma, todos blocos de uma mesma litologia terão a mesma receita, perdendo a vantagem que poderia existir ao retirar os blocos mais ricos primeiramente, dentro desta mesma litologia. Baseado nisso, decidiu-se calcular uma recuperação mássica para cada bloco, respeitando a recuperação média de cada litologia, de modo a avaliar como esta estratégia impactaria no resultado. Para a litologia hematita, adotou-se uma recuperação média para todos blocos. Foram utilizados os seguintes parâmetros nesse cálculo:

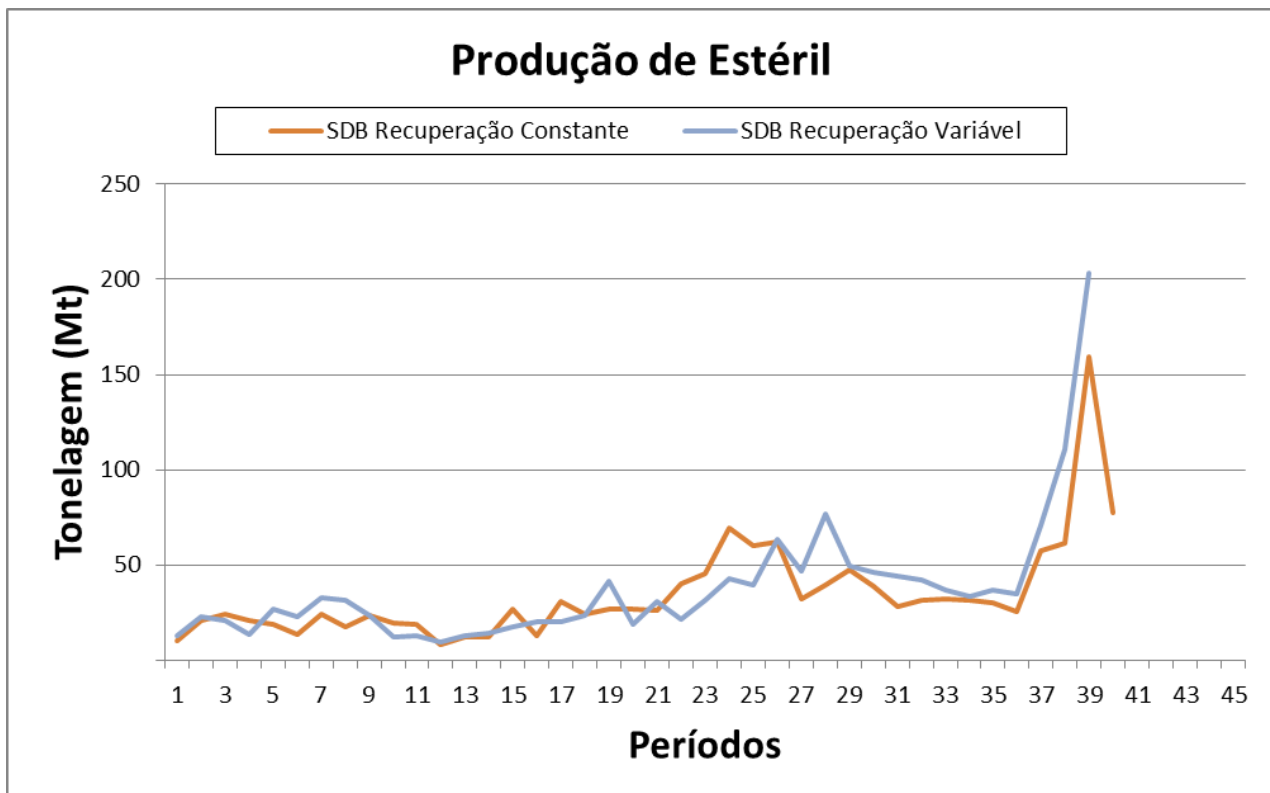
**Tabela V.3 - Parâmetros para Cálculo da Recuperação Mássica Bloco a Bloco – Depósito A**

Litologia	Teor Médio do Modelo (%)	Teor do Concentrado (%)	Recuperação Mássica Média (%)	Recuperação Metalúrgica Média (%)
Hematita			80,00	
Itabirito Rico	47,40	64,00	63,00	85,06
Itabirito Pobre	39,20	64,00	48,00	78,37

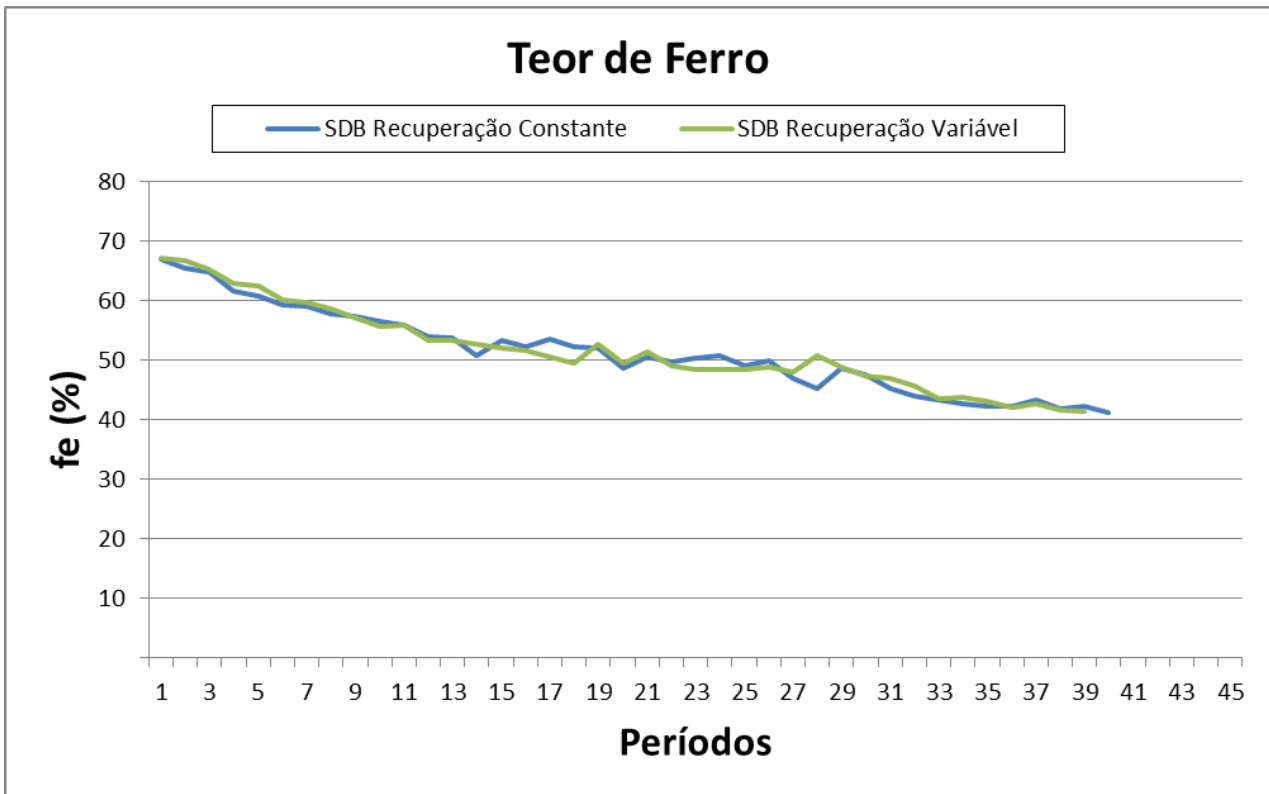
Para este teste utilizou-se somente a metodologia de SDB para geração da sequência de lavra. Os resultados se encontram nos gráficos a seguir:



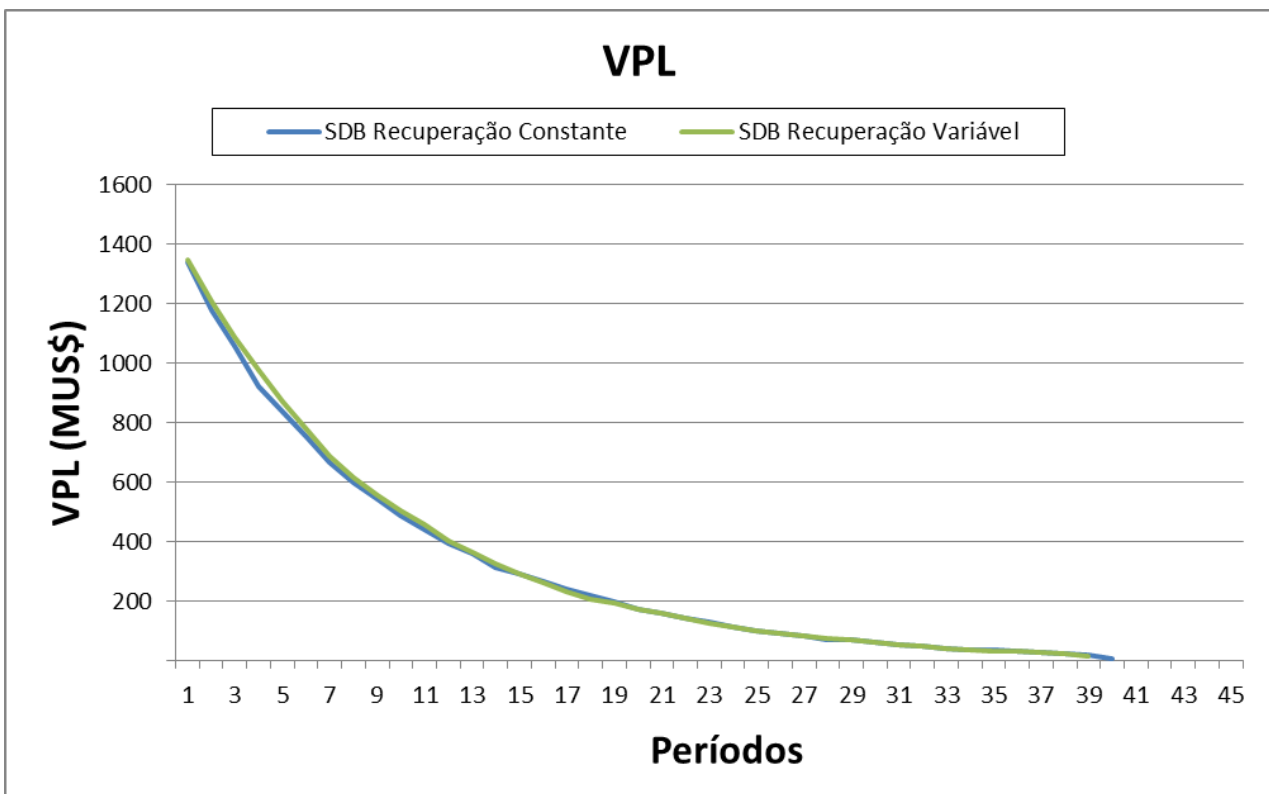
**Figura 5.7 Resultados Produção de Minério – Recuperação Mássica Variável**  
 Fonte: Contribuição do Autor



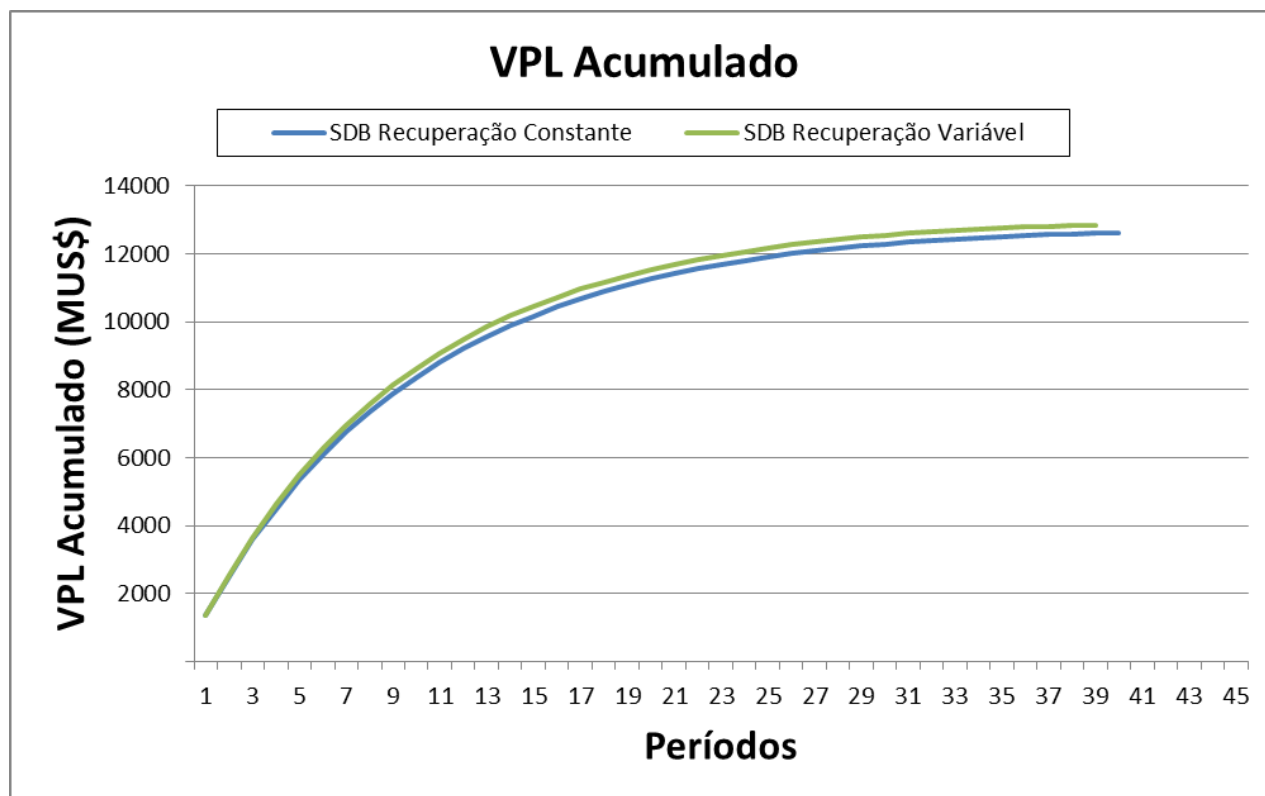
**Figura 5.8 Resultados Produção de Estéril – Recuperação Mássica Variável**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.9 Resultados Teores de Ferro – Recuperação Mássica Variável**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.10 Resultados VPL – Recuperação Mássica Variável**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.11 Resultados VPL Acumulado – Recuperação Mássica Variável**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

O cenário com recuperação variável apresentou VPL ligeiramente superior, da ordem de 1,95%. Embora este valor pareça pequeno, ele corresponde a um ganho de aproximadamente 250,0 milhões de dólares durante a vida da mina, sendo que este ganho é de aproximadamente 150,0 milhões de dólares somente nos 5 primeiros anos.

Este teste demonstrou que, ao se utilizar a metodologia de SDB, pequenas mudanças na maneira como é construída a função benefício podem afetar a sequência de produção gerada.

As tabelas contendo todos resultados dos testes se encontram no ANEXO I.

## **5.2. Resultados Depósito B**

O Depósito B é representado por um modelo estimado (determinístico), e suas características iniciais se encontram na Tabela V.4:

**Tabela V.4 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B**

<b>Características Originais do Modelo de Blocos do Depósito B</b>	
Tamanho do bloco em X	25 - 100 m
Tamanho do bloco em Y	25 - 100 m
Tamanho do bloco em Z	15 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em x	25 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em y	25 m
Número de blocos	1.088.619
Rotação do Modelo	0º

O modelo de blocos do Depósito B originalmente possuía a dimensão de blocos de 100m x 100m x 15m, com sub-blocos de até 25m x 25m x 15m. Analogamente ao Depósito A, este modelo foi regularizado, para sua utilização no sistema de SDB. A primeira opção foi regularizar o modelo para blocos com 25m x 25m x 15m, de forma a manter os resultados do modelo original. Para este tamanho de blocos, o software de SDB utilizado não convergiu para uma solução. Desta forma o modelo foi regularizado para um tamanho de 50m x 50m x 15m. As Tabela V.5 e

Tabela V.6 mostram as características dos modelos regularizados:

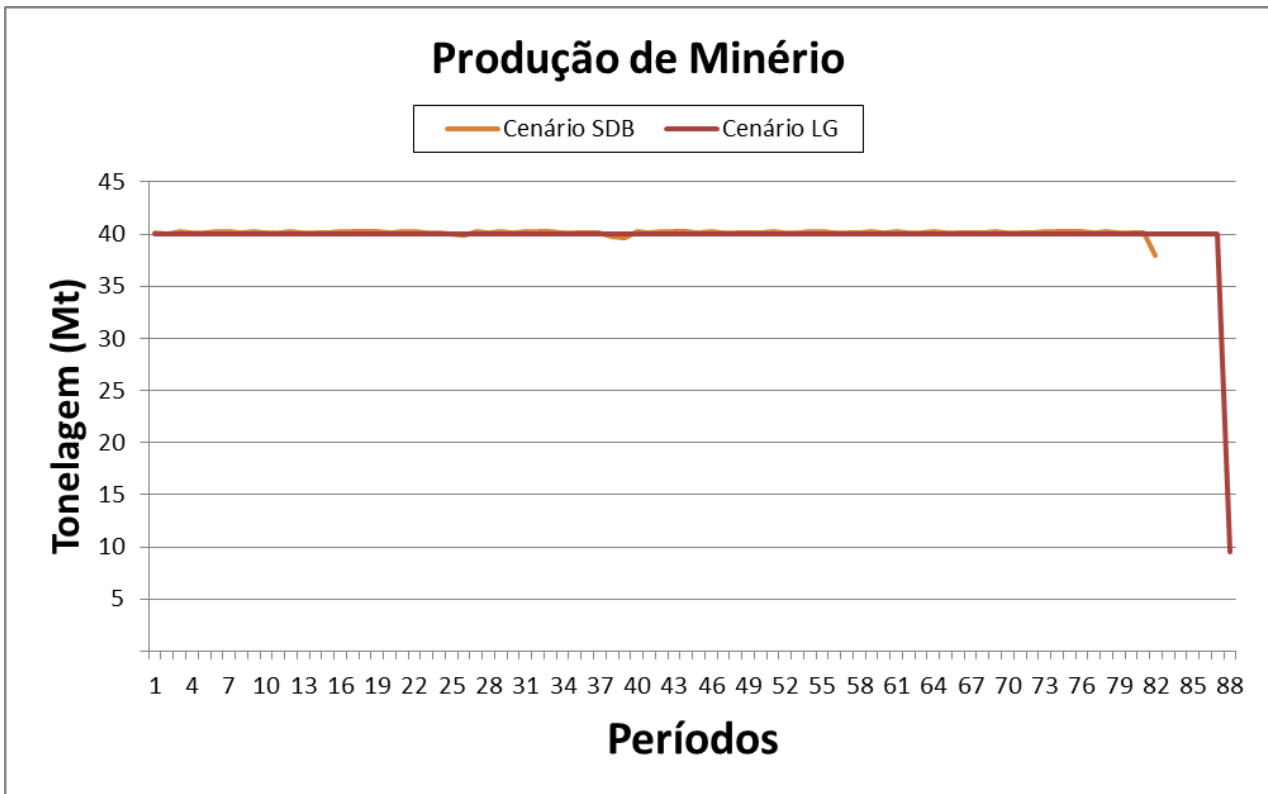
**Tabela V.5 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 25 x 25 x 15 m**

<b>Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 25 x 25 x 15 m</b>	
Tamanho do bloco em X	25 m
Tamanho do bloco em Y	25 m
Tamanho do bloco em Z	15 m
Número de blocos	2.534.150

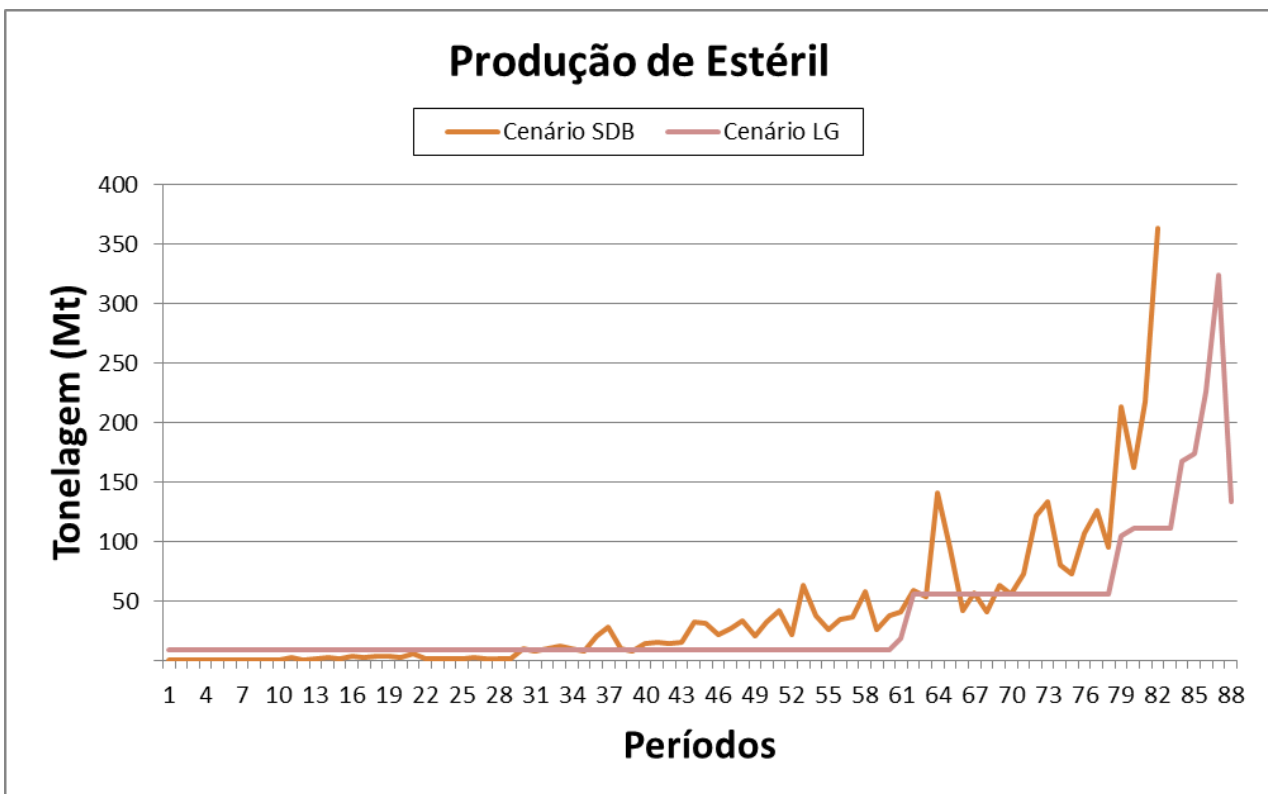
**Tabela V.6 - Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 50 x 50 x 15 m**

<b>Características do Modelo de Blocos do Depósito B Regularizado para 50 x 50 x 15 m</b>	
Tamanho do bloco em X	50 m
Tamanho do bloco em Y	50 m
Tamanho do bloco em Z	15 m
Número de blocos	636.849

Os resultados obtidos no sequenciamento da produção utilizando as duas metodologias se encontram nos gráficos abaixo:

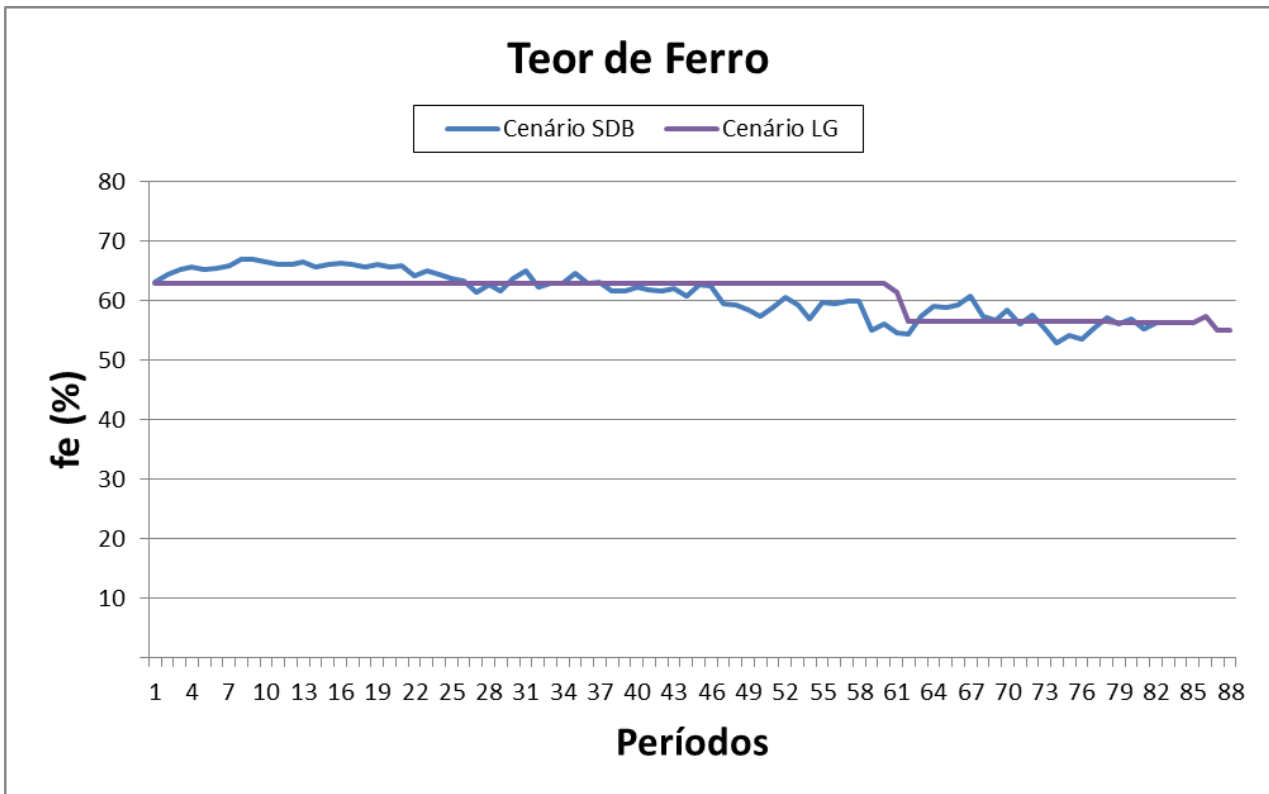


**Figura 5.12 Resultados Produção de Minério – Depósito B**  
 Fonte: Contribuição do Autor

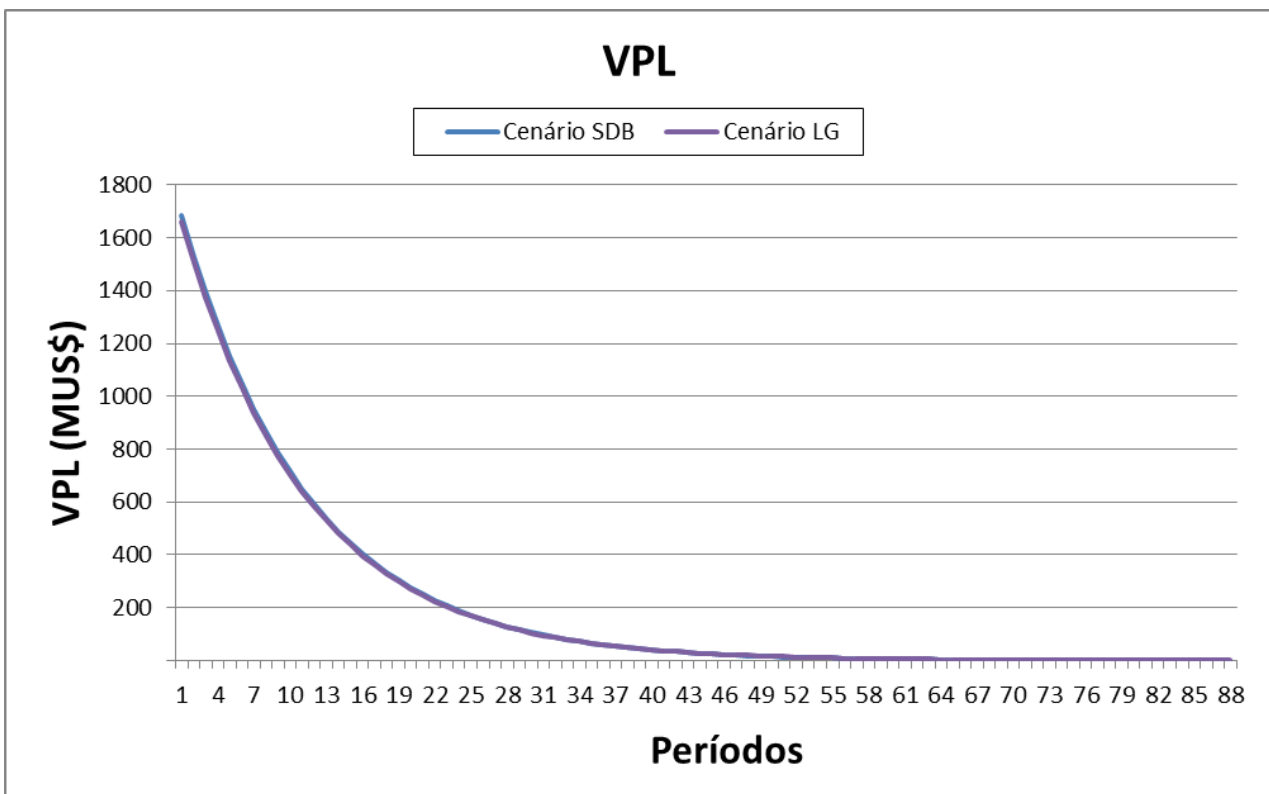


**Figura 5.13 Resultados Produção de Estéril – Depósito B**  
 Fonte: Contribuição do Autor

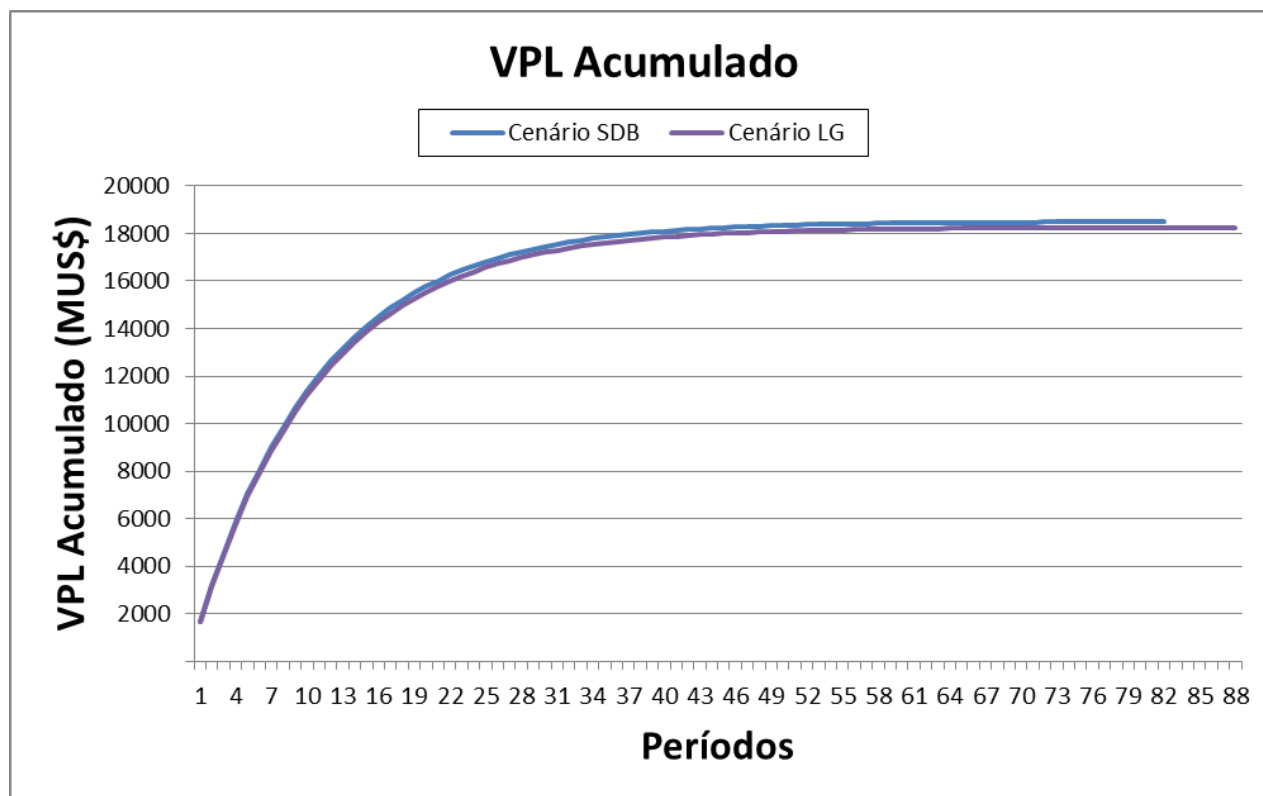




**Figura 5.14 Resultados Teores de Ferro – Depósito B**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.15 Resultados VPL – Depósito B**  
 Fonte: Contribuição do Autor

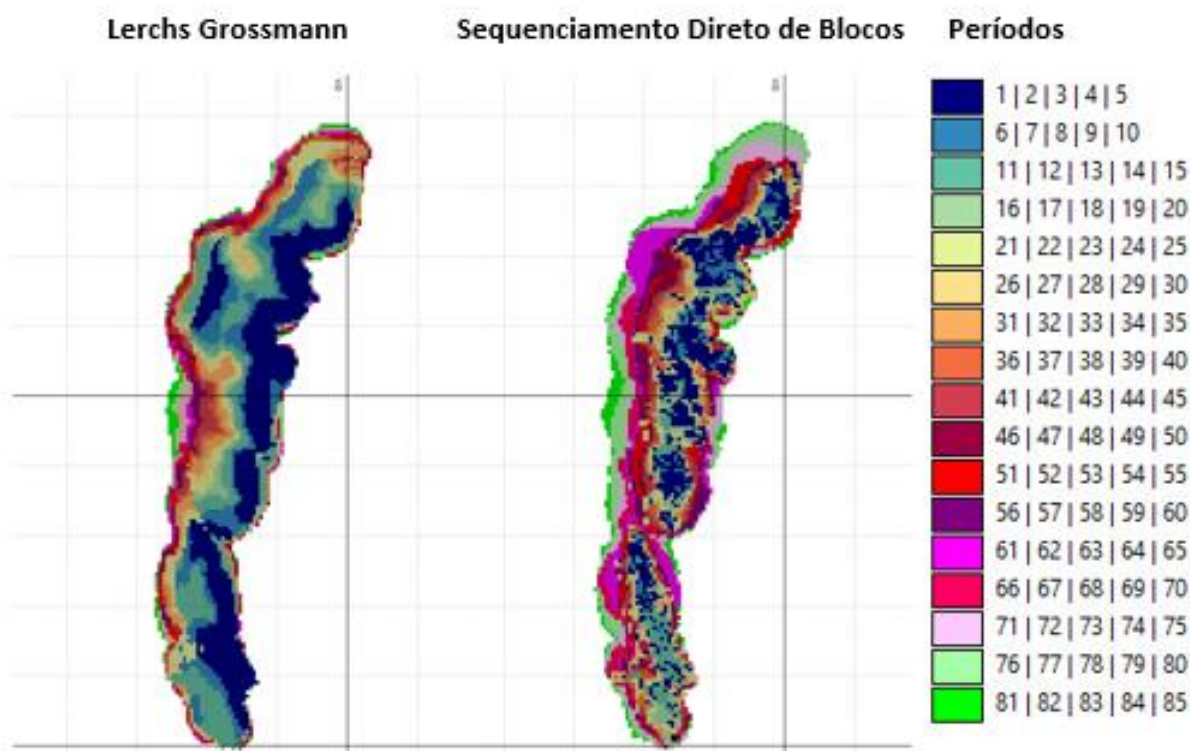


**Figura 5.16 Resultados VPL Acumulado – Depósito B**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

O valor de VPL acumulado para o Depósito B está na mesma ordem de grandeza em ambas as metodologias, sendo a diferença da ordem de 1,3%. Além disso, para os primeiros períodos da sequência de produção, os valores de VPL foram praticamente os mesmos. Isso provavelmente se deve a menor variabilidade dos teores do modelo de blocos do depósito B. Esta uniformidade suavizou a avidez do sistema, gerando uma menor diferença entre os resultados. Ao comparar os resultados do Depósito B, é possível concluir que há uma tendência de maior diferença entre as metodologias a medida que os modelos se tornam mais heterogêneos, em termos de função benefício, que é produto da recuperação mássica e conseqüentemente do teor.

A Figura 5.6 mostra os blocos lavrados por faixas de períodos, para as duas metodologias. Como pode ser observado, o resultado do SDB retirou blocos de maneira mais esparsa, provavelmente fugindo da realidade operacional da mina. Este comportamento se repetiu pelos primeiros anos da vida da mina. Além disso, a quantidade de estéril removida está espalhada quase que por toda extensão do depósito. Esta inconsistência operacional está presente em alguns artigos encontrados na literatura, como por exemplo em Farmer & Dimitrakopoulos (2015), que em seu trabalho, investiga as dificuldades para se obter um resultado operacional com técnicas baseadas em SIP e meta heurísticas. Algumas

estratégias podem ser utilizadas para suavizar este problema, como a definição de metas de produção de quantidades de estéril e a utilização de superfícies de controle.



**Figura 5.17 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Depósito B**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

As tabelas contendo todos resultados dos testes se encontram no ANEXO I.

### 5.3. Resultados Depósito C

O Depósito C é representado tanto por um modelo estimado quanto por um modelo simulado, e suas características iniciais se encontram na

Tabela V.7:

**Tabela V.7 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C**

Características Originais do Modelo de Blocos do Depósito C	
Tamanho do bloco em X	50 m
Tamanho do bloco em Y	50 m
Tamanho do bloco em Z	10 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em x	10 m
Tamanho do sub-bloco mínimo em y	10 m
Número de blocos	3.977.972
Rotação do Modelo	23°

O modelo de blocos do Depósito C originalmente possuía a dimensão de blocos de 50m x 50m x 10m, com sub-blocos de até 10m x 10m x 10m. Analogamente ao Depósito A e

B, este modelo modificado para sua utilização no sistema de SDB. A primeira opção foi regularizar o modelo para blocos com 10m x 10m x 10m, de forma a manter os resultados do modelo original. Como ocorreu para o Depósito B, para este tamanho de blocos o software de SDB utilizado não convergiu para uma solução. Desta forma o modelo foi regularizado para um tamanho de blocos de 20m x 20m x 10m. As Tabela V.8 e Tabela V.9 mostram as características dos modelos regularizados:

**Tabela V.8 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 10 x 10 x 10 m**

Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 10 x 10 x 10 m	
Tamanho do bloco em X	10 m
Tamanho do bloco em Y	10 m
Tamanho do bloco em Z	10 m
Número de blocos	7.335.066
Rotação do Modelo	0

**Tabela V.9 - Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 20 x 20 x 10 m**

Características do Modelo de Blocos do Depósito C Regularizado para 20 x 20 x 10 m	
Tamanho do bloco em X	20 m
Tamanho do bloco em Y	20 m
Tamanho do bloco em Z	10 m
Número de blocos	1.745.096
Rotação do Modelo	0

Para o Depósito C adotou-se uma recuperação mássica calculada para cada bloco, utilizando os parâmetros listados na Tabela V.10.

**Tabela V.10 - Parâmetros para Cálculo da Recuperação Mássica Bloco a Bloco – Depósito C**

Depósito C	Teor Médio do Modelo (%)	Teor do Concentrado (%)	Recuperação Mássica Média (%)	Recuperação Metalúrgica Média (%)
Minério Pobre	38,69	64,00	52,00	86,02
Minério Rico	59,29	64,00	83,38	90,00

### 5.3.1. Modelo Estimado (Determinístico) - Depósito C

Os resultados obtidos no sequenciamento da produção para o modelo determinístico do Depósito C se encontram nos gráficos abaixo:

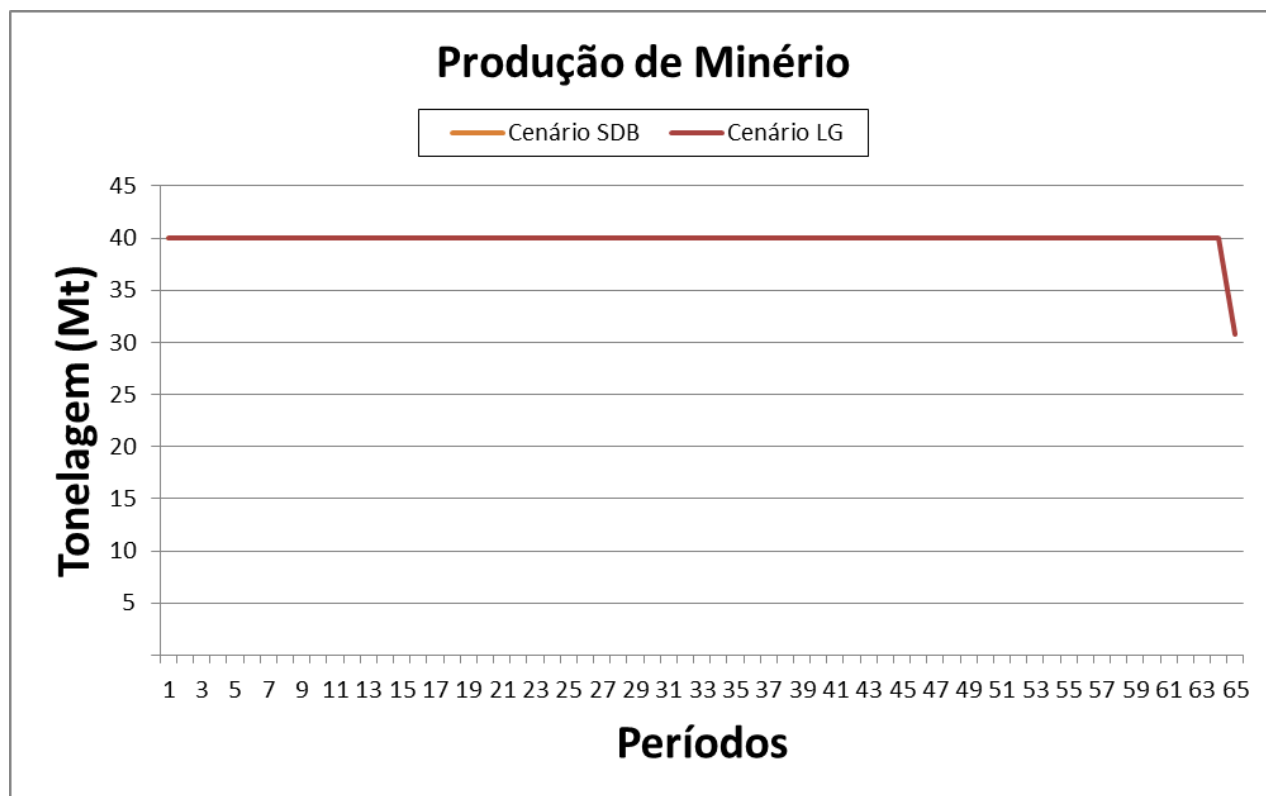


Figura 5.18 Resultados Produção de Minério – Modelo Estimado Depósito C  
Fonte: Contribuição do Autor

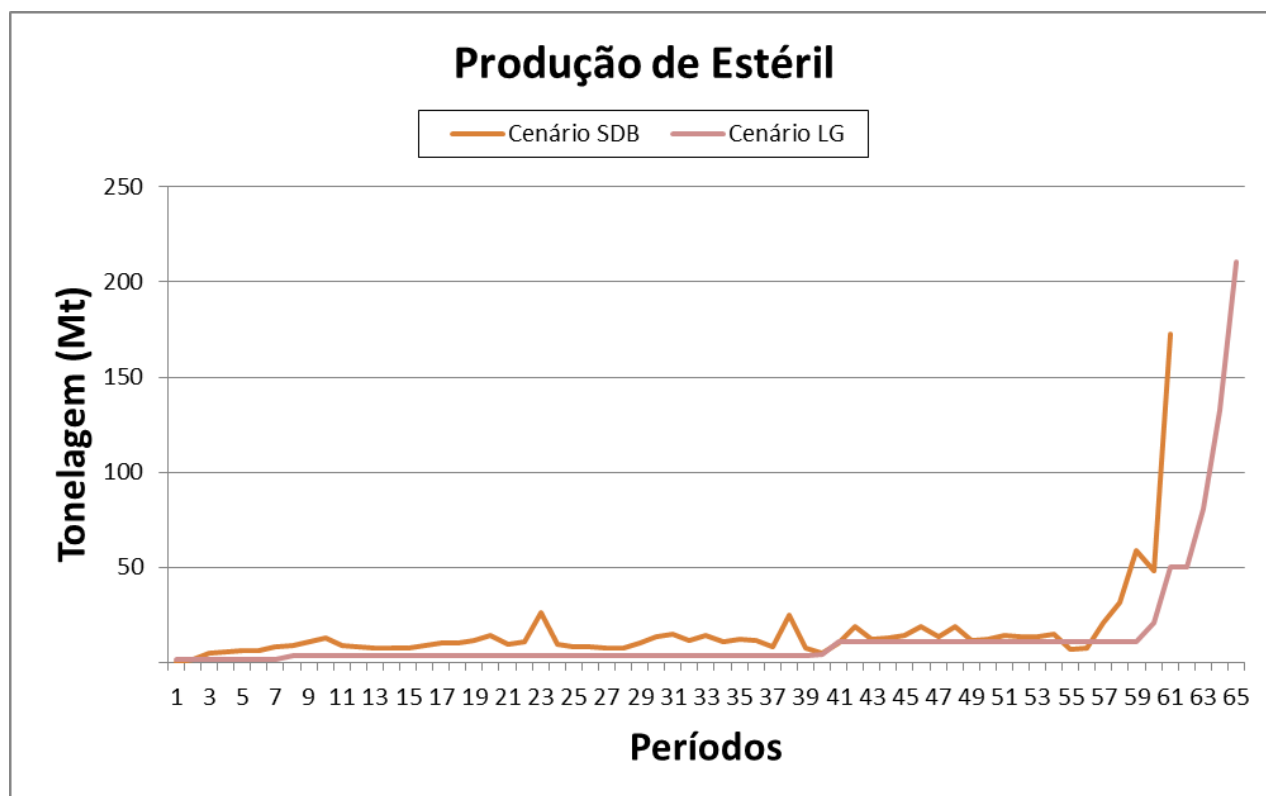
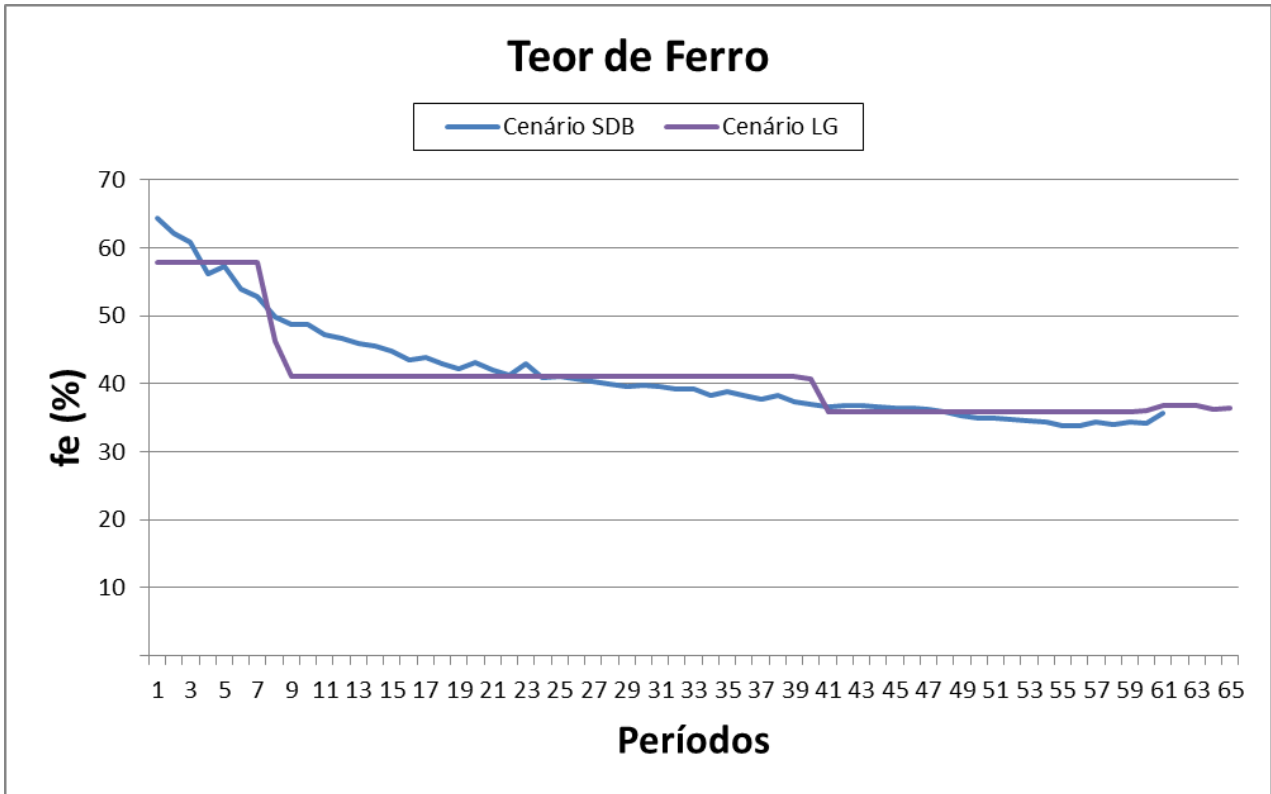
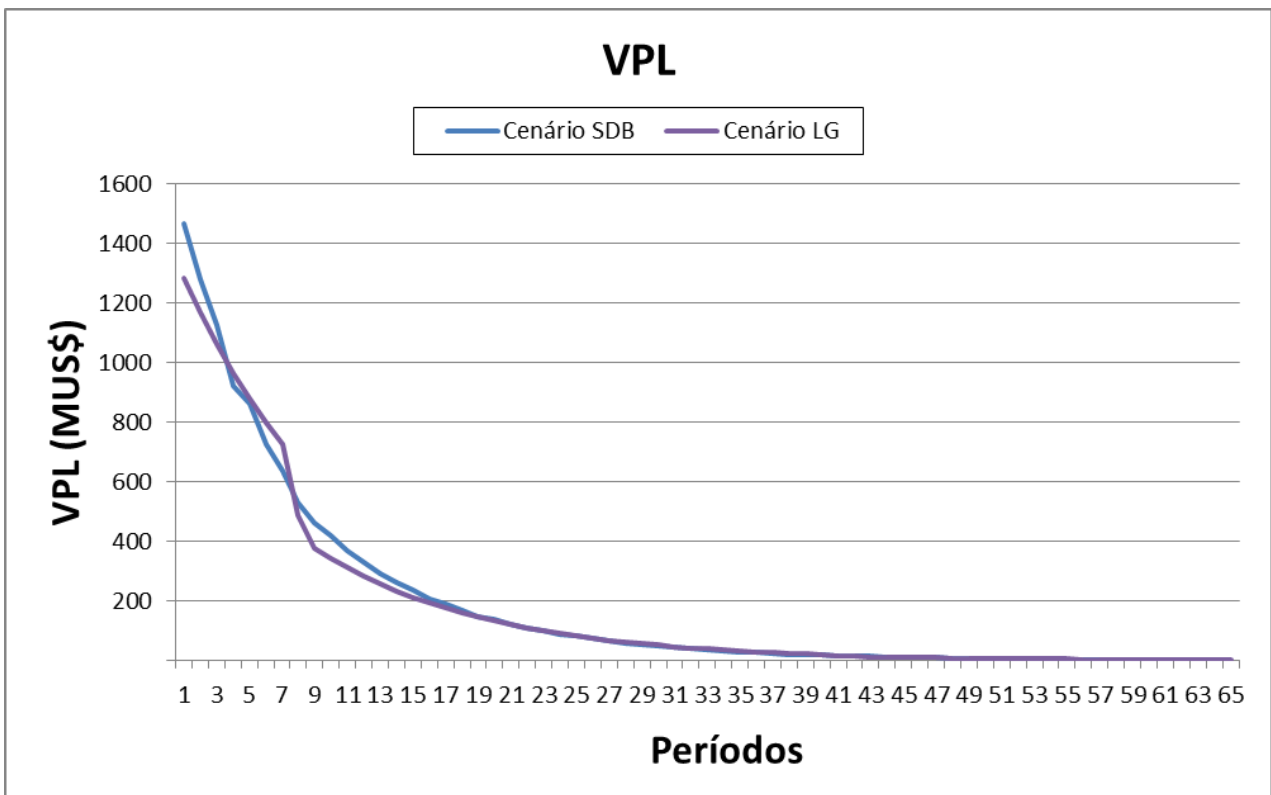


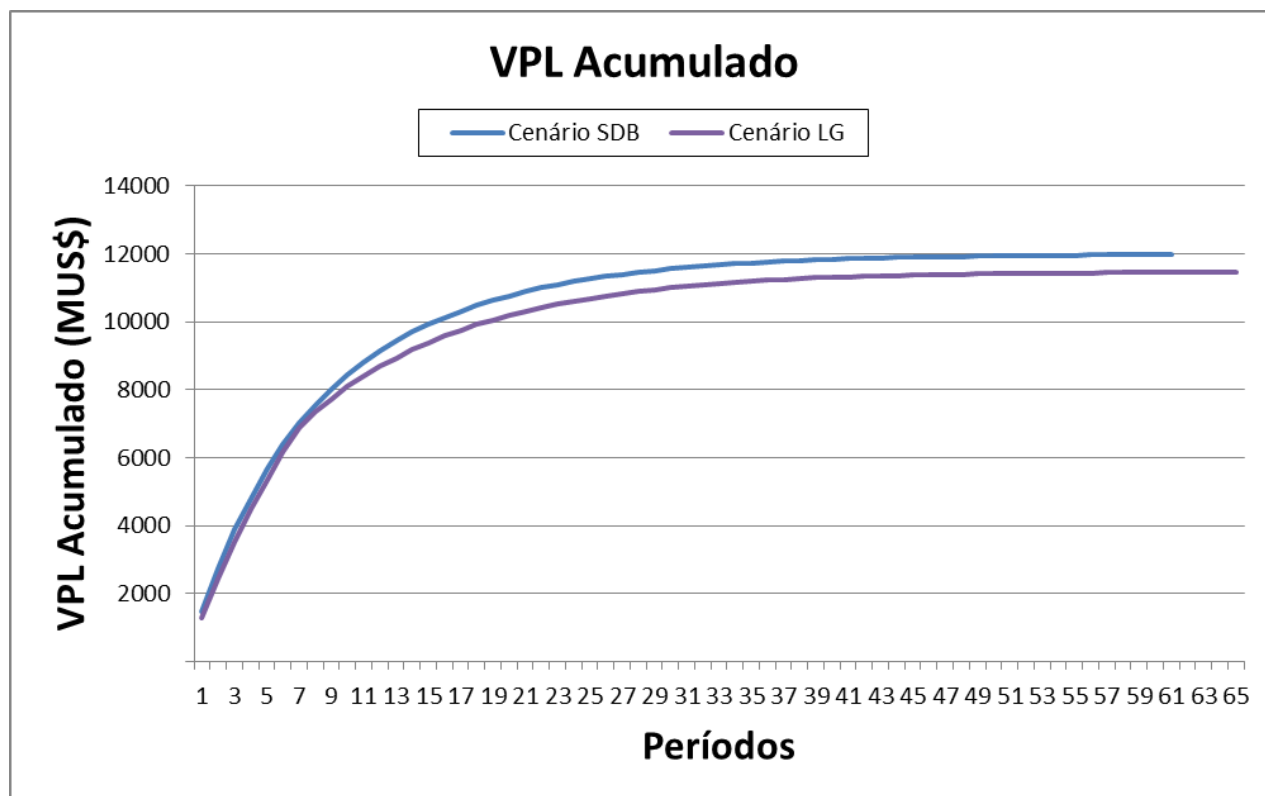
Figura 5.19 Resultados Produção de Estéril – Modelo Estimado Depósito C  
Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.20 Resultados Teores de Ferro – Modelo Estimado Depósito C**  
 Fonte: Contribuição do Autor



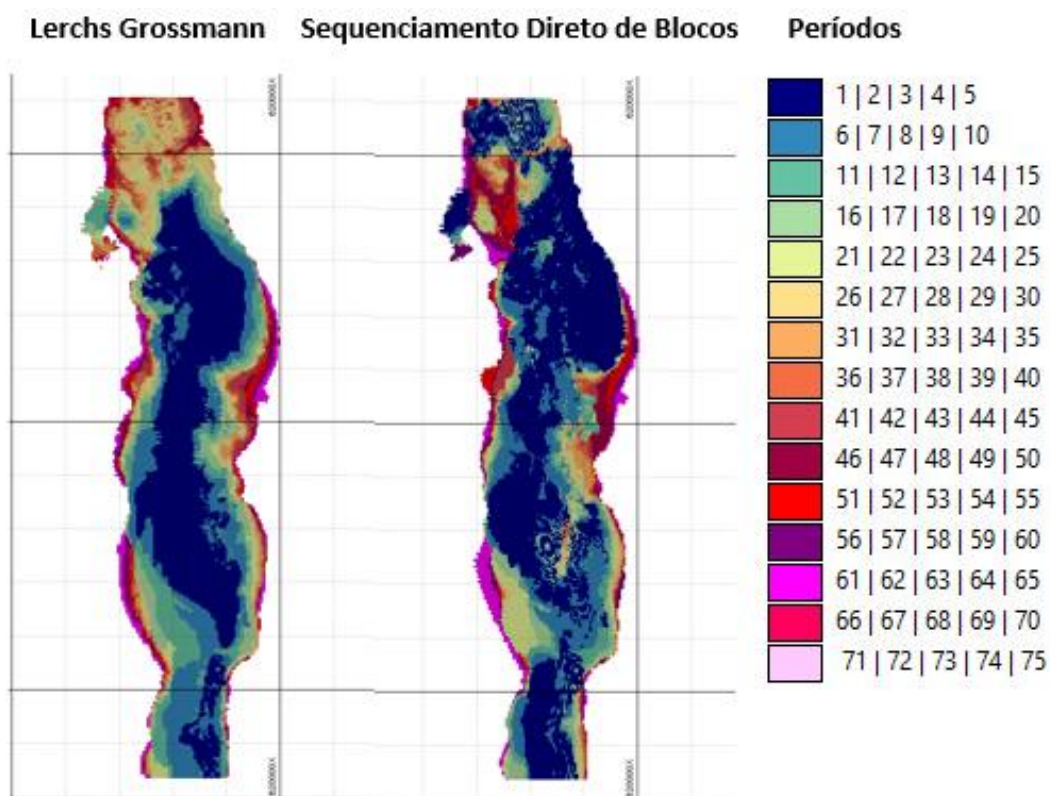
**Figura 5.21 Resultados VPL – Modelo Estimado Depósito C**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.22 Resultados VPL Acumulado – Modelo Estimado Depósito C**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

Os resultados seguiram os mesmos padrões observados para os Depósitos A e B, com uma vida da mina menor e um VPL acumulado aproximadamente 4,5%, maior, para o cenário SDB. Esse aumento de VPL está relacionado aos teores mais altos do minério lavrado nos primeiros períodos. Para os teores do cenário LG, percebe-se mudanças abruptas entre os períodos, conforme Figura 5.20. Este fato ocorre provavelmente devido ao efeito GAP.

A Figura 5.23 mostra os blocos lavrados por faixas de períodos, para as duas metodologias. Percebe-se que houve um espalhamento menor dos blocos retirados nos primeiros anos, quando comparado com os resultados do Depósito B.



**Figura 5.23 Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Modelo Estimado Depósito C**  
 Fonte: Contribuição do Autor

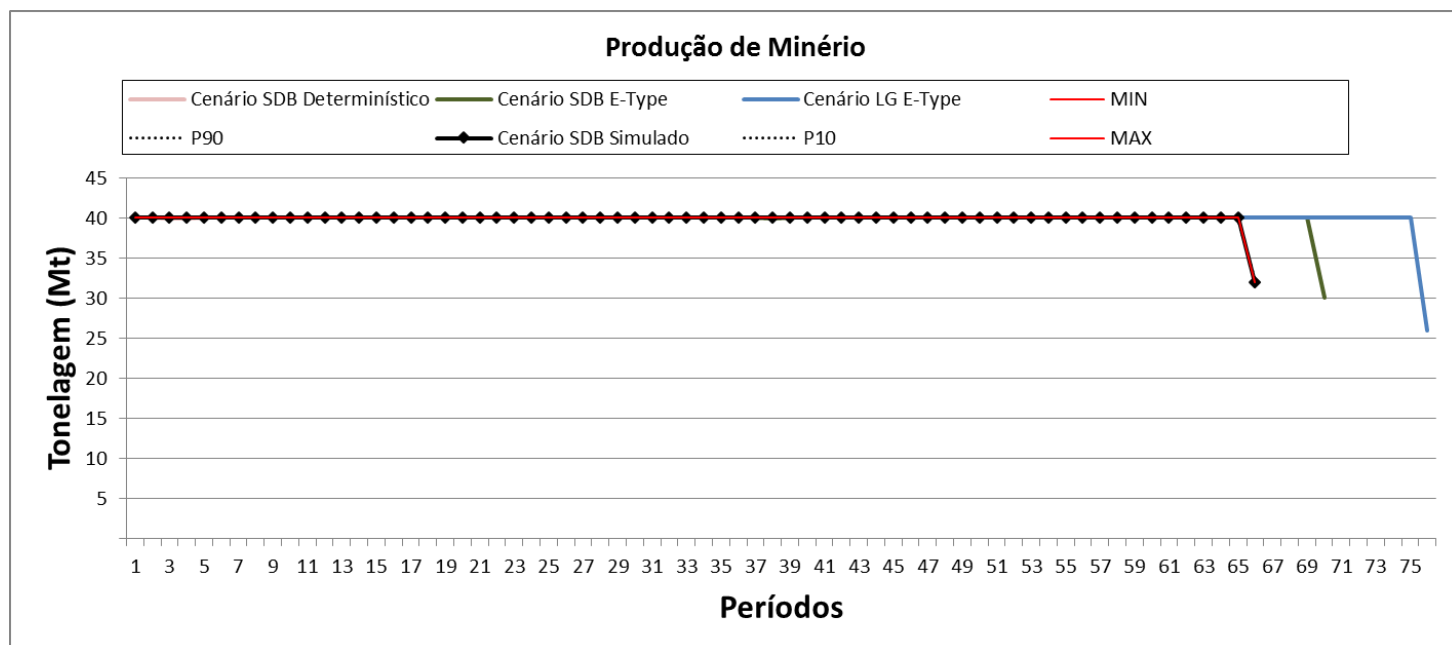
### 5.3.2. Modelo Simulado - Depósito C

O modelo de blocos simulado do Depósito C contém 25 simulações para o teor de ferro. Essas simulações foram geradas utilizando o método de Passeios Aleatórios. A metodologia de SDB utiliza uma função benefício para cada simulação, que é calculada a partir dos teores. Para comparação dos resultados, utilizou-se 4 cenários:

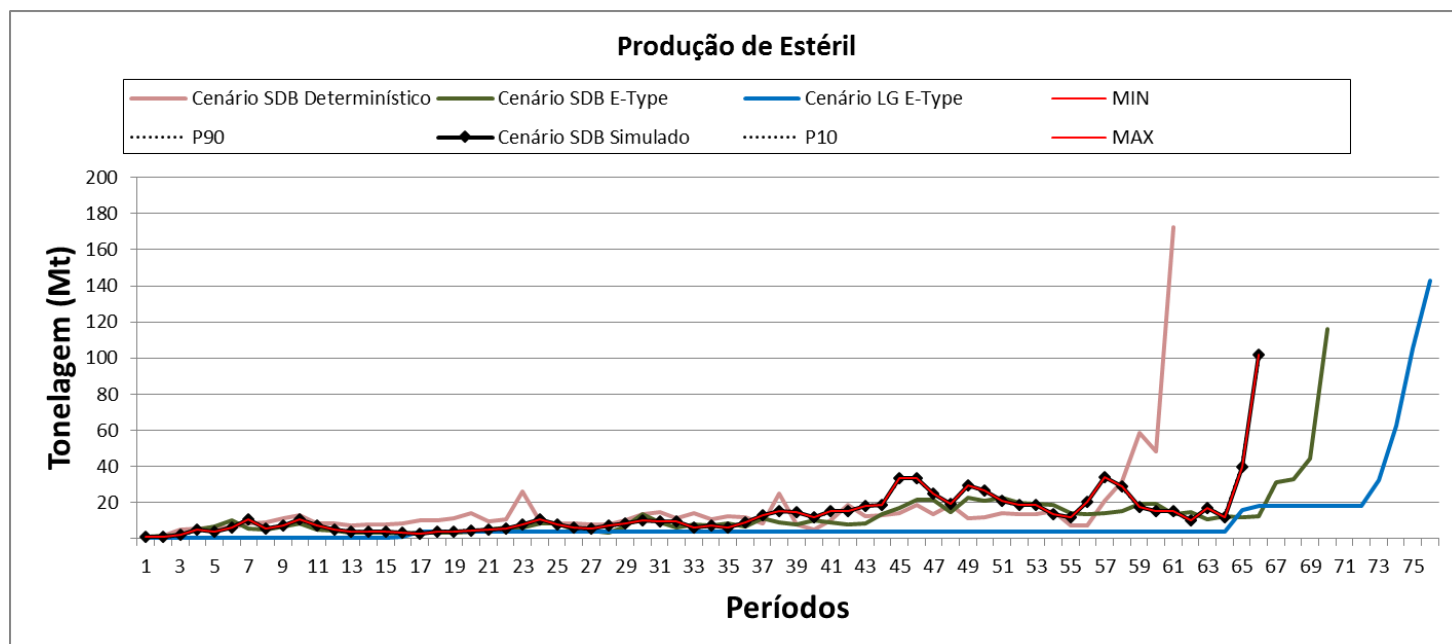
- Cenário SDB Simulado: sequenciamento utilizando SDB, com o modelo simulado;
- Cenário SDB Determinístico: sequenciamento utilizando SDB, com o modelo estimado (determinístico);
- Cenário SDB *E-Type*: sequenciamento utilizando SDB, a partir do campo *E-Type*, que é gerado a partir média do teor de ferro de todas as simulações realizadas. Conseqüentemente este é um cenário determinístico, pois temos somente um valor final para o teor de ferro;
- Cenário LG *E-Type*: sequenciamento utilizando LG, a partir do campo *E-Type*.



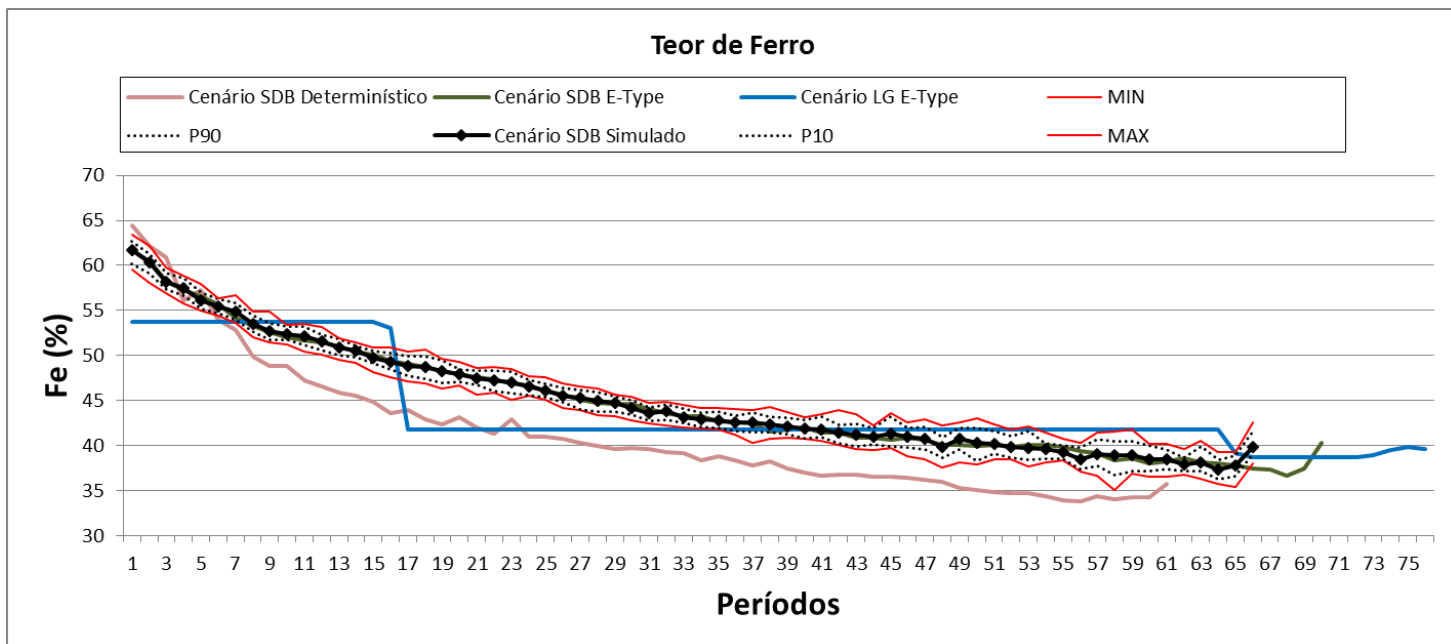
Como o modelo estimado (determinístico) e o modelo simulado foram gerados por metodologias diferentes, utilizou-se o campo *E-Type* para ter uma comparação mais justa entre os resultados, que se encontram nos gráficos abaixo:



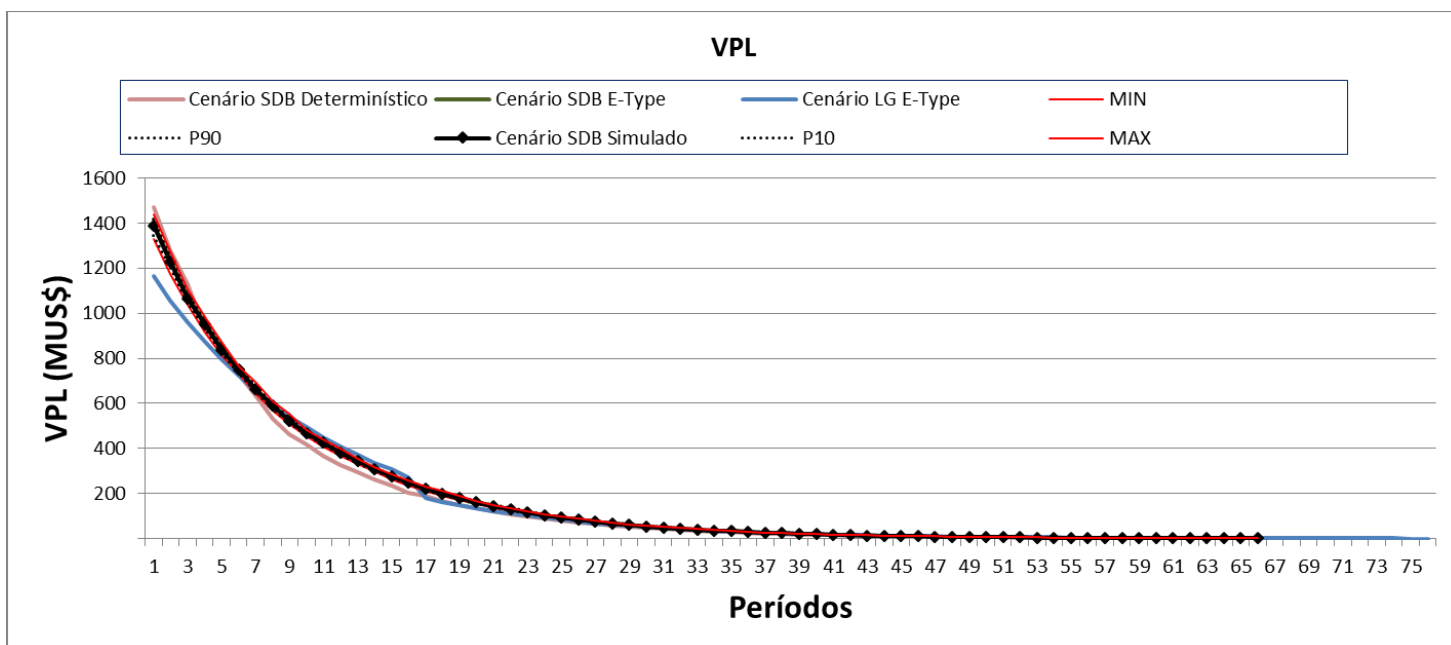
**Figura 5.24 Resultados Produção de Minério – Modelo Simulado Depósito C**  
Fonte: Contribuição do Autor



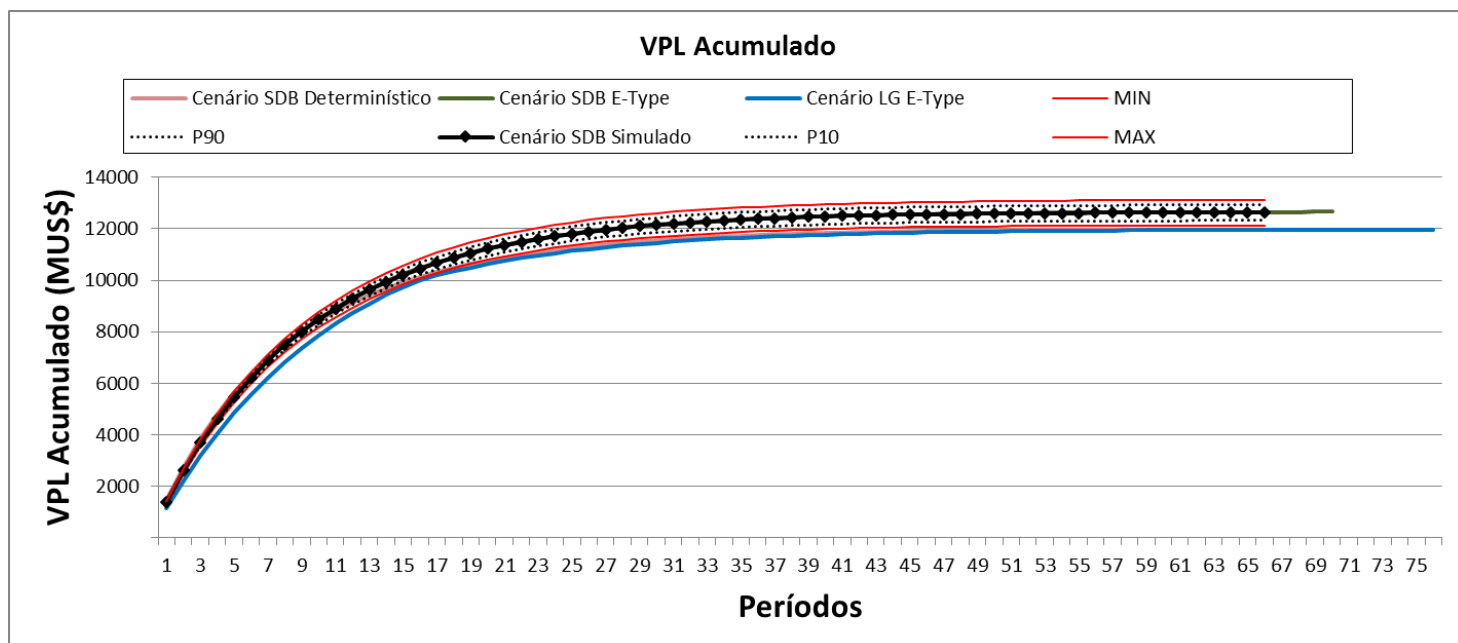
**Figura 5.25 Resultados Produção de Estéril – Modelo Simulado Depósito C**  
Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.26 Resultados Teores de Ferro – Modelo Simulado Depósito C**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.27 Resultados VPL – Modelo Simulado Depósito C**  
 Fonte: Contribuição do Autor

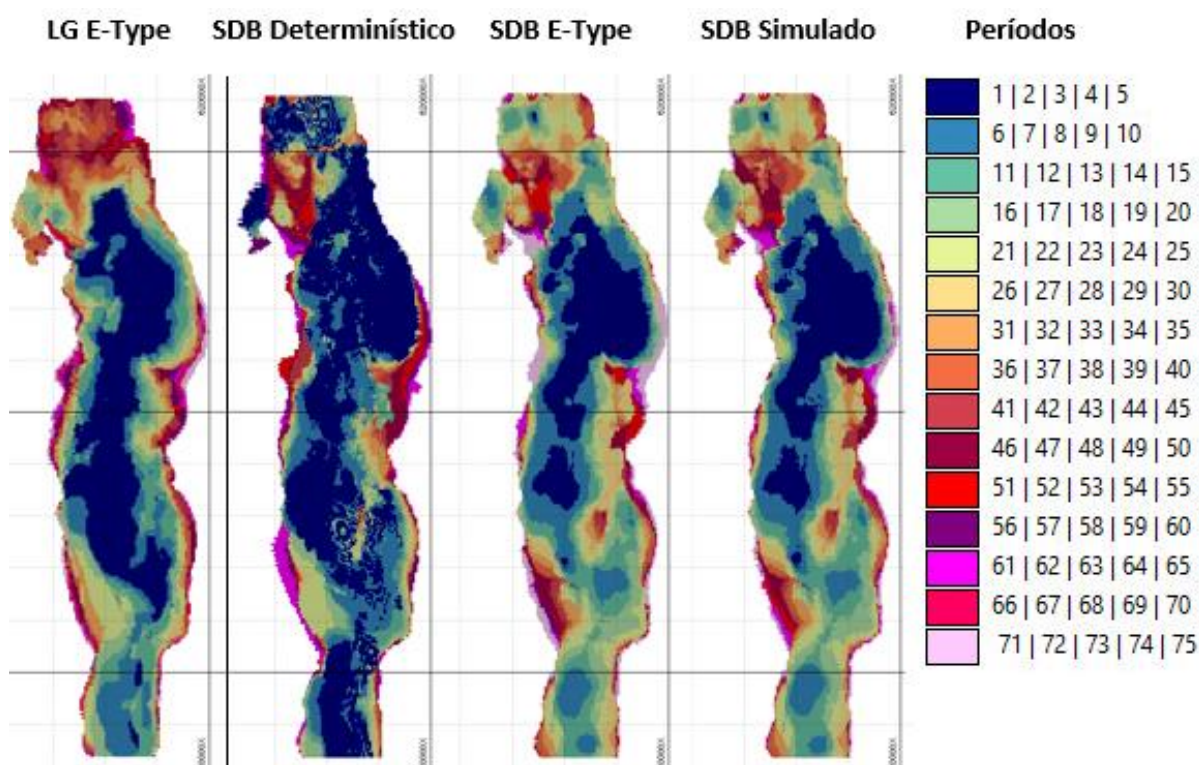


**Figura 5.28 Resultados VPL Acumulado – Modelo Simulado Depósito C**  
**Fonte: Contribuição do Autor**

Ao se comparar os resultados obtidos no Cenário Simulado com os obtidos no Cenário LG *E-Type*, percebe-se um VPL superior para o primeiro caso, sendo que o valor calculado para o segundo caso fica abaixo da curva de P10 gerado para o modelo simulado, indicando que existe uma altíssima probabilidade de que este ganho se concretize. Percebe-se também que, no Cenário Simulado, o sistema tentou minimizar os riscos associados a sequência, pois as curvas de P10 e P90 estão mais próximas do valor esperado para os primeiros anos. O Cenário SDB *E-Type* ficou muito próximo do valor esperado no Cenário Simulado.

Ao se comparar os resultados do Cenário Simulado com o Cenário SDB Determinístico, novamente percebe-se um VPL superior para o primeiro caso, de aproximadamente 5,3%. Os teores calculados para o segundo caso ficam fora dos valores mínimo e máximo dos valores calculados para o Cenário Simulado. Isto pode indicar uma baixíssima probabilidade de se obter a sequência planejada para o modelo estimado (determinístico). Outra possível causa deste efeito pode ser uma suavização excessiva dos teores do modelo no método de simulação utilizado.

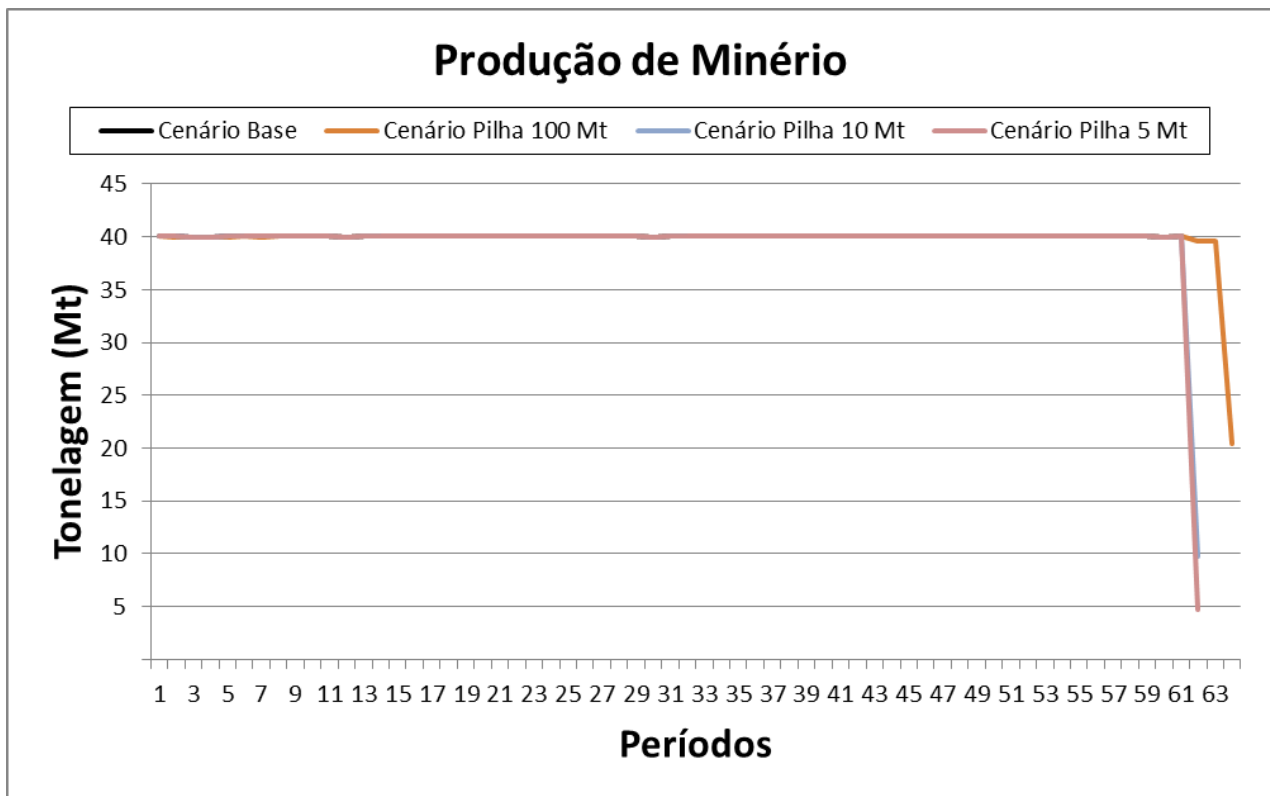
A Figura 5.29 mostra os blocos lavrados por faixas de períodos, para os quatro cenários:



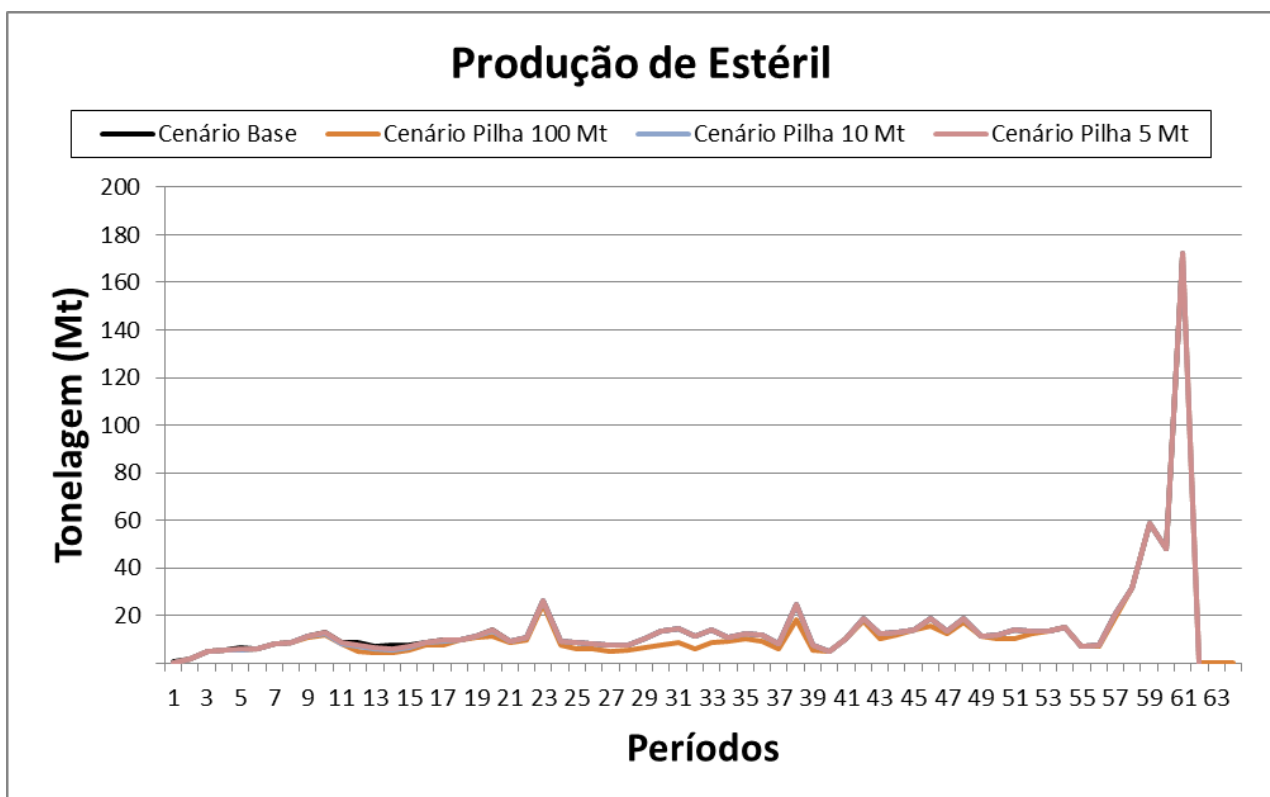
**Figura 5.29** Blocos Lavrados por Faixa de Períodos – Modelo Simulado Depósito C  
 Fonte: Contribuição do Autor

### 5.3.3. Testes com Pilhas de Estoque - Depósito C

A partir do modelo do Depósito C foram testados mais 3 cenários, que incluíram pilhas de estoques de diferentes tamanhos. Estes testes foram realizados visando entender o comportamento da solução com a inserção destas pilhas. Foram incluídas pilhas de 100, 10 e 5 milhões de toneladas, respectivamente. Foi considerado um custo de 1,0 US\$/t para retomada das pilhas. Os resultados se encontram nos gráficos abaixo:



**Figura 5.30 Resultados Produção de Minério – Testes com Pilhas de Estoque**  
 Fonte: Contribuição do Autor



**Figura 5.31 Resultados Produção de Estéril – Testes com Pilhas de Estoque**  
 Fonte: Contribuição do Autor

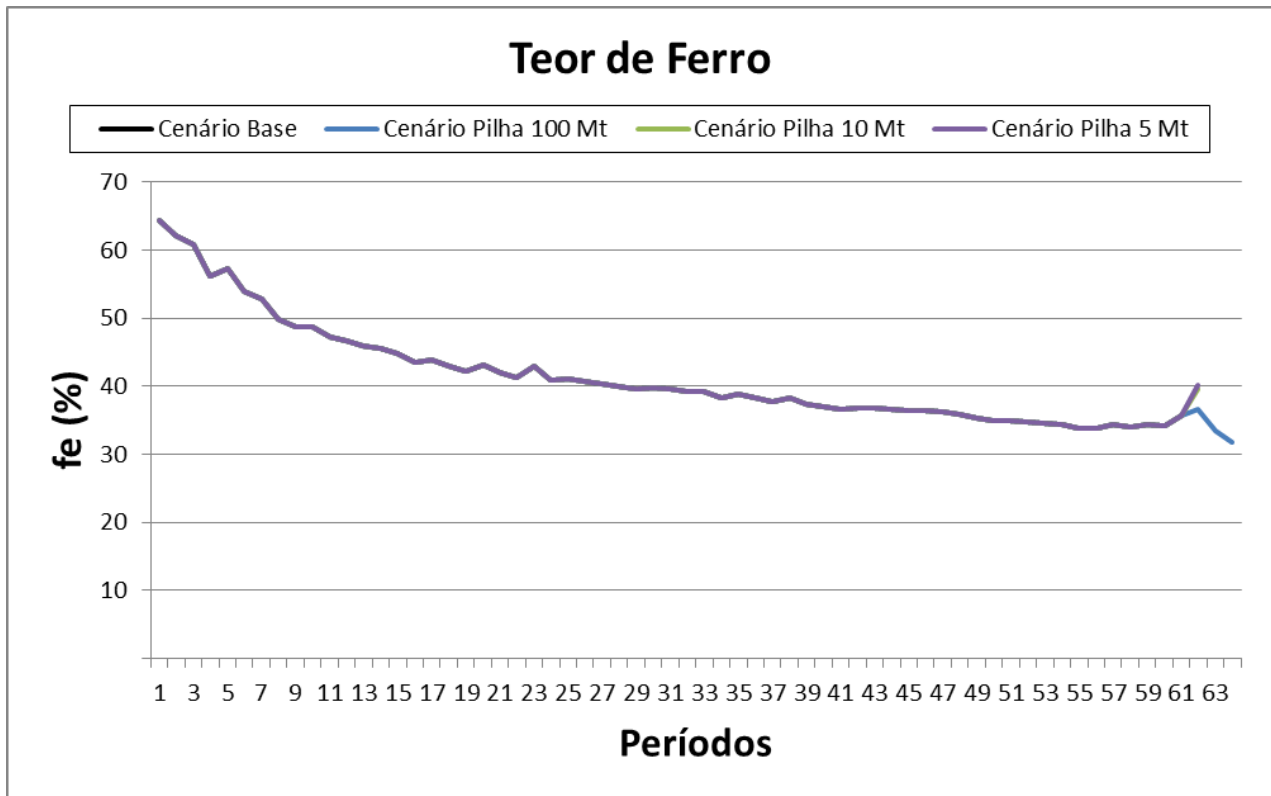


Figura 5.32 Resultados Teores de Ferro – Testes com Pilhas de Estoque  
Fonte: Contribuição do Autor

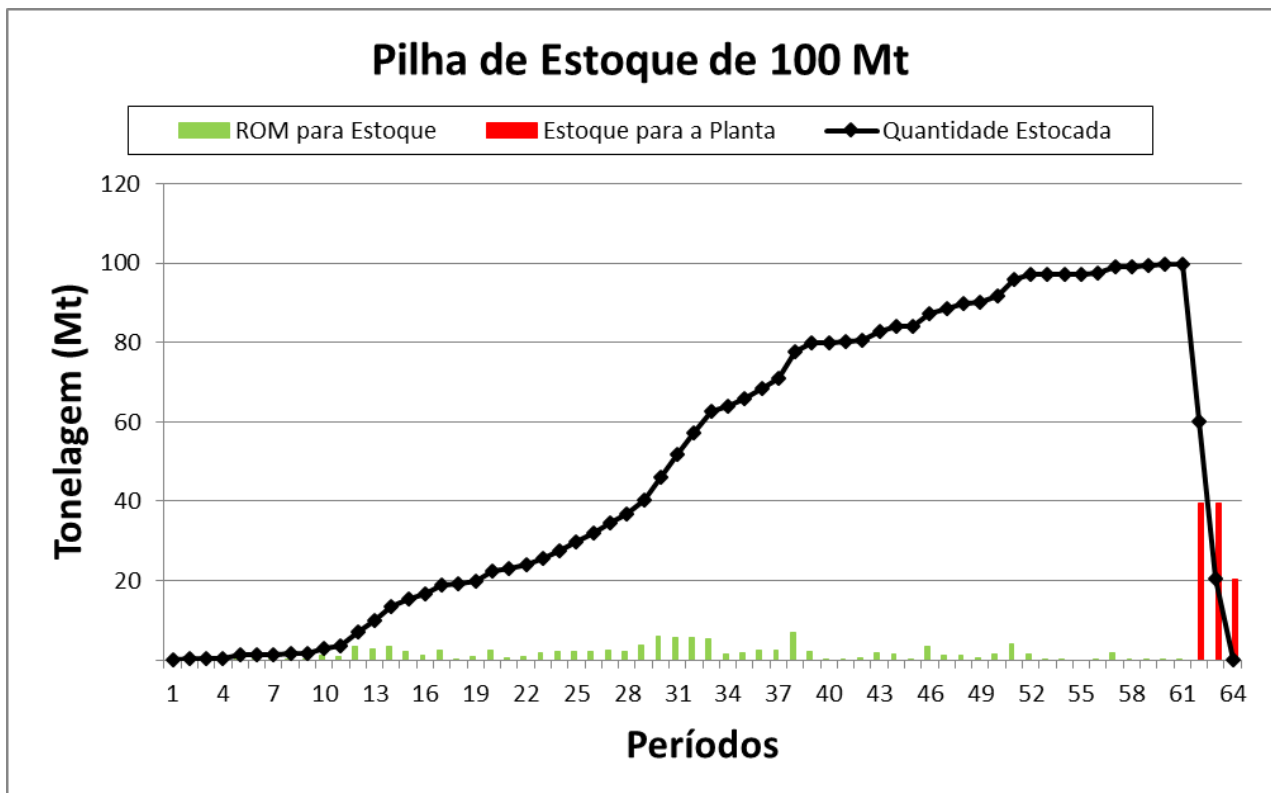


Figura 5.33 Pilha de Estoque 100 Mt  
Fonte: Contribuição do Autor

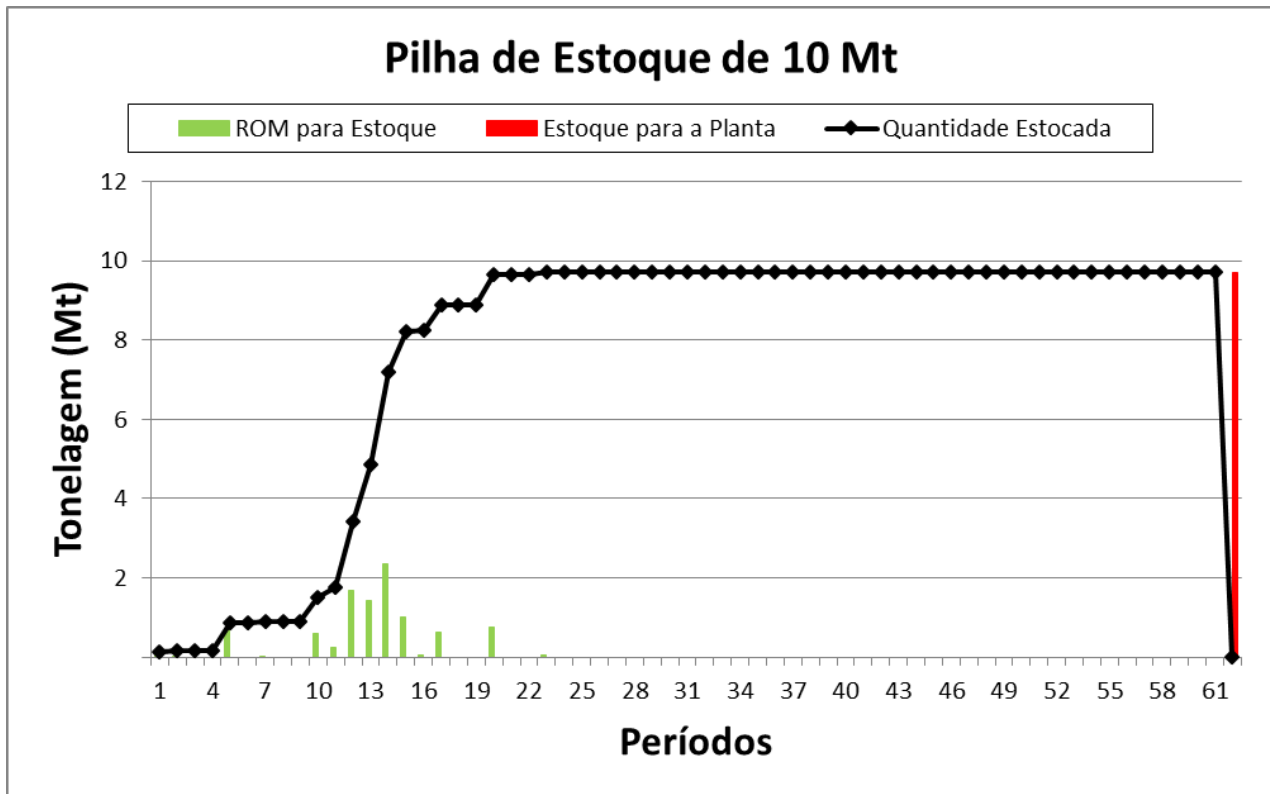


Figura 5.34 Pilha de Estoque 10 Mt  
Fonte: Contribuição do Autor

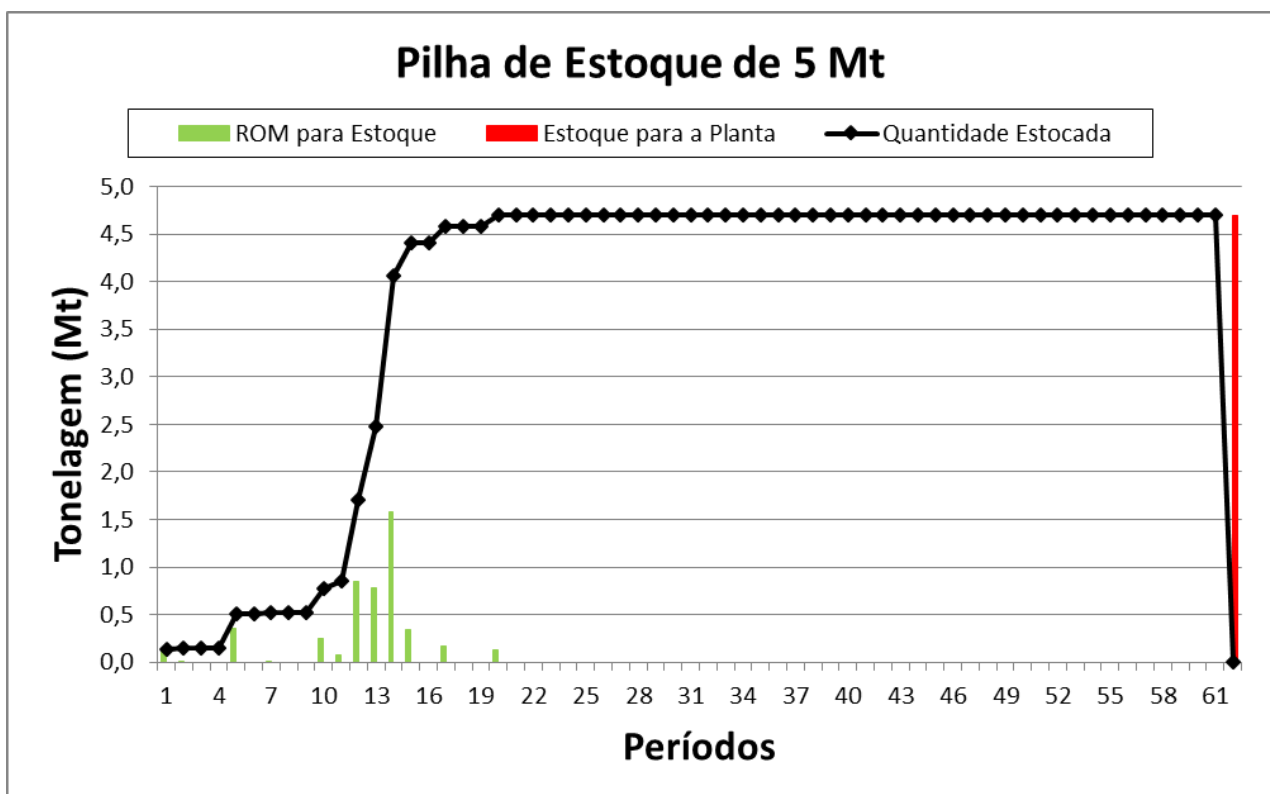


Figura 5.35 Pilha de Estoque 5 Mt  
Fonte: Contribuição do Autor

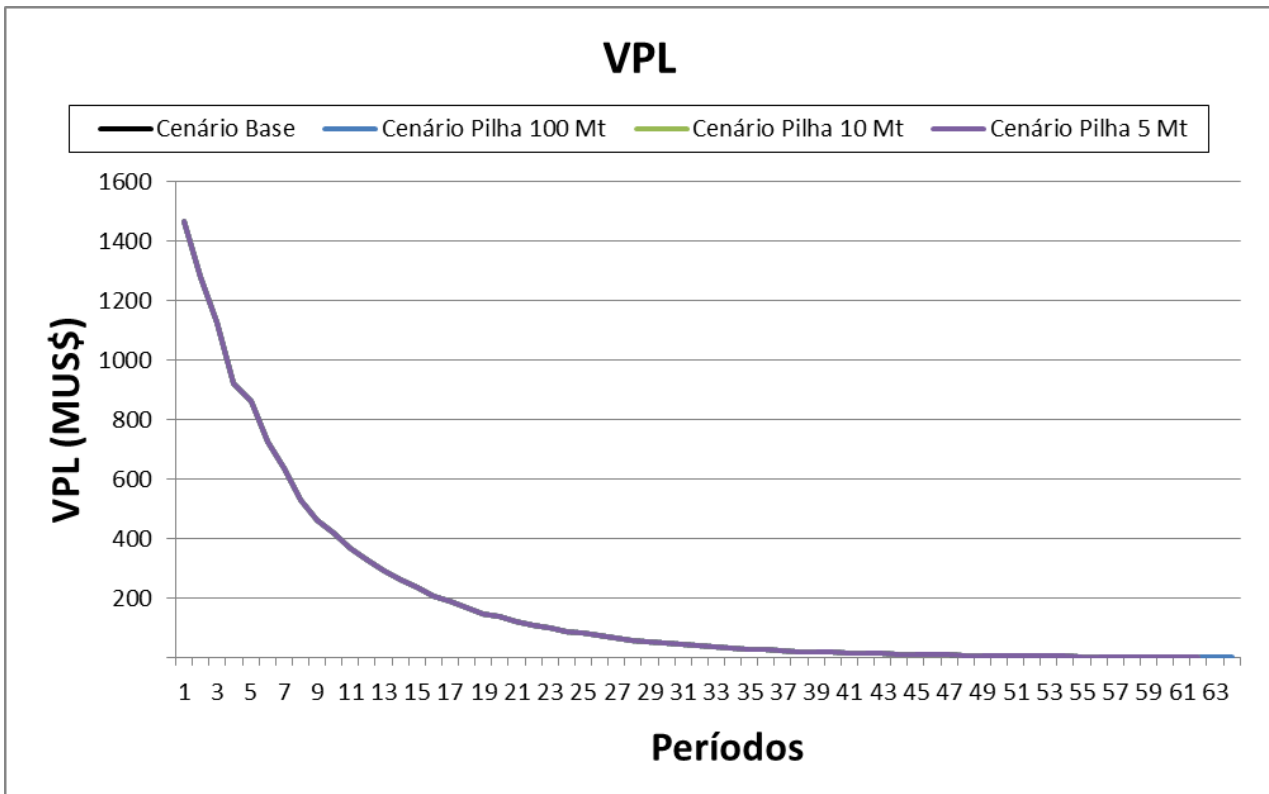


Figura 5.36 Resultados VPL – Testes com Pilhas de Estoque  
Fonte: Contribuição do Autor

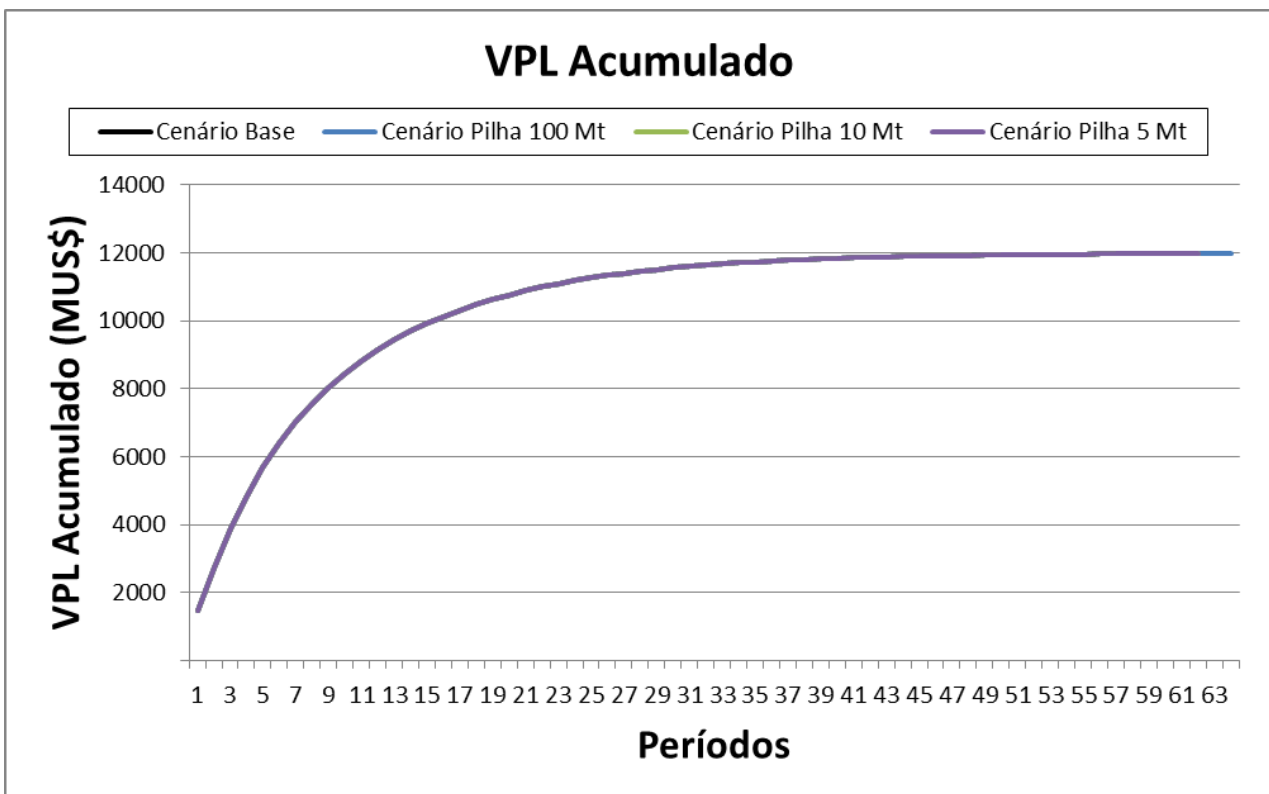


Figura 5.37 Resultados VPL Acumulado – Testes com Pilhas de Estoque  
Fonte: Contribuição do Autor



Os resultados acima mostram que a quantidade de material produzido na mina é sempre a mesma, comparando os cenários com e sem pilha de estoque. Ou seja, a soma do material destinado a pilha de estéril e ao estoque é constante, sendo igual ao estéril retirado no cenário sem pilha de estoque. Neste sistema de SDB, a decisão de levar o material para a pilha de estoque não é tomada no momento de retirar o bloco. Inicialmente ele pode ser direcionado para a planta ou para a pilha de estéril. Após a decisão de levar este bloco para a pilha de estéril, caso esse bloco possa ser aproveitado em períodos posteriores, esse bloco é direcionado à pilha de estoque. Isto ocorre porque muitas vezes o sistema decide não processar um bloco de teor mais baixo em um determinado período, de modo a melhorar o VPL da sequência. Caso existam pilhas de estoque, esse bloco será direcionado para ela, caso contrário o bloco será considerado estéril. Outro ponto importante a ser considerado, e que o sistema trabalha com um teor médio para a pilha de estoque, o que normalmente não representa a realidade das pilhas.

A diferença entre os cenários é muito pequena, conforme pode ser observado nos gráficos acima. Em todos cenários com pilha de estoque, o material estocado foi processado nos últimos períodos da sequência, após terminado a produção da mina, de modo que este material adicional pouco influenciou o VPL final da sequência.

É importante ressaltar que, embora o sistema de SDB utilizado neste estudo adote esta abordagem com relação as pilhas de estoque, existem na literatura sugestões para outros tipos de abordagem, que consideram as pilhas de estoque como um destino já na decisão de retirada do bloco. Esta segunda abordagem pode alterar o resultado da sequência, com ganhos significativos de VPL, embora traga uma complexidade adicional a um sistema que já é de difícil solução.

As tabelas contendo todos resultados dos testes se encontram no ANEXO I.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados comparativos entre a metodologia clássica, utilizando o algoritmo de Lerchs-Grossmann, e o Sequenciamento Direto de Blocos são promissores, pois mesmo em depósitos representados por modelos estimados (determinísticos), foi possível obter sequências com maiores VPL utilizando esta nova metodologia. A capacidade de aplicar o fator de desconto na geração da sequência de produção, permite que a decisão de retirada do bloco seja avaliada de acordo com o período em que realmente este bloco será lavrado. Esta consideração faz com que os blocos retirados em períodos posteriores sejam penalizados com um maior fator de desconto, assim como esperado na realidade. Desta forma, o sistema tende a buscar blocos com maior receita nos primeiros períodos, mesmo que em alguns casos isto também aumente ligeiramente a quantidade de estéril lavrada, mas que resultem em um maior VPL do empreendimento. Pode-se concluir pelos resultados obtidos que, a correta utilização da taxa de desconto, pode alterar a sequência de produção final, gerando ganhos significativos no VPL do empreendimento.

Adicionalmente, os resultados demonstraram que os ganhos obtidos a partir da aplicação da taxa de desconto no sequenciamento direto de blocos, está relacionado com a heterogeneidade do depósito. Para o Depósito B, que pode ser considerado mais homogêneo que os outros depósitos estudados, os resultados obtidos com a metodologia clássica e o sequenciamento direto de blocos foram semelhantes, indicando que quanto mais heterogêneo for o depósito, maiores são os ganhos ao se aplicar corretamente a taxa de desconto. Isso se deve ao fato que depósitos homogêneos são menos susceptíveis a avarias da metodologia de Sequenciamento Direto de Blocos.

O teste envolvendo o modelo simulado do Depósito C, apresentou um VPL superior quando comparado com o cenário utilizando modelo estimado (determinístico). Mas ao comparar esse valor ao valor obtido no Cenário SDB utilizando o campo *E-Type*, os valores foram praticamente iguais. Desta forma não é possível concluir que a utilização de modelos simulados sempre resulte em sequências com maiores VPL. Mas deve-se ressaltar que, utilizando modelos simulados, é possível avaliar os riscos associados a sequência definida, de forma a minimizar estes riscos nos primeiros períodos do empreendimento. Este aspecto é de extrema importância para definição da sequência de produção, evidenciando as vantagens de se trabalhar com modelos simulados.

Os testes envolvendo pilhas de estoque não apresentaram ganhos consideráveis. Isto se deve a forma com que o sistema de Sequenciamento Direto de Blocos utilizado neste estudo aborda este problema. A pilha de estoque não é considerada como um destino na decisão de retirada do bloco, de forma que somente serão direcionados para estas pilhas, os blocos que foram considerados estéril, mas que possam ser processados em períodos posteriores. Devido à grande complexidade do sistema, talvez esta abordagem seja a mais realista ao se tratar modelos reais de grande porte, pois avaliar a pilha de estoque como um destino no momento de decisão da retirada dos blocos, pode ocasionar um grande aumento no tempo de resolução do sistema.

Para os Depósitos B e C, os modelos regularizados para o menor tamanho dos sub-blocos não convergiram para uma solução, indicando que esta metodologia atualmente apresenta dificuldades para aplicações em depósitos com um grande número de blocos. Desta forma, foi necessário regularizar os blocos para um tamanho maior. É importante ressaltar o que o modelo do Depósito C regularizado para o menor tamanho dos sub-blocos, possui um número de blocos inferior ao modelo utilizado nos testes do Depósito A. Isto indica que outras características dos modelos, como a distribuição dos teores, também podem afetar o tempo de resolução do sistema.

O resultado do Sequenciamento Direto de Blocos retirou blocos de maneira mais esparsa no Depósito B, provavelmente fugindo da realidade operacional da mina. Este comportamento se repetiu pelos primeiros anos da vida da mina. Além disso, a quantidade de estéril removida está espalhada quase em toda extensão do depósito. Aparentemente este problema não ocorre em todos os casos, havendo uma maior tendência em modelos de blocos em que ocorram altos teores em porções superficiais, e com maior uniformidade. Foi observado este mesmo comportamento em outros centros de pesquisa que estudam este tema, como por exemplo em Farmer (2015).

De maneira geral pode-se concluir que esta nova metodologia de Sequenciamento Diretos de Blocos é promissora, e que se trata de um novo campo de pesquisa com um grande potencial para novos desenvolvimentos, frente aos benefícios apresentados neste estudo.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O autor recomenda, para trabalhos futuros, que sejam analisados os seguintes itens:

- Realização de estudos em mais depósitos minerais reais, incluindo depósitos metálicos e não metálicos, com variados graus de heterogeneidade, para confirmação da hipótese de que os ganhos de VPL estão diretamente relacionados a este parâmetro;
- Devido ao fato que o aumento de VPL constatado ao se utilizar o SDB é decorrente principalmente da aplicação da taxa de desconto, avaliar qual o impacto da mudança deste parâmetro, na definição dos blocos a serem lavrados em cada período e no VPL da sequência de produção;
- Comparar a operacionalidade dos planos gerados pelas duas metodologias, tendo em vista que, excluindo o problema relacionado a dispersão dos blocos em alguns casos (fato este que deve ser corrigido com os recentes avanços das técnicas de resolução deste problema), aparentemente os planos gerados pelo SDB são mais operacionais que os gerados pela metodologia de Lerchs-Grossmann;
- Avaliação de cenários com múltiplos destinos para um mesmo tipo de material, de modo a explorar melhor o fato, que ao se utilizar o SDB, o destino do bloco não é pré-definido, diferentemente do que ocorre no Lerchs-Grossmann;
- Realização de mais estudos em depósitos representados por modelos simulados, de modo a verificar ou não ganhos de VPL na sequência de produção ao se utilizar este tipo de abordagem. É importante ressaltar que, mesmo não existindo este ganho de VPL, a utilização de modelos simulados traz vantagens significativas, conforme citado nas conclusões deste trabalho;
- Realização de estudos considerando a pilha de estoque como um destino, na decisão de retirada do bloco, avaliando os ganhos de VPL relacionados a esta abordagem.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBOR, F., & DIMITRAKOPOULOS, R. Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons. *Mining Technology*, v. 119:2, p. 88-101, 2010.
- ALFORD, G., & WHITTLE, J. 1986. Application of Lerchs-Grossman Pit Optimisation to the Design of Open Pit Mines. *Open Pit Mining Conference*, pp 201-207. Calgary, Canada.
- ALMEIDA, A. M. 2013. Surface Constrained Stochastic Life-of-Mine Production Scheduling. 104 f. *Master Thesis*. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal.
- AMARAL, M. 2008. Modelos Matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto. 108 f. *Master Dissertation*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ASAD, M. W., & 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*, v. 64, p. 185-197, 2012.
- ASKARI-NASAB, H. 2006. Intelligent 3D interactive open pit planning and optimization. 167 f. *PhD Dissertation*. Department of Civil and Environmental Engineering, Alberta University, Edmonton.
- BOLAND, N., DUMITRESCU, I., FROYLAND, G., & GLEIXNER, A. M. LP-Based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity. *Computers & Operations Research*, v. 36, p. 1064-1089, 2007.
- CACCETTA, L., & HILL, S. P. An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *Journal of global optimization*, v. 27, p. 349-365, 2003.
- CARMO, F. A. 2001. Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas. 114 f. *Master Dissertation*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CHICOISNE, R. E. New Algorithm for the Open-Pit Mine Production Scheduling Problem. *Operations Research*, v. 60, N. 3, p. 517-528, 2012.
- CONSUEGRA, A. F., & DIMITRAKOPOULOS, R. Stochastic mine design optimisation based on simulated annealing: pit limits, production schedules, multiple orebody scenarios and sensitivity analysis. *Mining Technology*, v. 118:2, p. 79-90, 2009.
- CORDENONSI, A. 2008. 228 f. PhD Thesis. *Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas*. Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

- DIMITRAKOPOULOS, R. Strategic Mine Planning under Uncertainty. *Journal of Mining Science*, v. 47, n. 2, p. 138-150, 2011.
- DIMITRAKOPOULOS, R., FARRELLY, C. T., & GODOY, M. Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Transactions of the IMM, Section A Mining Industry*, v. 111, p. A82-A89, 2002.
- DOWD, P. A., & ONUR, A. H. Open pit optimization, part 1: optimal open pit design. *Transaction institution of Mining and Metallurgy*, v. 102, p. A95-A100, 1993.
- ELKINGTON, T., & DURHAM, R. Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization. *Journal of Mining Science*, v. 47(2), p. 177-190, 2011.
- ERARSLAN, K., & CELEBI, N. A simulative model for optimum open pit design. *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, v. 94, p. 59-68, 2001.
- FARMER, I., & DIMITRAKOPOULOS, R. Schedule-Based Pushback Design with Varying Geotechnical Constrains in the Sthochastic Optimization Framework. *Research Report n<sup>o</sup>9*, v.2, p. 312-335, 2015.
- GALLAGHER, M. S., & KEAR, R. M. Split shell open pit design concept applied at De Beers Venetia Mine South Africa using the Whittle and Gemcom software. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 101, p. 401-410, 2001.
- GHOLAMNEJAD, J., & OSANLOO, M. Incorporation of Ore Grade Uncertainty Into the Push Back Design Process. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 107, p. 177-185, 2007.
- GIANINI, L. 1990. Optimum design of open pit mines. 170 f. *PhD Dissertation*. School of Mathematics and Statistics, Curtin University of Technology, Perth.
- GLOVER, F., & KOCHENBERGER, G. A. Handbook of Metaheuristics. *Kluwer Academic Publishers*, New York, 2003.
- GLOVER, F., & LAGUNA, M. Tabu Search Fundamentals and Uses. *US West Chair in Systems Science*. University of Colorado, Colorado, 1995.
- GOYCOOLEA, M., MORENO, E., & RIVERA, O. 2013. Direct optimization of an open cut scheduling policy. *Proceedings of APCOM*. Porto Alegre, Brazil.
- GUIMARÃES, O., & MARINHO, A. 2014. Sequenciamento Direto de Blocos. In: *CBMina, 8., 2014, Belo Horizonte*.
- HUSTRULID, W. A., & KUCHTA, M. *Open pit mine planning & design (2nd ed.)*. Londres: Taylor & Francis, 2006.
- JOHNSON, B. T. 1968. 131 f. Optimum open pit mine production scheduling. *PhD Dissertation*. University of California, Berkeley.

- JOHNSON, D. S., ARAGON, C. R., MCGEOCH, L. A., & SCHEVON, C. Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation - Part 1 Graph Partitioning. *Operations Research* v. 37, n. 6, p. 865-891, 1989.
- KHALOKAKAIE, R. 1999. *Computer-Aided Optimal Open Pit Design With Variable Slope Angles*. 300 f. PhD Thesis, The University of Leeds, Leeds.
- KOENIGSBERG, E. The Optimum Contours of an Open Pit Mine: an Application of Dynamic Programming. *In: Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (17th APCOM)*, p. 274-287, 1982.
- KUMRAL, M. Optimizing ore–waste discrimination and block sequencing through simulated annealing. *Applied Soft Computing*, v. 13(8), p. 3737-3744, 2013.
- KUMRAL, M., & DOWD, P. A. A simulated annealing approach to mine production scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, v. 56(8), p. 922-930, 2004.
- LAMGHARI, A., & DIMITRAKOPOULOS, R. A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, v. 222, p. 642–652, 2012.
- LEITE, A., & DIMITRAKOPOULOS, R. Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit. *Institute of Materials, Minerals and Mining*, v. 116, n. 3, p. 109-118, 2007.
- LERCHS, H., & GROSSMANN, I. Optimum design of open pit mines. *Transaction on CIM*, v. 58, p. 17-24, 1965.
- LUZIA, L. F., & RODRIGUES, M. C. 2009. *Introdução ao Escalonamento e Aplicações - Estudo sobre as Metaheurísticas*. [s.l: s.n.].
- MARINHO, A., & BERETTA, F. 2014. The Impacts of Slope Angle Approximations on Pit Optimization. *In: CBMina, 8., 2014, Belo Horizonte*.
- MATHERON, G. Recherche d'Optima dans la Reconnaissance et la Mise en Exploitation des Gisements Miniers. *Annales des mines*, v. 5, p. 230-237, 1963.
- MEAGHER, C., DIMITRAKOPOULOS, R., & VIDAL, V. A new approach to constrained open pit pushback design using dynamic cut-off grades. *Journal of Mining Science*, v. 50, p. 733-744, 2009.
- MOOSAVI, E., GHOLAMNEJAD, J., ATAEE-POUR, M., & KHORRAM, E. A hybrid augmented Lagrangian multiplier method for the open pit mines long-term production scheduling problem optimization. *Journal of Mining Science*, v.50, p. 1047–1060, 2014.
- NOGHOLI, A. A. 2015. *Optimisation of Open Pit Mine Blocks*. 270 f. PhD Thesis. Queensland University of Technology, Brisbane.

- PANA, M. T. 1965. The simulation approach to open pit design. *In: Proceedings of the 5th APCOM*, Johannesburg, p. 139-144.
- PINTO, L. R., & MERSCHMANN, L. H. Planejamento operacional de mina usando modelos matemáticos. *Revista Escola de Minas*, v. 54 (3), p. 211-214, 2001.
- POUR, M. A. 2000. A Heuristic Algorithm to Optmise Stope Boundaries. 319 f. *PhD Thesis*. Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong.
- POURRAHIMIAN, Y., ASKARI-NASAB, H., & TANNANT, D. Mixed-Integer Linear Programming formulation for block-cave sequence optimisation. *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, v. 4, n. 1, p. 26-49, 2012.
- RAMAZAN, S., & DIMITRAKOPOULOS, R. Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 18, n. 2, p. 85-98, 2004.
- SENHORINHO, N. 2008. Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais. 112 f. *PhD Thesis*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SME. 2002. Mining Reference Handbook: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. *Chapter 8: Economics and Costing*, p. 161-172.
- SPLEIT, M. 2014. *Stochastic Long-Term Production Scheduling of the LabMag Iron Ore Deposit in Labrador*. 167 f. Master Thesis. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal.
- TOLWINSKI, B., & UNDERWOOD, R. A scheduling algorithm for open pit mines. *IMA Journal of Mathematics*, v. 7, p. 247-270, 1996.
- WHITTLE, D. 2011. Open-pit planning and design. *Mining Engineering Handbook*, p. 877-901. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, USA.
- WHITTLE, J. 1998. Four-X User Manual. *Whittle Programming Pty Ltd*.
- WRIGHT, A. 1990. *Open pit mine design model: introduction with Fortran 77 programs*. Clausthal-Zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications.
- WRIGHT, A. 1999. A simple algorithm for optimum pit limits design. *In: Proceedings of the 28rd APCOM*, p. 367-374.
- ZEYNI, E., KAKAIE, R., & YOUSEFI, A. A new algorithm for optimum open pit design: Floating cone method III. *Journal of Mining & Environment* v. 2, n. 2, p. 118-125, 2011.
- ZHAO, Y., & KIM, Y. C. 1992. A new optimum pit limit design algorithm. *In: Proceedings of 23rd APCOP*, p. 423-434.



## **ANEXO I – TABELAS COMPLETAS DOS RESULTADOS**

## Resultados Sequenciamento Depósito A

Resultados Depósito A										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
1	40,0	40,0	10,2	5,3	67,0	50,8	1.337,8	1.070,7	1.337,8	1.070,7
2	40,0	40,0	21,0	5,3	65,5	50,8	1.176,7	973,4	2.514,5	2.044,1
3	40,0	40,0	24,3	5,3	65,0	50,8	1.059,8	884,9	3.574,2	2.929,0
4	40,0	40,0	20,9	5,3	61,6	50,8	923,4	804,5	4.497,7	3.733,5
5	40,0	40,0	19,0	5,3	60,7	50,8	835,6	731,3	5.333,3	4.464,8
6	40,0	40,0	13,3	5,3	59,3	50,8	749,6	664,8	6.082,9	5.129,7
7	40,0	40,0	24,3	5,3	59,1	50,8	665,5	604,4	6.748,3	5.734,1
8	40,0	40,0	17,7	5,3	57,9	50,8	600,1	549,5	7.348,4	6.283,5
9	40,0	40,0	23,4	5,3	57,3	50,8	540,7	499,5	7.889,1	6.783,0
10	40,0	40,0	19,6	5,3	56,5	50,8	485,7	454,1	8.374,8	7.237,1
11	40,0	40,0	18,6	5,3	56,0	50,8	441,4	412,8	8.816,2	7.650,0
12	40,0	40,0	8,4	5,3	54,0	50,8	394,6	375,3	9.210,8	8.025,2
13	40,0	40,0	12,0	5,3	53,8	50,8	359,4	341,2	9.570,2	8.366,4
14	40,0	40,0	12,1	5,3	50,8	50,8	312,4	310,2	9.882,6	8.676,6
15	40,0	40,0	26,9	5,3	53,4	50,8	289,8	282,0	10.172,4	8.958,5
16	40,0	40,0	12,7	5,3	52,3	50,8	267,4	256,3	10.439,8	9.214,9
17	40,0	40,0	30,7	5,3	53,5	50,8	241,7	233,0	10.681,5	9.447,9
18	40,0	40,0	24,1	5,3	52,3	50,8	217,5	211,8	10.899,0	9.659,7
19	40,0	40,0	27,2	5,3	52,1	50,8	197,5	192,6	11.096,5	9.852,3
20	40,0	40,0	26,9	5,3	48,6	50,8	170,5	175,1	11.267,0	10.027,4
21	40,0	40,0	26,2	5,3	50,6	50,8	160,5	159,2	11.427,5	10.186,5
22	40,0	40,0	40,4	5,3	49,7	50,8	143,2	144,7	11.570,7	10.331,2
23	40,0	40,0	45,5	5,3	50,4	50,8	127,9	131,5	11.698,6	10.462,8
24	40,0	40,0	69,3	5,3	50,8	50,8	113,6	119,6	11.812,2	10.582,3
25	40,0	40,0	60,2	5,3	49,1	50,8	101,4	108,7	11.913,6	10.691,0
26	40,0	40,0	61,9	5,3	49,9	50,8	91,9	98,8	12.005,5	10.789,9
27	40,0	40,0	32,0	13,8	46,9	50,3	82,1	88,1	12.087,6	10.878,0
28	40,0	40,0	39,3	35,4	45,2	49,1	70,3	76,2	12.157,9	10.954,2
29	40,0	40,0	47,3	35,4	48,6	49,1	68,5	69,2	12.226,5	11.023,4
30	40,0	40,0	38,7	35,4	47,6	49,1	61,0	62,9	12.287,4	11.086,4
31	40,0	40,0	28,1	35,4	45,2	49,1	53,3	57,2	12.340,8	11.143,6
32	40,0	40,0	31,4	35,4	43,9	49,1	46,9	52,0	12.387,6	11.195,6
33	39,8	40,0	32,5	35,4	43,4	49,1	41,8	47,3	12.429,4	11.242,9
34	40,0	40,0	31,5	35,4	42,7	49,1	37,4	43,0	12.466,8	11.285,9
35	40,0	40,0	30,1	35,4	42,2	49,1	33,6	39,1	12.500,4	11.325,0
36	40,0	40,0	25,6	35,4	42,3	49,1	31,1	35,5	12.531,6	11.360,5
37	40,0	40,0	57,7	35,4	43,4	49,1	27,7	32,3	12.559,2	11.392,8
38	40,0	40,0	61,3	35,4	41,9	49,1	23,7	29,4	12.583,0	11.422,2
39	40,0	40,0	159,3	35,4	42,2	49,1	18,0	26,7	12.600,9	11.448,9

Resultados Depósito A										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
40	12,2	40,0	77,1	35,4	41,2	49,1	4,0	24,3	12.604,9	11.473,2
41		40,0	40,0	91,4		50,9		21,1		11.494,3
42		40,0	40,0	92,8		50,9		19,2		11.513,4
43		40,0	40,0	113,1		51,4		17,0		11.530,4
44		40,0	40,0	226,0		50,8		12,5		11.542,9
45		18,1	18,1	243,9		48,8		1,9		11.544,8
<b>Total</b>	<b>1.572,4</b>	<b>1.778,1</b>	<b>1.566,9</b>	<b>1.379,8</b>						

## Resultados Sequenciamento Depósito A – Recuperação Mássica Variável

Resultados Depósito A - Recuperação Mássica Variável										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável
1	40,0	40,0	10,2	13,0	67,0	67,3	1.337,8	1.346,4	1.337,8	1.346,4
2	40,0	40,0	21,0	22,9	65,5	66,8	1.176,7	1.207,6	2.514,5	2.554,0
3	40,0	40,0	24,3	20,8	65,0	65,3	1.059,8	1.089,2	3.574,2	3.643,2
4	40,0	40,0	20,9	13,9	61,6	63,0	923,4	978,3	4.497,7	4.621,5
5	40,0	40,0	19,0	26,8	60,7	62,6	835,6	868,7	5.333,3	5.490,2
6	40,0	40,0	13,3	23,1	59,3	60,2	749,6	774,9	6.082,9	6.265,1
7	40,0	40,0	24,3	33,0	59,1	59,7	665,5	686,9	6.748,3	6.952,0
8	40,0	40,0	17,7	31,5	57,9	58,7	600,1	616,9	7.348,4	7.568,9
9	40,0	40,0	23,4	23,6	57,3	57,3	540,7	556,7	7.889,1	8.125,6
10	40,0	40,0	19,6	12,2	56,5	55,8	485,7	503,1	8.374,8	8.628,7
11	40,0	40,0	18,6	12,7	56,0	55,8	441,4	459,5	8.816,2	9.088,2
12	40,0	40,0	8,4	9,6	54,0	53,3	394,6	401,8	9.210,8	9.490,0
13	40,0	40,0	12,0	12,6	53,8	53,3	359,4	363,5	9.570,2	9.853,5
14	40,0	40,0	12,1	14,3	50,8	52,6	312,4	325,7	9.882,6	10.179,2
15	40,0	40,0	26,9	17,7	53,4	52,2	289,8	291,3	10.172,4	10.470,6
16	40,0	40,0	12,7	20,5	52,3	51,6	267,4	261,0	10.439,8	10.731,6
17	40,0	40,0	30,7	20,1	53,5	50,7	241,7	230,5	10.681,5	10.962,0
18	40,0	40,0	24,1	23,8	52,3	49,6	217,5	204,5	10.899,0	11.166,6
19	40,0	40,0	27,2	41,7	52,1	52,8	197,5	195,0	11.096,5	11.361,6
20	40,0	40,0	26,9	19,0	48,6	49,6	170,5	173,3	11.267,0	11.534,9
21	40,0	40,0	26,2	30,8	50,6	51,3	160,5	160,3	11.427,5	11.695,2
22	40,0	40,0	40,4	21,8	49,7	49,1	143,2	141,3	11.570,7	11.836,6
23	40,0	40,0	45,5	31,6	50,4	48,4	127,9	125,2	11.698,6	11.961,7
24	40,0	40,0	69,3	43,0	50,8	48,5	113,6	111,2	11.812,2	12.072,9
25	40,0	40,0	60,2	39,2	49,1	48,4	101,4	100,8	11.913,6	12.173,7
26	40,0	40,0	61,9	63,6	49,9	48,9	91,9	91,0	12.005,5	12.264,7
27	40,0	40,0	32,0	47,1	46,9	48,1	82,1	81,5	12.087,6	12.346,1
28	40,0	40,0	39,3	77,1	45,2	50,7	70,3	75,8	12.157,9	12.422,0
29	40,0	40,0	47,3	49,4	48,6	48,9	68,5	67,7	12.226,5	12.489,6
30	40,0	40,0	38,7	46,1	47,6	47,4	61,0	59,3	12.287,4	12.548,9
31	40,0	40,0	28,1	44,5	45,2	47,1	53,3	53,6	12.340,8	12.602,5
32	40,0	40,0	31,4	42,3	43,9	45,8	46,9	47,2	12.387,6	12.649,7
33	39,8	40,0	32,5	37,0	43,4	43,6	41,8	41,0	12.429,4	12.690,7
34	40,0	40,0	31,5	33,4	42,7	43,7	37,4	37,6	12.466,8	12.728,3
35	40,0	40,0	30,1	37,0	42,2	43,1	33,6	33,3	12.500,4	12.761,7
36	40,0	40,0	25,6	35,0	42,3	42,1	31,1	29,9	12.531,6	12.791,5
37	40,0	40,0	57,7	70,8	43,4	42,6	27,7	25,7	12.559,2	12.817,2
38	40,0	40,0	61,3	110,4	41,9	41,6	23,7	20,8	12.583,0	12.838,0
39	40,0	35,6	159,3	203,5	42,2	41,4	18,0	12,9	12.600,9	12.851,0
40	12,2		77,1		41,2		4,0		12.604,9	

Resultados Depósito A - Recuperação Mássica Variável										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável	SDB Rec. Constante	SDB Rec. Variável
<b>Total</b>	<b>1.572,4</b>	<b>1.556,1</b>	<b>1.388,8</b>	<b>1.476,6</b>						

## Resultados Sequenciamento Depósito B

Resultados Depósito B										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
1	40,1	40,0	0,2	9,0	63,1	62,9	1.684,3	1.659,0	1.684,3	1.659,0
2	40,1	40,0	0,0	9,0	64,4	62,9	1.528,1	1.508,2	3.212,5	3.167,2
3	40,2	40,0	0,2	9,0	65,4	62,9	1.394,4	1.371,1	4.606,8	4.538,3
4	40,2	40,0	0,6	9,0	65,8	62,9	1.266,1	1.246,4	5.872,9	5.784,7
5	40,2	40,0	0,6	9,0	65,4	62,9	1.150,5	1.133,1	7.023,4	6.917,8
6	40,2	40,0	0,3	9,0	65,4	62,9	1.048,3	1.030,1	8.071,7	7.947,9
7	40,2	40,0	0,2	9,0	65,8	62,9	952,4	936,5	9.024,1	8.884,4
8	40,1	40,0	0,1	9,0	67,0	62,9	864,5	851,3	9.888,5	9.735,7
9	40,2	40,0	0,1	9,0	67,0	62,9	787,4	773,9	10.675,9	10.509,7
10	40,1	40,0	0,8	9,0	66,7	62,9	713,7	703,6	11.389,7	11.213,3
11	40,1	40,0	2,1	9,0	66,1	62,9	647,9	639,6	12.037,5	11.852,9
12	40,2	40,0	0,6	9,0	66,1	62,9	590,8	581,5	12.628,4	12.434,3
13	40,1	40,0	1,1	9,0	66,5	62,9	536,0	528,6	13.164,4	12.963,0
14	40,1	40,0	2,0	9,0	65,8	62,9	486,7	480,6	13.651,1	13.443,5
15	40,2	40,0	1,5	9,0	66,2	62,9	443,0	436,9	14.094,1	13.880,4
16	40,2	40,0	3,8	9,0	66,4	62,9	402,3	397,2	14.496,4	14.277,5
17	40,2	40,0	2,2	9,0	66,1	62,9	366,1	361,0	14.862,5	14.638,6
18	40,2	40,0	3,1	9,0	65,8	62,9	332,5	328,2	15.195,0	14.966,8
19	40,2	40,0	3,9	9,0	66,0	62,9	302,0	298,4	15.497,0	15.265,2
20	40,2	40,0	2,7	9,0	65,8	62,9	274,6	271,3	15.771,6	15.536,5
21	40,2	40,0	5,4	9,0	65,9	62,9	249,1	246,6	16.020,6	15.783,1
22	40,2	40,0	1,8	9,0	64,3	62,9	227,5	224,2	16.248,2	16.007,2
23	40,1	40,0	1,9	9,0	65,0	62,9	206,5	203,8	16.454,6	16.211,0
24	40,1	40,0	1,5	9,0	64,4	62,9	187,8	185,3	16.642,4	16.396,3
25	39,9	40,0	1,1	9,0	63,8	62,9	170,0	168,4	16.812,4	16.564,7
26	39,9	40,0	2,4	9,0	63,5	62,9	154,2	153,1	16.966,6	16.717,9
27	40,2	40,0	1,4	9,0	61,5	62,9	141,3	139,2	17.107,9	16.857,1
28	40,2	40,0	1,2	9,0	62,7	62,9	128,5	126,5	17.236,3	16.983,6
29	40,2	40,0	1,4	9,0	61,8	62,9	116,9	115,0	17.353,2	17.098,7
30	40,2	40,0	9,9	9,0	63,9	62,9	104,9	104,6	17.458,1	17.203,2
31	40,2	40,0	7,8	9,0	65,0	62,9	95,7	95,1	17.553,8	17.298,3
32	40,2	40,0	10,5	9,0	62,3	62,9	86,8	86,4	17.640,5	17.384,7
33	40,2	40,0	12,0	9,0	63,0	62,9	78,7	78,6	17.719,3	17.463,3
34	40,2	40,0	9,6	9,0	63,0	62,9	71,7	71,4	17.790,9	17.534,7
35	40,2	40,0	8,2	9,0	64,7	62,9	65,3	64,9	17.856,2	17.599,7
36	40,1	40,0	20,5	9,0	63,0	62,9	58,4	59,0	17.914,5	17.658,7
37	40,2	40,0	28,6	9,0	63,2	62,9	52,5	53,7	17.967,0	17.712,4
38	39,8	40,0	10,0	9,0	61,6	62,9	48,4	48,8	18.015,5	17.761,2
39	39,7	40,0	7,5	9,0	61,7	62,9	44,1	44,4	18.059,5	17.805,5
40	40,2	40,0	14,2	9,0	62,3	62,9	40,3	40,3	18.099,8	17.845,9

Resultados Depósito B										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
41	40,2	40,0	15,3	9,0	61,9	62,9	36,5	36,7	18.136,3	17.882,5
42	40,2	40,0	14,2	9,0	61,8	62,9	33,3	33,3	18.169,6	17.915,8
43	40,2	40,0	15,7	9,0	62,0	62,9	30,2	30,3	18.199,8	17.946,1
44	40,2	40,0	31,8	9,0	60,8	62,9	26,9	27,5	18.226,6	17.973,7
45	40,2	40,0	31,5	9,0	62,7	62,9	24,4	25,0	18.251,0	17.998,7
46	40,2	40,0	21,9	9,0	62,5	62,9	22,5	22,8	18.273,5	18.021,5
47	40,2	40,0	27,3	9,0	59,6	62,9	20,3	20,7	18.293,8	18.042,2
48	40,2	40,0	33,1	9,0	59,3	62,9	18,3	18,8	18.312,1	18.061,0
49	40,2	40,0	20,8	9,0	58,5	62,9	16,9	17,1	18.329,0	18.078,1
50	40,2	40,0	32,8	9,0	57,4	62,9	15,1	15,5	18.344,2	18.093,6
51	40,2	40,0	42,2	9,0	58,9	62,9	13,6	14,1	18.357,8	18.107,7
52	40,1	40,0	22,0	9,0	60,7	62,9	12,7	12,8	18.370,4	18.120,6
53	40,2	40,0	62,8	9,0	59,3	62,9	10,9	11,7	18.381,3	18.132,3
54	40,2	40,0	37,9	9,0	57,0	62,9	10,3	10,6	18.391,6	18.142,9
55	40,2	40,0	25,5	9,0	59,7	62,9	9,5	9,7	18.401,1	18.152,5
56	40,1	40,0	34,7	9,0	59,6	62,9	8,5	8,8	18.409,6	18.161,3
57	40,2	40,0	36,6	9,0	60,0	62,9	7,7	8,0	18.417,3	18.169,3
58	40,2	40,0	58,4	9,0	60,0	62,9	6,8	7,3	18.424,1	18.176,5
59	40,2	40,0	26,2	9,0	55,2	62,9	6,5	6,6	18.430,6	18.183,1
60	40,1	40,0	37,9	9,0	56,1	62,9	5,8	6,0	18.436,4	18.189,1
61	40,2	40,0	40,4	18,8	54,6	61,5	5,3	5,4	18.441,7	18.194,5
62	40,2	40,0	59,3	55,4	54,4	56,6	4,6	4,7	18.446,3	18.199,2
63	40,1	40,0	53,3	55,4	57,5	56,6	4,3	4,2	18.450,6	18.203,4
64	40,2	40,0	141,3	55,4	59,1	56,6	3,4	3,8	18.454,0	18.207,2
65	40,2	40,0	93,7	55,4	58,9	56,6	3,3	3,5	18.457,3	18.210,7
66	40,2	40,0	41,4	55,4	59,4	56,6	3,3	3,2	18.460,5	18.213,9
67	40,1	40,0	56,9	55,4	60,8	56,6	2,9	2,9	18.463,4	18.216,8
68	40,2	40,0	41,1	55,4	57,3	56,6	2,7	2,6	18.466,1	18.219,4
69	40,2	40,0	63,5	55,4	56,9	56,6	2,4	2,4	18.468,5	18.221,8
70	40,2	40,0	55,4	55,4	58,5	56,6	2,2	2,2	18.470,7	18.224,0
71	40,2	40,0	73,1	55,4	56,1	56,6	1,9	2,0	18.472,6	18.225,9
72	40,1	40,0	121,5	55,4	57,5	56,6	1,6	1,8	18.474,2	18.227,7
73	40,2	40,0	134,0	55,4	55,2	56,6	1,5	1,6	18.475,7	18.229,4
74	40,2	40,0	80,6	55,4	53,0	56,6	1,4	1,5	18.477,1	18.230,8
75	40,2	40,0	72,9	55,4	54,2	56,6	1,3	1,3	18.478,5	18.232,2
76	40,2	40,0	106,9	55,4	53,7	56,6	1,1	1,2	18.479,6	18.233,4
77	40,2	40,0	126,4	55,4	55,5	56,6	1,0	1,1	18.480,6	18.234,5
78	40,2	40,0	95,6	55,4	57,3	56,6	1,0	1,0	18.481,6	18.235,5
79	40,2	40,0	213,5	104,6	56,1	56,3	0,7	0,9	18.482,3	18.236,4
80	40,2	40,0	161,8	111,2	57,0	56,2	0,7	0,8	18.483,0	18.237,2
81	40,2	40,0	217,6	111,2	55,3	56,2	0,6	0,7	18.483,6	18.237,9

Resultados Depósito B										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
82	37,9	40,0	363,1	111,2	56,3	56,2	0,4	0,6	18.483,9	18.238,5
83		40,0		111,2		56,2		0,6		18.239,1
84		40,0		167,4		56,3		0,5		18.239,6
85		40,0		173,6		56,4		0,4		18.240,0
86		40,0		225,7		57,4		0,4		18.240,4
87		40,0		324,0		55,1		0,3		18.240,6
88		9,5		133,0		55,0		0,0		18.240,6
<b>Total</b>	<b>3.291,3</b>	<b>3.489,5</b>	<b>3.225,1</b>	<b>3.075,3</b>						



## Resultados Sequenciamento Depósito C – Modelo Estimado

Resultados Depósito C - Modelo Estimado										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
1	40,0	40,0	0,6	1,8	64,4	58,0	1.468,2	1.285,8	1.468,2	1.285,8
2	40,0	40,0	1,6	1,8	62,2	58,0	1.279,4	1.168,9	2.747,6	2.454,6
3	40,0	40,0	5,2	1,8	60,9	58,0	1.128,5	1.062,6	3.876,1	3.517,2
4	40,0	40,0	5,6	1,8	56,1	58,0	922,8	966,0	4.798,9	4.483,2
5	40,0	40,0	6,4	1,8	57,3	58,0	863,9	878,2	5.662,8	5.361,4
6	40,0	40,0	6,1	1,8	54,0	58,0	727,8	798,3	6.390,6	6.159,8
7	40,0	40,0	8,3	1,8	52,8	58,0	636,3	725,8	7.026,9	6.885,5
8	40,0	40,0	8,9	3,3	49,8	46,2	530,0	487,7	7.556,9	7.373,2
9	40,0	40,0	11,2	3,9	48,8	41,2	462,8	375,9	8.019,7	7.749,1
10	40,0	40,0	13,0	3,9	48,8	41,2	418,5	341,8	8.438,2	8.090,9
11	40,0	40,0	8,6	3,9	47,2	41,2	368,1	310,7	8.806,3	8.401,6
12	40,0	40,0	8,6	3,9	46,6	41,2	328,4	282,5	9.134,6	8.684,1
13	40,0	40,0	7,4	3,9	45,9	41,2	292,9	256,8	9.427,5	8.940,8
14	40,0	40,0	7,8	3,9	45,5	41,2	262,4	233,4	9.690,0	9.174,3
15	40,0	40,0	7,6	3,9	44,9	41,2	234,6	212,2	9.924,6	9.386,5
16	40,0	40,0	8,6	3,9	43,6	41,2	205,2	192,9	10.129,8	9.579,4
17	40,0	40,0	10,0	3,9	44,0	41,2	187,8	175,4	10.317,6	9.754,8
18	40,0	40,0	10,0	3,9	42,9	41,2	165,8	159,4	10.483,4	9.914,2
19	40,0	40,0	11,4	3,9	42,3	41,2	147,2	144,9	10.630,6	10.059,2
20	40,0	40,0	14,1	3,9	43,2	41,2	136,6	131,8	10.767,2	10.191,0
21	40,0	40,0	9,4	3,9	42,0	41,2	121,2	119,8	10.888,4	10.310,7
22	40,0	40,0	10,8	3,9	41,3	41,2	107,2	108,9	10.995,6	10.419,6
23	40,0	40,0	26,2	3,9	42,9	41,2	98,9	99,0	11.094,5	10.518,6
24	40,0	40,0	9,5	3,9	41,0	41,2	88,0	90,0	11.182,5	10.608,6
25	40,0	40,0	8,5	3,9	41,0	41,2	80,4	81,8	11.263,0	10.690,5
26	40,0	40,0	8,2	3,9	40,7	41,2	72,5	74,4	11.335,5	10.764,8
27	40,0	40,0	7,7	3,9	40,3	41,2	65,0	67,6	11.400,5	10.832,5
28	40,0	40,0	7,7	3,9	39,9	41,2	58,4	61,5	11.458,9	10.893,9
29	40,0	40,0	10,4	3,9	39,6	41,2	52,1	55,9	11.511,0	10.949,8
30	40,0	40,0	13,7	3,9	39,7	41,2	47,1	50,8	11.558,1	11.000,6
31	40,0	40,0	14,6	3,9	39,6	41,2	42,6	46,2	11.600,7	11.046,8
32	40,0	40,0	11,4	3,9	39,2	41,2	38,6	42,0	11.639,3	11.088,8
33	40,0	40,0	14,1	3,9	39,2	41,2	34,8	38,2	11.674,1	11.126,9
34	40,0	40,0	11,0	3,9	38,3	41,2	31,0	34,7	11.705,0	11.161,6
35	40,0	40,0	12,2	3,9	38,8	41,2	28,5	31,5	11.733,5	11.193,2
36	40,0	40,0	11,8	3,9	38,3	41,2	25,5	28,7	11.759,1	11.221,9
37	40,0	40,0	8,4	3,9	37,8	41,2	23,0	26,1	11.782,0	11.247,9
38	40,0	40,0	24,8	3,9	38,3	41,2	20,3	23,7	11.802,3	11.271,6
39	40,0	40,0	7,8	3,9	37,4	41,2	18,8	21,5	11.821,1	11.293,2
40	40,0	40,0	5,0	4,4	37,0	40,8	16,9	19,3	11.838,0	11.312,5

Resultados Depósito C - Modelo Estimado										
Período	Produção de Minério (Mtons)		Produção de Estéril (Mtons)		Teores de Ferro (%)		VPL (MUS\$)		VPL Acumulado (MUS\$)	
	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG	Cenário SDB	Cenário LG
41	40,0	40,0	10,2	10,8	36,6	35,9	15,0	14,5	11.853,0	11.327,0
42	40,0	40,0	18,6	10,8	36,8	35,9	13,4	13,2	11.866,3	11.340,2
43	40,0	40,0	12,5	10,8	36,7	35,9	12,3	12,0	11.878,7	11.352,2
44	40,0	40,0	13,2	10,8	36,6	35,9	11,1	10,9	11.889,8	11.363,2
45	40,0	40,0	13,9	10,8	36,5	35,9	10,1	9,9	11.899,9	11.373,1
46	40,0	40,0	18,7	10,8	36,4	35,9	9,0	9,0	11.908,9	11.382,1
47	40,0	40,0	13,8	10,8	36,2	35,9	8,2	8,2	11.917,1	11.390,3
48	40,0	40,0	18,7	10,8	35,9	35,9	7,3	7,5	11.924,4	11.397,8
49	40,0	40,0	11,5	10,8	35,2	35,9	6,6	6,8	11.931,0	11.404,6
50	40,0	40,0	12,1	10,8	35,0	35,9	5,9	6,2	11.936,9	11.410,7
51	40,0	40,0	14,0	10,8	34,9	35,9	5,3	5,6	11.942,3	11.416,3
52	40,0	40,0	13,8	10,8	34,8	35,9	4,8	5,1	11.947,1	11.421,4
53	40,0	40,0	13,3	10,8	34,7	35,9	4,4	4,6	11.951,5	11.426,1
54	40,0	40,0	15,1	10,8	34,4	35,9	3,9	4,2	11.955,4	11.430,3
55	40,0	40,0	7,2	10,8	33,9	35,9	3,6	3,8	11.959,0	11.434,1
56	40,0	40,0	7,5	10,8	33,8	35,9	3,2	3,5	11.962,2	11.437,6
57	40,0	40,0	20,9	10,8	34,4	35,9	2,9	3,2	11.965,1	11.440,8
58	40,0	40,0	31,8	10,8	34,1	35,9	2,5	2,9	11.967,6	11.443,6
59	40,0	40,0	58,8	10,8	34,3	35,9	2,1	2,6	11.969,7	11.446,2
60	40,0	40,0	48,4	20,7	34,3	36,1	2,0	2,3	11.971,6	11.448,6
61	40,0	40,0	172,4	49,9	35,8	36,8	1,1	2,0	11.972,7	11.450,6
62		40,0		49,9		36,8		1,8		11.452,4
63		40,0		80,7		36,7		1,5		11.453,8
64		40,0		133,0		36,3		1,0		11.454,9
65		30,7		210,6		36,5		0,3		11.455,1
<b>Total</b>	<b>2.441,1</b>	<b>2.590,7</b>	<b>940,2</b>	<b>890,4</b>						

## Resultados Minério e Estéril Sequenciamento Depósito C – Modelo Simulado

Resultados Minério e Estéril Depósito C - Modelo Simulado								
Período	Produção de Minério (Mtons)				Produção de Estéril (Mtons)			
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado
1	40,0	40,0	40,0	40,0	0,6	0,9	0,0	0,8
2	40,0	40,0	40,0	40,0	1,6	1,5	0,0	1,1
3	40,0	40,0	40,0	40,0	5,2	2,0	0,2	1,9
4	40,0	40,0	40,0	40,0	5,6	5,1	0,5	4,9
5	40,0	40,0	40,0	40,0	6,4	6,7	0,8	4,2
6	40,0	40,0	40,0	40,0	6,1	10,0	0,8	6,5
7	40,0	40,0	40,0	40,0	8,3	5,6	0,6	10,8
8	40,0	40,0	40,0	40,0	8,9	5,0	0,7	5,5
9	40,0	40,0	40,0	40,0	11,2	6,7	0,9	7,3
10	40,0	40,0	40,0	40,0	13,0	8,4	1,4	10,5
11	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	5,2	1,7	7,3
12	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	4,5	1,9	5,3
13	40,0	40,0	40,0	40,0	7,4	3,6	2,4	4,0
14	40,0	40,0	40,0	40,0	7,8	3,3	3,3	3,9
15	40,0	40,0	40,0	40,0	7,6	3,5	4,1	3,7
16	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	2,8	4,9	3,1
17	40,0	40,0	40,0	40,0	10,0	3,3	5,1	2,7
18	40,0	40,0	40,0	40,0	10,0	3,6	5,4	4,1
19	40,0	40,0	40,0	40,0	11,4	3,6	5,3	4,1
20	40,0	40,0	40,0	40,0	14,1	4,0	5,2	4,7
21	40,0	40,0	40,0	40,0	9,4	4,8	5,9	4,8
22	40,0	40,0	40,0	40,0	10,8	6,1	6,1	5,6
23	40,0	40,0	40,0	40,0	26,2	6,4	7,4	7,8
24	40,0	40,0	40,0	40,0	9,5	8,3	8,3	10,6
25	40,0	40,0	40,0	40,0	8,5	8,2	8,2	8,1
26	40,0	40,0	40,0	40,0	8,2	5,1	8,0	6,1
27	40,0	40,0	40,0	40,0	7,7	4,3	7,9	5,6
28	40,0	40,0	40,0	40,0	7,7	3,2	7,0	7,3
29	40,0	40,0	40,0	40,0	10,4	6,5	7,0	8,2
30	40,0	40,0	40,0	40,0	13,7	13,8	6,4	10,4
31	40,0	40,0	40,0	40,0	14,6	9,1	6,3	9,4
32	40,0	40,0	40,0	40,0	11,4	6,3	6,4	9,3
33	40,0	40,0	40,0	40,0	14,1	7,7	6,7	6,0
34	40,0	40,0	40,0	40,0	11,0	7,5	6,7	7,2
35	40,0	40,0	40,0	40,0	12,2	8,3	7,2	6,4
36	40,0	40,0	40,0	40,0	11,8	6,6	7,3	9,0
37	40,0	40,0	40,0	40,0	8,4	11,1	7,6	12,8
38	40,0	40,0	40,0	40,0	24,8	9,2	7,9	15,4
39	40,0	40,0	40,0	40,0	7,8	7,7	7,9	14,9
40	40,0	40,0	40,0	40,0	5,0	9,9	8,1	11,7
41	40,0	40,0	40,0	40,0	10,2	8,9	8,1	15,2
42	40,0	40,0	40,0	40,0	18,6	8,2	7,9	15,5
43	40,0	40,0	40,0	40,0	12,5	8,6	7,8	18,2
44	40,0	40,0	40,0	40,0	13,2	13,4	7,5	18,8
45	40,0	40,0	40,0	40,0	13,9	17,0	7,0	33,3
46	40,0	40,0	40,0	40,0	18,7	21,8	7,0	33,5
47	40,0	40,0	40,0	40,0	13,8	21,7	6,9	24,9
48	40,0	40,0	40,0	40,0	18,7	14,8	6,9	19,1
49	40,0	40,0	40,0	40,0	11,5	22,5	6,7	29,5
50	40,0	40,0	40,0	40,0	12,1	21,2	6,7	26,4

Resultados Minério e Estéril Depósito C - Modelo Simulado								
Período	Produção de Minério (Mtons)				Produção de Estéril (Mtons)			
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado
51	40,0	40,0	40,0	40,0	14,0	22,6	6,7	20,8
52	40,0	40,0	40,0	40,0	13,8	19,7	6,8	18,4
53	40,0	40,0	40,0	40,0	13,3	19,3	6,9	18,5
54	40,0	40,0	40,0	40,0	15,1	18,8	7,6	13,7
55	40,0	40,0	40,0	40,0	7,2	13,9	7,6	11,8
56	40,0	40,0	40,0	40,0	7,5	13,4	8,4	20,6
57	40,0	40,0	40,0	40,0	20,9	14,3	8,4	34,4
58	40,0	40,0	40,0	40,0	31,8	15,5	9,4	28,8
59	40,0	40,0	40,0	40,0	58,8	19,2	9,4	17,5
60	40,0	40,0	40,0	40,0	48,4	19,5	9,9	15,5
61	40,0	40,0	40,0	40,0	172,4	13,8	9,9	15,4
62		40,0	40,0	40,0		14,6	9,8	10,1
63		40,0	40,0	40,0		11,0	10,6	17,2
64		40,0	40,0	40,0		12,7	11,1	12,1
65		40,0	40,0	40,0		12,1	11,6	39,9
66		40,0	40,0	32,0		12,7	11,7	101,6
67		40,0	40,0			31,5	12,0	
68		40,0	40,0			33,0	12,3	
69		40,0	40,0			44,6	13,0	
70		30,1	40,0			116,0	15,5	
71			40,0				17,3	
72			40,0				18,9	
73			40,0				24,7	
74			40,0				29,5	
75			40,0				48,9	
76			26,0				74,0	
<b>Total</b>	<b>2.441,1</b>	<b>2.791,4</b>	<b>3.026,0</b>	<b>2.633,2</b>	<b>940,2</b>	<b>875,2</b>	<b>673,8</b>	<b>903,7</b>

## Resultados Teores de Ferro Sequenciamento Depósito C – Modelo Simulado

Resultados Teores de Ferro Depósito C - Modelo Simulado								
Período	Teores de Ferro (%)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
1	64,4	61,7	53,8	59,5	60,2	61,7	62,7	63,4
2	62,2	60,5	53,8	58,1	59,1	60,4	61,3	62,2
3	60,9	58,3	53,8	56,9	57,3	58,1	59,1	59,8
4	56,1	57,3	53,8	55,8	56,6	57,5	58,5	58,9
5	57,3	56,6	53,8	54,9	55,1	56,1	57,0	58,0
6	54,0	55,7	53,8	54,4	54,7	55,5	56,3	56,4
7	52,8	54,2	53,8	53,7	54,1	54,8	55,9	56,7
8	49,8	53,3	53,8	52,1	52,6	53,5	54,5	54,9
9	48,8	52,5	53,8	51,5	51,8	52,7	53,5	54,9
10	48,8	52,0	53,8	51,2	51,7	52,4	53,2	53,4
11	47,2	51,7	53,8	50,4	51,1	52,1	53,2	53,5
12	46,6	51,5	53,8	50,1	50,6	51,6	52,3	53,2
13	45,9	50,9	53,8	49,5	50,0	50,9	51,8	51,9
14	45,5	50,4	53,8	49,1	49,8	50,5	51,1	51,4
15	44,9	50,1	53,8	48,2	49,1	49,8	50,5	50,9
16	43,6	49,5	53,1	47,6	48,5	49,3	50,2	50,9
17	44,0	49,0	41,8	47,1	47,7	48,9	49,9	50,4
18	42,9	48,7	41,8	46,9	47,4	48,7	49,9	50,7
19	42,3	48,3	41,8	46,3	47,0	48,2	49,4	49,7
20	43,2	47,9	41,8	46,7	47,0	47,9	48,4	49,3
21	42,0	47,6	41,8	45,6	46,7	47,5	48,4	48,6
22	41,3	47,3	41,8	45,9	46,1	47,2	48,3	48,8
23	42,9	46,9	41,8	45,1	45,8	47,0	48,2	48,5
24	41,0	46,6	41,8	45,5	45,6	46,5	47,3	47,7
25	41,0	46,1	41,8	45,1	45,3	46,1	46,8	47,5
26	40,7	45,7	41,8	44,1	44,8	45,6	46,4	46,9
27	40,3	45,0	41,8	43,9	44,0	45,3	46,2	46,5
28	39,9	44,7	41,8	43,4	43,8	45,0	46,0	46,3
29	39,6	44,6	41,8	43,3	43,8	44,7	45,5	45,7
30	39,7	44,7	41,8	42,8	43,5	44,2	45,0	45,4
31	39,6	44,1	41,8	42,5	42,8	43,6	44,3	44,7
32	39,2	43,6	41,8	42,3	42,8	43,8	44,5	44,9
33	39,2	43,3	41,8	42,0	42,5	43,2	44,1	44,5
34	38,3	43,2	41,8	41,9	42,0	42,9	43,6	44,2
35	38,8	42,6	41,8	41,7	42,0	42,8	43,7	44,1
36	38,3	42,6	41,8	41,2	41,6	42,5	43,3	44,1
37	37,8	42,5	41,8	40,3	41,5	42,6	43,7	43,9
38	38,3	41,6	41,8	40,7	41,4	42,3	43,2	44,3
39	37,4	41,8	41,8	40,9	41,3	42,2	43,0	43,8
40	37,0	42,0	41,8	40,7	40,8	41,9	42,9	43,1
41	36,6	41,4	41,8	40,6	41,0	41,7	43,2	43,4
42	36,8	41,5	41,8	40,1	40,2	41,4	42,3	43,9
43	36,7	40,9	41,8	39,6	39,9	41,1	42,4	43,5
44	36,6	40,9	41,8	39,5	40,2	41,0	42,0	42,3
45	36,5	40,6	41,8	39,7	39,9	41,3	43,2	43,6
46	36,4	40,8	41,8	38,9	39,8	40,9	42,0	42,6
47	36,2	40,7	41,8	38,5	39,6	40,7	42,1	42,9
48	35,9	40,0	41,8	37,5	38,6	39,9	40,9	42,2
49	35,2	40,1	41,8	38,1	39,5	40,7	42,0	42,6
50	35,0	40,0	41,8	37,9	38,3	40,3	41,9	43,1

Resultados Teores de Ferro Depósito C - Modelo Simulado								
Período	Teores de Ferro (%)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
51	34,9	40,1	41,8	38,4	39,1	40,2	41,6	42,3
52	34,8	39,8	41,8	38,5	38,7	39,8	41,0	41,8
53	34,7	40,1	41,8	37,6	38,4	39,8	41,6	42,1
54	34,4	40,1	41,8	38,1	38,5	39,6	40,3	41,4
55	33,9	39,9	41,8	38,4	38,6	39,2	40,1	40,7
56	33,8	39,4	41,8	37,1	37,4	38,5	39,7	40,3
57	34,4	39,1	41,8	36,6	37,7	39,0	40,7	41,4
58	34,1	38,3	41,8	35,1	36,7	38,9	40,5	41,6
59	34,3	38,6	41,8	36,9	37,2	38,9	40,5	41,7
60	34,3	38,1	41,8	36,5	37,2	38,5	40,0	40,2
61	35,8	38,3	41,8	36,6	37,4	38,4	39,5	40,2
62		38,6	41,8	36,8	37,2	38,0	38,7	39,6
63		38,1	41,8	36,3	37,1	38,1	39,8	40,6
64		38,0	41,8	35,7	36,3	37,3	38,4	39,2
65		37,8	39,2	35,4	36,6	37,8	38,9	39,2
66		37,5	38,7	38,1	39,0	39,8	41,5	42,6
67		37,4	38,7					
68		36,7	38,7					
69		37,5	38,7					
70		40,3	38,7					
71			38,7					
72			38,7					
73			38,9					
74			39,5					
75			39,8					
76			39,6					

## Resultados VPL Sequenciamento Depósito C – Modelo Simulado

Resultados VPL Depósito C - Modelo Simulado								
Período	VPL (MU\$)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
1	1.468,2	1.393,9	1.163,2	1.328,5	1.345,2	1.389,8	1.417,2	1.437,9
2	1.279,4	1.238,4	1.057,5	1.171,6	1.199,4	1.230,6	1.254,2	1.276,0
3	1.128,5	1.074,3	961,4	1.036,7	1.047,3	1.065,8	1.087,7	1.106,0
4	922,8	953,0	874,0	914,8	933,1	950,8	973,5	980,9
5	863,9	851,0	794,5	813,6	818,5	838,8	854,8	875,1
6	727,8	753,0	722,3	729,7	733,8	747,8	762,2	763,0
7	636,3	663,4	656,6	646,5	653,0	664,9	681,7	694,9
8	530,0	590,1	596,9	568,2	576,6	589,1	604,1	610,4
9	462,8	521,7	542,7	506,4	511,0	524,1	535,5	553,8
10	418,5	464,8	493,3	453,9	461,7	469,7	480,4	482,5
11	368,1	422,4	448,5	407,6	414,5	426,5	438,0	441,5
12	328,4	381,3	407,7	367,3	373,1	383,2	391,0	399,5
13	292,9	340,7	370,6	330,2	334,5	343,3	351,8	352,4
14	262,4	305,0	337,0	297,4	302,7	309,0	313,7	315,9
15	234,6	273,5	306,3	262,8	270,3	275,4	281,2	283,8
16	205,2	244,5	273,7	235,8	241,4	247,1	253,8	258,6
17	187,8	219,5	178,7	210,7	214,0	221,8	228,6	232,0
18	165,8	197,4	162,5	188,9	192,5	200,2	207,1	211,0
19	147,2	177,5	147,7	169,2	173,2	179,7	186,1	187,5
20	136,6	159,4	134,3	155,5	157,7	161,4	164,0	168,2
21	121,2	143,4	122,1	136,7	141,4	144,8	149,0	150,3
22	107,2	129,2	111,0	125,0	125,5	130,5	135,0	136,7
23	98,9	116,1	100,9	109,9	112,9	117,4	121,8	122,7
24	88,0	104,3	91,7	100,6	101,4	104,5	107,1	108,3
25	80,4	93,4	83,4	91,1	92,0	94,4	96,6	98,5
26	72,5	84,4	75,8	80,5	82,2	84,5	86,9	88,4
27	65,0	75,6	68,9	72,6	73,3	76,2	78,6	79,4
28	58,4	68,2	62,6	64,3	65,8	68,3	70,5	71,5
29	52,1	61,4	56,9	58,2	59,6	61,4	62,9	63,4
30	47,1	55,0	51,8	51,6	53,0	54,4	56,1	57,0
31	42,6	49,7	47,1	46,4	47,2	48,7	49,9	50,7
32	38,6	44,8	42,8	42,1	43,0	44,6	45,7	46,4
33	34,8	40,3	38,9	38,0	38,9	39,9	41,2	41,8
34	31,0	36,5	35,4	34,2	34,6	35,8	36,9	37,7
35	28,5	32,6	32,1	31,2	31,4	32,5	33,7	34,2
36	25,5	29,7	29,2	27,4	28,1	29,1	30,0	30,9
37	23,0	26,6	26,6	23,9	25,2	26,3	27,3	27,5
38	20,3	23,6	24,1	22,1	22,8	23,4	24,3	25,2
39	18,8	21,7	22,0	20,1	20,3	21,2	22,0	22,5
40	16,9	19,8	20,0	18,2	18,4	19,2	19,9	20,2
41	15,0	17,7	18,1	16,4	16,6	17,2	18,1	18,4
42	13,4	16,1	16,5	14,5	14,6	15,4	15,9	17,0
43	12,3	14,4	15,0	12,7	12,9	13,7	14,5	15,0
44	11,1	12,9	13,6	11,5	11,9	12,4	13,0	13,1
45	10,1	11,5	12,4	10,1	10,3	10,9	11,9	12,2
46	9,0	10,4	11,3	8,7	9,2	9,8	10,3	10,6
47	8,2	9,4	10,2	7,9	8,5	9,0	9,5	10,0
48	7,3	8,6	9,3	6,9	7,5	8,0	8,4	8,9
49	6,6	7,6	8,5	6,3	6,9	7,3	7,7	8,0
50	5,9	6,9	7,7	5,7	5,9	6,6	7,1	7,4

Resultados VPL Depósito C - Modelo Simulado								
Período	VPL (MUS\$)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
51	5,3	6,3	7,0	5,4	5,8	6,0	6,4	6,5
52	4,8	5,7	6,4	5,1	5,1	5,4	5,7	6,0
53	4,4	5,3	5,8	4,3	4,5	4,9	5,3	5,6
54	3,9	4,8	5,3	4,1	4,2	4,5	4,7	4,9
55	3,6	4,4	4,8	3,8	3,9	4,0	4,2	4,3
56	3,2	3,9	4,3	3,1	3,2	3,4	3,7	3,7
57	2,9	3,5	3,9	2,6	2,9	3,1	3,4	3,5
58	2,5	3,1	3,6	2,2	2,5	2,8	3,1	3,3
59	2,1	2,8	3,3	2,4	2,4	2,7	2,9	3,0
60	2,0	2,5	3,0	2,1	2,2	2,4	2,6	2,6
61	1,1	2,3	2,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4
62		2,1	2,5	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
63		1,9	2,2	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0
64		1,7	2,0	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7
65		1,6	1,6	1,0	1,2	1,3	1,4	1,4
66		1,4	1,5	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
67		1,2	1,3					
68		1,1	1,2					
69		1,0	1,1					
70		0,5	1,0					
71			0,9					
72			0,8					
73			0,7					
74			0,6					
75			0,5					
76			0,2					



## Resultados VPL Acumulado Sequenciamento Depósito C – Modelo Simulado

Resultados VPL Acumulado Depósito C - Modelo Simulado								
Período	VPL Acumulado (MUS\$)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
1	1.468,2	1.393,9	1.163,2	1.328,5	1.345,2	1.389,8	1.417,2	1.437,9
2	2.747,6	2.632,3	2.220,7	2.500,1	2.544,6	2.620,4	2.671,3	2.713,9
3	3.876,1	3.706,6	3.182,1	3.536,8	3.591,9	3.686,3	3.759,0	3.819,9
4	4.798,9	4.659,6	4.056,1	4.451,6	4.525,0	4.637,1	4.732,5	4.800,9
5	5.662,8	5.510,6	4.850,6	5.265,2	5.343,4	5.475,8	5.587,3	5.676,0
6	6.390,6	6.263,6	5.572,9	5.994,9	6.077,2	6.223,6	6.349,5	6.438,9
7	7.026,9	6.927,0	6.229,5	6.641,5	6.730,2	6.888,6	7.031,2	7.133,8
8	7.556,9	7.517,1	6.826,4	7.209,6	7.306,8	7.477,7	7.635,3	7.744,3
9	8.019,7	8.038,8	7.369,1	7.716,0	7.817,8	8.001,7	8.170,8	8.298,1
10	8.438,2	8.503,6	7.862,4	8.170,0	8.279,4	8.471,4	8.651,2	8.780,6
11	8.806,3	8.925,9	8.310,9	8.577,6	8.693,9	8.897,9	9.089,2	9.222,1
12	9.134,6	9.307,2	8.718,6	8.944,9	9.067,0	9.281,2	9.480,2	9.621,6
13	9.427,5	9.647,9	9.089,3	9.275,1	9.401,5	9.624,4	9.832,0	9.973,9
14	9.690,0	9.952,9	9.426,2	9.572,5	9.704,2	9.933,4	10.145,7	10.289,8
15	9.924,6	10.226,4	9.732,5	9.835,3	9.974,6	10.208,8	10.426,9	10.573,6
16	10.129,8	10.470,9	10.006,3	10.071,1	10.216,0	10.455,9	10.680,7	10.832,2
17	10.317,6	10.690,3	10.185,0	10.281,7	10.430,0	10.677,7	10.909,2	11.064,2
18	10.483,4	10.887,7	10.347,4	10.470,6	10.622,5	10.877,9	11.116,3	11.275,2
19	10.630,6	11.065,2	10.495,1	10.639,8	10.795,6	11.057,6	11.302,4	11.462,7
20	10.767,2	11.224,6	10.629,4	10.795,4	10.953,3	11.219,0	11.466,4	11.630,9
21	10.888,4	11.368,1	10.751,4	10.932,1	11.094,7	11.363,8	11.615,4	11.781,2
22	10.995,6	11.497,3	10.862,4	11.057,1	11.220,3	11.494,4	11.750,4	11.917,9
23	11.094,5	11.613,4	10.963,3	11.167,0	11.333,2	11.611,8	11.872,2	12.040,6
24	11.182,5	11.717,6	11.055,0	11.267,6	11.434,6	11.716,3	11.979,3	12.149,0
25	11.263,0	11.811,0	11.138,3	11.358,8	11.526,5	11.810,6	12.075,9	12.247,4
26	11.335,5	11.895,4	11.214,1	11.439,3	11.608,8	11.895,2	12.162,8	12.335,8
27	11.400,5	11.971,0	11.283,0	11.511,8	11.682,1	11.971,4	12.241,4	12.415,2
28	11.458,9	12.039,2	11.345,7	11.576,1	11.747,9	12.039,7	12.311,9	12.486,7
29	11.511,0	12.100,6	11.402,6	11.634,2	11.807,5	12.101,1	12.374,9	12.550,2
30	11.558,1	12.155,6	11.454,4	11.685,9	11.860,5	12.155,5	12.431,0	12.607,2
31	11.600,7	12.205,3	11.501,4	11.732,3	11.907,7	12.204,2	12.480,8	12.657,9
32	11.639,3	12.250,0	11.544,2	11.774,4	11.950,7	12.248,8	12.526,5	12.704,2
33	11.674,1	12.290,3	11.583,1	11.812,5	11.989,6	12.288,7	12.567,7	12.746,1
34	11.705,0	12.326,8	11.618,4	11.846,7	12.024,2	12.324,5	12.604,6	12.783,7
35	11.733,5	12.359,4	11.650,6	11.877,9	12.055,6	12.357,0	12.638,3	12.817,9
36	11.759,1	12.389,1	11.679,8	11.905,4	12.083,7	12.386,1	12.668,3	12.848,8
37	11.782,0	12.415,7	11.706,4	11.929,3	12.108,9	12.412,4	12.695,6	12.876,3
38	11.802,3	12.439,3	11.730,5	11.951,4	12.131,6	12.435,8	12.719,9	12.901,5
39	11.821,1	12.461,0	11.752,5	11.971,5	12.151,9	12.457,0	12.741,9	12.924,1
40	11.838,0	12.480,8	11.772,4	11.989,7	12.170,3	12.476,2	12.761,8	12.944,3
41	11.853,0	12.498,4	11.790,6	12.006,1	12.186,9	12.493,3	12.779,9	12.962,7
42	11.866,3	12.514,6	11.807,1	12.020,5	12.201,5	12.508,7	12.795,9	12.979,7
43	11.878,7	12.528,9	11.822,1	12.033,2	12.214,4	12.522,4	12.810,4	12.994,7
44	11.889,8	12.541,8	11.835,7	12.044,8	12.226,3	12.534,8	12.823,4	13.007,8
45	11.899,9	12.553,4	11.848,1	12.054,9	12.236,6	12.545,7	12.835,2	13.020,0
46	11.908,9	12.563,8	11.859,3	12.063,6	12.245,8	12.555,5	12.845,6	13.030,7
47	11.917,1	12.573,2	11.869,6	12.071,5	12.254,3	12.564,5	12.855,1	13.040,7
48	11.924,4	12.581,8	11.878,9	12.078,4	12.261,8	12.572,5	12.863,5	13.049,7
49	11.931,0	12.589,4	11.887,4	12.084,7	12.268,7	12.579,8	12.871,2	13.057,6
50	11.936,9	12.596,3	11.895,1	12.090,4	12.274,6	12.586,4	12.878,3	13.065,0

Resultados VPL Acumulado Depósito C - Modelo Simulado								
Período	VPL Acumulado (MUS\$)							
	Cenário SDB Determinístico	Cenário SDB E-Type	Cenário LG E-Type	Cenário SDB Simulado MIN	Cenário SDB Simulado P90	Cenário SDB Simulado	Cenário SDB Simulado P10	Cenário SDB Simulado MAX
51	11.942,3	12.602,7	11.902,1	12.095,8	12.280,4	12.592,4	12.884,7	13.071,6
52	11.947,1	12.608,4	11.908,4	12.100,9	12.285,5	12.597,8	12.890,5	13.077,6
53	11.951,5	12.613,6	11.914,2	12.105,2	12.290,0	12.602,7	12.895,8	13.083,1
54	11.955,4	12.618,4	11.919,4	12.109,3	12.294,2	12.607,2	12.900,5	13.088,0
55	11.959,0	12.622,8	11.924,2	12.113,2	12.298,1	12.611,2	12.904,7	13.092,4
56	11.962,2	12.626,7	11.928,6	12.116,3	12.301,3	12.614,7	12.908,4	13.096,1
57	11.965,1	12.630,2	11.932,5	12.118,9	12.304,2	12.617,8	12.911,8	13.099,6
58	11.967,6	12.633,3	11.936,1	12.121,1	12.306,6	12.620,6	12.914,9	13.102,9
59	11.969,7	12.636,1	11.939,4	12.123,4	12.309,0	12.623,3	12.917,8	13.105,9
60	11.971,6	12.638,6	11.942,3	12.125,6	12.311,2	12.625,7	12.920,4	13.108,5
61	11.972,7	12.641,0	11.945,0	12.127,5	12.313,3	12.627,8	12.922,6	13.110,9
62		12.643,1	11.947,5	12.129,3	12.315,1	12.629,8	12.924,7	13.113,0
63		12.645,1	11.949,7	12.130,8	12.316,7	12.631,5	12.926,5	13.115,0
64		12.646,8	11.951,7	12.132,2	12.318,1	12.633,0	12.928,2	13.116,7
65		12.648,4	11.953,4	12.133,3	12.319,3	12.634,3	12.929,5	13.118,1
66		12.649,8	11.954,8	12.133,9	12.320,0	12.635,1	12.930,4	13.119,0
67		12.651,0	11.956,1					
68		12.652,1	11.957,3					
69		12.653,0	11.958,4					
70		12.653,5	11.959,4					
71			11.960,3					
72			11.961,2					
73			11.961,9					
74			11.962,5					
75			11.963,0					
76			11.963,2					

Resultados Minério, Estéril e Teores de Ferro Depósito C – Testes com Pilhas de Estoque

Resultados Minério, Estéril e Teores de Ferro Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque												
Período	Produção de Minério (Mtons)				Produção de Estéril (Mtons)				Teor de Ferro (%)			
	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt
1	40,0	40,0	40,0	40,0	0,6	0,4	0,4	0,4	64,4	64,4	64,4	64,4
2	40,0	40,0	40,0	40,0	1,6	1,5	1,5	1,6	62,2	62,2	62,2	62,2
3	40,0	40,0	40,0	40,0	5,2	5,2	5,2	5,2	60,9	60,9	60,9	60,9
4	40,0	40,0	40,0	40,0	5,6	5,6	5,6	5,6	56,1	56,1	56,1	56,1
5	40,0	40,0	40,0	40,0	6,4	5,4	5,7	6,0	57,3	57,3	57,3	57,3
6	40,0	40,0	40,0	40,0	6,1	6,0	6,1	6,1	54,0	54,0	54,0	54,0
7	40,0	40,0	40,0	40,0	8,3	8,1	8,3	8,3	52,8	52,8	52,8	52,8
8	40,0	40,0	40,0	40,0	8,9	8,7	8,9	8,9	49,8	49,8	49,8	49,8
9	40,0	40,0	40,0	40,0	11,2	11,1	11,2	11,2	48,8	48,8	48,8	48,8
10	40,0	40,0	40,0	40,0	13,0	11,9	12,4	12,7	48,8	48,8	48,8	48,8
11	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	7,9	8,4	8,6	47,2	47,2	47,2	47,2
12	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	5,2	6,9	7,7	46,6	46,6	46,6	46,6
13	40,0	40,0	40,0	40,0	7,4	4,5	5,9	6,6	45,9	45,9	45,9	45,9
14	40,0	40,0	40,0	40,0	7,8	4,3	5,4	6,2	45,5	45,5	45,5	45,5
15	40,0	40,0	40,0	40,0	7,6	5,7	6,6	7,3	44,9	44,9	44,9	44,9
16	40,0	40,0	40,0	40,0	8,6	7,4	8,6	8,6	43,6	43,6	43,6	43,6
17	40,0	40,0	40,0	40,0	10,0	7,6	9,4	9,9	44,0	44,0	44,0	44,0
18	40,0	40,0	40,0	40,0	10,0	9,8	10,0	10,0	42,9	42,9	42,9	42,9
19	40,0	40,0	40,0	40,0	11,4	10,7	11,4	11,4	42,3	42,3	42,3	42,3
20	40,0	40,0	40,0	40,0	14,1	11,6	13,4	14,0	43,2	43,2	43,2	43,2
21	40,0	40,0	40,0	40,0	9,4	8,7	9,4	9,4	42,0	42,0	42,0	42,0
22	40,0	40,0	40,0	40,0	10,8	10,0	10,8	10,8	41,3	41,3	41,3	41,3
23	40,0	40,0	40,0	40,0	26,2	24,5	26,2	26,2	42,9	42,9	42,9	42,9
24	40,0	40,0	40,0	40,0	9,5	7,4	9,5	9,5	41,0	41,0	41,0	41,0
25	40,0	40,0	40,0	40,0	8,5	6,3	8,5	8,5	41,0	41,0	41,0	41,0
26	40,0	40,0	40,0	40,0	8,2	6,3	8,2	8,2	40,7	40,7	40,7	40,7
27	40,0	40,0	40,0	40,0	7,7	5,2	7,7	7,7	40,3	40,3	40,3	40,3
28	40,0	40,0	40,0	40,0	7,7	5,5	7,7	7,7	39,9	39,9	39,9	39,9
29	40,0	40,0	40,0	40,0	10,4	6,7	10,4	10,4	39,6	39,6	39,6	39,6
30	40,0	40,0	40,0	40,0	13,7	7,9	13,7	13,7	39,7	39,7	39,7	39,7
31	40,0	40,0	40,0	40,0	14,6	9,0	14,6	14,6	39,6	39,6	39,6	39,6
32	40,0	40,0	40,0	40,0	11,4	5,8	11,4	11,4	39,2	39,2	39,2	39,2
33	40,0	40,0	40,0	40,0	14,1	8,9	14,1	14,1	39,2	39,2	39,2	39,2
34	40,0	40,0	40,0	40,0	11,0	9,5	11,0	11,0	38,3	38,3	38,3	38,3
35	40,0	40,0	40,0	40,0	12,2	10,3	12,2	12,2	38,8	38,8	38,8	38,8
36	40,0	40,0	40,0	40,0	11,8	9,2	11,8	11,8	38,3	38,3	38,3	38,3
37	40,0	40,0	40,0	40,0	8,4	6,0	8,4	8,4	37,8	37,8	37,8	37,8
38	40,0	40,0	40,0	40,0	24,8	18,0	24,8	24,8	38,3	38,3	38,3	38,3
39	40,0	40,0	40,0	40,0	7,8	5,6	7,8	7,8	37,4	37,4	37,4	37,4
40	40,0	40,0	40,0	40,0	5,0	4,8	5,0	5,0	37,0	37,0	37,0	37,0

Resultados Minério, Estéril e Teores de Ferro Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque												
Período	Produção de Minério (Mtons)				Produção de Estéril (Mtons)				Teor de Ferro (%)			
	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt
41	40,0	40,0	40,0	40,0	10,2	10,1	10,2	10,2	36,6	36,6	36,6	36,6
42	40,0	40,0	40,0	40,0	18,6	18,0	18,6	18,6	36,8	36,8	36,8	36,8
43	40,0	40,0	40,0	40,0	12,5	10,5	12,5	12,5	36,7	36,7	36,7	36,7
44	40,0	40,0	40,0	40,0	13,2	11,8	13,2	13,2	36,6	36,6	36,6	36,6
45	40,0	40,0	40,0	40,0	13,9	13,9	13,9	13,9	36,5	36,5	36,5	36,5
46	40,0	40,0	40,0	40,0	18,7	15,4	18,7	18,7	36,4	36,4	36,4	36,4
47	40,0	40,0	40,0	40,0	13,8	12,5	13,8	13,8	36,2	36,2	36,2	36,2
48	40,0	40,0	40,0	40,0	18,7	17,4	18,7	18,7	35,9	35,9	35,9	35,9
49	40,0	40,0	40,0	40,0	11,5	11,1	11,5	11,5	35,2	35,2	35,2	35,2
50	40,0	40,0	40,0	40,0	12,1	10,5	12,1	12,1	35,0	35,0	35,0	35,0
51	40,0	40,0	40,0	40,0	14,0	10,1	14,0	14,0	34,9	34,9	34,9	34,9
52	40,0	40,0	40,0	40,0	13,8	12,4	13,8	13,8	34,8	34,8	34,8	34,8
53	40,0	40,0	40,0	40,0	13,3	13,3	13,3	13,3	34,7	34,7	34,7	34,7
54	40,0	40,0	40,0	40,0	15,1	15,0	15,1	15,1	34,4	34,4	34,4	34,4
55	40,0	40,0	40,0	40,0	7,2	7,2	7,2	7,2	33,9	33,9	33,9	33,9
56	40,0	40,0	40,0	40,0	7,5	7,1	7,5	7,5	33,8	33,8	33,8	33,8
57	40,0	40,0	40,0	40,0	20,9	19,2	20,9	20,9	34,4	34,4	34,4	34,4
58	40,0	40,0	40,0	40,0	31,8	31,8	31,8	31,8	34,1	34,1	34,1	34,1
59	40,0	40,0	40,0	40,0	58,8	58,6	58,8	58,8	34,3	34,3	34,3	34,3
60	40,0	40,0	40,0	40,0	48,4	48,1	48,4	48,4	34,3	34,3	34,3	34,3
61	40,0	40,0	40,0	40,0	172,4	172,3	172,4	172,4	35,8	35,8	35,8	35,8
62		39,6	9,7	4,7		0,0	0,0	0,0		36,7	39,6	40,2
63		39,6				0,0				33,4		
64		20,5				0,0				31,8		
<b>Total</b>	<b>2.441,1</b>	<b>2.540,8</b>	<b>2.450,8</b>	<b>2.445,8</b>	<b>940,2</b>	<b>840,6</b>	<b>930,6</b>	<b>935,6</b>				

## Movimentação Estoques Depósito C – Testes com Pilhas de Estoque

Movimentação Estoques Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque									
Período	Cenário Pilha 100 Mt			Cenário Pilha 10 Mt			Cenário Pilha 5 Mt		
	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada
1	0,16	0,00	0,16	0,14	0,00	0,14	0,14	0,00	0,14
2	0,05	0,00	0,21	0,04	0,00	0,18	0,01	0,00	0,15
3	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,15
4	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,15
5	0,98	0,00	1,19	0,70	0,00	0,88	0,36	0,00	0,51
6	0,11	0,00	1,29	0,00	0,00	0,88	0,00	0,00	0,51
7	0,15	0,00	1,44	0,02	0,00	0,90	0,01	0,00	0,53
8	0,22	0,00	1,66	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,53
9	0,08	0,00	1,75	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,53
10	1,15	0,00	2,89	0,60	0,00	1,50	0,25	0,00	0,78
11	0,72	0,00	3,61	0,26	0,00	1,76	0,07	0,00	0,85
12	3,37	0,00	6,99	1,67	0,00	3,43	0,85	0,00	1,70
13	2,87	0,00	9,85	1,43	0,00	4,87	0,78	0,00	2,48
14	3,49	0,00	13,34	2,34	0,00	7,21	1,58	0,00	4,06
15	2,00	0,00	15,34	1,00	0,00	8,21	0,34	0,00	4,41
16	1,21	0,00	16,55	0,05	0,00	8,26	0,00	0,00	4,41
17	2,45	0,00	19,00	0,64	0,00	8,90	0,17	0,00	4,58
18	0,19	0,00	19,19	0,00	0,00	8,90	0,00	0,00	4,58
19	0,69	0,00	19,88	0,00	0,00	8,90	0,00	0,00	4,58
20	2,57	0,00	22,45	0,75	0,00	9,64	0,12	0,00	4,70
21	0,68	0,00	23,12	0,00	0,00	9,64	0,00	0,00	4,70
22	0,77	0,00	23,89	0,00	0,00	9,64	0,00	0,00	4,70
23	1,75	0,00	25,64	0,06	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
24	2,03	0,00	27,67	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
25	2,20	0,00	29,87	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
26	1,97	0,00	31,84	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
27	2,58	0,00	34,42	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
28	2,21	0,00	36,64	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
29	3,69	0,00	40,33	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
30	5,83	0,00	46,15	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
31	5,60	0,00	51,75	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
32	5,58	0,00	57,34	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
33	5,19	0,00	62,53	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
34	1,48	0,00	64,01	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
35	1,90	0,00	65,91	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
36	2,57	0,00	68,48	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
37	2,38	0,00	70,86	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
38	6,75	0,00	77,62	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
39	2,18	0,00	79,80	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
40	0,22	0,00	80,02	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
41	0,07	0,00	80,09	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
42	0,63	0,00	80,72	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
43	1,93	0,00	82,64	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
44	1,41	0,00	84,05	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
45	0,04	0,00	84,09	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
46	3,25	0,00	87,34	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
47	1,31	0,00	88,65	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70

Movimentação Estoques Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque									
Período	Cenário Pilha 100 Mt			Cenário Pilha 10 Mt			Cenário Pilha 5 Mt		
	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada	ROM para Estoque	Estoque para a Planta	Quantidade Estocada
48	1,23	0,00	89,88	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
49	0,38	0,00	90,26	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
50	1,63	0,00	91,89	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
51	3,89	0,00	95,78	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
52	1,35	0,00	97,13	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
53	0,01	0,00	97,14	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
54	0,01	0,00	97,15	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
55	0,00	0,00	97,15	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
56	0,33	0,00	97,48	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
57	1,70	0,00	99,18	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
58	0,01	0,00	99,20	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
59	0,14	0,00	99,34	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
60	0,24	0,00	99,58	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
61	0,12	0,00	99,70	0,00	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70
62	0,00	39,61	60,09	0,00	9,70	0,00	0,00	4,70	0,00
63	0,00	39,61	20,48						
64	0,00	20,48	0,00						

## Resultados VPL Depósito C – Testes com Pilhas de Estoque

Resultados VPL Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque								
Período	VPL (MUS\$)				VPL Acumulado (MUS\$)			
	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt
1	1.468,2	1.468,2	1.468,2	1.468,2	1.468,2	1.468,2	1.468,2	1.468,2
2	1.279,4	1.279,4	1.279,4	1.279,4	2.747,6	2.747,6	2.747,6	2.747,6
3	1.128,5	1.128,5	1.128,5	1.128,5	3.876,1	3.876,1	3.876,1	3.876,1
4	922,8	922,8	922,8	922,8	4.798,9	4.798,9	4.798,9	4.798,9
5	863,9	863,9	863,9	863,9	5.662,8	5.662,8	5.662,8	5.662,8
6	727,8	727,8	727,8	727,8	6.390,6	6.390,6	6.390,6	6.390,6
7	636,3	636,3	636,3	636,3	7.026,9	7.026,9	7.026,9	7.026,9
8	530,0	530,0	530,0	530,0	7.556,9	7.556,9	7.556,9	7.556,9
9	462,8	462,8	462,8	462,8	8.019,7	8.019,7	8.019,7	8.019,7
10	418,5	418,5	418,5	418,5	8.438,2	8.438,2	8.438,2	8.438,2
11	368,1	368,1	368,1	368,1	8.806,3	8.806,3	8.806,3	8.806,3
12	328,4	328,4	328,4	328,4	9.134,6	9.134,6	9.134,6	9.134,6
13	292,9	292,9	292,9	292,9	9.427,5	9.427,5	9.427,5	9.427,5
14	262,4	262,4	262,4	262,4	9.690,0	9.690,0	9.690,0	9.690,0
15	234,6	234,6	234,6	234,6	9.924,6	9.924,6	9.924,6	9.924,6
16	205,2	205,2	205,2	205,2	10.129,8	10.129,8	10.129,8	10.129,8
17	187,8	187,8	187,8	187,8	10.317,6	10.317,6	10.317,6	10.317,6
18	165,8	165,8	165,8	165,8	10.483,4	10.483,4	10.483,4	10.483,4
19	147,2	147,2	147,2	147,2	10.630,6	10.630,6	10.630,6	10.630,6
20	136,6	136,6	136,6	136,6	10.767,2	10.767,2	10.767,2	10.767,2
21	121,2	121,2	121,2	121,2	10.888,4	10.888,4	10.888,4	10.888,4
22	107,2	107,2	107,2	107,2	10.995,6	10.995,6	10.995,6	10.995,6
23	98,9	98,9	98,9	98,9	11.094,5	11.094,5	11.094,5	11.094,5
24	88,0	88,0	88,0	88,0	11.182,5	11.182,5	11.182,5	11.182,5
25	80,4	80,4	80,4	80,4	11.263,0	11.263,0	11.263,0	11.263,0
26	72,5	72,5	72,5	72,5	11.335,5	11.335,5	11.335,5	11.335,5
27	65,0	65,0	65,0	65,0	11.400,5	11.400,5	11.400,5	11.400,5
28	58,4	58,4	58,4	58,4	11.458,9	11.458,9	11.458,9	11.458,9
29	52,1	52,1	52,1	52,1	11.511,0	11.511,0	11.511,0	11.511,0
30	47,1	47,1	47,1	47,1	11.558,1	11.558,1	11.558,1	11.558,1
31	42,6	42,6	42,6	42,6	11.600,7	11.600,7	11.600,7	11.600,7
32	38,6	38,6	38,6	38,6	11.639,3	11.639,3	11.639,3	11.639,3
33	34,8	34,8	34,8	34,8	11.674,1	11.674,1	11.674,1	11.674,1
34	31,0	31,0	31,0	31,0	11.705,0	11.705,0	11.705,0	11.705,0
35	28,5	28,5	28,5	28,5	11.733,5	11.733,5	11.733,5	11.733,5
36	25,5	25,5	25,5	25,5	11.759,1	11.759,1	11.759,1	11.759,1
37	23,0	23,0	23,0	23,0	11.782,0	11.782,0	11.782,0	11.782,0
38	20,3	20,3	20,3	20,3	11.802,3	11.802,3	11.802,3	11.802,3
39	18,8	18,8	18,8	18,8	11.821,1	11.821,1	11.821,1	11.821,1
40	16,9	16,9	16,9	16,9	11.838,0	11.838,0	11.838,0	11.838,0

Resultados VPL Depósito C - Testes Com Pilhas de Estoque								
Período	VPL (MUS\$)				VPL Acumulado (MUS\$)			
	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt	Cenário Base	Pilha 100 Mt	Pilha 10 Mt	Pilha 5 Mt
41	15,0	15,0	15,0	15,0	11.853,0	11.853,0	11.853,0	11.853,0
42	13,4	13,4	13,4	13,4	11.866,3	11.866,3	11.866,3	11.866,3
43	12,3	12,3	12,3	12,3	11.878,7	11.878,7	11.878,7	11.878,7
44	11,1	11,1	11,1	11,1	11.889,8	11.889,8	11.889,8	11.889,8
45	10,1	10,1	10,1	10,1	11.899,9	11.899,9	11.899,9	11.899,9
46	9,0	9,0	9,0	9,0	11.908,9	11.908,9	11.908,9	11.908,9
47	8,2	8,2	8,2	8,2	11.917,1	11.917,1	11.917,1	11.917,1
48	7,3	7,3	7,3	7,3	11.924,4	11.924,4	11.924,4	11.924,4
49	6,6	6,6	6,6	6,6	11.931,0	11.931,0	11.931,0	11.931,0
50	5,9	5,9	5,9	5,9	11.936,9	11.936,9	11.936,9	11.936,9
51	5,3	5,3	5,3	5,3	11.942,3	11.942,3	11.942,3	11.942,3
52	4,8	4,8	4,8	4,8	11.947,1	11.947,1	11.947,1	11.947,1
53	4,4	4,4	4,4	4,4	11.951,5	11.951,5	11.951,5	11.951,5
54	3,9	3,9	3,9	3,9	11.955,4	11.955,4	11.955,4	11.955,4
55	3,6	3,6	3,6	3,6	11.959,0	11.959,0	11.959,0	11.959,0
56	3,2	3,2	3,2	3,2	11.962,2	11.962,2	11.962,2	11.962,2
57	2,9	2,9	2,9	2,9	11.965,1	11.965,1	11.965,1	11.965,1
58	2,5	2,5	2,5	2,5	11.967,6	11.967,6	11.967,6	11.967,6
59	2,1	2,1	2,1	2,1	11.969,7	11.969,7	11.969,7	11.969,7
60	2,0	2,0	2,0	2,0	11.971,6	11.971,6	11.971,6	11.971,6
61	1,1	1,1	1,1	1,1	11.972,7	11.972,7	11.972,7	11.972,7
62		2,2	0,6	0,3		11.974,9	11.973,3	11.973,0
63		1,8				11.976,7		
64		0,8				11.977,4		