



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

GEOVANNA NOGUEIRA PAIVA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA GEOMETRIA DA CAVA NA
CUBAGEM DE UMA RESERVA MINERAL

ARAXÁ-MG

2023

GEOVANNA NOGUEIRA PAIVA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA GEOMETRIA DA CAVA NA
CUBAGEM DE UMA RESERVA MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais -
Unidade Araxá, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Orientador(a): Me. Guilherme Alzamora
Mendonça

Coorientador(a): Dr. Allan Erlikhman
Medeiros Santos

ARAXÁ-MG

2023

GEOVANNA NOGUEIRA PAIVA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA GEOMETRIA DA CAVA NA
CUBAGEM DE UMA RESERVA MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
- Unidade Araxá, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas.

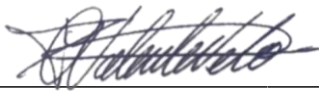
Data de Defesa: Araxá, 6 de julho de 2023.



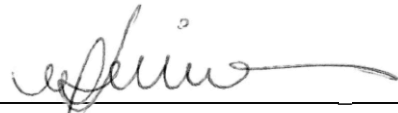
Presidente e Orientador: Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Co-Orientador: Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos
Universidade Federal de Ouro Preto



Membro Titular: Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Membro Titular: Marly Aparecida da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

ADRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as benções alcançadas dentro e fora da faculdade durante esses cinco anos (e meio).

Agradeço minha família, Willian, Elânia e minha mana, Leandra, pelo apoio em toda a minha vida acadêmica, desde o jardim de infância até esse último semestre da faculdade.

Em especial, meu companheiro da vida, Tairony, que sempre me incentivou, me apoiou e puxou muito minha orelha, obrigada por todo amor e companheirismo durante todos esses anos.

Agradeço ao meu orientador e coorientador, Guilherme e Allan por todo suporte no trabalho e por todos os ensinamentos passados nas salas de aula. Aproveito para agradecer todos os professores do CEFET.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos e colegas de faculdade, em especial Thais, Marynara, Natalia e Sofia pelo companheirismo e aprendizados compartilhados nestes cinco anos.

EPÍGRAFE

"Faça o que puder, com o que tiver, onde estiver".

Theodore Roosevelt

RESUMO

O principal objetivo do planejamento de mina é garantir a sustentabilidade duradoura da atividade de mineração enquanto conseguir rentabilidade econômica. Neste contexto fica claro que no planejamento de mina vários fatores devem ser considerados e estes são decisivos no momento da lavra. A operacionalização da cava é um exemplo destes fatores, que é definida através de vários parâmetros, sejam geotécnicos, qualidade do minério, geologia estrutural do depósito, entre outros. Este trabalho visa analisar os impactos da operacionalização de cava com a cubagem de uma reserva. A metodologia aplicada foi a clássica, por meio de design manual foi realizada a operacionalização a partir de uma cava final e de um modelo de blocos utilizando o software *Studio OP* da *Datamine*. As *strings* foram projetadas para o pé e crista dos taludes e, operacionalizada com as vias de acesso em sistema de via helicoidal, que consiste em uma rampa contínua e em espiral, mais utilizada em jazidas com grande extensão horizontal. Após a metodologia de design, foi realizada a cubagem com os dados de interesse. Foram avaliados as tonelagens, teor médio, relação estéril-minério global, máximos e mínimos e variância do teor. Entre a cava final e a cava operacionalizada houve uma perda de 1,91% de minério o equivalente a 258.793 t e um acréscimo de 8,11% de estéril, o equivalente a 2.674.796,49 t, o que impactou diretamente na REM, que foi de 2,19 para 2,14. Essa perda de minério e acréscimo de estéril é negativo para o empreendimento em questões econômicas, visto que há o aumento da REM, porém está dentro dos limites estabelecidos pela literatura de 5 e 10% para minério e estéril respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento de mina. Cubagem. Cava final. Cava operacionalizada. Relação Estéril-Minério.

ABSTRACT

The main objective of mine planning is to ensure the lasting sustainability of the mining activity while obtaining economic income. In this context it is clear that in any mine planning several factors must be considered and these are decisive at the time of mining. The operation of the pit is an example of these factors, which is defined through various parameters, whether geotechnical, ore quality, structural geology of the reservoir, among others. This work analyzes the impacts of operationalizing a pit on the volume of a reserve. The applied methodology was the classic one, through manual design, the operationalization was carried out from a final pit and a block model using Studio OP software from Datamine. The strings were designed for the foot and crest of the slopes and, operated with the access roads in a helical route system, which consists of a continuous and spiral ramp, more used in deposits with a large horizontal extension. After these design steps, cubing was performed with the data of interest. The tonnages, average grade, global sterile-ore ratio, maximums and minimums and grade variance were evaluated. Between the final pit and the operational pit, there was a loss of 1.91% of ore, equivalent to 258,793 t and an increase of 8.11% of overburden, equivalent to 1,674,796.49 t, which directly impacted REM, which went from 2.19 to 2.14. This loss of consumption and waste waste is negative for the enterprise in accelerated issues, since there is an increase in REM, but it is within the limits described in the literature of 5 and 10% for ore and waste, respectively.

KEYWORDS: Mine planning. Cubage. Final pit. Operational pit. Waste-Ore Ratio

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de seções.....	10
Figura 2 - Técnica de cones flutuantes	12
Figura 3 – Seção de corpo mineral	13
Figura 4 – Corno mineral com blocos valorados	13
Figura 5 – Modelo de blocos com primeira linha zerada	14
Figura 6 – Modelo de blocos com soma cumulativa por coluna.....	14
Figura 7 - Cálculo cumulativo geral.....	15
Figura 8 - Processo da soma cumulativa geral	15
Figura 9 - Limite da cava ótima final.....	16
Figura 10 - Limite da cava ótima final com seus valores originais.....	16
Figura 11 - Apresentação de um cone de extração.....	18
Figura 12 - REM decrescente.....	19
Figura 13 - REM crescente.....	20
Figura 14 - REM constante.....	20
Figura 15 – Parâmetros geométricos	21
Figura 16 - Fluxograma da metodologia.....	23
Figura 17 – Modelo de blocos	25
Figura 18 – Seção E da cava final e modelo de blocos com legenda de minério e estéril.....	26
Figura 19 - Seção E da cava final e modelo de blocos com legenda de P_2O_5	27
Figura 20 – Seção E da cava final, modelo de blocos e <i>string</i> para início da cava operacionalizada	29
Figura 21 – Seções horizontais do modelo de blocos e limite de cava final.....	29
Figura 23 – Seção em planta das <i>strings</i> da cava operacionalizada.....	30
Figura 23 – (a) seção W (b) seção E.....	33
Figura 24 – (a) Seção N (b) Seção E	34
Figura 28 – Cava final <i>versus</i> cava operacionalizada	35
Figura 26 – Histograma da cava final.....	36
Figura 27 – Histograma da cava operacionalizada	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros geométricos	28
Tabela 2 – Distribuição estatística do teor de P_2O_5 do depósito.	32
Tabela 3 – Cubagem cava final e cava operacionalizada	35
Tabela 4 – Distribuição Estatística dos teores de P_2O_5 nas cavas avaliadas.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1	FUNDAMENTOS DO PLANEJAMENTO	3
2.1.1	Conceito de planejamento	3
2.1.2	Fases do Planejamento	3
2.1.3	Estudo Conceitual	3
2.1.4	Custos do planejamento	5
2.2	PLANEJAMENTO A LONGO, MÉDIO E CURTO PRAZO	6
2.2.1	Planejamento a longo prazo	6
2.2.2	Planejamento a médio prazo	6
2.2.3	Planejamento a curto prazo	7
2.3	MODELO GEOLÓGICO	7
2.4	MODELO ECONÔMICO DE BLOCOS	8
2.5	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CAVA	9
2.5.1	Métodos manuais	10
2.5.2	Técnica do cone flutuante	11
2.5.3	Algoritmo de Lerchs-Grossman	12
2.5.4	Razão de extração	16
2.5.5	Operacionalização da cava	20
3	METODOLOGIA	23
3.1	Metodologia utilizada	23
3.2	Importação dos arquivos	24
3.3	Modelo de blocos	24
3.4	Cava final	25
3.5	Parâmetros geométricos	27
3.6	Operacionalização da cava	28
3.7	Cubagem	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Análise estatística do depósito	32
4.2	Cava operacionalizada	32
5	CONCLUSÕES	39

REFERÊNCIAS.....40

1 INTRODUÇÃO

A indústria mineira busca como seu principal objetivo a otimização de lucro, maximizando os ganhos e reduzindo os custos. Como é um empreendimento acometido de inúmeras incertezas e dependente de grandes investimentos, é preciso que sejam elaborados projetos e planos de mina, de forma que seja garantido esses objetivos (Campos, 2017).

Junto a isso, existe o planejamento de lavra, que busca o maior aproveitamento dos recursos disponíveis, recuperando ao máximo o bem mineral e aumentando o lucro da empresa. O planejamento de lavra é um roteiro de atividades capaz de reportar qual deve ser o plano de produção a ser implementado, sendo assim, o planejamento de lavra antecipa informações e problemas, para que no futuro suas consequências sejam as mínimas possíveis (Borges, 2013).

Chimuco (2010) afirma que o plano de lavra deve levar em consideração intervalos de tempo que permitam cumprir os processos que são propostos em seus planos de médio, curto e longo prazo. Ximenes (2018) evidencia que o planejamento de curto prazo é aplicado em intervalo de tempo menor que garanta as especificações do material, quantidade e qualidade do minério liberado, garantir a meta de produção e relação estéril-minério planejada.

Para auxiliar nas atividades do planejamento de mina, diversos softwares estão sendo utilizados a nível operacional e aplicados em tempo real, o que permite que se modifique o plano de lavra para que cada vez ele seja ainda mais exato e lucrativo (Silva, 2014). Neste trabalho se trabalhou diretamente com *Studio OP* para operacionalizar uma cava final que veio de *input*.

O presente trabalho consiste na comparação e análise da cubagem de um modelo de blocos quando cubado no sólido de uma cava matemática, com a cubagem do sólido da cava operacionalizada. No estudo se recebe o modelo de blocos e cava final como *input* e a metodologia se aplica em operacionalizar a cava. O intuito é analisar a diferença quantitativa de material e ver na prática como se comporta a cubagem quando a cava final é alterada para se tornar operacional, avaliando os ganhos e perdas desse cenário. Especificamente o objetivo é realizar o design da cava operacionalizada, construindo rampas de acesso e, por fim realizar a

cubagem da cava final e da cava operacionalizada para comparar os resultados obtidos.

Nos próximos tópicos é apresentado uma revisão bibliográfica sobre planejamento de mina, seguido da metodologia utilizada e os resultados obtidos através do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DO PLANEJAMENTO

2.1.1 Conceito de planejamento

De acordo com Pinto e Dutra (2008), o planejamento de mina é resultado de uma série de estudos que estão em busca da melhor forma de explorar aquele bem mineral para aproveitar o máximo possível. Dessa forma, é possível otimizar para que se recupere o máximo possível do minério, em função do maior lucro factível, para isso, atualmente se emprega no planejamento modelos computacionais e matemáticos buscando essa otimização já citada.

De forma clara para definir fisicamente o planejamento, a sua principal aplicação é para se ter a maior quantidade de minério liberado, ou seja, minério exposto para a lavra, com o mínimo possível de estéril lavrado, já que os custos de movimentações são altos. Entretanto, só é possível liberar esse minério, quando a extração do estéril necessário para a sua liberação esteja planejada dentro de um cenário economicamente viável (Pinto e Dutra, 2008).

2.1.2 Fases do Planejamento

O planejamento de mina, é distribuído em três fases, são elas: Estudo Conceitual, Estudos Preliminares e Estudo de Viabilidade. Eles serão descritos a seguir.

2.1.3 Estudo Conceitual

De acordo com Curi (2014), estudo conceitual é o primeiro dentro do planejamento, por isso, é aceitável que nele contenha erro atrelado a estimativa de custos de até 30%. É neste estudo que são apresentadas a expectativa de investimento nesse futuro empreendimento mineiro, isso, com base nas primeiras

ideias e análises de possíveis aproveitamentos daquele bem mineral. Neste momento, as principais ferramentas são os dados históricos de projetos e áreas semelhantes. Nesse escopo, é preciso avaliar a aderência estratégica do projeto, dessa forma é possível identificar os possíveis erros, são eles: geológico, operacional, mercado, político, ambiental e, financeiro.

2.1.3.1 Estudo preliminar

Com nível mais avançado em comparação ao estudo conceitual, se tem o estudo preliminar, o qual apresenta nível intermediário de detalhamento e resultados, ainda não definitivos. Tem o objetivo de determinar se é justificável uma análise aprofundada do projeto conceitual através de estudos de viabilidade técnica e econômica. Esse estudo preliminar tem o custo relativamente médio, em contrapartida o próximo passo, estudo de viabilidade, tem um alto custo agregado. Na maioria das vezes, esse estudo é executado por duas ou três pessoas da empresa e tem apoio de especialistas com conhecimentos específicos. É indicado neste momento, os estudos iniciais de viabilidade econômica, comparação de opções, e outros investimentos mineiros, buscando sempre um que haja menor risco e maior lucro (Curi, 2014).

2.1.3.2 Estudo de viabilidade

Quando finalizado o estudo preliminar, se o resultado for positivo, inicia-se a preparação do estudo de viabilidade da lavra.

De acordo com Pinto e Dutra (2008), esse passo é fundamental no processo de avaliação de mina. É nele em que se estudará a parte econômica de todo o planejamento para verificar a viabilidade econômica e comercial do projeto em questão. Segundo (Curi 2014), nesse estudo são considerados aspectos econômicos, legais, tecnológicos, geológicos, ambientais e sociopolíticos. O objetivo é refinar fatores básicos para garantir o sucesso do empreendimento, ao final do estudo será recomendado ou não o projeto da mina. Quando definidos os fatores relativos ao projeto, é preciso incluir a maior quantidade de variáveis para determinar o valor potencial e custos para o bem mineral.

Conforme o projeto evolui, várias análises devem ser realizadas baseadas em uma quantidade de informações crescente para aumentar a precisão dos resultados, isso até que as decisões para desenvolver a lavra sejam tomadas (Pinto e Dutra, 2008).

Quando favorável a decisão para continuação do projeto, as próximas decisões devem ser baseadas em informações muito mais detalhadas. Essa fase de estudo de pré-viabilidade se baseia em dados de informações geológicas, projetos de engenharia, planejamento de mina e instalações de usina para o beneficiamento desse minério. Deve-se considerar análises das informações que se tem de geologia, beneficiamento, projeto descritivo, lavra, transporte, necessidade operacional, cidades próximas, mão-de-obra, legislação, entre outros. Nesse estudo deve conter todos os conhecimentos ambientais, técnicos e comerciais, a fim de determinar capacidade de produção, taxa de retorno, receita, custos com investimento etc. O *output* desse estudo será um relatório que servirá como base para todas as demais fases do projeto (Pinto e Dutra, 2008).

Curi (2014) recomenda que nesse estudo contenha uma introdução, resumo e objetivos, que é de suma importância o detalhamento da localização com a planta, clima, topografia, história e propriedade da área.

2.1.4 Custos do planejamento

Os custos dos estudos de viabilidade variam de acordo com a natureza do projeto, porte, quantidade de alternativas que serão estudadas, tipos de pesquisas e estudos, entre outros. Assim, excluindo itens como testes metalúrgicos, geometalúrgicos, impactos ambientais, sondagens, se falando em investimento total de capital, os valores de cada estudo em porcentagem são na ordem de 0.1 a 0.3% no estudo conceitual, 0.2 a 0.8% no estudo preliminar e 0.5 a 1.5% no estudo de viabilidade (Pinto e Dutra, 2008).

2.2 PLANEJAMENTO A LONGO, MÉDIO E CURTO PRAZO

2.2.1 Planejamento a longo prazo

Segundo Costa (1979), o plano de exaustão de mina é conhecido como planejamento de mina de longo prazo e envolve várias etapas, como a estimativa da quantidade de minério disponível, a relação estéril-minério e a delimitação do limite da cava final. É importante para evitar a construção de estruturas permanentes dentro da cava final e planejar as vias de acesso necessárias.

De acordo com Costa (1979), o plano de longo prazo que define a delimitação da cava final, o que é essencial para o desenvolvimento dos planos de curto e médio prazo, que são partes integrantes e fundamentais para o planejamento de lavra. O período de planejamento pode variar dependendo do tamanho e vida útil das reservas, bem como dos objetivos gerais específicos da operação.

O presente trabalho é realizado dentro do planejamento de mina de longo prazo.

2.2.2 Planejamento a médio prazo

Para Fioroni (2008), no planejamento de médio prazo, é onde toda a infraestrutura necessário para que o curto prazo aconteça é definida. Ele leva em consideração fatores geológicos, e a margem de erro de planejamento é maior do que a margem do planejamento de curto prazo. Nele devem serem evidenciadas as mudanças ao longo da vida útil da mina, é no médio prazo que é realizado o dimensionamento de equipamentos e definidos os investimentos necessários em um horizonte médio de cinco anos.

Dessa forma, é possível admitir que as atividades abrangidas pelo médio prazo são a operacionalização de cavas, definição de infraestrutura, interface com o setor ambiental para liberação de áreas, planejar a produção de cinco anos das minas e dimensionar a produção e frota anual (Fioroni, 2008).

2.2.3 Planejamento a curto prazo

Quando finalizado o planejamento de longo e médio prazo, onde já se garantiu a qualidade do material durante todo o *life of mine*, é hora planejar horizontes semanais e mensais (Ortiz, 2008).

É entendido que no planejamento de curto prazo é onde mais se sofre com imprevistos, já que ele absorve todas as margens de erros do médio e longo prazo. Nessa parte do planejamento são acompanhadas as produções e mudanças de mercado em um pouco espaço de tempo. Ele é influenciado por informações anuais, semestrais, mensais, semanais e diários. O objetivo do planejamento de curto prazo é traçar as metas de produção de minério e decapeamento para manter o fluxo de minério nas condições pré-estabelecidas da usina, para que tenha uma produtividade e consiga cumprir o plano de produção do empreendimento minério (Fioroni, 2008).

O curto prazo admite algumas atividades, como o cronograma de produção, controle de dados de produção, programação de pilhas de homogeneização, planejamento de estocagem de minério para períodos com dificuldade de lavra, planejamento de disposição de estéril e por fim, cálculo para acompanhar a aderência e cumprimento do plano (Fioroni, 2008).

2.3 MODELO GEOLÓGICO

O modelo geológico constituído de blocos, nada mais é que uma representação tridimensional de uma mina onde se particiona em numerosos blocos todo o volume de material. Ele também é capaz de estimar a quantidade de material que a reserva contém e proporciona uma clara visualização da reserva. Os desafios para a construção do modelo já são vistos para definição das dimensões dos blocos, visto que eles dependem da altura dos bancos, da diluição do material e claro, do objetivo do aproveitamento do depósito (Espinoza, 2012).

O problema da caracterização para estimar a reserva mineral, sem dúvidas é a quantidade de informação geológica, muitas vezes essas informações não dispõem de uma representatividade aceitável. Incertezas com relação à localização do corpo mineralizado, qual a sua forma e como estão distribuídos os teores, massas e volumes, são frequentes. Entretanto, são a partir delas que os

resultados quantitativos e qualitativos dos relatórios finais das regiões pesquisadas são gerados (Pinto e Dutra, 2008).

2.4 MODELO ECONÔMICO DE BLOCOS

Para maximizar o valor total da cava, é necessário um critério de otimização, esse é um problema que o planejamento de mina enfrenta, já que é preciso encontrar um conjunto de blocos com valor máximo possível e que seja correspondente as premissas do projeto (Pinto e Dutra 2008).

De acordo com Braga (2015), o primeiro conceito de modelo de blocos referente a representação da menor unidade de lavra surgiu em 1964, em trabalhos desenvolvidos por Axelson (1964). O modelo de blocos foi definido como o volume do corpo mineralizado subdividido em unidades tridimensionais representando uma unidade de lavra. Para Amaral (2008), o modelo de blocos representa a mina ou depósito mineral subdividido em vários blocos.

Cada bloco pode conter informações geotécnicas, geológicas, geometalúrgicas e de custos. Para Pinto e Dutra (2008), a altura do bloco é, na maioria das vezes, correspondente a altura da bancada de lavra, ou múltiplo dessa bancada e conta também com uma forma de retângulo ou quadrado na seção horizontal. Uma característica importante no modelo é que todos os blocos devem apresentar as mesmas dimensões e forma geométrica.

De acordo com Pinto e Dutra (2008), os blocos encontrados no domínio precisam ser caracterizados com o seu valor líquido, que corresponde ao valor da venda do bloco, subtraído dos custos diretos, correspondente aos cursos atribuídos para a exploração do bloco e custos indiretos, relacionados aos custos que não são possíveis de se atribuir a cada blocos, como por exemplo o salário do efetivo técnico, de gestão, custos de estudos etc. Dessa forma, são considerados alguns parâmetros de custos para definir o valor econômico dos blocos e lucro máximo.

Para encontrar o valor econômico do bloco, é utilizada a equação a seguir:

$$VEB = R - CD$$

Onde:

VEB = Valor econômico do bloco

R = Receita

$$CD = \text{Custos direto}$$

Para encontrar o lucro, ou prejuízo, é necessário considerar os custos indiretos, é possível calcular com a formula a seguir:

$$\text{Lucro (ou prejuízo)} = \Sigma(\text{VEB}) - CI$$

Onde:

$$CI = \text{Custos indiretos}$$

Eles enfatizam que blocos de estéril e rejeito têm VEB negativo, ou seja, apresentam valor econômico do bloco negativo ou igual a zero dependendo da diluição. E para calcular o lucro máximo no bloco, somar o VEB de todos os blocos da cava para chegar no resultado real, dessa forma tem-se o lucro máximo desse modelo.

2.5 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CAVA

Para limitar a cava é preciso sobrepor a superfície geométrica de cava em um corpo de minério, assim, uma porção do corpo de minério é considerado reserva lavrável. O limite da cava e tamanho dela, está diretamente relacionado a relação estéril-minério.

De acordo com Peters (1978), uma cava é projetada de diversas formas até obter-se a melhor opção para o empreendimento mineiro. As cavas são desenvolvidas através de variadas metodologias, essas seguem procedimentos similares aos dos métodos manuais.

Para Esmaeil (2018), foi nos últimos 50 anos que foi desenvolvido uma série de métodos numéricos para aplicações na mineração, com aplicação de geoestatística foi desenvolvida a modelagem tridimensional, o algoritmo de Lerchs-Grossmann e o algoritmo de Lane, isso possibilitou a criação de planos de lavra cada vez mais eficazes. Com isso, foi possível a criação da função de maximização do valor presente líquido do fluxo de caixa, também conhecido como VPL, com isso, é possível inserir premissas sobre capacidades de mina, britagem, usina, isto é, na operação de mineração.

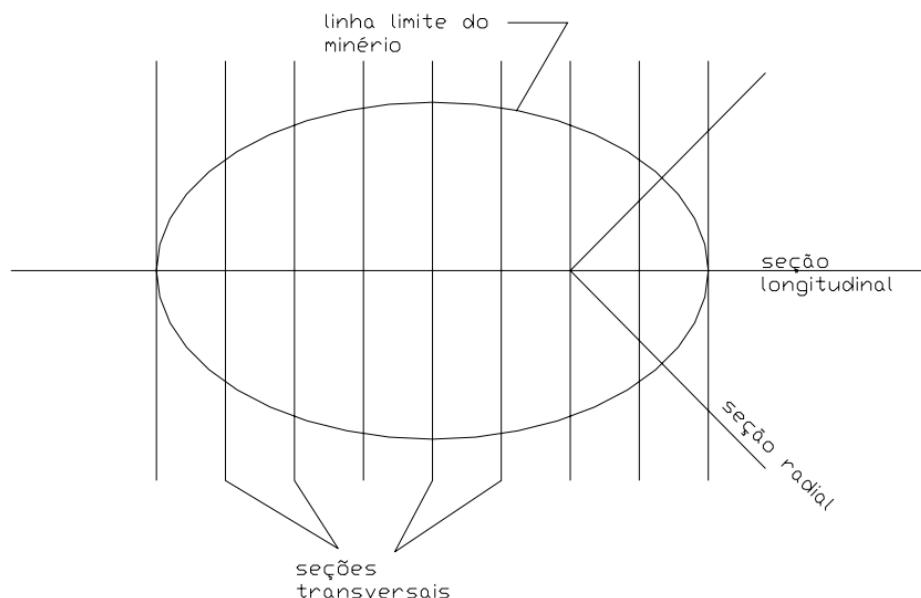
2.5.1 Métodos manuais

Um método tradicional utilizado no planejamento de mina para a obtenção de cava final é o método manual. Baseado principalmente na relação estéril-minério, é um método de tentativa e erro, onde o bom resultado está dependente do engenheiro de minas encarregado de executar o projeto, contando com sua habilidade (Pinto e Dutra, 2008).

Para iniciar o planejamento manual da cava, é necessário se atentar a alguns detalhes como, seções verticais que mostram claramente os limites do minério e seus teores, a planta de cada banco da mina com uma legenda evidenciando o minério e o estéril, o ângulo de talude aceitável para o tipo de rocha, largura mínima necessária para o fundo de cava e por último (Pinto e Dutra, 2008).

São utilizados três tipos de seções para representar o depósito, como pode se observar na figura 1 a seguir, são elas: seção longitudinal, seção vertical e seção radial.

Figura 1 - Tipos de seções



Fonte: Pinto e Dutra (2008)

Deve ser representado nessas seções os teores de minério, a superfície da topografia que intercede esse corpo de minério, a geologia local, e todas as outras informações importantes para esse planejamento. Para traçar os limites da

cava em cada seção é utilizada a relação estéril-minério, basicamente buscando minério desprezando o máximo possível de estéril. Onde é necessário lavrar estéril, é preciso levar em consideração que o minério deverá cobrir as despesas de lavra desse material desprezado. Para isso, em cada seção é calculada a REM e analisada, caso seja menor que a relação econômica, pode-se prosseguir para a próxima seção, em caso de negativa, ou seja, a REM está maior que o aceitável, o limite de cava deve ser diminuído. Isso vai se repetir até que a REM total seja igual a relação econômica. É importante ressaltar que a relação econômica é o lucro maximizado, não necessariamente o que representa a maior quantidade de minério e estéril, mas sim o que representa um maior lucro. (Pinto e Dutra, 2008)

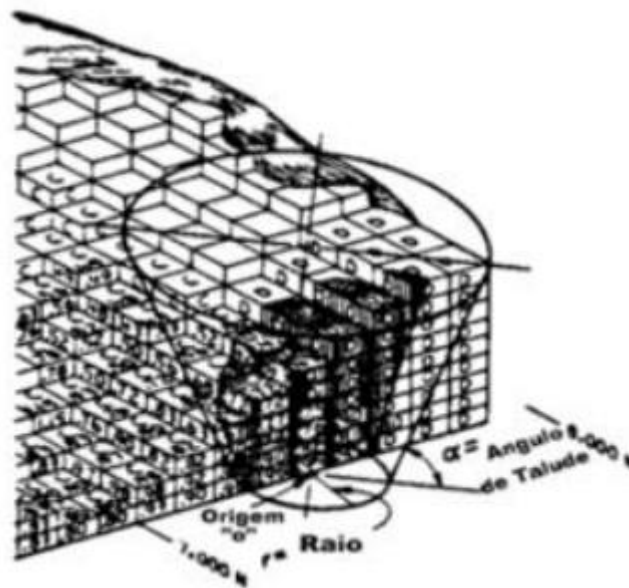
2.5.2 Técnica do cone flutuante

A técnica de cones flutuantes, assim como o algoritmo de Lerchs-Grossman são os mais populares no planejamento de mina atualmente. Para Peroni (2012) esse método considera o material contido nos cones com restrições físicas e geomecânicas, se dentro do cone há minério que dê retorno financeiro o cone é extraído, se a REM é alta e o custo é maior que a receita o cone não será extraído. Assim se repetirá até que não haja mais blocos economicamente viáveis.

Ainda de acordo com Peroni (2012), os algoritmos que são baseados nessa abordagem podem não ter resultados ótimos. Para do Carmo (2001), dependendo da direção utilizada na procura por cones viáveis, o método pode falhar no projeto de cavas ótimas. Quando os blocos são procurados no sentido de topo para base, pode não garantir o bom resultado da cava otimizada.

Apesar dos resultados não serem otimizados para geração de cava final, eles podem gerar resultados com uma interpretação mais intuitiva e ágil (Peroni, 2012). De acordo com do Carmo (2001) o algoritmo de Kerobov tem o objetivo de melhorar o método de cones flutuantes. A figura 2, mostra a técnica de cones flutuantes em um modelo de blocos.

Figura 2 - Técnica de cones flutuantes



Fonte: (Do Carmo, 2001)

2.5.3 Algoritmo de Lerchs-Grossman

Em 1965 foi desenvolvido o algoritmo de Lerchs e Grossman (LG), quando esses autores publicaram o trabalho *Optimum design of open pit mines*. O trabalho apresenta dois métodos numéricos, um com modelo bidimensional ou seção vertical de cava e outro com modelo tridimensional. (Hustrulid, Kuchta e Martin, 2013). Esse algoritmo matemático permite determinar uma cava final a céu aberto, de forma que a diferença entre o valor total do minério e o custo de extração dele seja positiva e, maximizada. (Carmo, Curi e Souza 2006)

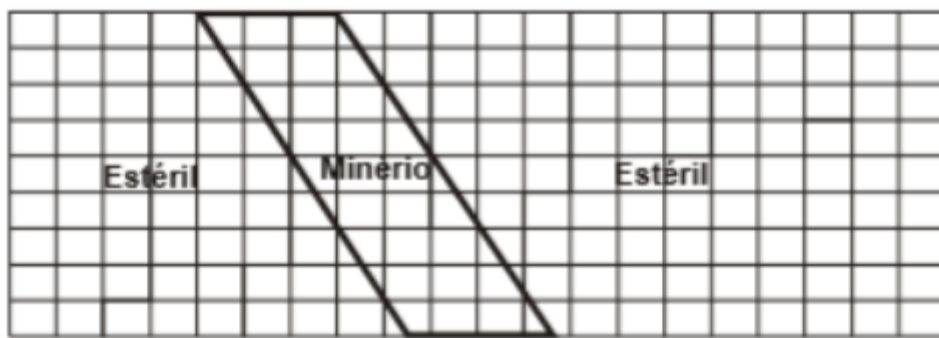
De acordo com Campos (2017) apesar do algoritmo ser o maior utilizado e de ter introduzido a aplicação de métodos computacionais na indústria mineira. Ele ainda enfrenta barreiras na completa aceitação, isso pela complexidade do método em termos de programação e compreensão, além da dificuldade no momento de alterar os ângulos de talude da cava, entre outros desafios.

O método aplicado ao modelo bidimensional é simples e preciso, e aplicado para cada seção vertical do depósito. (Pinto e Dutra, 2008). Ele apresenta dificuldade para suavizar o fundo de cava, assim como a maioria das metodologias bidimensionais. Como o método funciona de forma independente a cada seção, é

impossível garantir essas seções serão encaixadas perfeitamente. Por isso, o desenho tridimensional não será uma solução ótima. (Johnson e Sharp, 1971 apud Campos, 2017).

Para título de entendimento, a forma mais clara de como funciona o algoritmo é através dos exemplos a seguir mostram um exemplo que foi apresentado por Lerchs Grossmann (1965) e representado por Hustrulid e Kuchta (2006). A figura 3 representa uma seção vertical de um modelo de blocos com a existência de um corpo mineral.

Figura 3 – Seção de corpo mineral



Fonte: (Hustrulid e Kuchta, 2006)

Neste exemplo, considera-se que os blocos de estéril têm VPL de -4 e os blocos de minério tem VPL de 12. A geometria adotada foi retangular com medidas de 5x7, o ângulo de talude utilizado é de 35.5°. A figura 4 a seguir apresenta os blocos com seus VPLs. A figura 5 mostra que nos blocos de contato foi utilizada uma ponderação, já que no bloco há minério estéril. Para os blocos terem suas posições espaciais, utilizou-se (i,j) onde i é a linha e j é a coluna.

Figura 4 – Corno mineral com blocos valorados

-4	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
			-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4		
				-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4				
					-4	12	12	12	12	-4	-4	-4					
						12	12	12	12	-4	-4						
							12	12	12	-4							
								12	12	-4							
									12	12	-4						

Fonte: (Hustrulid e Kuchta, 2006)

Figura 5 – Modelo de blocos com primeira linha zerada

I \ J	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
①	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②		-4	-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
③			-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4		
④				-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4			
⑤					-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4				
⑥						-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4					
⑦							-4	-4	8	12	12	0	-4						
⑧								-4	0	12	12	8	-4						
⑨									-4	12	12	12	0						

Fonte: (Hustrulid e Kuchta, 2006)

Para iniciar, é preciso adicionar zero na primeira linha. O segundo passo é realizar a soma cumulativa em cada coluna. Como mostra a figura 6.

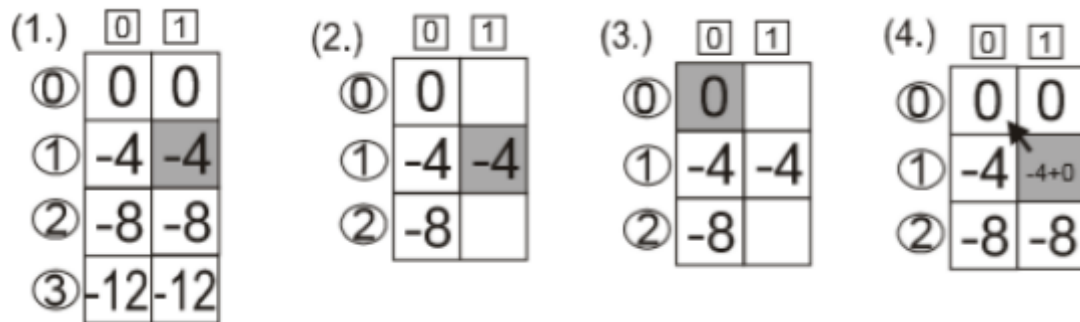
Figura 6 – Modelo de blocos com soma cumulativa por coluna

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
①	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
①	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②	-8	-8	-8	-8	-8	8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	
③	-12	-12	-12	-12	-12	4	32	36	20	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12		
④				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16			
⑤					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20				
⑥						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24					
⑦							20	52	64	36	4	-24	-28						
⑧								48	64	48	16	-16	-32						
⑨									60	56	28	-4	-32						

Fonte: (Hustrulid e Kuchta, 2006)

Depois da soma cumulativa por coluna, é realizada a soma cumulativa geral. Inicia-se da extrema esquerda, movendo-se para a direita ao longo da seção, isso até encontrar o primeiro bloco possível de calcular. O cálculo é simples, porém requer bastante atenção, sendo necessário analisar os três blocos imediatamente a esquerda o bloco analisado e, ao seu valor somar com bloco de maior valor. A figura 7 exemplifica claramente como funciona. Na imagem, o bloco analisado é o 1,1, valorado em -4. Analisando os blocos a sua esquerda imediata, tem-se 0, -4 e -8, então soma-se o -4 ao 0, e em seguida com uma seta, indica para qual direção está o bloco escolhido para somar. O valor do bloco então é substituído pela soma. O processo segue descendo a coluna, quando finalizar a coluna 1, inicia-se a coluna 2 novamente do topo a base até o fim de todos os blocos.

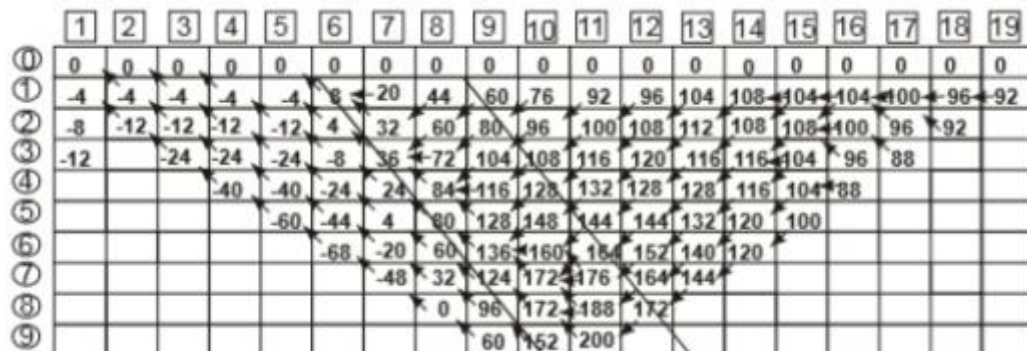
Figura 7 - Cálculo cumulativo geral



Fonte: Hustrulid e Kuchta (2006)

Depois de repetir esse processo até o fim do modelo de blocos, ou seja, chegar ao lado direito inferior, e ter todos os blocos com os valores atualizados e indicados com a seta (figura 8), é preciso encontrar o bloco com maior valor na linha 1, abaixo da linha de zeros e seguir as setas contornando os blocos, conforme indica na figura 9. Finalmente, a figura 10 apresenta o limite de cava final obtida pelo LG para essa seção do modelo de blocos, neste momento, os blocos retornam com seus valores originais.

Figura 8 - Processo da soma cumulativa geral



Fonte: Hustrulid e Kuchta (2006)

$V_M = \text{Volume do corpo de minério}$

$\pi = \text{constante de Pi}$

$r^2 = \text{raio do corpo de minério ao quadrado}$

$L = \text{Comprimento do corpo de minério}$

Para lavar esse corpo de minério, é necessário um ângulo de talude menor que noventa graus. Adotando-se um ângulo de talude β , o volume explotado é definido pela equação a seguir:

$$V_T = \frac{1}{3} \pi [R^2 L_T - r^2 (L_T - L)]$$

Onde:

$V_T = \text{Volume total escavado}$

$L_T = \text{Comprimento total escavado}$

$R = \text{Raio do cone escavado total}$

$$L_T = L + r \tan(\beta)$$

$$R = \frac{L}{\tan(\beta)} + r$$

A REM global é definida por:

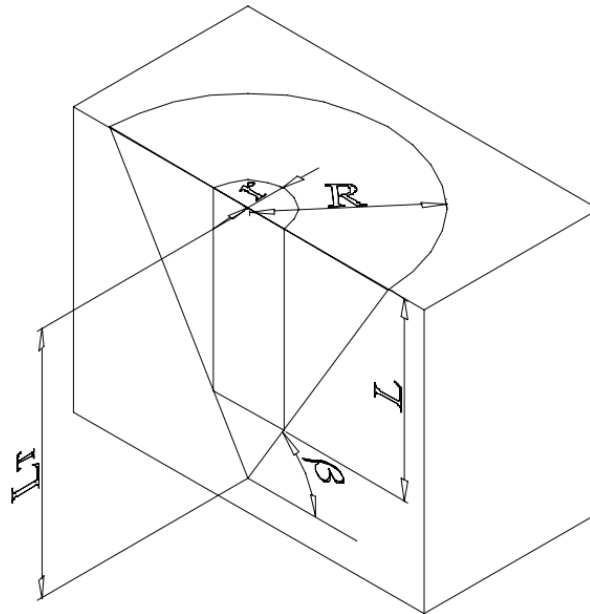
$$R_{EM} = \frac{V_T - V_M}{V_M}$$

Ou:

$$R_{EM} = \frac{[R^2 L_T - r^2 (L_T - L)] - 3r^2 L}{3r^2 L}$$

A figura 11 a seguir ilustra as variáveis utilizadas nas equações apresentadas.

Figura 11 - Apresentação de um cone de extração



Fonte: Pinto e Dutra (2008)

Dessa maneira, é possível definir as REM's para cada fase da lavra.

2.5.4.2 Relação estéril minério (aspectos econômicos)

Conforme Pinto e Dutra (2008), quando a cava ótima e a REM global forem determinadas é possível detalhar o planejamento de lavra. Quando elaborado o sequenciamento de lavra é necessário determinar a evolução da REM no tempo através de algum dos três métodos a seguir:

I – REM decrescente;

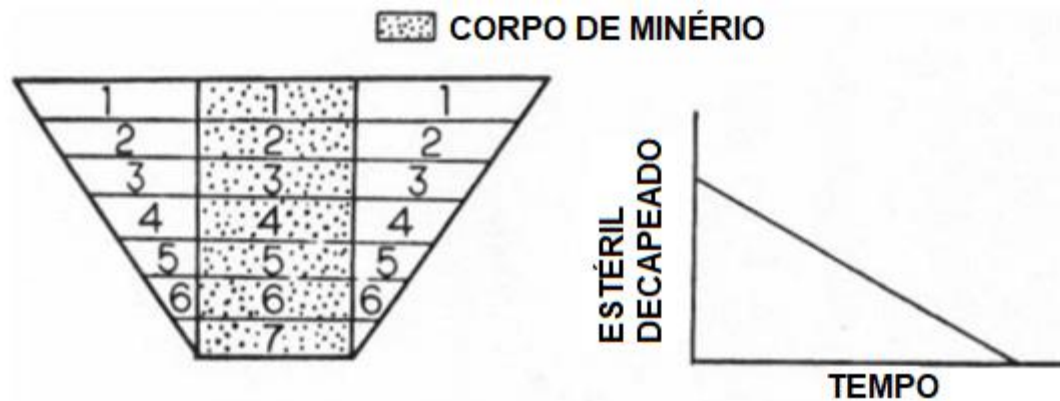
II – REM crescente;

III – REM constante. **COLOCAR NA ORDEM AS IMAGENS**

Para o método decrescente, o minério é lavrado e em sequência todo o estéril do banco seja lavrado até os limites da cava ótima, esse método é vantajoso quando se analisa a questão do minério liberado no próximo banco, a não contaminação do minério dos próximos bancos e os equipamentos são mantidos na direção da cava final. Em contrapartida, esse método é desvantajoso pois os custos atrelados a lavra de estéril são maximizados nos primeiros anos do empreendimento

minério, fazendo com que o investimento inicial seja muito alto. A figura 12 a seguir ilustra a REM decrescente (Pinto e Dutra, 2008).

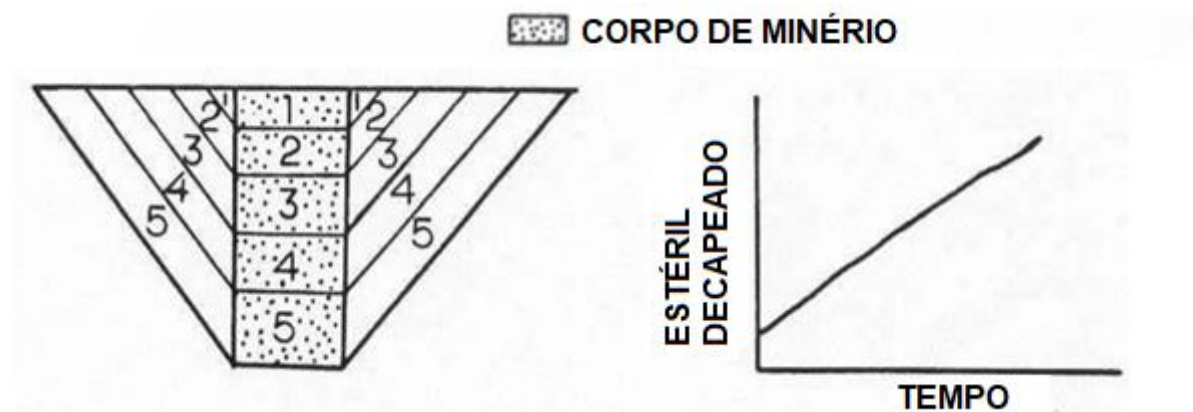
Figura 12 - REM decrescente



Fonte: Pinto e Dutra (2008)

De acordo com Pinto e Dutra (2008), quando utilizado o método crescente de REM, o início do projeto é realizado uma REM muito baixa, lavrando todo o minério dos primeiros bancos logo nos primeiros anos e deixando os taludes de estéril obrigatoriamente paralelos aos taludes do *Life of Mine*. Neste cenário, os benefícios são maximizados nos primeiros anos, o que diminui os riscos do investimento já que o retorno é quase que imediato, porém a operação de mina encontra muitos desafios e é sacrificada em várias frentes de lavras com bancos estreitos, além de fazer com o final da lavra não seja viável, já que será necessário lavar muito estéril para liberar o minério. A figura 13 ilustra o método de REM crescente.

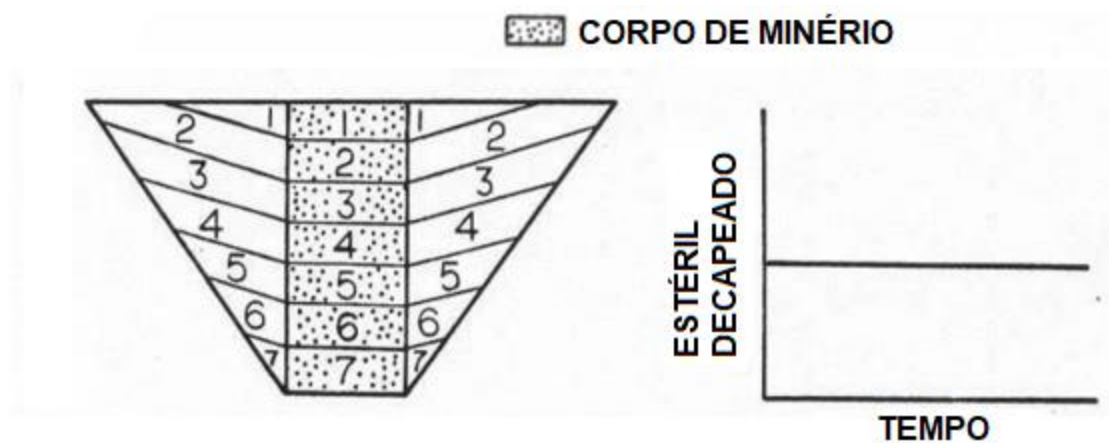
Figura 13 - REM crescente



Fonte: Pinto e Dutra (2008)

Segundo, Pinto e Dutra (2008), o método de REM constante visa operar a lavra do estéril com uma REM próxima da REM global. Os taludes aumentam proporcionalmente com a profundidade até que se chegue na cava final, a produção e equipamento é constante do início ao fim da vida da mina. A figura 14 ilustra o método de REM constante.

Figura 14 - REM constante



Fonte: Pinto e Dutra (2008)

2.5.5 Operacionalização da cava

Depois de gerar a cava ótima, é preciso gerar a cava operacional. Para Rocha (2015), realizar a operacionalização da cava é fazer o design com pés, cristas, rampas e acessos. É durante este trabalho que serão adicionados os

parâmetros operacionais, como largura de berma, largura da rampa, altura do banco, ângulo de talude. A figura 15 a seguir ilustra esses parâmetros.

Figura 15 – Parâmetros geométricos



Fonte: Peroni (2002)

Os resultados da cava ótima e da cava operacionalizada não são iguais, porém existe um limite de variação. A indústria aceita até 5% de variação para o minério e 10% de variação para o estéril (Rocha, 2015).

Peroni (2002), explica como cada parâmetro geométrico para a operacionalização deve ser decidido:

- Altura da bancada – calculada diretamente pelas especificações dos equipamentos de operação, como perfuratrizes, escavadeiras e caminhões.
- Ângulo de talude – medido em graus, determinado pela geotecnia presando pela otimização da segurança e máximo lucro possível.
- Bermas – o intervalo de berma, ângulo de talude de berma e a largura da berma são definidos pela geotecnia do talude.
- Limites de cava – como visto em tópicos anteriores, o limite pode ser definido de diversas maneiras, a fim de encontrar o limite mais lucrativo possível. Como principal fator de controle desse limite tem-se os custos de remoção do material de decapeamento e estéril versus o valor econômico do minério. O

que também é fator influenciável nesta delimitação é a infra-estrutura da superfície, córregos, limites fundiários, direito de propriedades, entre outros.

- Acessos – Pode ser projetado um sistema espiral que servirá de estrada de acesso e deverá ser mantida dentro da cava com gradiente constante. A rampa também pode ser projetada como um sistema de retorno, também conhecido como ziguezague. E a escolha entre esses dois sistemas depende do corpo de minério, estabilidade de taludes e da frota operacional.
- Largura dos acessos – depende diretamente da frota utilizada para escoar a produção e da necessidade de utilização da via.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, utilizou-se um modelo de blocos, topografia do local, dados geométricos de uma cava, uma cava final e os *softwares Studio OP* e *Excel*.

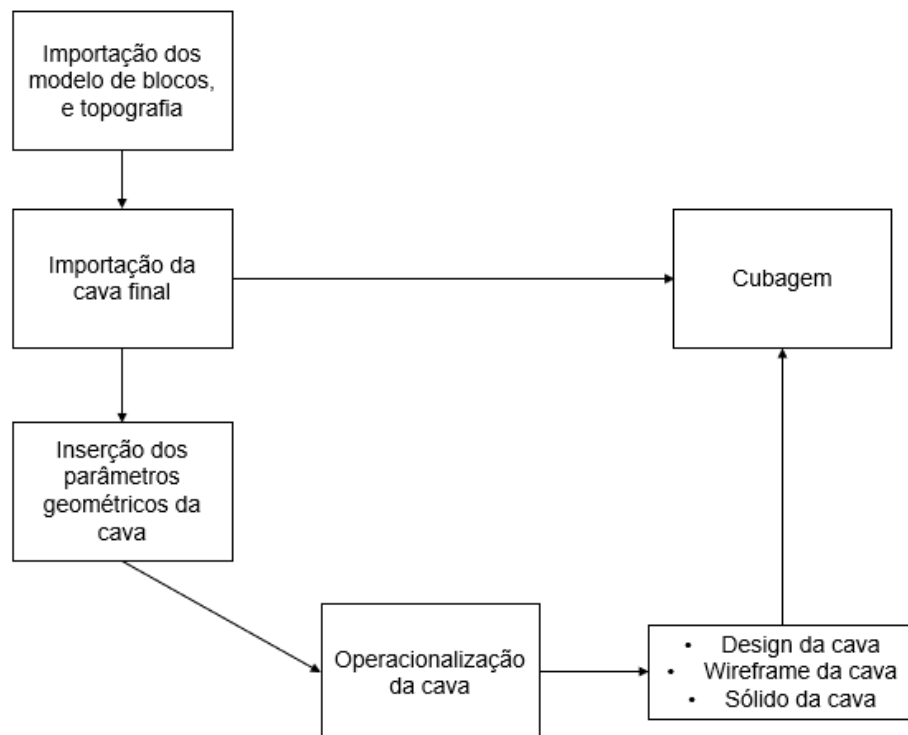
O modelo de blocos, dados geométricos e cava matemática utilizado foi de uma reserva de fosfato de um empreendimento mineiro em Minas Gerais. Este modelo teve uma função aplicada sobre o atributo de P_2O_5 para que a confidencialidade fosse preservada. Apenas o teor de P_2O_5 e a litologia foram considerados para definição de minério e estéril neste trabalho.

Para o tratamento dos dados do modelo de blocos, design da cava operacionalizada e, *report* foi utilizado o *Studio OP* da empresa Datamine. Para manipulação dos *reports* foi utilizado o software Excel.

3.1 Metodologia utilizada

Nesta seção será apresentada a metodologia aplicada a fim de comparar a cubagem da cava final e da cava operacionalizada ao fim do trabalho, a figura 16 mostra o fluxograma de cada etapa a seguir:

Figura 16 - Fluxograma da metodologia



3.2 Importação dos arquivos

Inicialmente, no software *Datamine Studio OP* foi realizada a importação do modelo de blocos geológico, cava final e a superfície topográfica do local.

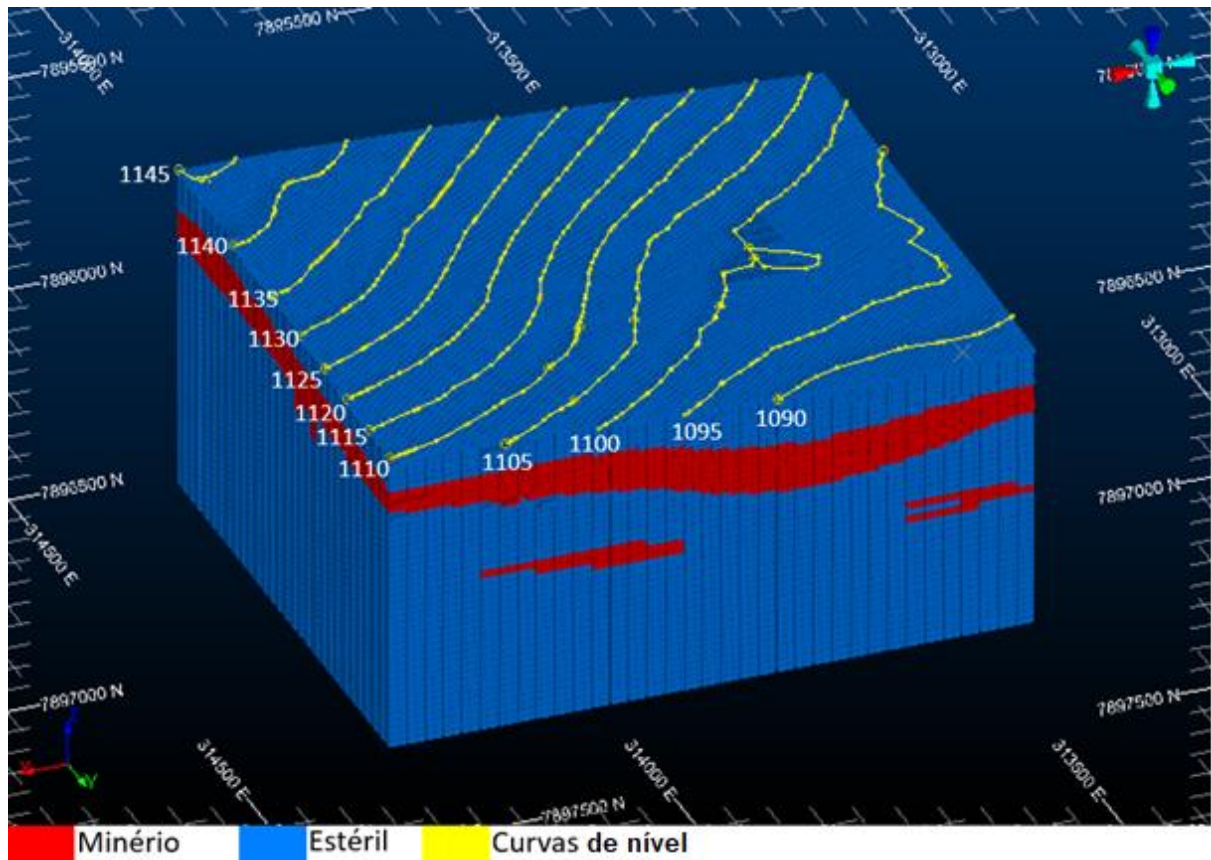
3.3 Modelo de blocos

Para este trabalho, o modelo de blocos utilizado é referente a um depósito brasileiro localizado em Minas Gerais cujo material de interesse é o fosfato. O atributo de P_2O_5 no modelo sofreu alterações para preservar as informações do empreendimento mineiro. Os dados do modelo são compostos pelos seguintes atributos:

- Coordenadas e localização dos centroides de cada bloco;
- Tamanho de cada bloco;
- Teores de P_2O_5 ;
- Litologia de cada bloco.

O modelo foi cortado em relação a topografia, visando remover blocos situados acima da superfície topográfica. A figura 17 mostra o modelo de blocos já cortado.

Figura 17 – Modelo de blocos



3.4 Cava final

Foi importado o sólido da cava final recebido como *input* para o trabalho, na figura 18 é possível observar uma seção da cava final e do modelo de blocos. Na figura 19 é possível observar a mesma seção, mas dessa vez com a distribuição de teores de P_2O_5 .

Figura 18 – Seção E da cava final e modelo de blocos com legenda de minério e estéril

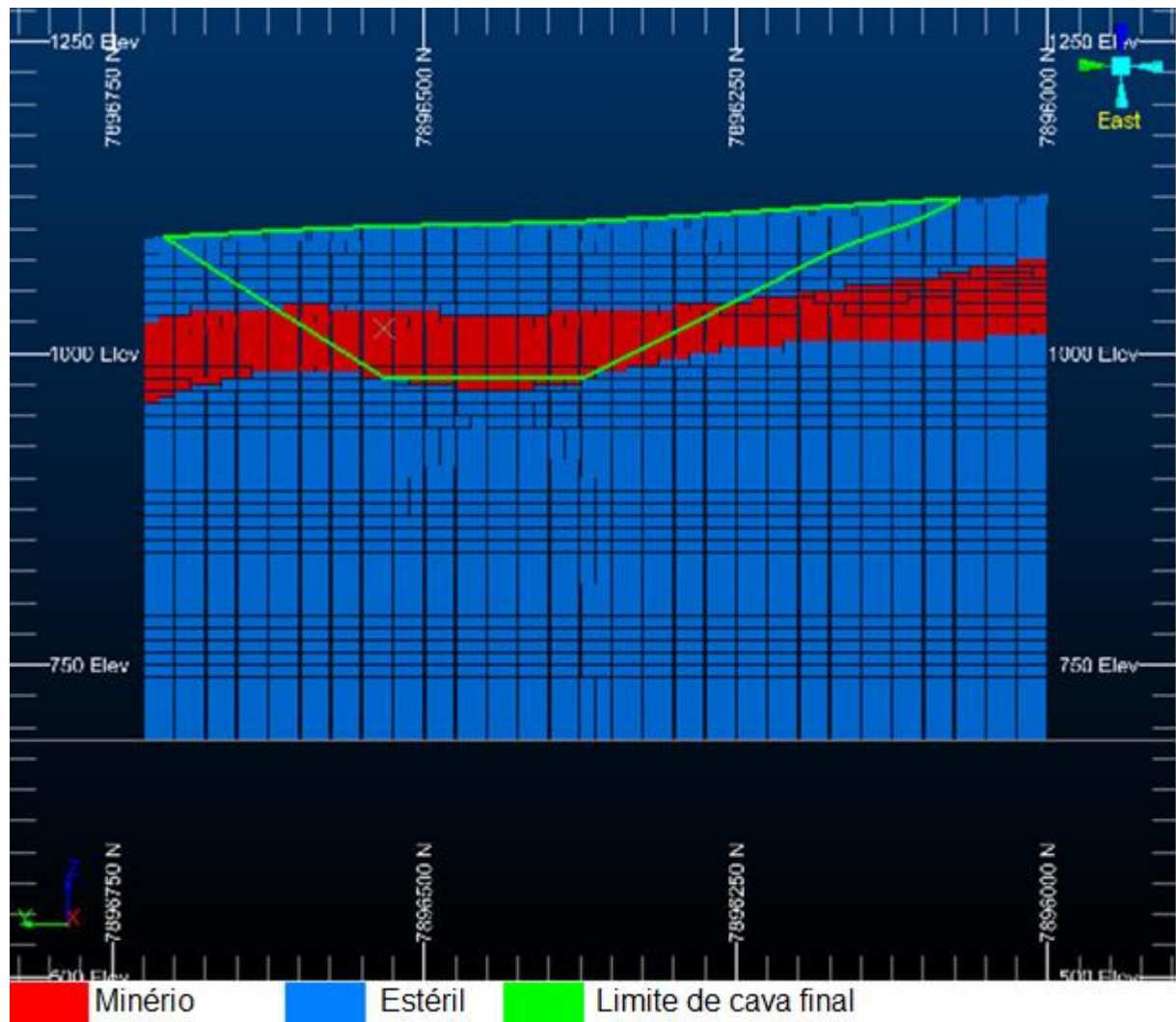
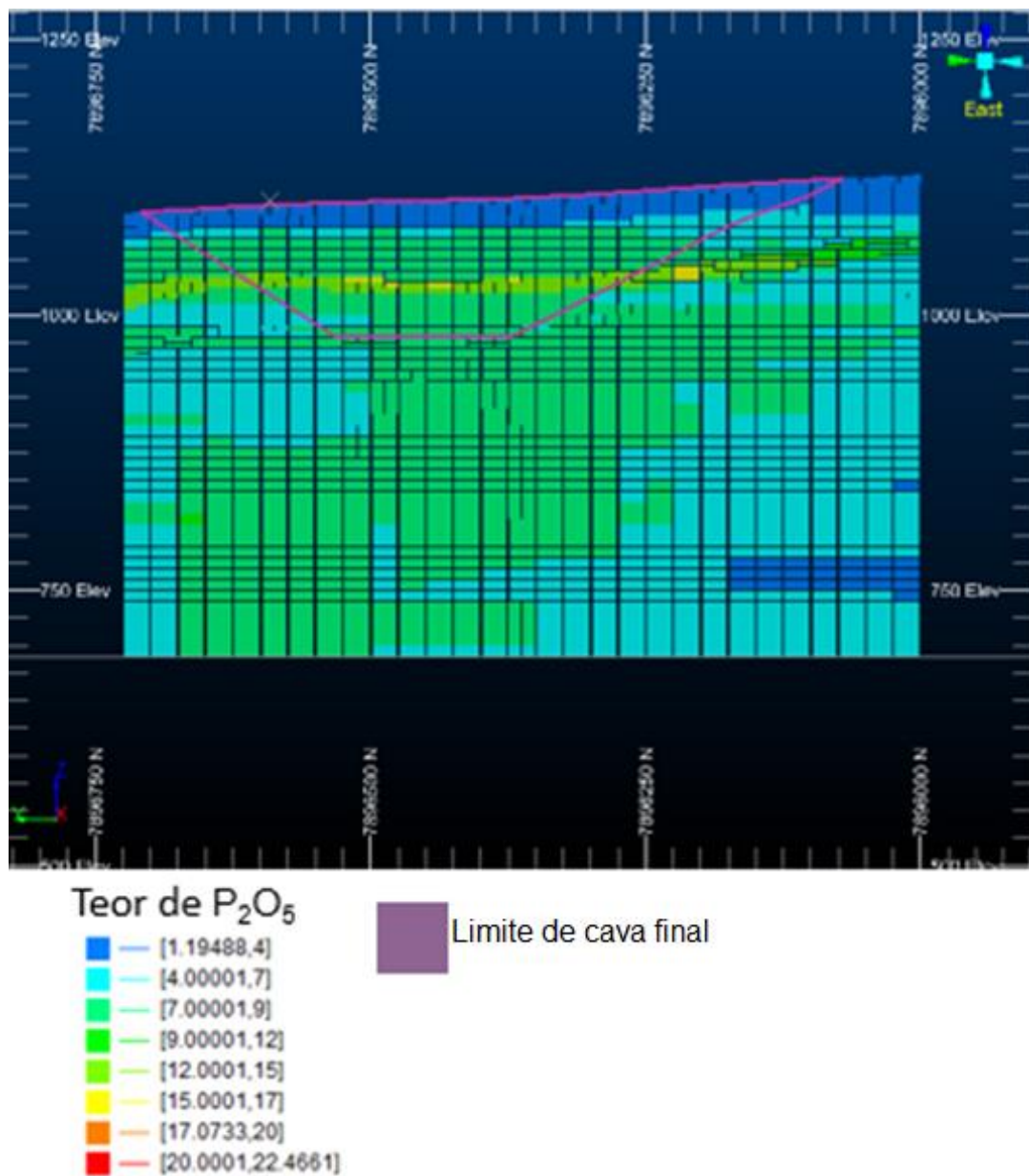


Figura 19 - Seção E da cava final e modelo de blocos com legenda de P_2O_5



3.5 Parâmetros geométricos

Para iniciar o design da cava operacionalizada, houve o *input* dos parâmetros utilizados por um empreendimento mineiro. A tabela 1 a seguir se refere a esses parâmetros. Estes foram fornecidos por uma empresa de mineração de.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos

Elemento geométrico	Geometria de cava final
Largura da berma	7 m
Altura do banco	10 m
Ângulo de face do talude	50°
Gradiente da rampa	8%
Largura da rampa	17 m

3.6 Operacionalização da cava

De início, é necessário observar qual a cota mais alta da cava final, pois ela significa onde está o ponto mais alto da topografia. Dessa forma, a *string* de topo da cava final, que antes era projetada conforme a topografia, foi projetada com o ângulo de talude de 50°, para se tornar uniforme acima da cota mais alta da cava final. Isso foi realizado para quando a superfície da cava operacionalizada estiver finalizada, seja possível gerar o sólido. A *string* foi projetada na cota 1140. Para isso, anteriormente foi necessário obter a *string* de interseção entre a cava final e a topografia, para assim conseguir realizar essa projeção na cota mais alta. A figura 20 ilustra essa *string* projetada.

O próximo passo foi analisar cota por cota desde o topo até o fundo de cava para saber onde havia ocorrência de minério para ter a melhor tomada de decisão em relação ao início da rampa. Na figura 21 é possível observar quatro seções em cotas diferentes, na seção (b) é visto que há a ocorrência de minério, mas a porção não está contemplada na cava final, na seção (c) já existe minério dentro do limite de cava final e, na seção (d) a cava final é completamente composta de minério.

Figura 20 – Seção E da cava final, modelo de blocos e *string* para início da cava operacionalizada

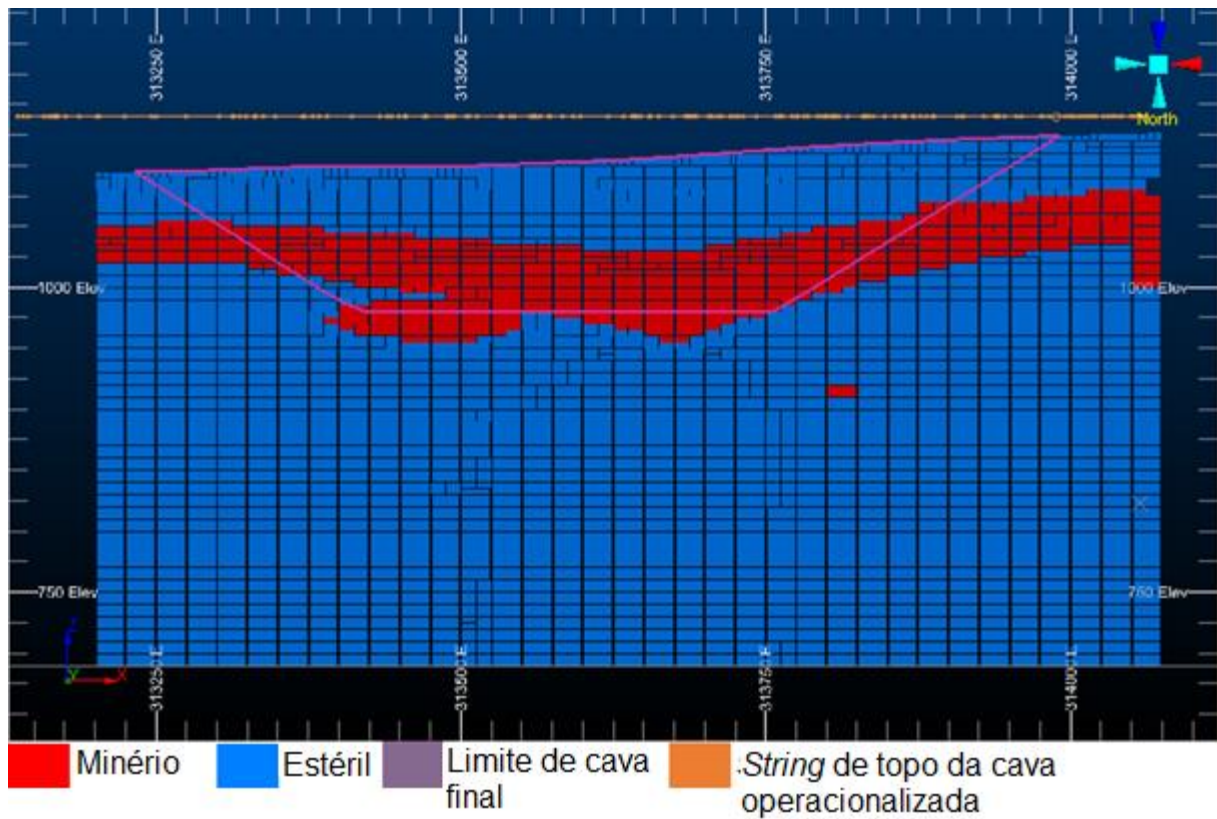
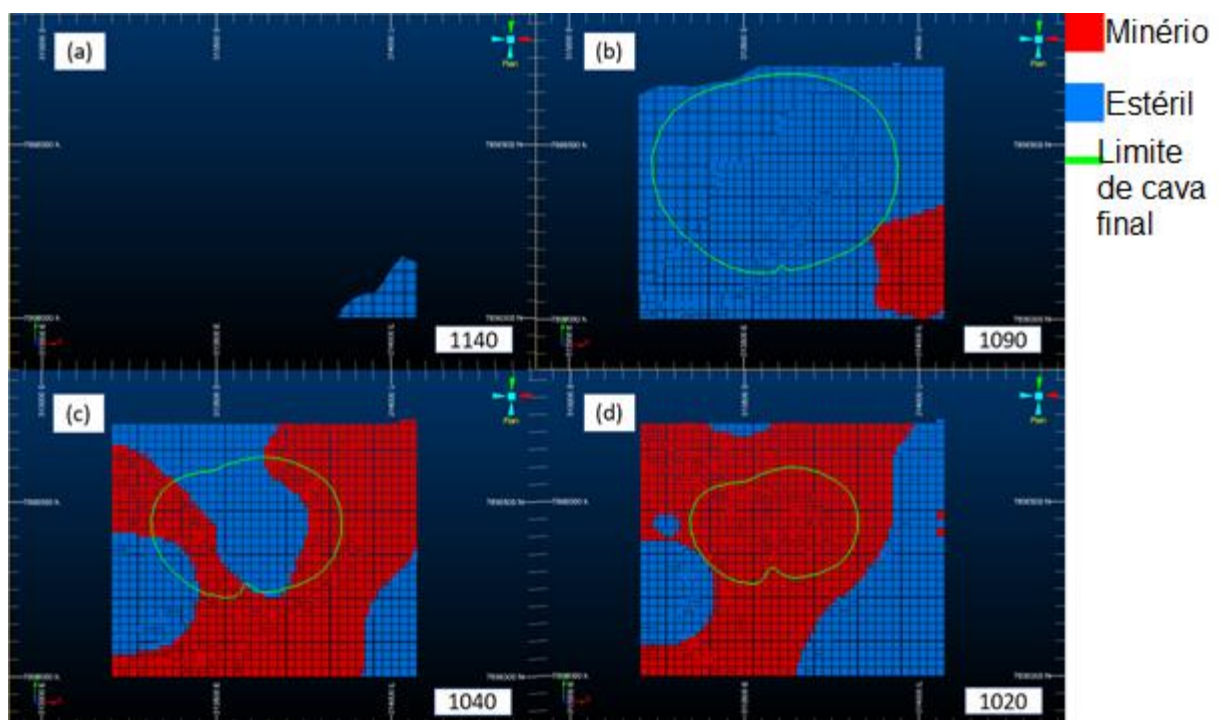
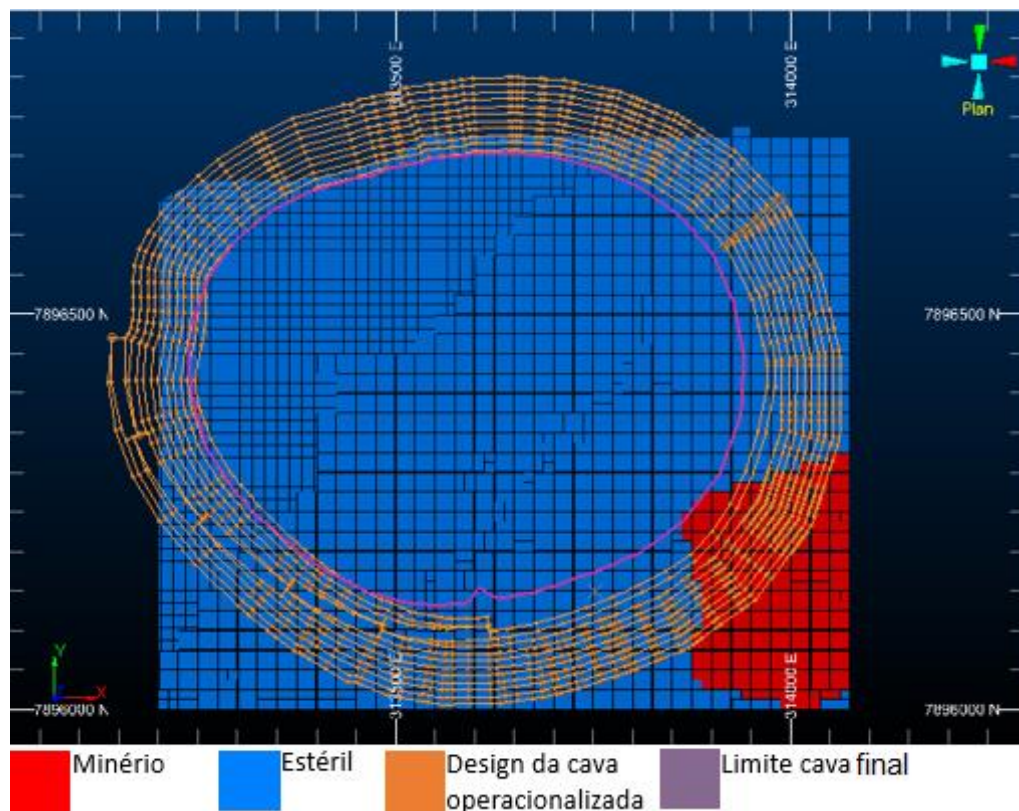


Figura 21 – Seções horizontais do modelo de blocos e limite de cava final



Para gerar o design da cava operacional, através do contorno projetado para a cota 1140 da cava final, foi consecutivamente gerado após ele, uma rampa de acesso, o pé de talude ao fim da rampa e *string* da crista, que pode ser chamada também de linha de berma, pois ela que determina o limite da berma. A todo momento é conferido se o design está contemplando o máximo possível de minério que já era contemplado na cava final. A figura 23 ilustra o design da cava operacionalizada em planta com a seção do modelo de blocos e do limite de cava final na cota 1090, onde anteriormente foi observado a primeira ocorrência de minério. Dessa forma o trabalho de design seguiu até o fundo de cava.

Figura 22 – Seção em planta das *strings* da cava operacionalizada



Posteriormente, quando finalizado o design, foi gerado a *wireframe* da cava operacionalizada e, com essa *wireframe* junto com da superfície topográfica, foi gerado o sólido com a diferença entre a cava operacionalizada e a superfície topográfica.

3.7 Cubagem

Depois de gerado o sólido da cava operacionalizada, foi hora de realizar a cubagem dele, os dados foram extraídos também no *Studio OP* e levados para o *Excel*. Nesse momento, as massas de minério e estéril foram avaliadas e, comparadas entre o resultado da cava antes e depois da operacionalização, bem como, a REM de ambas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia exposta anteriormente

4.1 Análise estatística do depósito

A análise estatística dos dados iniciou-se com os dados obtidos do depósito mineral onde foi analisado os parâmetros estatísticos que são observados na tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição estatística do teor de P_2O_5 do depósito.

Valores	Depósito (%)
Média	4,035
Variância	5,27
Desvio padrão	2,84
Máximo	22,36
Mínimo	1,19

Verifica-se que a variável teor apresenta esperança matemática de 4,04%, enquanto a variância e desvio foram valorados em 5,27% e 2,84%, respectivamente.

4.2 Cava operacionalizada

Através da metodologia apresentada, a cava operacionalizada foi gerada manualmente, utilizando como referência a dada cava final. As figuras 23 e 24 mostram seções da cava operacionalizada. A figura 23 mostra o modelo de blocos, com a classificação de minério e estéril, nela é possível observar o corpo de minério contínuo e espesso, a espessura do minério abrange mais de cinco bancos, abaixo da cava ainda há minério, no entanto o fundo de cava já chegou ao limite operacional e não é possível aprofundar mais.

Figura 23 – (a) seção W (b) seção E

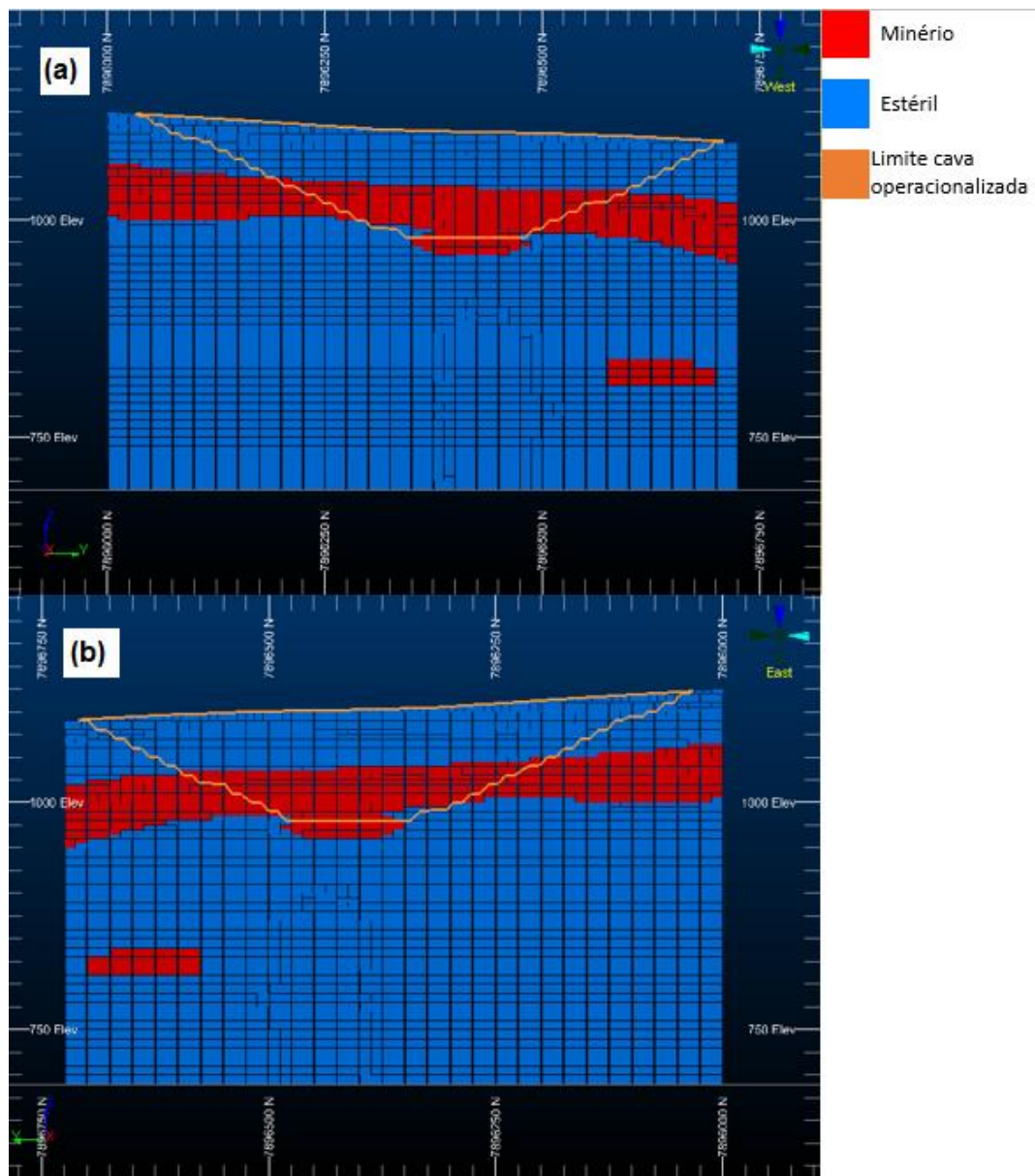
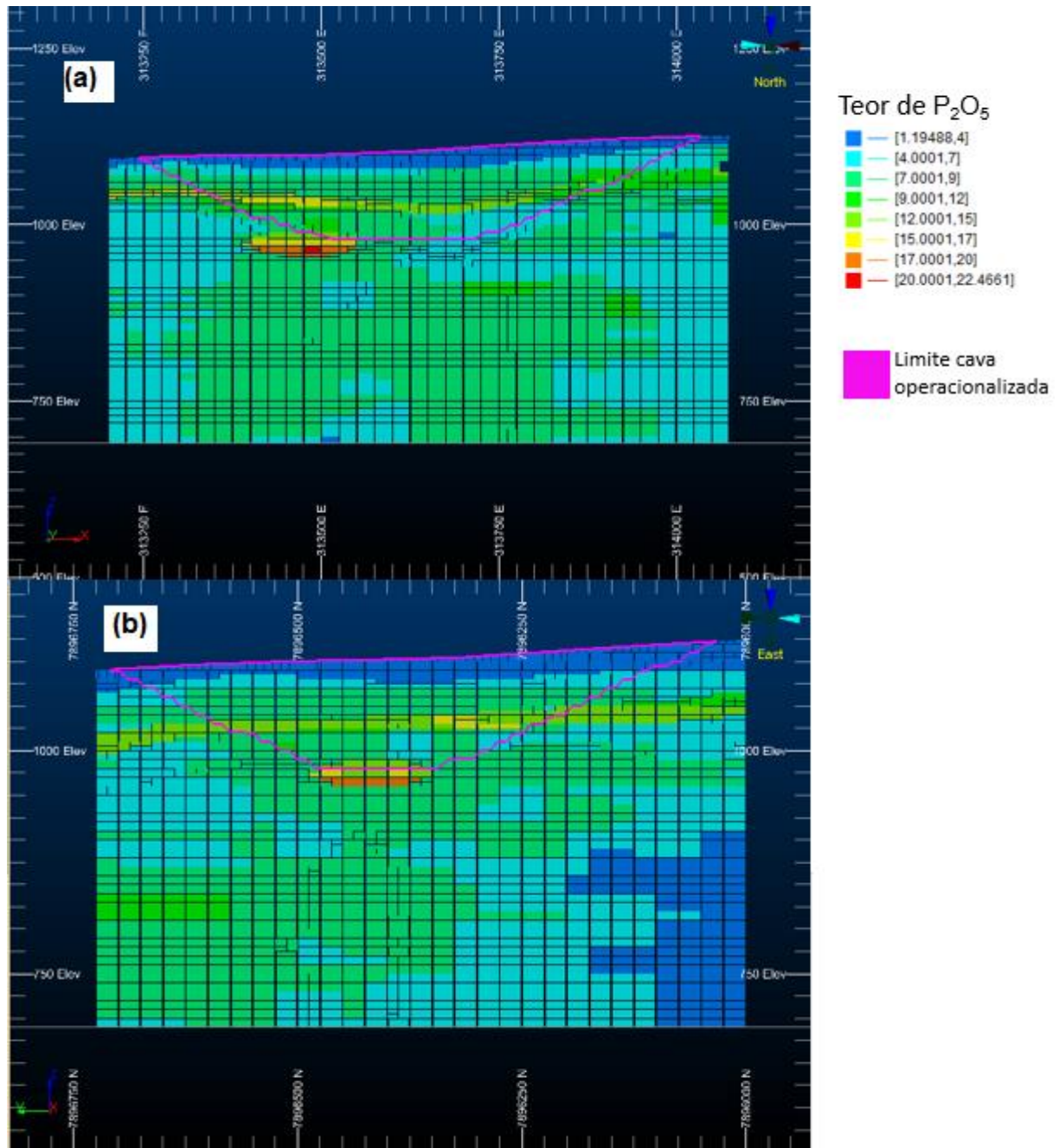


Figura 24 – (a) Seção N (b) Seção E



A partir da Figura 27, é possível observar a ocorrência de P_2O_5 mais rico, que se dá em uma tira horizontal no meio da cava, e depois se concentra ao fundo da cava.

É visto que a porção mais rica de recurso está abaixo do fundo de cava, mas como foi dito anteriormente, é um local onde não era possível aprofundar mais a cava pela falta de operacionalização, o fundo ficaria muito estreito deixando não

operacional. A alternativa de abrir o *pit* para conseguir operacionalizar mais nessa região é inviável pelo aumento da REM, automaticamente aumentando os custos. Dessa maneira, esse material é classificado como recurso, eventualmente se houver mudança dos fatores modificadores ele poderá vir a se tornar reserva e ser aproveitado em um momento futuro.

Na figura 24 é possível observar que a cava operacionalizada abrange mais espaço, conseqüentemente, mais material que a cava final. A seguir, é possível observar na tabela 4 a cubagem das duas cavas, ela apresenta os resultados numéricos do que é visto na figura 28.

Figura 25 – Cava final *versus* cava operacionalizada

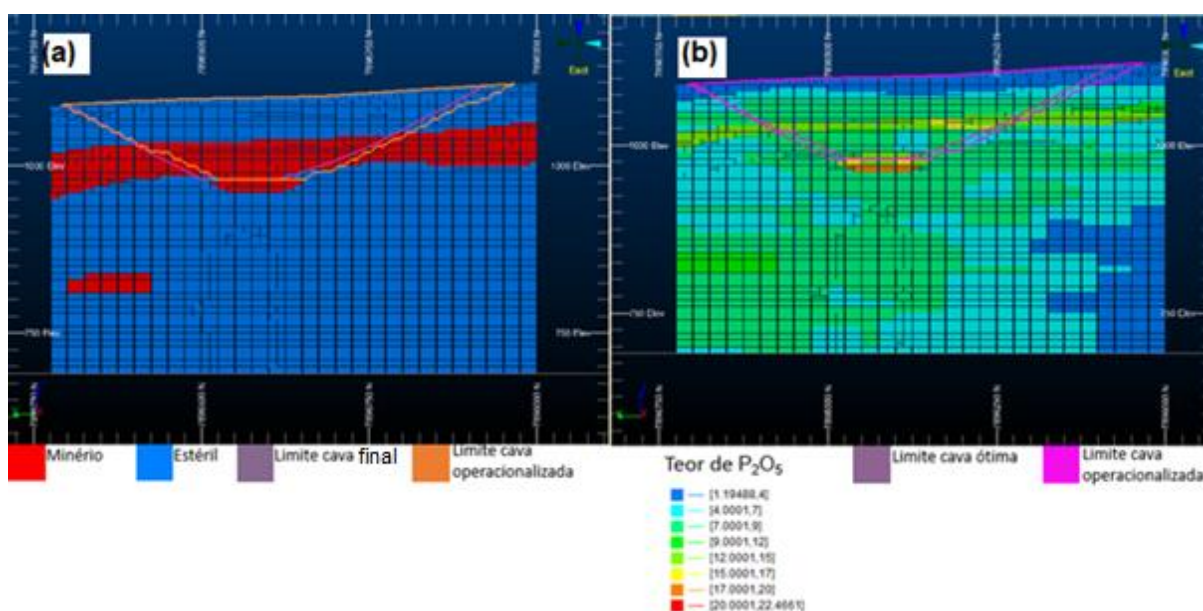


Tabela 3 – Cubagem cava final e cava operacionalizada

Cava	Minério (t)	Estéril (t)	Total (t)	REM
Cava final	13.511.354,47	29.554.914,45	43.006.268,92	2,19
Cava operacionalizada	13.252.625,47	32.229.710,94	45.482.337,41	2,43

Com a operacionalização da cava houve uma perda de 1,91% de minério o equivalente a 258.793 t de minério a menos e, um acréscimo de 8,11% de estéril, o equivalente a 2.674.796,49 t de estéril a mais.

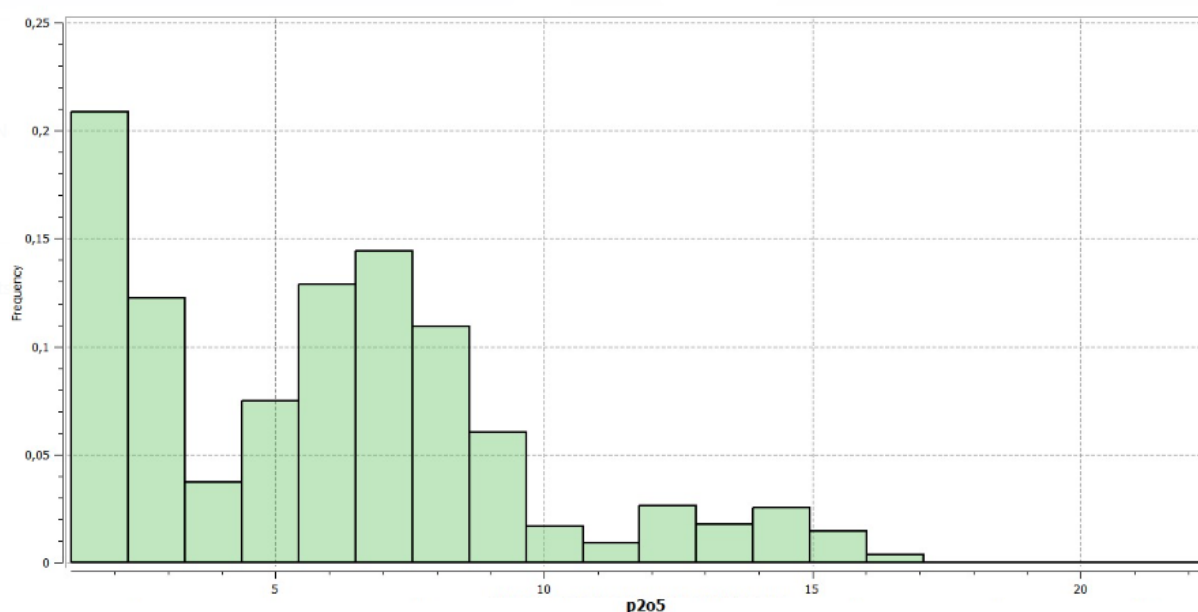
De acordo com o item 2.5.5, estes valores são aceitos, visto que Rocha (2015) afirma que a indústria aceita uma margem de 5% para o minério e de até

10% para estéril. Esses limites são estabelecidos para que não haja perda significativa da reserva, visto que os bens minerais não são renováveis.

Essa variação influencia diretamente na REM da cava, já que deixará de lavar minério e será lavrado uma porção maior de estéril, impactando diretamente nos custos de lavra. A cava que foi inserida para o trabalho buscava um ganho maior em relação a cava operacional, com mais minério e menos estéril.

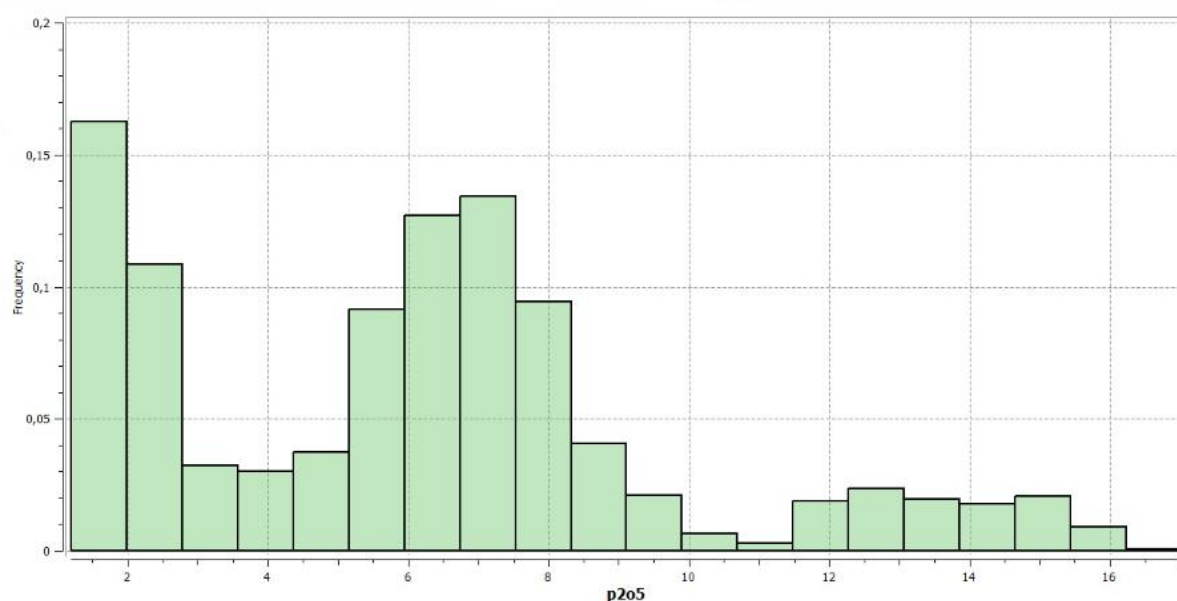
Nas figuras 26 e 27 observa-se o histograma de cada uma das cavas, eles apresentam forma assimétrica com características de bimodalidade, isso significa que se trata de um depósito mineral complexo. São histogramas parecidos, o que é um bom resultado, mostrando que as cavas não divergiram de maneira extrapolada. A tabela 4 faz uma comparação entre os parâmetros estatísticos encontrados para cada cava.

Figura 26 – Histograma da cava final



O histograma apresenta a distribuição estatística das análises para P2O5 na cava final com teores variando de 0 a 22%. Ainda é possível observar que há um predomínio de amostras com teor em torno de 1%, posteriormente essa predominância cai e retorna de 6 a 8%.

Figura 27 – Histograma da cava operacionalizada



O histograma aponta a distribuição estatística dos teores, e estes variam de 0 a 17%. É possível ainda observar que, assim como o histograma da Figura 26, este também há um predomínio de amostras com teor em torno de 1 a 2%, posteriormente essa predominância cai e retorna de 6 a 8%. Esse resultado é positivo, visto que essa segunda predominância abrande o teor de corte, que foi de 4%.

Tabela 4 – Distribuição Estatística dos teores de P₂O₅ nas cavas avaliadas

Valores	<i>Ultimate pit (%)</i>	Cava operacionalizada (%)
Média	5,908	6,102
Variância	12,53	12,85
Máximo	22,36	17,02
Mediana	5,94	6,20
Mínimo	1,19	1,19

Com essa análise, é possível observar a mediana, que indica o valor central de todo os dados, foi maior para a cava operacional, a média também seguiu

essa linha, sendo a mediana e a média valorados em 6,20 e 6,10 respectivamente para a cava operacionalizada e de 5,94 e 5,90 para a cava final.

5 CONCLUSÕES

Sabendo que a mineração está entre as principais atividades econômicas do país, além de estar espalhada por todo o território brasileiro. O Brasil destaca não apenas por ser um grande produtor dos produtos minerais, mas também um grande consumidor destes. Mas para obter sucesso em tantos empreendimentos, é fundamental ter um bom planejamento de mina.

A determinação de uma cava final e cava operacionalizada é um dos grandes desafios para o planejamento de mina, pois impacta diretamente no sucesso da mineradora. A determinação dos parâmetros utilizados para realizar a operacionalização impactam diretamente na análise quantitativa e qualitativa da cubagem.

Desta forma, o objetivo desse trabalho foi operacionalizar uma extensão da reserva de fosfato imputada. Para isso importou-se o modelo de blocos do depósito, uma cava final e a topografia local, com esses dados foi possível operacionalizar a mesma, ao fim do design, foi realizada a cubagem e análise estatísticas dos dados.

A cubagem das duas cavas possibilitou a comparação dos números de cada uma. Quando cubado observou-se que na cava operacionalizada teve uma perda de 1,91% de minério o equivalente a 258.793 t e um acréscimo de 8,11% de estéril, o equivalente a 2.674.796,49 t de estéril, o que impactou diretamente na REM, que foi de 2,19 para 2,43.

Estatisticamente falando, a média de P_2O_5 da cava final para a cava operacionalizada subiu de 5,91 para 6,10, mediana foi de 5,94 para 6,20, a variância não teve mudança significativa. Foi observado nos histogramas, da cava final e cava operacionalizada que a frequência de P_2O_5 concentra a maior parte de 6 a 8%.

A operacionalização e cubagem serviu para se conhecer os impactos gerados quando se altera a geometria da cava e, mostrou que não é possível ter uma aderência de 100% do que é planejado, visto que, ainda no planejamento já se desloca do que seria uma prática perfeita.

REFERÊNCIAS

ARROYO ORTIZ, Carlos Enrique. Uma utilização de simulação geoestatística no tratamento de incertezas no planejamento de mina. 2008.

BORGES, Thiago Campos. Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração. 2013.

BRAGA, Silvânia Alves. Krigagem dos indicadores aplicada a modelagem das tipologias de minério fosfatados da mina F4. 2015.

CAMPOS, Pedro Henrique Alves. Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional. 2017.

CHIMUCO, João Paulino Júlio. Metodologia de planejamento de mina para retomada das operações de lavra das jazidas de Kassinga Norte-Angola. 2010.

CURI, Adilson. Lavra de Minas. Oficina de Textos, 2017

DO AMARAL, Monica. Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto. 2008.

DO CARMO, Frederico Augusto Rosa. Metodologia para planejamento de cavas finais a minas a céu aberto otimizadas. **Ouro Preto**, 2001.

ESMAEIL, Rahimi et al. Optimized algorithm in mine production planning, mined material destination, and ultimate pit limit. **Journal of Central South University**, v. 25, n. 6, p. 1475-1488, 2018.

ESPINOZA, Daniel et al. MineLib: a library of open pit mining problems. **Annals of operations research**, v. 206, p. 93-114, 2013.

FIORONI, Marcelo Moretti et al. Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In: **2008 Winter simulation conference**. IEEE, 2008. p. 759-767.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. Open pit mine planning and design. Londres: Taylor and Francis, 2013. 3 ed. v. 1 – Fundamentals. 1027 p.

LERCHS, H; GROSSMANN, I.F. Optimum design of open pit mines. Transactions CIM, 58: 17-24, 1965.

PERONI, Rodrigo de Lemos. Análise da sensibilidade do seqüenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico. 2002.

PETERS, William C. **Exploration and mining geology**. 1987.

PINTO, C. L.; DUTRA, J. I. **I Etapa – Introdução ao Planejamento de Lavra**. Belo Horizonte, 2008. 51 p.

ROCHA, Antônio Carlos Pereira da. Avaliação do material estéril de formação ferrífera em mineração para disposição seletiva e reaproveitamento futuro. 2015.