

Bruno Hani Elias Korkis

**O impacto da operacionalização no valor da cava final de uma mina de
cobre e ouro a céu aberto**

São Paulo
2018

Bruno Hani Elias Korkis

**O impacto da operacionalização no valor da cava final de uma mina de
cobre e ouro a céu aberto**

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

Orientador: Prof. Dr. Giorgio
Francesco Cesare de Tomi

São Paulo

2018

TF-2018

K841i

Sysno 2929049

H2018#



Escola Politécnica - EPMI



31700000813

Ficha Catalográfica

Korkis, Bruno Hani Elias

O impacto da operacionalização no valor da cava final de uma mina de cobre e ouro a céu aberto, BK/ B.E.Korkis. São Paulo, 2018.

33 p.

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

1.Otimização de Lavra 2. Planejamento de Lavra. 3. Mineração a céu aberto. 4. Valor Presente Líquido

Aos meus familiares.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, em especial meus pais, Hani Aziz Korkis e Rafif Makdesi Elias, que me deram suporte e me ajudaram nesta jornada, que não foi curta.

Aos meus amigos e colegas da Escola Politécnica, que me proporcionaram boas risadas e companheirismo em meio as dificuldades e desafios que acompanham a graduação.

Também gostaria de agradecer a todos os funcionários da Datamine África, em especial ao time de consultoria de engenharia, que me ensinaram muito sobre mineração e pelos quais tem um apreço imenso. Em especial gostaria de agradecer aos engenheiros Bruno Panachão Abilleira e Lucas Kiefer, dois excelentes engenheiros e consultores, que me ensinaram grande parte dos conteúdos que estão apresentados neste trabalho.

Aos meus professores do departamento de engenharia de minas, em especial ao meu orientador Giorgio Francesco de Tomi.

Resumo

A otimização de lavra é uma importante etapa do processo de planejamento de lavra a longo prazo. A otimização é um norte importante para engenheiros de planejamento, que criam suas cavas sempre atentando a cava financeira, que por ser idealizada é impossível de se reproduzir operacionalmente. Dado isto, o objetivo deste trabalho é explicar algumas das razões pelas quais é impossível atingir a cava financeira em termos de valor, e analisar na prática, usando dados que reproduzem uma mina de cobre e ouro. Foi feita a cava financeira, que é produto de um software de otimização de lavra, que gera uma cava ideal em termos financeiros, e depois com base nesta foi desenhada uma cava operacional, posteriormente reintroduzida no software de otimização para análise de valor. Analisadas as diferenças entre as duas, notamos que o valor presente líquido da cava operacional é 11,1% menor que o da cava ideal.

Palavras-chave: Otimização de Lavra, Planejamento de Lavra, Mineração a Céu-Aberto, Valor Presente Líquido.

Abstract

Mine optimization is an important step in the process of long term mine planning. It acts as an important guide for mine planning engineers, who create their pits with the financial pit always in mind, and since the financial pit is an idealized version of the operational pit, it will never be achieved operationally. With that in mind, the objective of this work is to explain some of the reasons that make it impossible to reach the financial pit in terms of financial value, as well as analyzing it in practice, using a fictional copper-gold open pit mine. The financial pit was made using a pit optimization software, that generates an ideal pit in terms of financial value, and after that, using the financial pit as a guide, we designed a possible operational pit with a mine design software. This operational pit was later introduced into the pit optimization software, which generated our financial parameters for said pit. Analyzing the differences between the two, we noticed that the net present value of the operational pit was 11.1% smaller than the net present value of the financial pit.

Key words: Mine Optimization, Mine Planning, Open Pit Mining, Net Present Value.

Lista de Figuras

Figura 1: Lógica circular de otimização a céu aberto.....	16
Figura 2: NPV Scheduler	18
Figura 3: Visão Geral do Studio OP.....	19
Figura 4: Fluxograma do processo de criação de cavas incrementais	20
Figura 5: Exemplo de gráfico de cavas incrementais (por valor)	21
Figura 6: Tabela com dados do modelo de blocos, visualizado a partir do leitor de dados do software.....	23
Figura 7: Modelo de blocos visualizado no StudioOP.....	24
Figura 8: Modelo de blocos com a topografia inclusa na visualização	24
Figura 9: Corte Norte-Sul do modelo de blocos com a topografia inclusa (em vermelho).....	25
Figura 10: Taxa de desconto e produção anual no NPV Scheduler	27
Figura 11: Cava Financeira – NPV Scheduler	29
Figura 12: Corte Norte-Sul da Cava Financeira com a topografia inclusa	29
Figura 13: Visão planar do primeiro banco do design operacional (1955 m)..	31
Figura 14: Visão planar do primeiro banco do design operacional (1970 m)..	32
Figura 15: Cava operacional com rampas selecionadas	33
Figura 16: Visão Leste-Oeste da cava operacional comparada a cava financeira	34
Figura 17: Visão N-S da cava operacional comparada a cava financeira.....	34
Figura 18: Visão planar da cava Operacional.....	35
Figura 19: Cava operacional reintroduzida no software de Otimização	35
Figura 20: Corte norte sul das cavas sobrepostas com blocos abaixo da cava operacional	38
Figura 21: Corte norte sul das cavas sobrepostas com blocos acima da cava operacional	39
Figura 22: Cavas incrementais - Cava Financeira	41
Figura 23: Cavas incrementais - Cava operacional	41

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do modelo de blocos	23
Tabela 2: Preços de <i>commodities</i> minerais	26
Tabela 3: Parâmetros econômicos de processo.....	26
Tabela 4: Resultados Operacionais obtidos - Cava Financeira	28
Tabela 5: Resultados Financeiros obtidos - Cava Financeira.....	28
Tabela 6: Parâmetros Operacionais	32
Tabela 7: Resultados Operacionais obtidos - Cava Operacional.....	36
Tabela 8: Resultados Financeiros obtidos - Cava Operacional	36
Tabela 9: Diferenças entre os parâmetros financeiros	37
Tabela 10: Diferenças entre os parâmetros operacionais.....	37
Tabela 11: Quantificação das diferenças entre os parâmetros introduzidos na cava operacional.....	40

Sumário

1	Introdução e Objetivos	11
1.1	Introdução	11
1.1.1	A Otimização de Lavra como processo	11
1.1.2	Cava Financeira e Cava Operacional	12
1.2	Objetivos	12
2	Revisão Bibliográfica	13
2.1	Histórico da Otimização de Lavra	13
2.2	Conceitos de Otimização de Lavra.....	14
3	Metodologia.....	17
3.1	Considerações Iniciais	17
3.2	Softwares utilizados	18
3.2.1	Software de Otimização de Lavra.....	18
3.2.2	Software CAD	19
3.3	Calculo do Valor Presente Líquido e Cavas Incrementais	19
4	Resultados	22
4.1	Dados Utilizados – Cava Financeira	22
4.1.1	Modelo de Blocos	22
4.1.2	Geração do modelo econômico	25
4.1.3	Parâmetros geotécnicos e fatores de produção	26
4.2	Resultados – Cava Financeira	28
4.3	Dados Utilizados – Cava Operacional.....	30
4.4	Resultados – Cava Operacional.....	33
5	Discussão	37
5.1	Diferenças de valores entre as cavas	37
5.2	Diferenças no desenho e suas influências	38
5.3	Diferença nas cavas incrementais	40
6	Conclusão	43
7	Bibliografia	44

1 Introdução e Objetivos

1.1 Introdução

A otimização de lavra é um importante processo na mineração como um todo. A mesma é necessária para determinar o “rumo” mais financeiramente e operacionalmente viável de uma operação de mineração. (Silva, 2008)

A mesma visa alcançar objetivos que sirvam o longo prazo da operação a ser otimizada, maximizando o retorno econômico da mineração. É um processo iterativo e cíclico, devendo ser realizado diversas vezes, ao longo da vida da mina (“Life of Mine”), dado que ao longo da operação, o conhecimento dos parâmetros geológicos e experiência operacional aumentam.

1.1.1 A Otimização de Lavra como processo

Os processos de desenvolvimento, projeto e sequenciamento de lavra estão baseados geralmente em um único modelo determinista do corpo mineralizado. Deste modelo, gera-se um modelo computacional, onde os diversos parâmetros regionalizados são organizados em tabelas. Este modelo chamamos de “Modelo de Blocos”. A partir deste, que é uma das entradas em qualquer otimização de lavra, pode se começar o processo de otimização, tendo os dados geológicos e valores financeiros do minério a ser extraído.

O processo de otimização envolve algoritmos computacionais, como o de Lerchs-Grossmann, em que cada bloco a ser retirado do modelo de blocos tem um valor financeiro atrelado, e este bloco tem sua retirada em dependência com outros blocos, sendo checado se é financeiramente viável retirar outros blocos para retirar o bloco pretendido.

1.1.2 Cava Financeira e Cava Operacional

A cava financeira é o produto direto do processo de otimização utilizando softwares que maximizam o valor presente de uma cava, tendo como fatores limitantes aspectos geotécnicos e direções geográficas.

A cava financeira não leva em parâmetros operacionais essenciais para a operação de lavra, como: rampas, depósitos de minério, pilhas de estéril, aberturas para manobra de caminhões e etc. Por conta disto, o valor presente representado pela cava financeira é um valor idealizado, que não é possível de ser alcançado.

A cava operacional, por sua vez, engloba todos os fatores operacionais os quais a cava financeira não leva em conta. É elaborada por um engenheiro de longo prazo, em softwares do tipo CAD. Para sua elaboração, o engenheiro leva em conta os contornos da cava financeira, dimensão de equipamentos a serem utilizados, fatores geotécnicos e outros fatores não incluídos na otimização de cavas.

1.2 Objetivos

Será realizada uma comparação entre uma cava econômica, produto de softwares de otimização de lavra, com uma cava operacional, feita com base na cava econômica. Esta comparação englobará as diferenças entre os valores econômicos finais entre as duas cavas, e elucidará quais diferenças entre as duas causam estas discrepâncias de valores. Isto será feito estudando dados de uma mina de céu aberto de cobre e ouro.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico da Otimização de Lavra

Segundo C. Musingwini (2016), a aplicação da otimização de lavra e métodos de otimização genéricos tem raízes na disciplina de Investigação Operacional ou *Operations Research (OR)*, que tem suas origens na Força Aérea Britânica (RAF) em meados de 1930. Seu desenvolvimento continuou durante a Segunda Guerra Mundial, e enfim, começou a ser incorporado na mineração e em outros segmentos industriais por volta de 1960.

Com esta emergência de novas técnicas para otimização, duas figuras importantes fizeram avanços significativos na área: Helmut Lerchs e Ingo F. Grossmann, que na década de 60 desenvolveram um algoritmo para achar o design otimizado de uma mina a céu aberto. Lerchs e Grossmann eram engenheiros da IBM que trabalhavam em achar soluções de mercado que pudessem ser atendidas pela nova tecnologia dos computadores.

O algoritmo, também conhecido como algoritmo de Lerchs-Grossmann é um método utilizado para resolver o problema de otimização dos limites de uma cava, as vezes referido como o '*ultimate pit limit problem*'. Mais detalhes sobre o método desenvolvido serão elucidados adiante.

Quando perceberam que seu algoritmo não poderia ser implementado em computadores por conta do poder de processamento limitado da época, Lerchs e Grossmann publicaram seus achados no *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin* de janeiro de 1965, com a esperança de revisarem e exporem suas documentações do algoritmo, para que em um futuro próximo, quando as capacidades computacionais se desenvolvessem, o método pudesse ser aplicado.

E isto aconteceu. Em 1986, Jeff Whittle, que estava em contato com ambos e baseando-se nos seus trabalhos, desenvolveu o primeiro software que aplicava o método Lerchs-Grossmann de otimização, hoje software conhecido na indústria como Pacote Whittle.

Desde então, diversos softwares foram desenvolvidos, englobando os métodos de Whittle e construindo novos métodos a partir destes. Alguns dos softwares mais utilizados no mercado são: Vulcan (Maptek) Surpac (3ds), NPVS (Datamine) e MineSight (Hexagon).

2.2 Conceitos de Otimização de Lavra

A otimização de lavra a longo prazo tem como objetivo determinar a distribuição de quantidade e qualidade de minério a ser lavrado ao longo de uma linha de tempo. Segundo Picard e Smith (2004), o planejamento open pit pode ser definido como o problema de definir o contorno final de uma mina, em qual o lucro total, ou VPL (valor presente líquido), seja máximo, levando em conta fatores operacionais.

A otimização pelo método de Lerchs-Grossman em uma mina a céu aberto tem como princípio básico a premissa de que a mesma é minerada em duas direções, para baixo e lateralmente. Mas é limitada lateralmente por ângulos geotécnicos, e limitada na direção vertical pelo fator econômico de se retirar um bloco acima do bloco que possui interesse econômico. O algoritmo resolve este problema matemático achando o melhor valor que englobe retirar blocos economicamente viáveis, seguindo ângulos geotécnicos (Guimarães, 2007).

Um dos elementos essenciais para a otimização de lavra e planejamento de lavra em geral é o modelo de blocos, ou *block model*, que consiste em blocos arranjados em espaço tridimensional, que contém informações sobre teores e quantidades de minério e/ou outros parâmetros. Este é o *input* primário em um processo de

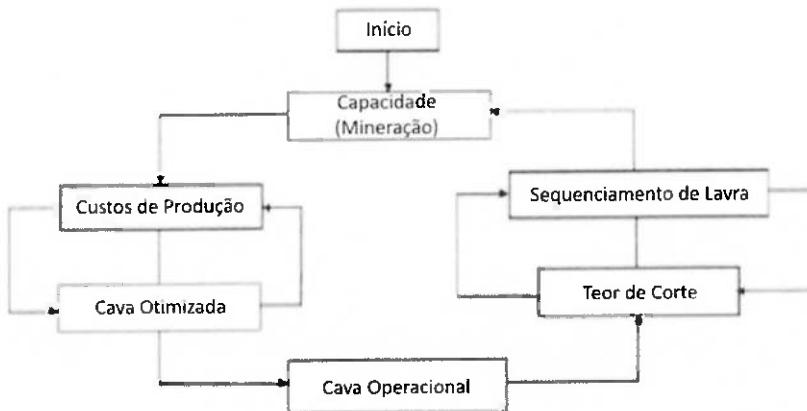
otimização, junto com outros inputs, como preço de minério, presente e futuro, teores de corte, ângulo geral das paredes, restrições técnicas e aspectos geométricos. O output do processo é a cava financeira otimizada, que é uma cava idealizada e que não pode ser minerada sem adicionar a mesma fatores operacionais (Do Carmo, 2001).

Para transformar uma cava financeira idealizada a uma cava operacional, são utilizados os conhecimentos gerais do engenheiro de planejamento de longo prazo e fatores da própria mina, ou seja, cada mina tem suas próprias particularidades e fatores que afetam o valor de uma cava e que devem ser incorporados no design de uma cava operacional.

Uma outra particularidade do processo de planejamento estratégico e de design a longo prazo é que o mesmo é um processo circular e que deve ser realizado diversas vezes até se chegar a uma cava satisfatória. Mas o processo é inherentemente circular e cíclico, dado que para se maximizar o VPL (valor presente líquido) de uma cava, os blocos que compõem o modelo de blocos devem ter um parâmetro econômico embutido aos mesmos, que é desconhecido até que se faça o primeiro sequenciamento dos mesmos, e a sequência de mineração não é conhecida até que se defina o contorno da cava final e os teores de corte.

Com todas estas particularidades expostas, se vê que o processo de otimização de uma cava aberta envolve diversos *inputs* e é uma tarefa que mobiliza todo o capital pensante de uma mina, com engenheiros, geólogos e geotécnicos tendo que trabalhar em equipe para produzir um planejamento estratégico satisfatório para a operação em questão, e a gerencia da mina conduzindo e dando norte ao processo para que o mesmo atenda aos interesses da diretoria e dos acionistas da empresa.

Figura 1: Lógica circular de otimização a céu aberto



Fonte: Osanloo et al. 2008 (Traduzido)

Como pode ser visto, o processo de otimização de lavra é um processo multidisciplinar, que para ser desenvolvido leva em conta diversas disciplinas de diversas áreas, como da engenharia de minas, produção e computacional, geologia e finanças.

3 Metodologia

3.1 Considerações Iniciais

Para atingir os objetivos, serão usados métodos gerais de otimização de lavra, que incluem: otimização inicial com *inputs* econômicos e o modelo de bloco, geração da cava econômica, ajustes operacionais para obter a cava operacional, geração de cavas incrementais tanto da cava financeira e operacional e posterior análise das mesmas.

Algumas razões para as discrepâncias já são esperadas, como:

- Abertura do primeiro banco em uma cota maior que a menor cota da cava financeira;
- Planejamento operacional de pilhas de reserva;
- Planejamento operacional de pilhas de estéreis;
- Inclusão de rampas, tanto de longo prazo quanto de curto e médio prazo;
- Adaptação da cava financeira para uma cava operacional com relação a curvas (curvas acentuadas, curvas suaves) e outros aspectos operacionais para viabilizar a extração levando em conta espaços para o maquinário operar.

Todos estes pontos fazem com que o valor econômico de uma cava decresça.

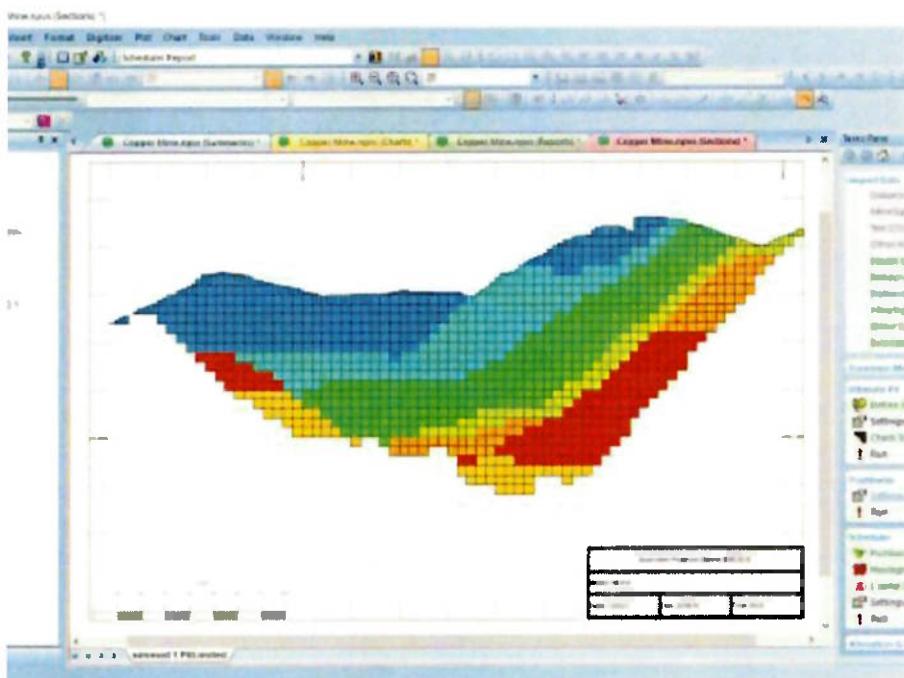
3.2 Softwares utilizados

3.2.1 Software de Otimização de Lavra

Para a etapa de otimização de lavra e sequenciamento, utilizaremos o software NPV Scheduler ©. O software utiliza o algoritmo de Lerchs-Grossmann para definir a melhor configuração de blocos a serem retirados, que geram o maior valor presente.

O NPV Scheduler possui funcionalidades como otimização do teor de corte, gerenciamento de depósitos de minérios, geração de cavas intermediárias e otimização das mesmas e otimização considerando a blendagem de material produzido.

Figura 2: NPV Scheduler

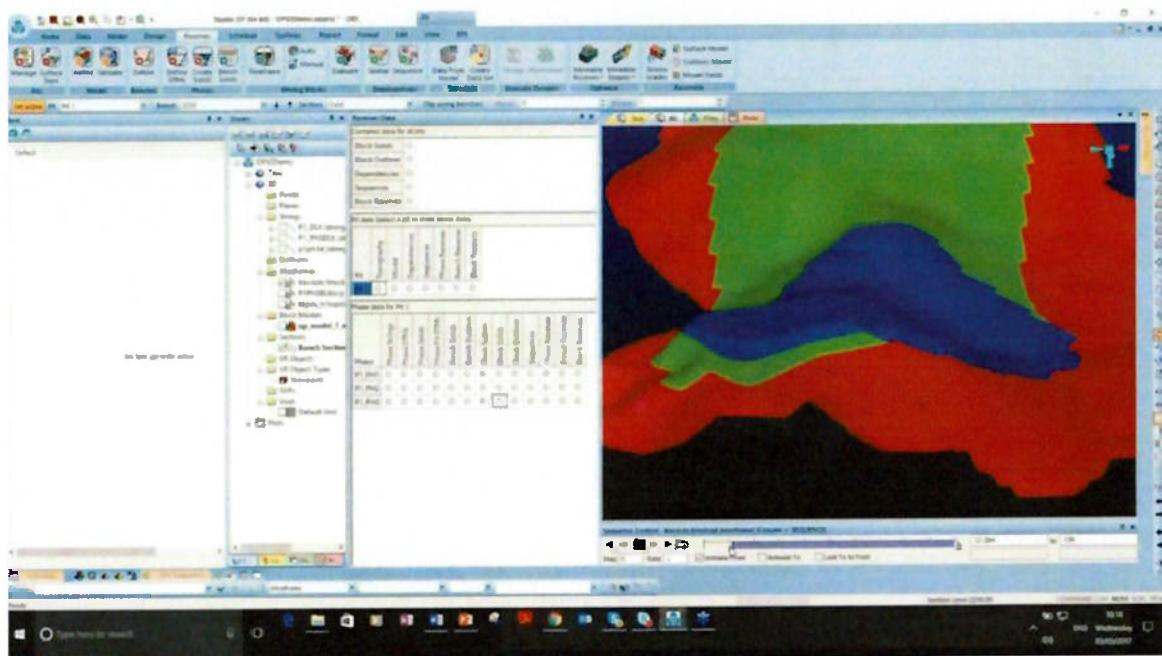


Fonte: Datamine

3.2.2 Software CAD

Já para a etapa de design de cava operacional, será utilizado o software Studio OP®, da Datamine. O mesmo possui extensa integração com o software NPV Scheduler ©, também possuindo funções de sequenciamento de curto e médio prazo.

Figura 3: Visão Geral do Studio OP



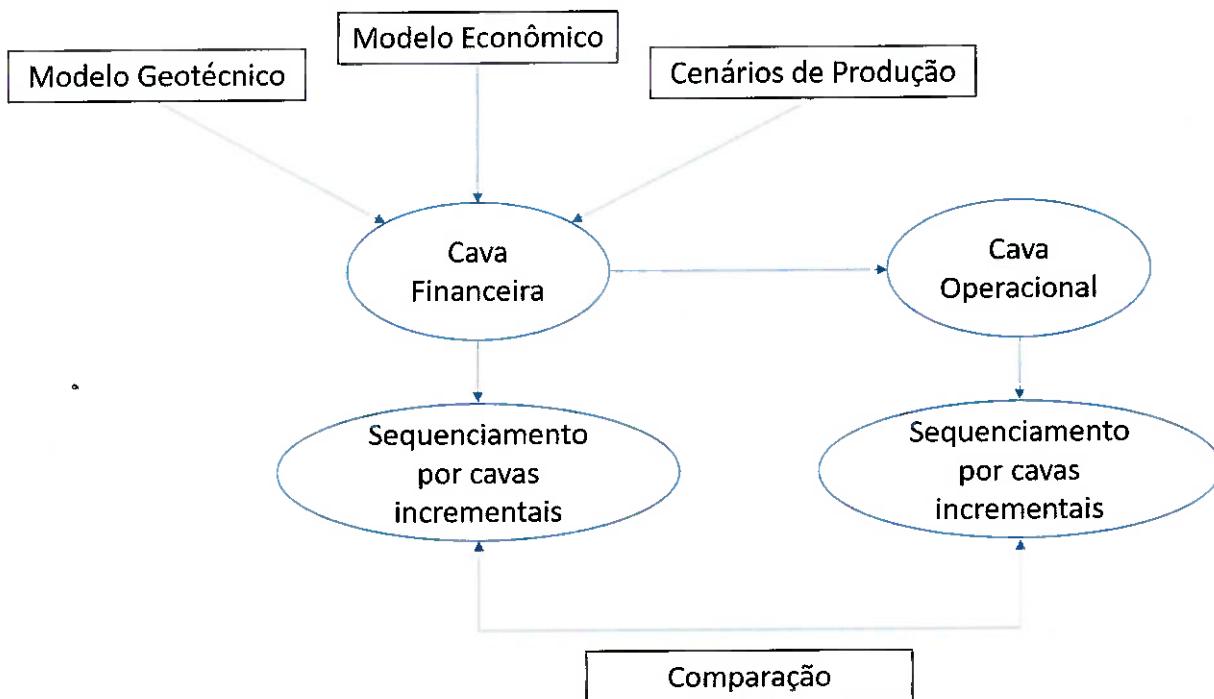
Fonte: Datamine

3.3 Cálculo do Valor Presente Líquido e Cavas Incrementais

Durante o desenvolvimento deste trabalho, será citado inúmeras vezes o valor presente líquido de uma cava, que está relacionado ao lucro que se obtém da mesma, considerando os fluxos de caixas no tempo. A maneira com que o software (e também a metodologia geral dos softwares que utilizam o algoritmo de Lerchs-Grossmann) de calcular o VPL de uma cava segue etapas que serão explicadas a seguir.

Primeiramente, com a introdução do modelo econômico e dos custos e preços, o software calcula cavas incrementais, (“LG Phases”), que servem como cavas intermediárias entre não minerar e a cava otimizada. O cálculo das cavas incrementais se faz penalizando o preço total da *commodity* a ser minerada, ajustando seu preço a 0% seu valor total, e incrementando gradualmente até que se chegue a 100% do valor. Com o aumento do preço da *commodity*, a cava aumenta de tamanho gradativamente, pois novas áreas podem ser mineradas com lucro econômico, e quando a *commodity* mineral chega a 100% do seu valor no incremento, o software usa o valor da produção anual e a taxa de desconto utilizada para obter o valor do VPL da cava financeira, e produz um sequenciamento básico de produção. O fluxograma abaixo ilustra o processo:

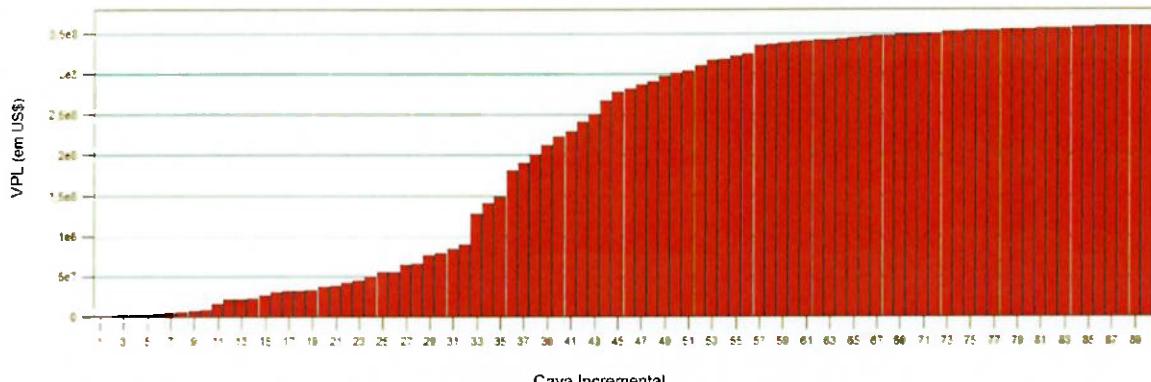
Figura 4: Fluxograma do processo de criação de cavas incrementais



Fonte: Elaboração Própria

Podemos notar que o sequenciamento por cavas incrementais também pode ser feito da cava operacional, que ocorre quando reintroduzimos a cava operacional no software de otimização de lavra, processo este que será feito neste trabalho.

Figura 5: Exemplo de gráfico de cavas incrementais (por valor)



Fonte: Elaboração Propria – NPV scheduler

Os gráficos gerados tem no eixo das ordenadas o valor que deseja se analisar (VPL, Tonelagem ou volume total) das cavas incrementais, e no eixo horizontal temos o numero de cavas, separadas pela porcentagem do valor total do preço da commodity.

4 Resultados

4.1 Dados Utilizados – Cava Financeira

O processo responsável pela geração da cava financeira pelo software de otimização de lavra pode ser dividido em diversas etapas para chegar ao produto final. As etapas principais são:

1. Importar o modelo de blocos com teor e densidade de cada bloco;
2. Importar topografia da região;
3. Geração do modelo econômico (modelo de blocos com os parâmetros econômicos de custos de mineração e processamento incluídos);
4. Inclusão dos preços das commodities a serem mineradas;
5. Inclusão de parâmetros geotécnicos (ângulos de face, ângulos globais e outros parâmetros geotécnicos);
6. Inclusão da taxa de desconto a ser utilizada pelo software, assim como a tonelagem anual a ser lavrada.

O presente trabalho irá cobrir todos estes parâmetros e apresentar os resultados obtidos

4.1.1 Modelo de Blocos

O modelo de blocos utilizado foi fornecido pela empresa Datamine, e simula parâmetros geológicos de uma mina a céu-aberto de cobre e ouro. O modelo de bloco é extenso, e cobre uma grande área, oferecendo diversas possibilidades para elaboração das cavas a céu aberto. Os blocos de minério estão divididos em sulfetos e óxidos de cobre.

Tabela 1 - Parâmetros do modelo de blocos**Tabela – Parâmetros do modelo de Blocos**

Número de Blocos	321.000
Comprimento dos blocos	10 metros
Altura dos blocos	10 metros
Largura dos blocos	10 metros
Tonelagem de minério no modelo	411,1 milhões de toneladas
Tonelagem de estéril no modelo	268,5 milhões de toneladas
Densidade Média	2,55

Fonte: Datamine

Figura 6: Tabela com dados do modelo de blocos, visualizado a partir do leitor de dados do software

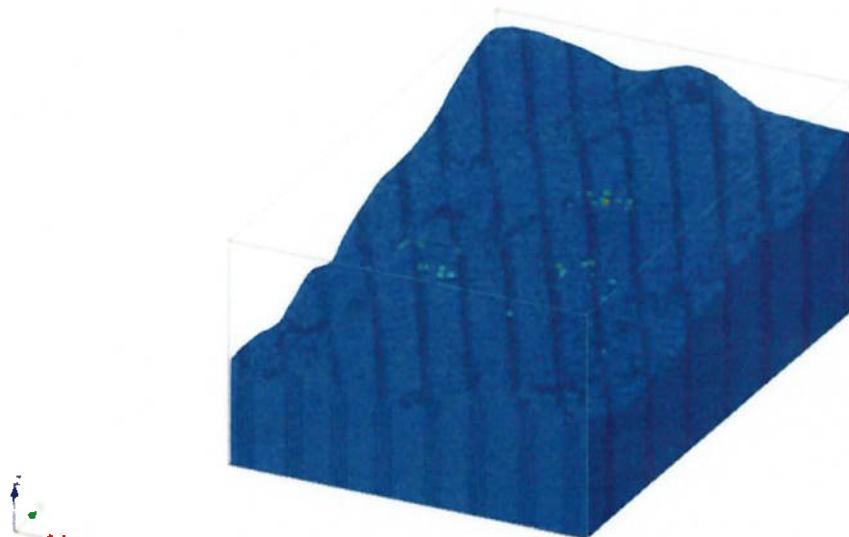
RECORD	X (m)	Y (m)	Z (m)	AU (m)	KINC (m)	VINC (m)	ZINC (m)	DENSITY (m)	ROCKCODE ...	MCAF (m)	PCAF (m)	SIM1 (m)	SIM2 (m)	SIM3 (m)	SIM4 (m)	SIM5 (m)	
39443	55712	4795	10345	1925	0.0469	10	10	10	2,54	1	1.6675	1	0.1662	0.05	0.1089	0.1256	
39444	55713	4795	10345	1935	0.0468	10	10	10	2,54	1	1.6625	1	0.0756	0.2633	0.2641	0.1887	
39445	55714	4795	10345	1945	0.0469	10	10	10	2,54	1	1.6375	1	0.1933	0.0456	0.2011	0.6037	
39446	55715	4795	10345	1955	0	10	10	10	1,8	0	1.6125	1	0	0	0	0	
39447	55716	4795	10345	1965	0	10	10	10	1,8	0	1.5875	1	0	0	0	0	
39448	55717	4795	10345	1975	0	10	10	10	1,8	0	1.5625	1	0	0	0	0	
39449	55718	4795	10345	1985	0	10	10	10	1,8	0	1.5375	1	0	0	0	0	
39450	55719	4795	10345	1995	0	10	10	10	1,8	0	1.5125	1	0	0	0	0	
39451	55720	4795	10345	2005	0	10	10	10	1,8	0	1.4875	1	0	0	0	0	
39452	55721	4795	10345	2015	0	10	10	10	1,8	0	1.4625	1	0	0	0	0	
39453	55722	4795	10345	2025	0	10	10	10	1,8	0	1.4375	1	0	0	0	0	
39454	55723	4795	10345	2035	0	10	10	10	1,8	0	1.4125	1	0	0	0	0	
39455	55724	4795	10345	2045	0.7129	10	10	10	2,54	1	1.3875	1	0.2639	0.1807	0.2013	0.0956	
39456	55725	4795	10345	2055	0.7217	10	10	10	2,54	1	1.3625	1	0.7308	0.0411	0.5122	0.0767	
39457	55726	4795	10345	2065	0.7304	10	10	10	2,54	1	1.3375	1	0.2078	0.0689	0.2633	0.2311	
39458	55727	4795.2	10342.5	2075	0.7206	5	5	10	2,54	1	1.3125	1	0.7128	0.109	0.589	0.0378	
39459	55728	4795.2	10342.5	2072.999023	0.7206	5	5	5	5.997986	2,54	1	1.3175	1	0.7128	0.109	0.589	0.0378
39460	55729	4797.5	10342.5	2072.177979	0.7206	5	5	5	2,54	1	1.3125	1	0.7128	0.109	0.589	0.0378	
39461	55730	4797.5	10342.5	2082.833006	0	5	5	5	2,54	1	1.3029	1	0.7128	0.109	0.589	0.0378	
39462	55731	4797.5	10342.5	2082.933005	0	5	5	5	2,54	1	1.2927	1	0	0	0	0	
39463	55732	4797.5	10342.5	2082.933005	0	5	5	5	2,54	1	1.2927	1	0	0	0	0	
39464	55733	4795	10355	1805	0	10	10	10	1,8	0	1.9875	1	0	0	0	0	
39465	55751	4795	10355	1815	0	10	10	10	1,8	0	1.9625	1	0	0	0	0	
39466	55752	4795	10355	1825	0	10	10	10	1,8	0	1.9375	1	0	0	0	0	
39467	55753	4795	10355	1835	0	10	10	10	1,8	0	1.9125	1	0	0	0	0	
39468	55754	4795	10355	1845	0	10	10	10	1,8	0	1.8875	1	0	0	0	0	
39469	55755	4795	10355	1855	0	10	10	10	1,8	0	1.8625	1	0	0	0	0	
39470	55756	4795	10355	1865	0	10	10	10	1,8	0	1.8375	1	0	0	0	0	
39471	55757	4795	10355	1875	0	10	10	10	1,8	0	1.8125	1	0	0	0	0	
39472	55758	4795	10355	1885	0	10	10	10	1,8	0	1.7875	1	0	0	0	0	
39473	55759	4795	10355	1895	0	10	10	10	1,8	0	1.7625	1	0	0	0	0	
39474	55760	4795	10355	1905	0	10	10	10	1,8	0	1.7375	1	0	0	0	0	
39475	55761	4795	10355	1915	0.7469	10	10	10	2,54	1	1.7125	1	0.05	0.0578	0.0325	0.0894	
39476	55762	4795	10355	1925	0.0469	10	10	10	2,54	1	1.6875	1	0.389	0.04	0.1394	0.0689	
39477	55763	4795	10355	1935	0.0468	10	10	10	2,54	1	1.6625	1	0.0711	0.1211	0.0567	0.0967	
39478	55764	4795	10355	1945	0.036	10	10	10	2,54	1	1.6375	1	0.0389	0.2344	0.042	0.1811	

Fonte: Datamine

Cada linha do arquivo corresponde a um bloco, contendo informações de: coordenadas dos centroides do bloco, comprimento, altura e largura do mesmo, teor de cobre e de ouro, densidade e numerador para definição de sub-células.

O modelo de blocos utilizado neste trabalho possui células inteiras e também possui sub-células 2x2 nas regiões limítrofes a topografia.

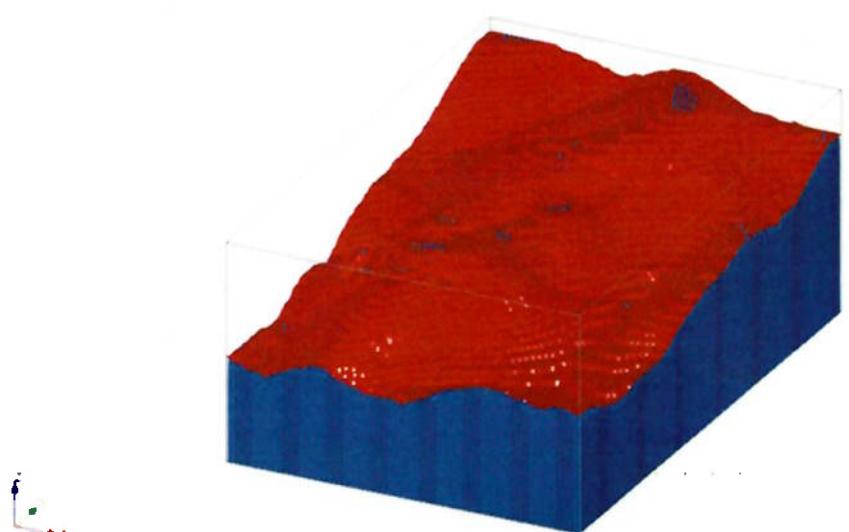
Figura 7: Modelo de blocos visualizado no StudioOP



Fonte: Datamine

Também importamos a topografia da região para o cálculo do modelo econômico. Esta topografia foi fornecida pela empresa, e acompanha os dados do modelo de bloco durante a etapa inicial de geração da cava financeira. A topografia utilizada no software é uma representação 3D de pontos topográficos coletados.

Figura 8: Modelo de blocos com a topografia inclusa na visualização



Fonte: Datamine

Figura 9: Corte Norte-Sul do modelo de blocos com a topografia inclusa (em vermelho)



Fonte: Elaboração Própria

A figura 9 mostra o modelo de blocos confinado pela topografia, e é possível também ver os blocos que contêm sub-células nas regiões limitadas pela topografia. As sub-células são geradas para que o modelo seja mais preciso e tenha maior aderência à topografia. Também é possível ver a legenda utilizada para colorir os blocos de acordo com seu teor de cobre.

4.1.2 Geração do modelo econômico

O modelo econômico incorpora valores financeiros e econômicos aos blocos do modelo de bloco. Para sua geração, foi necessária a introdução dos preços de venda das commodities minerais extraídas, assim como custos de mineração e de processamento, assim gerando um

Para a data da análise (22 de outubro de 2018) temos que os preços das commodities são os seguintes:

Tabela 2: Preços de *commodities* minerais

Commodity	Preço
Ouro (g)	US\$ 39,29
Cobre (t)	US\$ 6.283

Fonte: LME (London Metal Exchange)

Além dos preços de commodities minerais, temos também que introduzir custos de mineração e de processamento para cada bloco. Temos que o processamento do minério se dá por 2 processos, a depender se o mesmo é da classe de sulfetos ou de óxidos. Para óxidos, o processamento se dá por moagem, e para sulfetos por lixiviação.

Tabela 3: Parâmetros econômicos de processo

Parâmetro	Valor
Custo de mineração (por tonelada)	1 US\$/t
Custo de moagem (por tonelada - Cobre)	200 US\$/t
Recuperação (Moagem – Cobre)	88%
Custo de lixiviação (por tonelada)	230 US\$/t
Custo adicionais (por grama de Au)	5 US\$/t

Fonte: Elaboração Própria

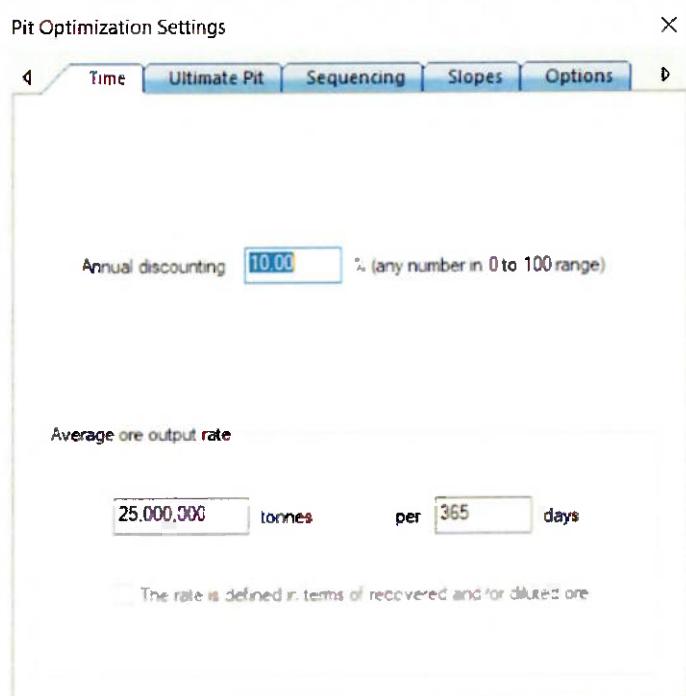
4.1.3 Parâmetros geotécnicos e fatores de produção

Geralmente os ângulos geotécnicos mudam dependendo da direção de lavra, e com o passar do tempo, novos tipos de rochas são expostos e ângulos podem mudar de banco para banco, tornando o processo de planejamento de lavra mais complexo. Por simplificação, definimos para o parâmetro geotécnico um ângulo global inter-rampas de 65° em todas as direções, dado que o escopo deste trabalho é analisar mudanças de valor de uma cava otimizada para uma cava operacional, e não montar um planejamento de lavra perfeito. Este ângulo é posteriormente utilizado para definir os ângulos de face das bancadas, bermas e altura dos bancos na cava operacional.

Para a taxa de desconto, utilizamos uma taxa de 10%. De todos os parâmetros citados até então a taxa de desconto tem o maior efeito sobre o valor presente líquido total. A taxa de desconto utilizada provém de dados obtidos do LAPOL – USP para minas de cobre.

Também é necessário informar a produção anual da mina, que no nosso caso é de 25 milhões de toneladas.

Figura 10: Taxa de desconto e produção anual no NPV Scheduler



Fonte: NPV Scheduler (DATAMINE)

Estes dados são essenciais para a geração da cava financeira, como descrito na seção 3.3 (Cálculo do Valor Presente Líquido e Cavas Incrementais)

4.2 Resultados – Cava Financeira

Após introduzir todos os parâmetros, o software faz o cálculo das cavas incrementais como descrito na seção 3.3 (Cálculo do Valor Presente Líquido e Cavas Incrementais), e conseguimos obter os resultados apresentados a seguir, divididos em operacionais e financeiros:

Tabela 4: Resultados Operacionais obtidos - Cava Financeira

Parâmetro Operacional	Valor
Tonelagem de minério lavrado (t)	90,4 milhões
Tonelagem de estéril lavrado (t)	51,3 milhões
Total lavrado (t)	141,7 milhões
Volume total	61.6 milhões de m ³
Duração de mineração	5,6 anos
Relação estéril / minério (REM)	0,57

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 5: Resultados Financeiros obtidos - Cava Financeira

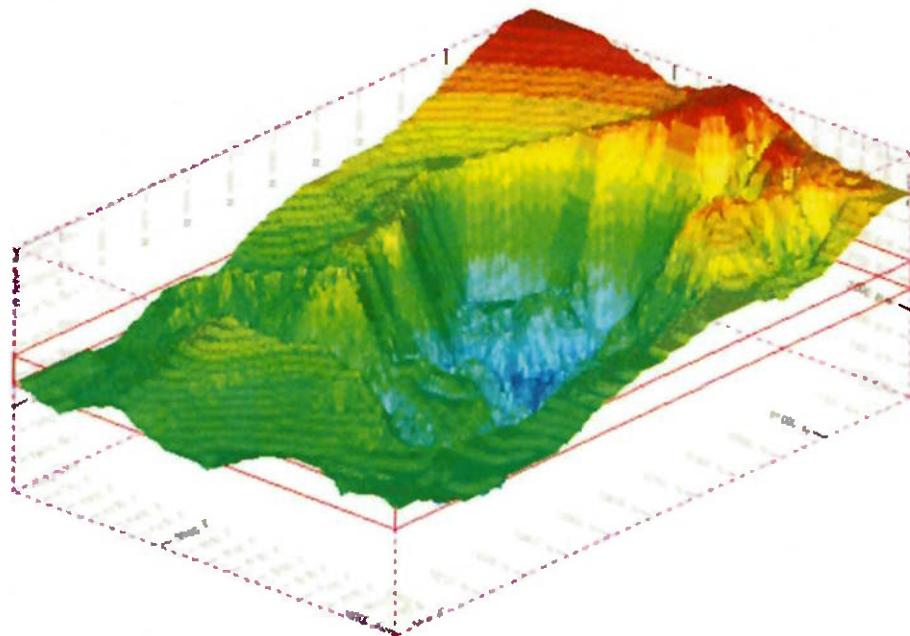
Parâmetro Financeiro	Valor
Receita Total	US\$ 956,2 Milhões
Custo de Processamento Total	US\$ 384,0 Milhões
Custo de Mineração Total	US\$ 174,8 Milhões
Valor Presente Líquido	US\$ 359,3 Milhões

Fonte: Elaboração Própria

Além destes valores, o software também gera um arquivo de pontos e triângulos que podem ser lidos pelo software de design, para visualizarmos a cava financeira em 3D.

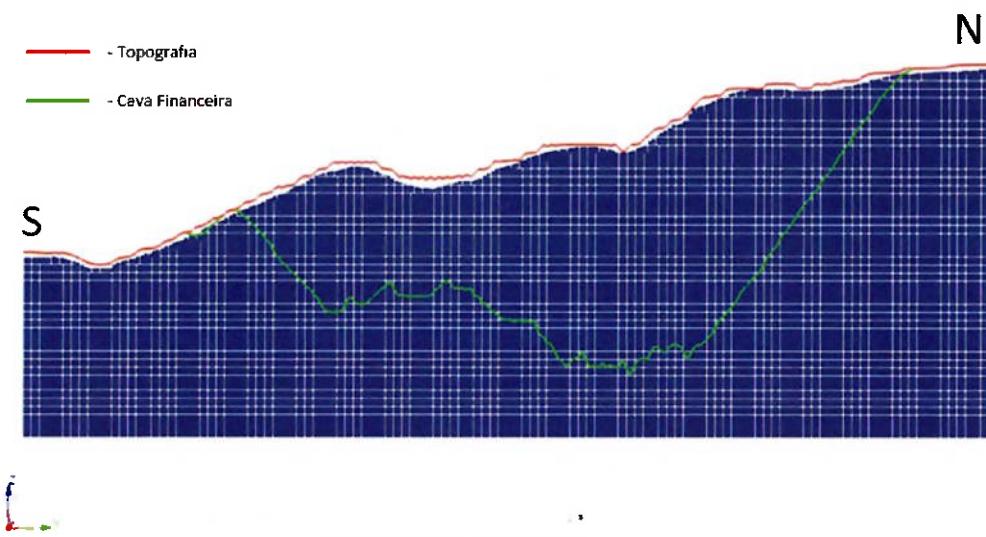
Podemos ver na figura 11 o formato da cava financeira gerada pelo software de otimização de lavra.

Figura 11: Cava Financeira – NPV Scheduler



Fonte: Elaboração Própria

Figura 12: Corte Norte-Sul da Cava Financeira com a topografia inclusa



Fonte: Elaboração Própria

Na figura 12, podemos ver a topografia e a cava financeira na mesma imagem, e os blocos entre os dois são os blocos que foram marcados a ser retirados pelo software de otimização.

Com a cava financeira em mãos, temos um norte para a elaboração da cava operacional, que levará em conta os mesmos parâmetros financeiros que a cava financeira, assim como parâmetros operacionais adaptados às variáveis geotécnicas e de produção.

4.3 Dados Utilizados – Cava Operacional

Para a elaboração da cava operacional, utilizamos o mesmo modelo de blocos, assim como o mesmo modelo econômico, o que implica que todos os parâmetros de processo e custos devem ser os mesmos tanto para a cava financeira como para a cava operacional. A principal mudança com relação ao processo anterior é que o design da cava operacional é feito no software de CAD, e depois reintroduzido no software de otimização como limitante de número de blocos a serem lavrados, gerando o valor presente líquido e outros resultados econômicos com base nesta limitante.

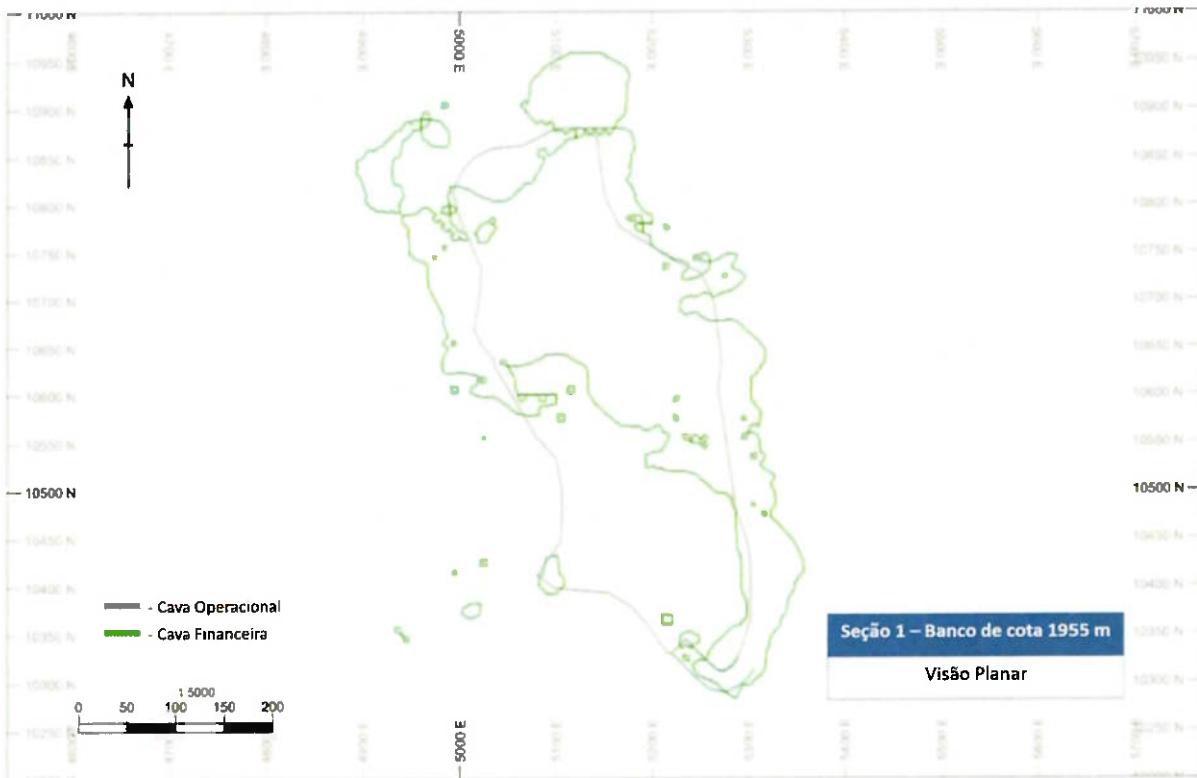
O processo de design de cavas com base na cava financeira começa com a escolha do último banco a ser lavrado, e depois desenhando os bancos subsequentes (de baixo para cima). A escolha do primeiro banco e seu formato são de suma importância no processo de desenho da cava operacional. O primeiro banco deve ter uma largura suficientemente grande para justificar a abertura no nível, e para acomodar os equipamentos que irão realizar a lavra.

A cava financeira não leva em conta a maioria dos fatores operacionais, e, portanto, é importante que o engenheiro de planejamento de lavra esteja atento para os requerimentos de espaço que acompanham o processo de lavra para decidir se é

necessário ou não a abertura em certo nível, se é economicamente e operacionalmente vantajoso ou não.

No caso da mina a ser otimizada neste trabalho, vemos que a cava financeira abre o primeiro banco somente considerando a retirada de poucos blocos, em um espaço pequeno e com pouca mobilidade para caminhões e escavadeiras, então escolhemos um banco localizado um nível superior, com uma largura suficientemente larga para justificar a abertura do nível.

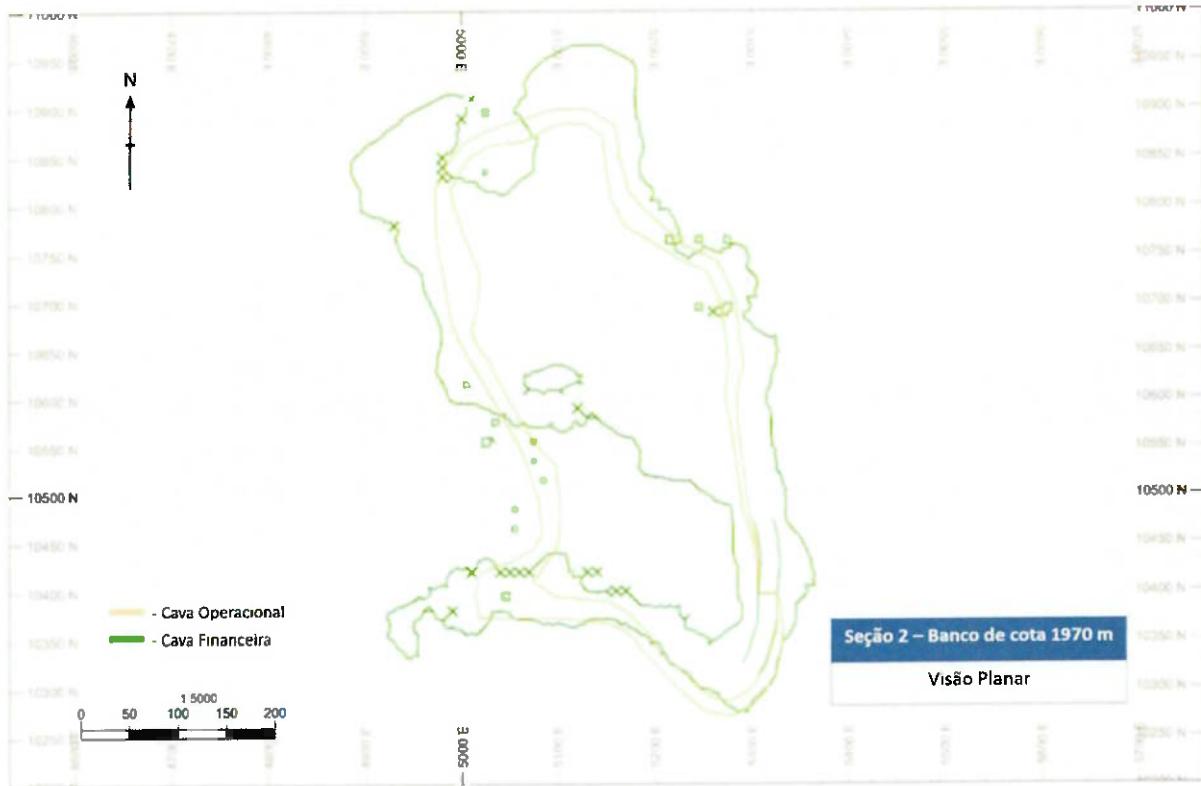
Figura 13: Visão planar do primeiro banco do design operacional (1955 m)



Fonte: Elaboração Própria

O primeiro nível no nosso caso não está aderente completamente a cava financeira, mas foi tomada uma decisão operacional pois cumprir total aderência a cava financeira implicaria em dificuldades de manejo de equipamento. No segundo banco, é possível ver que a aderência é melhor.

Figura 14: Visão planar do primeiro banco do design operacional (1970 m)



Fonte: Elaboração Própria

Também devemos levar em conta que as rampas entre os bancos “empurram” as paredes da cava, por isso devemos nos primeiros bancos manter uma distância com relação as paredes da cava financeira. A cava operacional produzida possui os seguintes parâmetros operacionais:

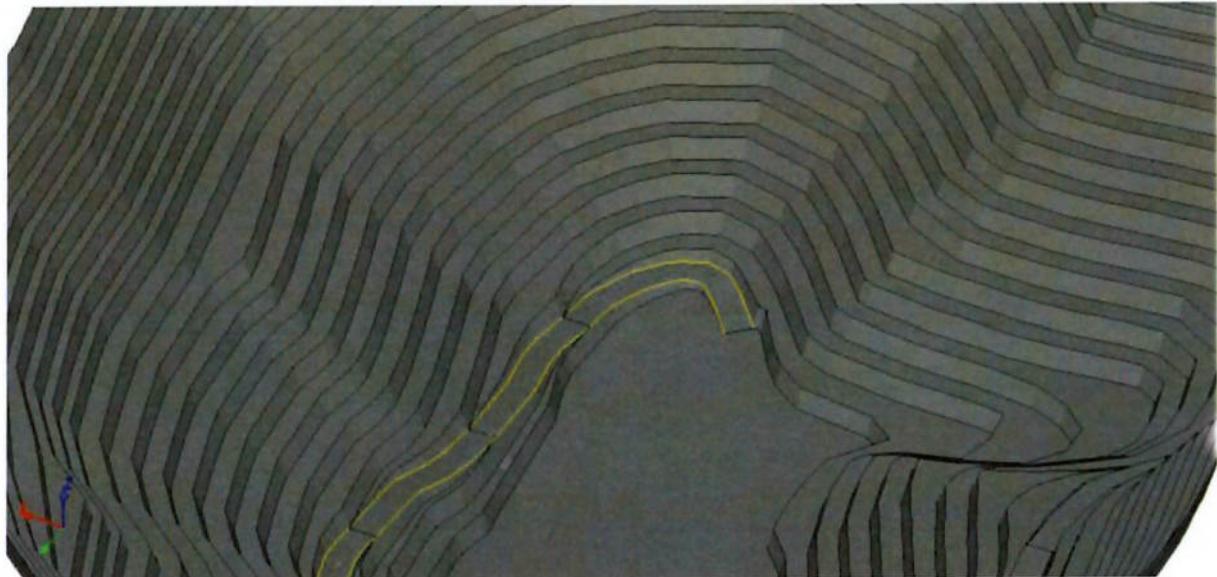
Tabela 6: Parâmetros Operacionais

Parâmetro Operacional	Valor
Altura das bancadas	15 metros
Largura da berma	15 metros
Ângulo de face	65°
Largura das rampas	20 metros
Declividade das rampas	10%
Ângulo geral	62.7°

Fonte: Elaboração Própria

Adaptamos alguns parâmetros operacionais para que os mesmos reproduzam um ângulo global menor que o ângulo global da cava financeira, por razões de segurança. Além disto, uma das principais diferenças entre a cava financeira e a cava operacional é a inclusão de rampas na cava operacional, que pode ser vista na figura abaixo:

Figura 15: Cava operacional com rampas selecionadas



Fonte: Elaboração Própria

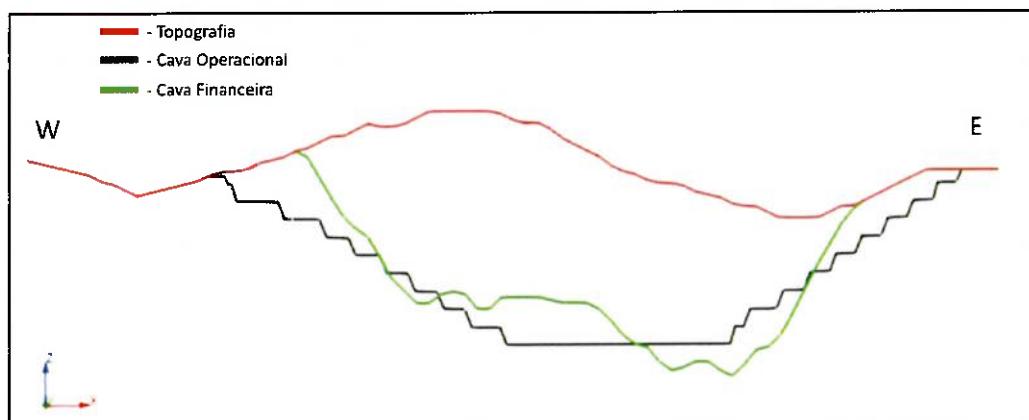
4.4 Resultados – Cava Operacional

O processo de desenvolvimento da cava é um processo iterativo, já que enquanto estamos conduzindo o primeiro desenho, geralmente só é possível perceber melhorias ou erros feitos enquanto estamos na metade do processo, e quando concluído, depois de analisarmos os fatores econômicos da cava, podemos tomar a decisão de voltar a desenhar a cava operacional para aumentar o ganho econômico. Portanto, faz sentido revisitar a etapa de desenho da cava operacional diversas vezes no processo de planejamento.

Porém, uma vez decidida a cava final, mudanças radicais no desenho da cava durante a vida da mina são raras, dado que se atingem os limites da cava, e mudanças no desenho da mina implicam em desvios arriscados aos fatores geotécnicos e financeiros já decididos anteriormente.

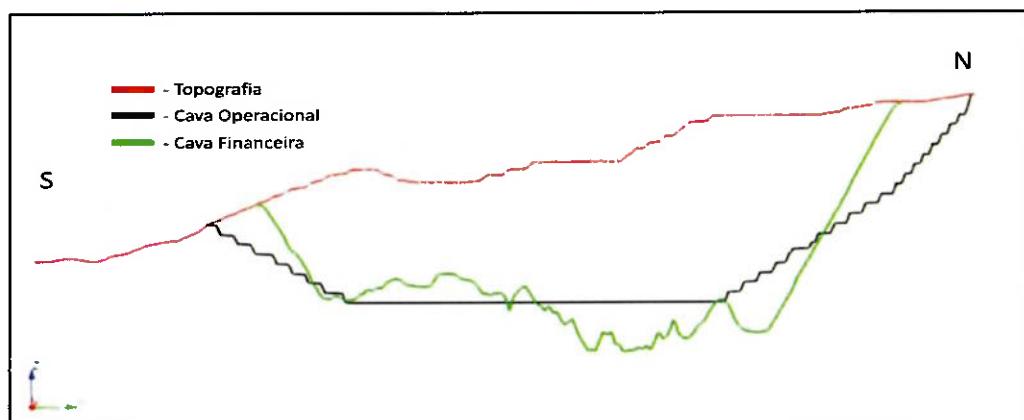
Apresentamos abaixo um desenho de uma cava operacional com uma rampa principal, e elucidaremos na seção de discussão *insights* sobre a cava operacional e suas mudanças com relação a cava financeira.

Figura 16: Visão Leste-Oeste da cava operacional comparada a cava financeira



Fonte: Elaboração Própria

Figura 17: Visão Norte-Sul da cava operacional comparada a cava financeira



Fonte: Elaboração Própria

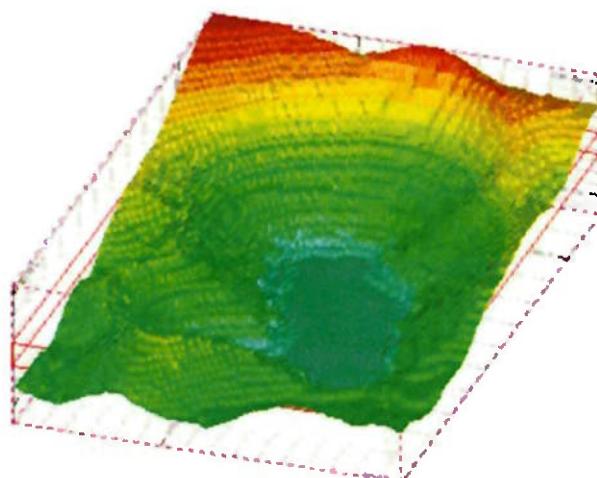
Figura 18: Visão planar da cava Operacional



Fonte: Elaboração Própria

A cava operacional, assim que pronta, foi reintroduzida no software de otimização como limitante do modelo econômico. Isto força o software a retirar blocos somente acima da cava operacional, fornecendo os resultados financeiros da cava operacional.

Figura 19: Cava operacional reintroduzida no software de Otimização



Fonte: Elaboração Própria

A cava reintroduzida nos fornece os resultados:

Tabela 7: Resultados Operacionais obtidos - Cava Operacional

Parâmetro Operacional	Valor
Tonelagem de minério lavrado (t)	78,2 milhões
Tonelagem de estéril lavrado (t)	70,3 milhões
Total lavrado (t)	148,5 milhões
Volume total	67,7 milhões de m ³
Duração de mineração	5,6 anos
Relação estéril / minério (REM)	0,9

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 8: Resultados Financeiros obtidos - Cava Operacional

Parâmetro Financeiro	Valor
Receita Total	US\$ 781,4 Milhões
Custo de Processamento Total	US\$ 305,7 Milhões
Custo de Mineração Total	US\$ 125,9 Milhões
Valor Presente Líquido	US\$ 319,4 Milhões

Fonte: Elaboração Própria

Estes dados serão comparados e analisados na sessão de discussão, mas conseguimos já inferir que o valor presente líquido da cava teve um decréscimo em seu valor, juntamente com a receita e a tonelagem de minério lavrado.

5 Discussão

5.1 Diferenças de valores entre as cavas

Com a reintrodução da cava operacional e subsequente obtenção dos valores econômicos da cava, podemos comparar as diferenças nos valores das duas cavas, e explicar os motivos das diferenças. Algumas razões já foram elucidadas ao longo do trabalho, porem iremos cita-las novamente nesta seção.

Nas tabelas 9 e 10 a seguir, fazemos um comparativo entre os valores operacionais e financeiros da cava financeira e da cava operacional:

Tabela 9: Diferenças entre os parâmetros financeiros

Parâmetro Operacional	Cava Financeira	Cava Operacional	Diferença
Tonelagem de minério lavrado (milhões de t)	90,4	78,2	-13,5%
Tonelagem de estéril lavrado (milhões de t)	51,3	70,3	37,0%
Total lavrado (milhões de t)	141,7	148,5	4,8%
Volume total (m ³)	61,6	67,7	9,0%
Relação estéril / minério (REM)	0,57	0,9	57,9%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 10: Diferenças entre os parâmetros operacionais

Parâmetro Financeiro	Cava Financeira	Cava Operacional	Diferença
Receita Total	US\$ 956,2 Milhões	781,4 Milhões	-18,3%
Custo de Processamento Total	US\$ 384,0 Milhões	305,7 Milhões	-20,4%
Custo de Mineração Total	US\$ 174,8 Milhões	125,9 Milhões	-28,0%
Valor Presente Líquido	US\$ 359,3 Milhões	319,4 Milhões	-11,1%

Fonte: Elaboração Própria

Vemos que em todos os parâmetros existem perdas de valor, o que já era esperado, dado que a cava financeira é uma idealização, impossível de ser atingida. Porém é possível minimizar as diferenças, e alguns fatores impactam mais sobre o valor da cava que outros. É interessante notar que em um dos parâmetros principais, de total

lavrado, a diferença é menor que 5%, e que segundo Silva, R.S (2008), o padrão de auditorias para diferenças de tonelagem e volume é de até 5%.

5.2 Diferenças no desenho e suas influências

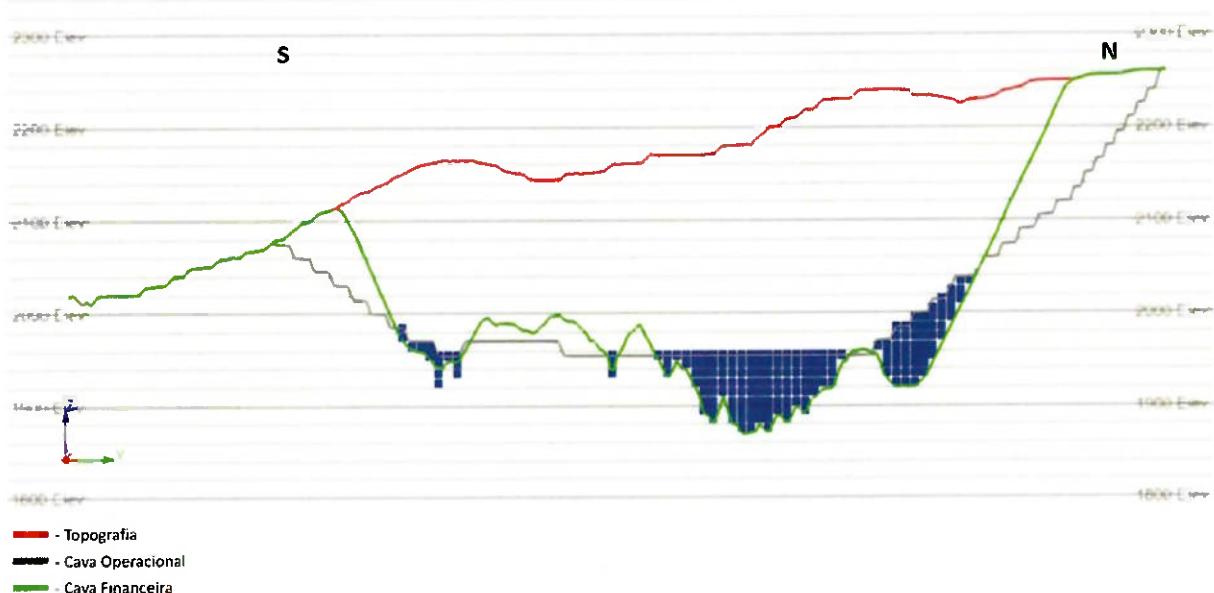
Os principais fatores que causam diferenças entre as cavas, que já foram citadas na seção de metodologia deste relatório são:

- Introdução de rampas;
- Diferenças no desenho da mina;
- Diferenças de número de bancos, com bancos menores sendo ignorados;
- Bermas maiores;

Após os obtermos os resultados das análises da cava, podemos comparar o efeito de cada um dos fatores de diferença entre as cavas, e analisarmos a influência dos mesmos sobre o valor de tonelagem das cavas.

Abaixo na figura 20, temos as duas cavas sobrepostas uma a outra:

Figura 20: Corte norte sul das cavas sobrepostas com blocos abaixo da cava operacional



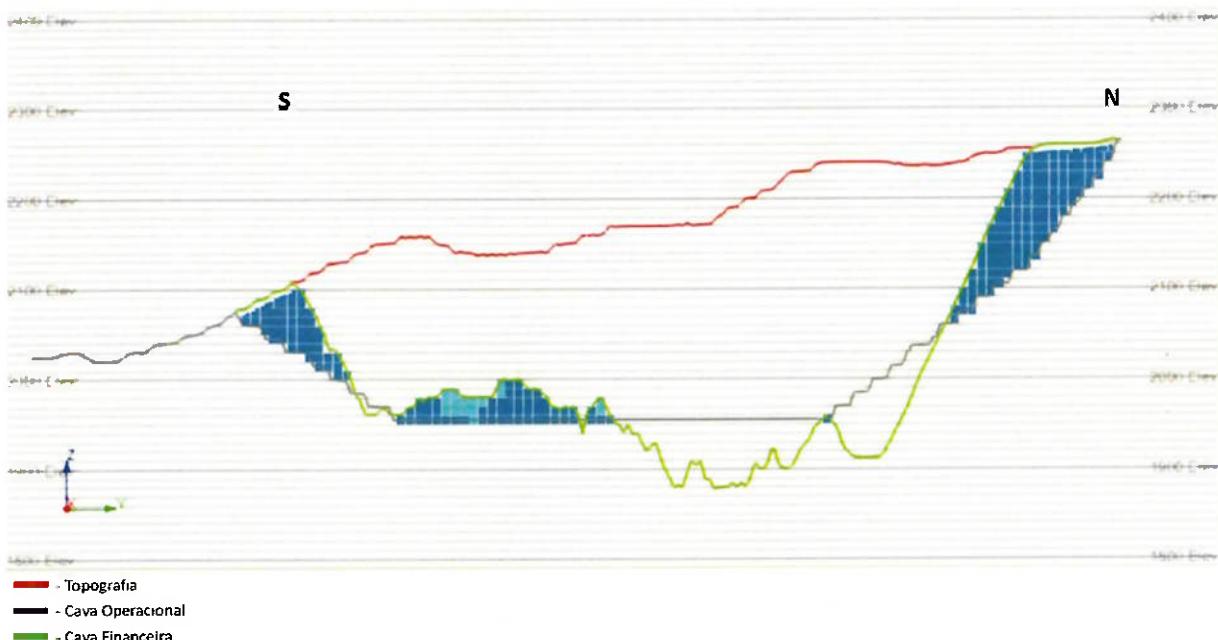
Fonte: Elaboração Própria

Na figura, podemos ver em detalhe a diferença no número de bancos, assim como os blocos abaixo da cava operacional, que deixamos de retirar por estarem em bancos criados pela cava financeira com largura e área insuficientes para justificar sua abertura operacionalmente.

A cava financeira começa na cota 1855, enquanto que a cava operacional começa na cota 1955, tendo 100 metros de diferença de profundidade entre as duas. Os blocos que estão abaixo da cota 1955, e que não são retirados na cava operacional possuem volume de 2,5 milhões de metros cúbicos e tonelagem total de 6,3 milhões de toneladas. A tonelagem e o volume dos blocos que estão abaixo da cava operacional e acima da cava financeira podem servir como um indicador tangível de perdas ou ganhos com as diferenças nas cotas entre as duas cavas.

Já com relação a diferença relacionada a introdução de rampas e bermas na cava operacional, podemos analisar o número de blocos que se compreendem acima da cava operacional e abaixo da cava financeira, ilustrados pela figura a seguir:

Figura 21: Corte norte sul das cavas sobrepostas com blocos acima da cava operacional



Fonte: Elaboração Própria

É difícil separar os ganhos e perdas com a introdução das bermas somente, ou somente com a introdução de rampas, por isso esta análise terá de ser feita em conjunto. Além disto, está presente na figura ganhos e perdas relativos a diferença de ângulos globais, que no nosso caso, reduzimos o ângulo global por conta de riscos de segurança.

Tabela 11: Quantificação das diferenças entre os parâmetros introduzidos na cava operacional

	Diferenças relacionadas a diferentes cotas	Diferenças relacionadas a rampas, bermas e ângulos	Diferença
Tonelagem total (milhões de toneladas)	18,5	28,3	53,0%
Volume total (milhões de metros cúbicos)	7,3	13,1	79,5%

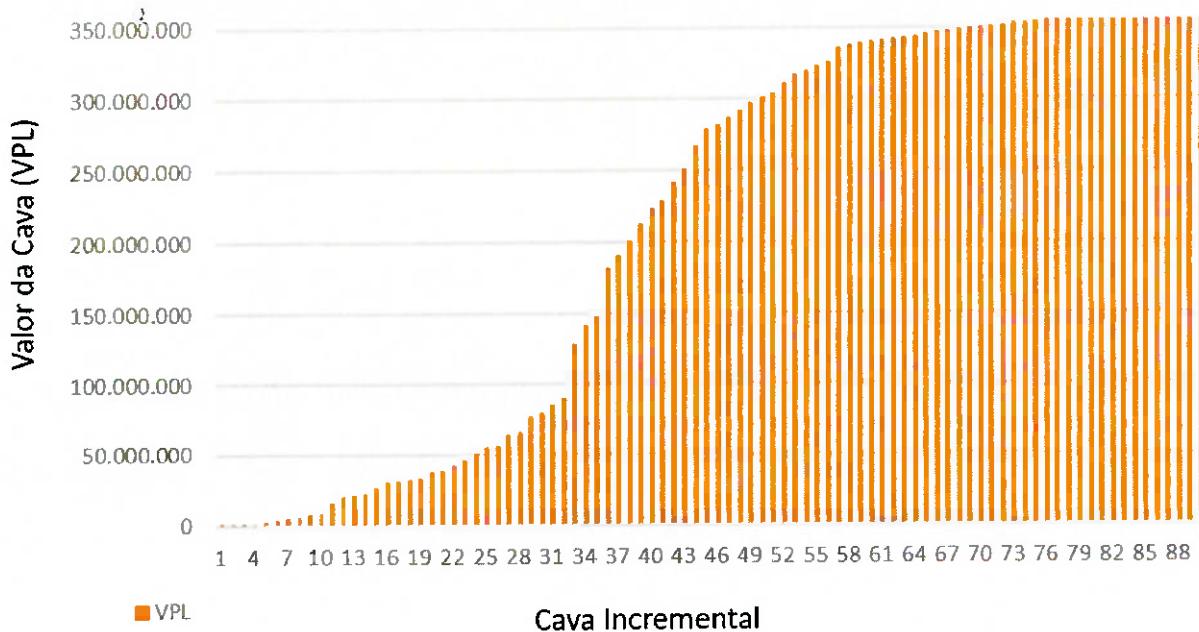
Fonte: Elaboração Própria

Podemos ver que a influencia da adição de rampas, bermas e mudanças de angúlos tem uma influência maior no valor de tonelagem e volume retirados na cava operacional que a diferença relacionada a diferentes cotas. É claro que esta maneira de quantificar diferenças tem seus defeitos, porem é uma maneira para que possamos colocar em termos tangíveis as mudanças ocasionadas pela introdução de fatores operacionais.

5.3 Diferença nas cavas incrementais

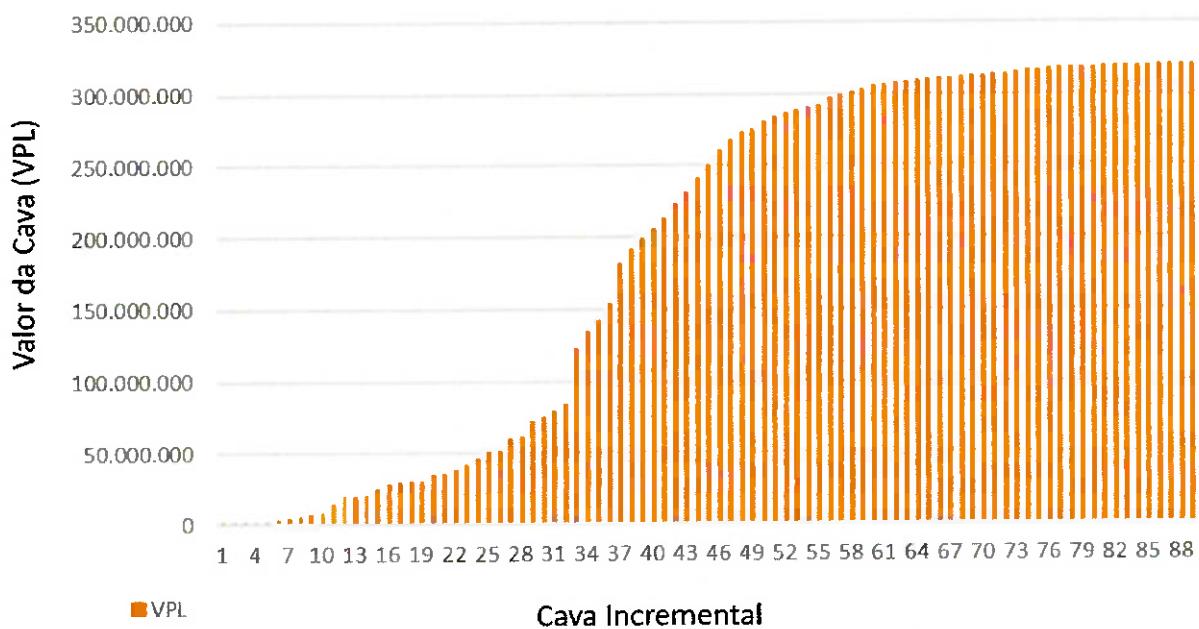
Como foi explicado na seção de cavas incrementais e cálculo do VPL na metodologia desta tese, foram feitas as cavas incrementais de ambas cavas analisadas neste trabalho, com diferenças minutas entre as duas, nas figuras abaixo podemos ver as duas:

Figura 22: Cavas incrementais - Cava Financeira



Fonte: Elaboração Própria

Figura 23: Cavas incrementais - Cava operacional



Fonte: Elaboração Própria

Notamos que o VPL da cava financeira atinge um patamar maior nas cavas mais avançada, e também possui um VPL maior no início, porem vemos que o formato geral das curvas de cava é semelhante entre as duas cavas, porem a cava financeira atinge cavas intermediárias (que podem vir a se tornar *pushbacks*) antes da cava operacional, o que em si já era um resultado esperado. Quanto maior a complexidade de um desenho de mina, maior é a diferença entre as cavas intermediarias.

6 Conclusão

Após a realização de todas as etapas citadas neste trabalho, concluímos o escopo sugerido do processo de otimização de uma mina a céu aberto.

É importante notar que o processo de otimização e planejamento de lavra é um processo cíclico, e que deve ser continuamente realizado ao longo da vida útil da mina. Neste trabalho somente, em que o escopo não é de reproduzir fidedignamente um processo de planejamento, fizemos diversas cavas diferentes, e introduzimos diversos fatores nos softwares, em um processo de erro e acerto para chegarmos a um resultado satisfatório. Vale a pena citar que depois da etapa de desenho da cava operacional, existem ainda outras etapas no processo de planejamento e otimização de lavra, as quais estão fora do escopo deste trabalho porem são igualmente importantes no processo como um todo.

A cava operacional, embora apresentando diferenças acentuadas nos parâmetros financeiros e operacionais, pode ser considerada satisfatória olhando-se pela ótica de tonelagem total retirada, assim como no valor presente líquido da cava, que apresenta diferenças esperadas e inerentes do processo de desenho de uma mina a céu aberto.

Neste trabalho, tentou se trazer práticas de mercado para o campo acadêmico de estudo, e o trabalho pode servir como futura referência para trabalhos que tratem do mesmo tema e para aqueles que se interessem na prática de planejamento de lavra de minas a céu aberto.

7 Bibliografia

JOURNAL OF THE SOUTHERN AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. Presidential Address: Optimization in underground mine planning – Developments and opportunities. C. Musingwini, Johannesburg, v. 116, n.9, Sep. 2016.

PICARD, J.-C.; SMITH, B. T. (2004). Parametric maximum flows and the calculation of optimal intermediate contours in open pit mine design. *INFOR Journal*, volume 42, 143-153.

DO CARMO, F. A. R. Metodologia para planejamento de cavas finais a minas a céu aberto otimizadas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, 2001. 135 p.

GUIMARÃES, O. R. DE A. Aplicação de algoritmos genéticos na determinação de cava final e sequenciamento de lavra em minas a céu aberto. Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2007. 169 p.

OSANLOO, M.; GHOLAMNEJAD, J.; KARIMI, B. 2008. Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 22, no. 1. pp. 3-35.

SILVA, N.C. Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008

DATAMINE. Open pit planning. Disponível em:
<https://www.dataminesoftware.com/open-pit-planning/>. Acesso em: 10 out. 2018.