



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO – UFMT
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MINAS

INVESTIGAÇÃO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE
UMA JAZIDA DE OURO, A PARTIR DE UM MODELO DE
BLOCOS.

CUIABÁ – MT
2020

GUSTAVO GOMES PEREIRA

INVESTIGAÇÃO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE
UMA JAZIDA DE OURO, A PARTIR DE UM MODELO DE
BLOCOS.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Minas.
Orientador: Luis Henrique N.
Januário.

CUIABÁ – MT
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

G633i Gomes Pereira, Gustavo.

Investigação de viabilidade técnico-econômica de uma Jazida de ouro, a partir de um modelo de blocos / Gustavo Gomes Pereira.

-- 2020

40 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Luis Henrique Nery Januario.

TCC (graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Engenharia, Várzea Grande, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Cava matemática,. 2. Planejamento de longo prazo. 3. Operacionalização de cava. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

INVESTIGAÇÃO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE UMA JAZIDA DE
OURO, A PARTIR DE UM MODELO DE BLOCOS.

Gustavo Gomes Pereira

TRABALHO DE QUALIFICAÇÃO PARA A CONCLUSÃO DE CURSO
SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO, CAMPUS VÁRZEA GRANDE,
COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL
EM ENGENHARIA DE MINAS.

Aprovado por:



Prof. Me. Luis Henrique Nery Januario (Engº de Minas) – Orientador



Profª. Dra. Flávia Regina Pereira Santos de Siqueira (Geóloga) – Membro

EDUARDO CARLOS
ALEXANDRINA:01741335612

Assinado de forma digital por EDUARDO CARLOS
ALEXANDRINA:01741335612
DN: c=BR, o=ICP-Brasil, ou=Secretaria da Receita Federal do Brasil -
RFB, ou=RFB e-CPF A3, ou=(EM BRANCO), ou=59621003000195,
cn=EDUARDO CARLOS ALEXANDRINA:01741335612
Dados: 2022.02.03 09:23:39 -02'00'

Prof. Dr. Eduardo Carlos Alexandrina (Engº de Minas) – Membro

CUIABÁ – MT

Dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Dalvo Gabriel Pereira e Luzia Ferreira Gomes, que me deram todo aporte até aqui. Aos meus irmãos e amigos que me apoiaram em todos momentos. Ao meu orientador Luís Henrique N. Januário e coorientadora Mônica Aragona, os quais não me mediram esforços para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço na pessoa do Arnaldo Aparecido S. Martins a Mineração Aricá pelos dados e esclarecimentos cedidos.

“Mineração é a atividade que propicia aos seres humanos, mediante seus produtos, saciarem suas fomes biológicas, psicológicas, sociais e espirituais e concretizarem seus sonhos. ”

(José Mendo M. Souza)

RESUMO

A mineração de ouro ocorre basicamente desde os primórdios da civilização, tendo atualmente uma vasta aplicação, como a utilização em eletrônicos. Com isso, quando se tem uma jazida passível de extração desse material é preciso ter um planejamento adequado visando a maximização dos recursos, associado a menor degradação ambiental e risco operacional. Objetivou-se assim no trabalho gerar parâmetros financeiros de fluxo de caixa, projeção de vida útil de mina e por fim dar características operacionais as cavas geradas. Nesse sentido, foi estabelecido a partir de um modelo de blocos cedido pela Mineração Aricá, da Baixada Cuiabana, um fluxo de trabalho através de algoritmos pré-estabelecidos, em especial o de Lerchs-Grossmann. Os *softwares* utilizados ajudaram a realizar análises de fluxo de caixa, teor de corte, além da operacionalização. Isso se deu através de entradas de parâmetros operacionais e econômicos. Os resultados se traduziram em duas cavas rentáveis e operacionais com teor de corte de 0,14g/t, e uma vida útil de 22,11 meses, estabelecida segundo a taxa de produção da empresa e reserva final, após todos procedimentos. Concluiu-se através do desenvolvimento dos parâmetros econômicos e de geometria de cava, a viabilidade técnica, econômica e operacional do objeto de estudo, além de dar embasamento para um planejamento de exaustão das minas.

Palavras-chave: cava matemática, planejamento de longo prazo, operacionalização.

ABSTRACT

Gold mining has occurred since the dawn of civilization, currently having a wide application, such as use in electronics. Thus, when there is a deposit that can be extracted with this material, it is necessary to have an adequate planning, the maximization of resources, associated with less environmental degradation and operational risk. The objective of this work was to generate cash flow parameters, project the mine's useful life and, finally, to give operational characteristics to the pits generated. In this sense, it was established from a block model provided by Mineração Aricá, from Baixada Cuiabana, a workflow through pre-adjusted algorithms, especially from Lerchs-Grossmann. The software used helped to carry out analyzes of cash flow, cut-off, in addition to operationalization. This happened through parameter and economy entries. The results were translated into two profitable and operational pits with a cut-off of 0.14g /t, and a useful life of 22.11 months, according to the company's production rate and final reserve, after all procedures. It was concluded through the development of the economic parameters and pit geometry, the technical, economic and operational feasibility of the object of study, in addition to providing a basis for mine exhaust planning.

Keywords: mathematical pit, long-term planning, operationalization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – “Carta estratigráfica da Faixa Paraguai para a região da Baixada Cuiabana (...)”	11
Figura 2 - Mapa em escala regional contendo as principais província auríferas do estado de Mato Grosso e o local de estudo.	13
Figura 3 - Ciclo de produção de mina a céu aberto.....	15
Figura 4 - Representação de um talude e seus bancos.	17
Figura 5 – Principais elementos de bancada de mina.....	17
Figura 6 - Frequência acumulada de ângulos de face. Eixo “X”: porcentagem acumulada, Eixo “Y” face de ângulo de bancada (graus). Dentro da figura: quantidade de dados.....	18
Figura 7 - Bancada com leira de segurança.....	18
Figura 8 Representação típica de um modelo de blocos.	22
Figura 9 - Mapa de localização ilustrando a capital de Mato Grosso, Cuiabá e a área de estudo.Fonte: (Colombo et al., 2017).	27
Figura 10- Fluxo de trabalho utilizado no ‘software’ NPV Scheduler.....	28
Figura 11 - Cava matemática gerada no NPV Scheduler,com as respectivas direções N e E.....	29
Figura 12 - Vista de perfil das cavas matemáticas combinadas com MDB e legenda gerada para discriminar os teores médios dos blocos. Em branco estão as direções.....	30
Figura 13 - Vistas de planta (a) e perfil (a) das cavas operacionalizadas (XYZ).	31
Figura 14 - Vistas norte (a) e oeste (b) das cavas matemáticas operacionalizadas (XYZ).	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros econômicos fornecidos pela empresa, os quais alimentaram o software NVP Scheduler para geração do modelo econômico.	28
Tabela 2 - Parâmetros geométricos aplicados na operacionalização	31
Tabela 3 - Resultados do modelo econômico	33
Tabela 4 - Resultado para o pit ótimo	33
Tabela 5 - Resultado para as cavas aninhadas com um desconto por período de 10%.....	34
Tabela 6 - Resultados após operacionalização.....	35

Sumário

1. Introdução.....	9
1.1 Objetivo.....	10
1.2 Justificativa	10
2. Revisão bibliográfica.....	11
2.1 Contexto geológico	11
2.1.2 Geologia Local.....	13
2.2 Geometria de lavra.....	14
2.3 Limites de Lavra e formas de defini-lo	20
2.4 Operacionalização da cava.....	26
4. Resultados e Discussões	33
5. Conclusões.....	36
6. Referências bibliográficas	37

1. Introdução

A mineração de ouro ocorre a séculos, e este metal de brilho notável, foi ganhando diversas aplicações ao longo dos tempos. Sendo que para a civilização moderna, é imprescindível para desenvolvimento de equipamentos de ponta da área tecnológica, por exemplo. Não obstante, a cotação do seu valor não costuma sofrer com baixas abruptas, pelo contrário. Assim, ter o controle de sua extração, com ferramentas de planejamento adequado, é imprescindível para maximizar receitas e evitar percas, racionalizando ao máximo esse recurso. (CURI, 2014).

A história do município de Cuiabá também está atrelada a exploração do metal, e atualmente há diversos empreendimentos voltados para a exploração de ouro na baixada cuiabana. Na maioria são pequenos mineradores, sob o regime de lavra garimpeira. (MIRANDA, 1997).

Todavia, a significativa diminuição de minérios secundários, vem obrigando empresas a adotarem maior planejamento e robustez em suas operações. Para tanto, uma melhor fase exploratória da jazida, bem como um planejamento de longo prazo, tem se tornado prática comum nesse regime simplificado de extração. (NETO, 2009).

Há também outras circunstâncias, em que empresas acabam fazendo uma mudança de regime de lavra garimpeira para regime de pesquisa e concessão de lavra, etapa que demanda de mais processos técnicos burocráticos, mas que limitam menos as formas de exploração. Nesse caso, as técnicas explicitadas no trabalho são partes imprescindíveis tanto para a aprovação do projeto junto aos órgãos competentes como para o sucesso de um empreendimento.

Com isso, o primeiro estágio de um projeto de lavra de mina é basicamente a obtenção de dados da reserva mineral, a qual necessita de um conhecimento preliminar na fase de pesquisa que assegure a continuidade do projeto e com um erro de estimativa aceitável. De posse disso, é possível fazer

um estudo conceitual, se julgado viável, um estudo preliminar e por último um estudo de viabilidade técnica. (CURI, 2014).

Segundo essa sequência, este trabalho buscou traduzir um modelo de blocos (MDB) em números reais e parâmetros financeiros, além de operacionalizar as duas cavas matemáticas geradas por uma das ferramentas computacionais utilizadas, que se baseia no algoritmo de Lerchs-Grossmann para tal finalidade. A cava matemática é a de maior valor entre todas possíveis cavas. Dessa forma, o desenvolvimento da metodologia tem relação direta com projetos de viabilidade técnica. (LERCHS; GROSSMANN, 1965).

1.1 Objetivo

Gerar parâmetros financeiros, de fluxo de caixa e projeções de vida útil de mina, além de dar características operacionais para as cavas obtidas, partindo de um modelo de blocos. Tudo isso embasado na literatura, visando um maior Valor Presente Líquido (VPL), assim como atendimentos de boas práticas de salubridade e meio ambiente.

1.2 Justificativa

O planejamento de atividade de mineração exige análises bem elaboradas a fim de minimizar os erros, além de conhecer o tamanho desses. Este se divide em longo, médio e curto prazo. Assim, um trabalho no campo do longo prazo que visa delimitar o tamanho da cava, sua geometria, características operacionais, determinar sua vida útil e atestar sua viabilidade econômica certamente enriquece o arcabouço de materiais disponíveis sobre o tema.

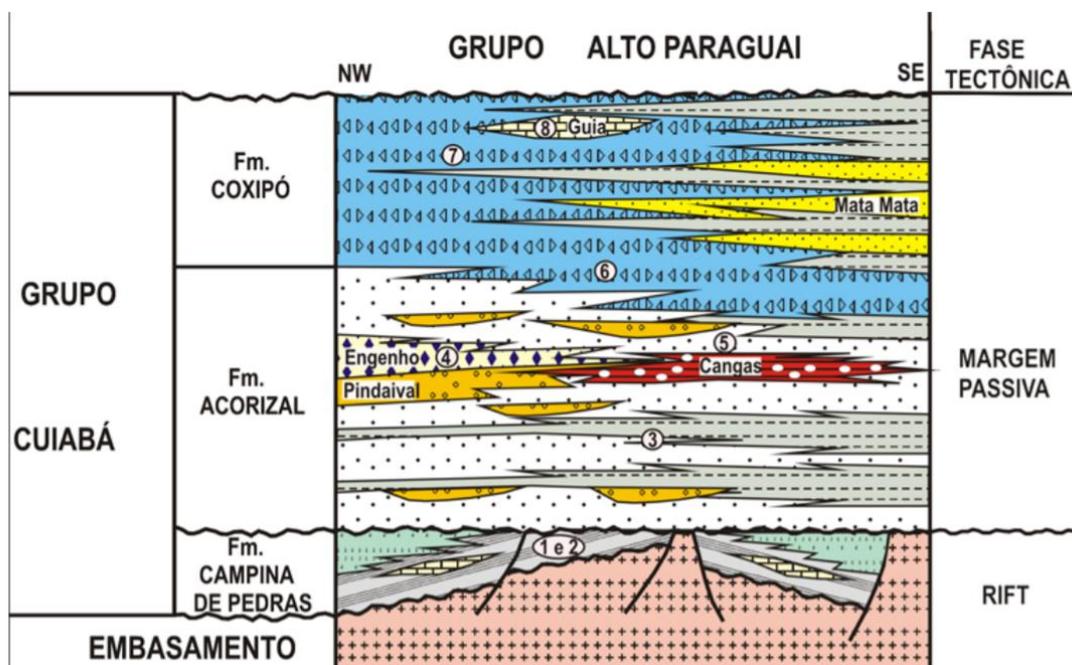
O trabalho também pode abrir precedentes para publicações futuras no estado de Mato Grosso, uma vez que há outros empreendimentos semelhantes ao que se obteve essa parceria. Além do bom relacionamento com a empresa que fornece as licenças do *softwares* a FAENG.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Contexto geológico

A jazida em estudo está inserida no grupo Cuiabá, e é explotada desde os tempos coloniais. O grupo Cuiabá compreende uma espessa pilha metassedimentar acumulada na margem sudeste do Craton Amazônico e afetado pelo Ciclo Orogênico Brasileiro-Panafricano (~600Ma). Os diversos estudos realizados na região permitiram uma divisão litoestratigráfica do Grupo Cuiabá nas formações Campina de Pedras, Acorizal e Coxipó (Fig. 1). (TOKASHIKE; SAES, 2008).

Figura 1 – “Carta estratigráfica da Faixa Paraguai para a região da Baixada Cuiabana. Os números correspondem às sub-unidades de Luz et al. (1980). 1 e 2 – Filitos intercalando filitos grafitosos, mármores e metagrauvacas; 3 e 5 – Metaconglomerados, metarenitos e filitos gradacionais, metarcóseos e quartzitos; 4 – Metadiamicctitos (Engenho) e meta-ritmitos arenopelíticos com “dropstones” (Cangas); 6, 7 e 8 – Filitos, metadiamicctitos, quartzitos (Mata-Mata) e mármores (Guia).”



Fonte: (TOKASHIKE; SAES, 2008).

Luz *et al.* (1980), fizeram a subdivisão do Grupo Cuiabá, na baixada cuiabana, em nove subunidades. Sendo que são denominadas de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e uma indivisa, para toda área de ocorrência do grupo na Faixa Paraguai. Essas seguem no quadro abaixo.

Quadro 1 – Subunidades do grupo Cuiabá com suas respectivas descrições.

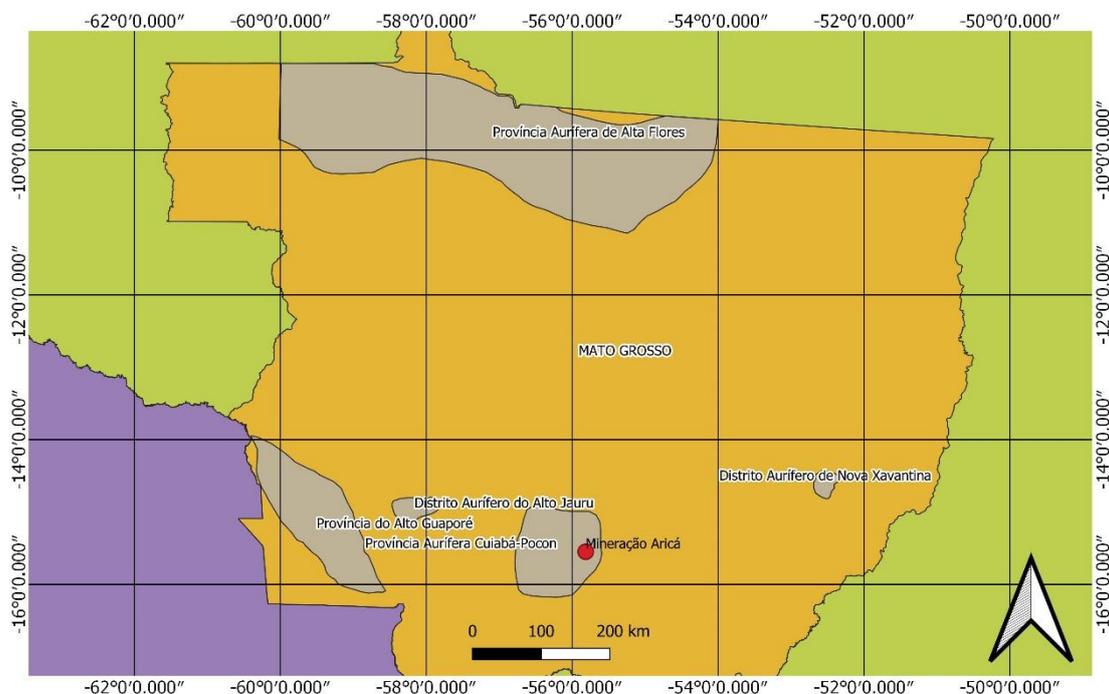
Subunidade	Descrição
1	Constituída por filitos serícíticos, com intercalações de filitos e metarenitos algo grafitosos;
2	Constituem-se de metarenitos arcoseanos, metarcóseos e filitos grafitosos, com intercalações de metarenitos e lentes de mármores calcíferos. Os filitos grafitosos mostram acamadamento com preservação das estruturas sedimentares sob forma de lentes estiradas isoladas (wavy) ou conectadas (linsen) de arenito muito fino.
3	Composta por filitos, filitos conglomeráticos, metaconglomerados, metarcóseos, metarenitos, quartzitos, com lentes de filitos e mármores calcíferos, além de níveis de hematita.
4	Composta por metaparaconglomerados (metadiamicíticos) petromíticos, com clastos de quartzo, feldspato, quartzito, rochas graníticas e máficas, além de raras intercalações de filitos e metarenitos.
5	Composta por filitos e filitos serícíticos, com intercalações e lentes de metaconglomerados, metarenitos finos a conglomeráticos e metaconglomerados.
6	Formada principalmente por filitos conglomeráticos, metaconglomerados (metadiamicíticos), com clastos de quartzo, filitos e quartzitos e intercalações subordinadas de metarenitos.
7	Composta por metaparaconglomerados (metadiamicíticos) petromíticos, matriz areno-argilosa, com clastos de quartzo,

	quartzito, calcários, rochas máficas e graníticas, com raras intercalações de filitos;
8	Formada por mármore calcíticos e dolomíticos, margas e filitos sericíticos.
Indivisa	Formada por quartzitos, metarenitos, filitos e filitos conglomeráticos

2.1.2 Geologia Local

Com tudo vale ressaltar que o empreendimento está inserido na terceira maior província aurífera do estado de Mato Grosso (Fig. 2), associada ao grupo Cuiabá sendo a composição da jazida basicamente de filitos, com veios de quartzos oxidados e encaixados, nos quais se tem as mineralizações associadas. (COLOMBO *et al.*, 2017)

Figura 2 - Mapa em escala regional contendo as principais província auríferas do estado de Mato Grosso e o local de estudo.



Escala 1:5000000

● Área de estudo ■ Província Auríferas ■ Limite MT ■ Limite Brasil ■ Bolívia

2.2 Geometria de lavra

Há vários passos a serem seguidos antes do desenvolvimento de um projeto de lavra. Primeiro é necessário comprovar a existência de depósito através de processos técnicos burocráticos. Ou seja, é preciso passar por uma fase de pesquisa que envolve trabalhos diversos, desde o requerimento de autorização para os trabalhos, que devidamente autorizados passam por sondagens, aberturas de trincheiras, análises de amostras e vários outros julgados necessários. (BRANCO, 2016).

Com isso, se for constatado algum potencial para a área, se faz um estudo preliminar, para assim verificar a possibilidade de converter a jazida em mina. Constatado esse potencial, é preciso afunilar o estudo, passando a etapas de viabilidade, a qual depende de técnicas de avaliação econômica e também pode levar em consideração alguns aspectos de lavra, tais como: escolha do método a ser empregado, considerações geotécnicas, entre outras. Tudo isso conciliando ainda fatores de salubridade e segurança. (CURI, 2014).

De maneira prática, é possível resumir os procedimentos inerentes para se chegar a de um condicionamento de mina, como sendo: estágios de pré-viabilidade, estudos de viabilidade técnica, econômica e financeira, projeto básico e, por fim, o detalhamento da mina. (CURI, 2017).

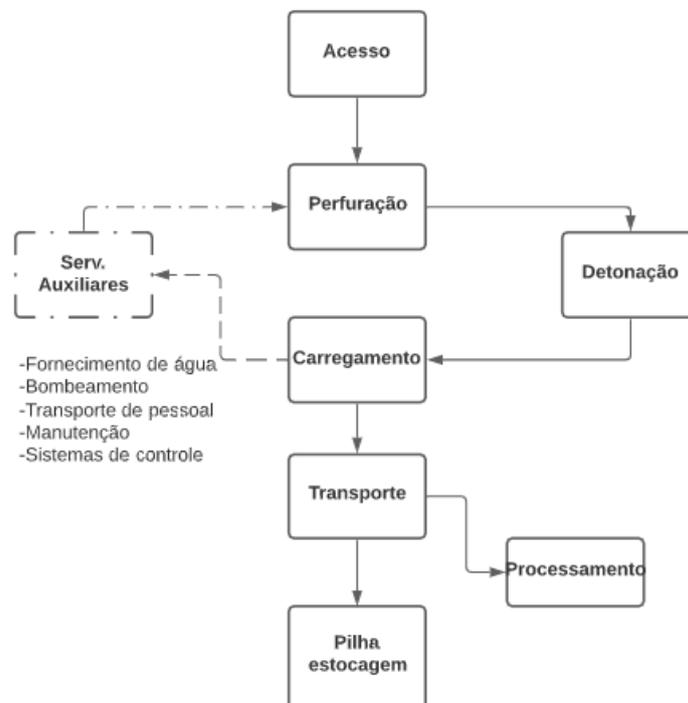
Todas etapas precisam considerar questões ambientais e sociais. Ademais, há parâmetros que podem variar durante todo desenvolvimento do projeto, sejam técnicos ou financeiros. Com isso, é preciso ter um planejamento de curto, médio e longo prazo. Porém, já no início do projeto mineiro, é imprescindível ter um planejamento de longo prazo. Ou seja, ter o contorno da cava da mina delimitado antes do começo de sua operação. Tal prática é objeto de discussão pela comunidade técnica e científica globalmente. Felizmente, com os avanços tecnológicos, atualmente é possível prever vários cenários de desenvolvimento e lavra, possibilitando assim um bom planejamento a longo prazo. (CARMO, 2001).

Sob esse aspecto, considerações acerca da geometria na lavra a Céu aberto precisam ser feitas com muita precisão. Curi (2014), lembra de que se faz

necessário diferir entre bancadas de produção, onde ocorre o ciclo de lavra propriamente dito (Fig. 3), bancadas de contenção, as quais tem por finalidade reter materiais que possam deslizar de bancadas superiores, e as bancadas ou bermas de segurança, que contribuem para manutenção do ângulo geral de talude, assegurando assim a estabilidade do *pit*. O autor ainda considera que, para o correto dimensionamento das bancadas, há implicações de diversos fatores como:

- Volume, teor médio, teor de corte e distribuição;
- Seletividade e necessidade de blindagem
- Considerações sobre estabilidade de taludes;
- Escala de produção;
- Relação estéril/minério;
- Equipamentos utilizados nas operações de lavra: função básica da escala de produção.

Figura 3 - Ciclo de produção de mina a céu aberto.



Fonte: Adaptado de (Souza, 2001).

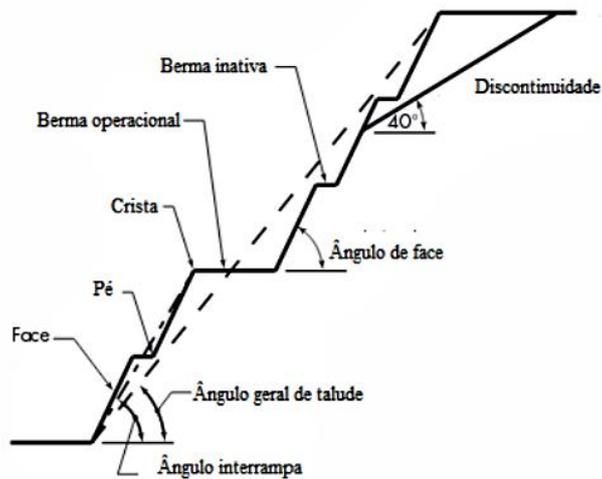
Nesse sentido, para contemplar produtividade, salubridade e segurança, alguns elementos são de extrema importância, tais como: altura da bancada, ângulo de face da bancada, vias de acesso, ângulo geral de talude e a relação estéril minério (REM). Como visto na Fig. 4, os bancos são onde ocorrem o ciclo de lavra e a geometria de lavra deve ser executada respeitando as condicionantes que podem influenciar os parâmetros, sendo em geral: volume, teor, distribuição do minério, seletividade na lavra e estabilidade de taludes. (OLIVEIRA, 2016).

Para fins de produtividade de lavra, a altura do banco deve ser a maior possível, respeitando todos parâmetros geológicos e ambientais, além de ser importante observar o tamanho e tipo de equipamento que será empregado, garantindo assim, a máxima segurança dentro do empreendimento. Com bancos maiores, obtém-se um melhor rendimento na perfuração, menor deslocamento de equipamentos, melhor produtividade no desmonte, menor custo na construção de acessos e, por fim, um menor número de bancos. No entanto, ao se trabalhar com bancos menores garante-se maior segurança na operação e um melhor controle nos desvios dos furos de perfuração do maciço (Fig. 2). (OLIVEIRA, 2016).

Curi (2014), elenca as mesmas vantagens para bancadas maiores e faz menção a algumas outras vantagens para bancadas menores, as quais estão elencadas abaixo:

- Melhor saneamento e limpeza das frentes;
- Melhor controle na fragmentação de rocha;
- Menor nível de vibrações na área de influência da lavra;
- Maior facilidade na construção de rampas e vias de acesso;
- Melhora na seletividade, diminuindo a diluição;
- Em caso de problemas em uma frente de lavra, maiores opções para mudança de local de trabalho.

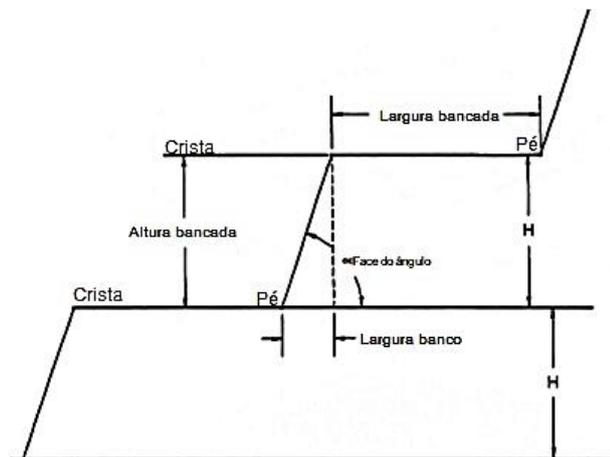
Figura 4 - Representação de um talude e seus bancos.



Fonte: (Oliveira, 2016).

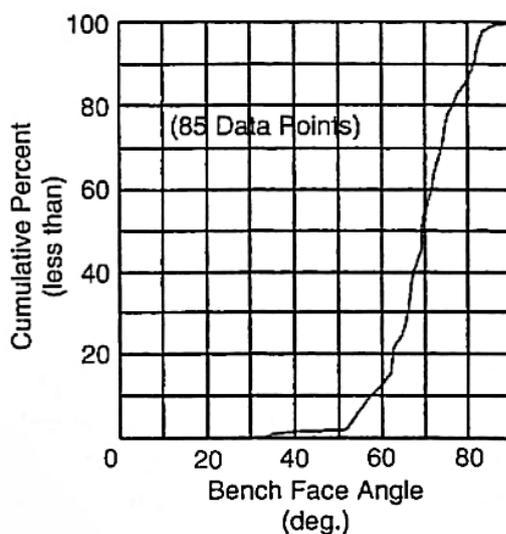
Logo, cada bancada possui uma separação entre superfície inferior e superior de uma altura (H) (Fig. 5). Nota-se também a face da bancada, que interliga as duas superfícies. Ao início de uma face, há o pé da bancada, na parte superior tem-se a crista. Esse ângulo de face pode variar consideravelmente, a depender das características do maciço. Um valor típico fica entre 60 e 65° e a grande maioria dos valores está entre 55 e 80° (Fig. 4). A berma, por sua vez, é a medida horizontalmente entre a crista de uma face e o pé da face seguinte. Para fins operacionais, a berma também precisa ter uma certa inclinação, a fim de evitar o acúmulo de água. (HUSTRULID *et al.*, 2013).

Figura 5 – Principais elementos de bancada de mina.



Fonte: Adaptado de (Hustrulid *et al.*, 2013).

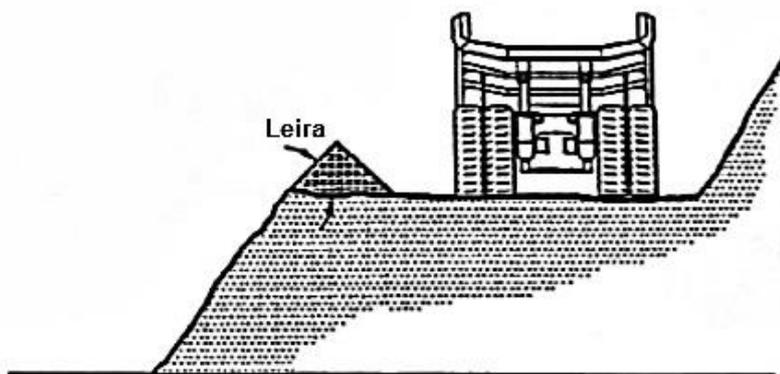
Figura 6 - Frequência acumulada de ângulos de face. Eixo "X": porcentagem acumulada, Eixo "Y" face de ângulo de bancada (graus). Dentro da figura: quantidade de dados.



Fonte: (Hustrulid et al., 2013).

Destaca-se ainda que é importante para as bermas contarem com uma proteção, denominada leira (Fig. 7), sejam essas para estradas ou bancadas que apresentem possibilidade de queda de veículo. No Brasil isso é regido pela Norma Reguladora da Mineração NRM 13, sendo especificamente tratado em seu artigo 13.6, alínea *d.*, que especifica que a proteção deve ser de pelo menos metade do maior diâmetro do pneu que trafegar pelo local.

Figura 7 - Bancada com leira de segurança.



Fonte: Adaptado de (Hustrulid et al., 2013).

Oliveira (2016) ainda destaca que a largura da berma deve obedecer certas especificações, em que as de produção devem ter pelo menos 50% a mais de comprimento que os equipamentos de carregamento e transporte somados. Ele ainda ressalta que bermas mais largas implicam em alguns aspectos positivos, como menor tempo de manobra, maior facilidade de supervisão e, portanto, uma maior eficiência das máquinas. Porém, resulta em menor seletividade e, logo, em maior diluição.

Como verificado na Fig. 5, o ângulo de talude faz conexão entre o pé e a crista da bancada. Esse ângulo é diretamente sensível à altura dos bancos e do tipo de material do maciço rochoso, sendo que um material muito variado pode implicar em diferentes bancadas em uma mesma mina. Salienta-se ainda que ângulos individuais de taludes, bem como a largura das bermas tem uma forte influência sobre o ângulo geral de talude, passando assim a ser grande objeto de estudo, visando sua melhor implementação.

The formulation of slope design criteria fundamentally involves analysis against the predicted failure modes that could affect the slope at bench, inter-ramp and overall scales. The level of stability is assessed and compared with the acceptance criteria nominated at the various levels by the owners and/or regulators for safety levels and economic risk . (READ; STACEY, p. 9, 1968)¹.

Já o ângulo geral de talude, sensível a todos esses parâmetros como já mencionado, é um dos principais delineadores da cava final, tanto em forma, como em tamanho, e tem influência direta na REM. Lembrando que tanto esse, como a face e outros elementos da bancada, são estruturas que devem durar no mínimo até que sejam finalizadas as operações de mina. A proposição de sua inclinação deve ainda permitir um sistema de estradas com inclinação adequado,

¹ *A formulação de critérios de projeto de taludes fundamentalmente envolve análise quanto aos modos de falha previstos que podem afetar a inclinação da bancada, do ângulo inter-rampa e o ângulo de geral de da mina. O nível de estabilidade é avaliado e comparado com os critérios de aceitação nomeados nos vários níveis por proprietários e / ou reguladores dos níveis de segurança e risco econômico. (READ e STACEY, p. 9, 1968, p. 9, tradução nossa).*

se estendendo até ao final cava, buscando sempre minimizar a REM. (OLIVEIRA, 2016).

O ângulo geral de talude de uma seção pode ser determinado de acordo com a equação abaixo:

$$\alpha = (\arctg) \frac{H}{P} \quad (1)$$

Onde:

H = altura da bancada;

P = projeção horizontal do talude geral na seção;

O parâmetro relação estéril/minério é amplamente usado para definição da geometria da lavra. Representa o montante de material desprovido de valor econômico (estéril) que deverá ser removido, para remover uma unidade de minério (CURI, 2014, p.117).

2.3 Limites de Lavra e formas de defini-lo

Hartman e Mutmansky (1987) ressaltam que o planejamento de longo prazo não tem uma definição específica, embora seja do seu escopo definir a vida útil da mina ou pelo menos parte dela. Como há diversas geometrias possíveis para minas a céu aberto, também é parte imprescindível do projeto a delimitação da cava final.

Logo, fica claro que o propósito de um projeto de cava a céu aberto é delimitar os contornos de uma mina a céu aberto, com base em um modelo econômico e observando condicionantes de viabilidade técnica e econômica, conciliando isso ao máximo de renda líquida. Para isso, é projetado o *pit* final,

através quase sempre de computadores e algoritmos pré-determinados. (CARMO, 2001).

A partir do algoritmo de Lerchs-Grossmann são gerados o corte mínimo e o problema de fluxo de caixa de maior renda líquida, sendo ainda vários estágios (*pits* intermediários), os quais facilitam fazer projeções de acordo com o preço de mercado da substância. Com isso é possível também afirmar que o *pit* final tem vários *pits* intermediários, quanto maior o preço de mercado, maior será a cava. O contrário também é válido.

Os limites finais da cava definem o tamanho e a forma de uma mina a céu aberto no final de sua vida útil, buscando a maximização do lucro. Eles definem a extensão das reservas lavráveis e a quantidade de material estéril a ser retirado e depositado. Normalmente marcam a fronteira limite além da qual a exploração de um dado depósito não será mais econômica. Os limites da cava na superfície delimitam uma fronteira dentro da qual as estruturas de superfície da mina, tais como plantas de beneficiamento e escritórios da mina, não devem ser locados (CARMO, 2001, p. 14).

Quanto à forma de delimitação de cava, há três métodos mais utilizados, sendo eles: (1) manuais ou bidimensional, (2) tridimensionais com auxílio computacional e (3) computacional. Os métodos manuais foram muito utilizados até a década de 60, enquanto os métodos tridimensionais ganharam força, a partir de 1964, com as constantes melhorias de capacidade de processamento das máquinas. Assim os depósitos minerais, jazidas e lavras de minas são feitos através de um processo chamado de triangulação. Já quanto a delimitação de cava pelo método computacional, há vários algoritmos de otimização. (CURI, 2014).

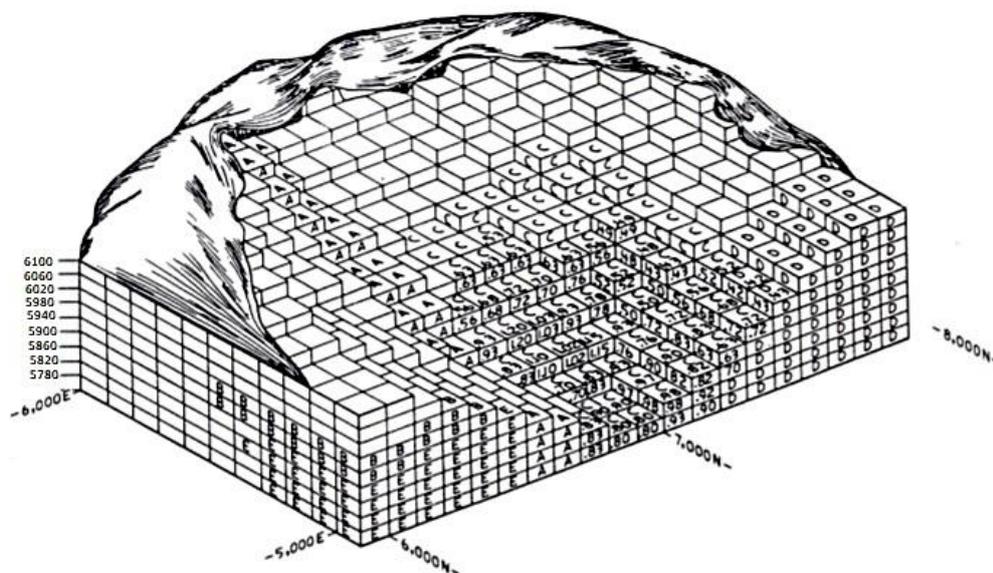
Tais algoritmos são basicamente divididos em duas classes, sendo uma de métodos heurísticos, que correspondem a respostas não exatas, porém capazes de chegar a soluções próximas da ótima, e outra de métodos matematicamente exatos, que conseguem atingir o ponto ótimo, não havendo

margem para discussões. Os métodos que mais têm se destacado nesse segmento são: Técnica de cones flutuantes, Algoritmo de Lerchs-Grossmann e Análise Convexa ou parametrização do contorno de cava final (CURI, 2014).

Esses algoritmos estão presentes em vários softwares encontrados no mercado, mas sua aplicação depende de comandos anteriores, responsáveis por organizar dados de uma campanha de sondagem para então, através de técnicas específicas, gerar um modelo de blocos que possibilitará finalmente a utilização de um dos algoritmos.

Assim, parametrizar um corpo mineral permite uma compreensão prévia da jazida em estudo, seja a curto, médio ou longo prazo. Ou seja, com ferramentas adequadas, é possível ter informações quanto a quantidade de minério, estéril, aspectos geotécnicos e outros. Logo, o modelo de blocos (Fig. 8) que é um dos passos anteriores a todo planejamento econômico de uma jazida e posterior às etapas como construção de furos de sondagem e manipulação de *strings*. Para se chegar a tais modelos é possível utilizar métodos geoestatísticos, *inverse power distance* IPD, *Nearest Neighbor*, *Ordinary Kriging*, *Simple Kriging* e *Sichel's Estimator*. (CURI, 2014).

Figura 8 Representação típica de um modelo de blocos.



Fonte: adaptado de (HUSTRULID et al., 2013).

No planejamento de longo prazo (ou na vida útil da mina), o modelo de blocos divide um corpo mineral em uma grade de blocos de tamanhos iguais, onde cada bloco recebe uma estimativa de seu grau (teor de minério) e outros atributos de qualidade relevantes. Tais dados são importantes tanto para planejadores de curto como longo prazo, porém os dados devem ser analisados de perspectivas diferentes. No primeiro, busca-se bater metas através das decisões de qual material alimentará o britador ou planta de processamento, enquanto para o planejamento de longo prazo, cabe particionar o modelo de blocos quanto as regiões de interesse (*BLOM et al., 2018*).

De posse do modelo de blocos, se faz necessário projetar a cava final ou cava ótima, sendo esse um dos principais desafios de um projeto de mineração. Isso porque os limites devem se estabelecer de modo a retornar o maior valor presente líquido (VPL) e esses, durante a execução do projeto, podem ser reavaliados, sempre considerando restrições de ordem técnicas e ambientais. (*CARMO et al., 2006*).

O uso da programação dinâmica para o projeto de cavas de mineração foi discutido pela primeira vez por Lerchs e Grossmann (1965). O problema da otimização de uma cava final (a duas ou três dimensões) não tem, na prática, uma solução analítica fácil. Tal dificuldade tem resultado no surgimento de diversos algoritmos heurísticos e variados métodos de resolução. O algoritmo Lerchs e Grossmann em duas dimensões funciona na prática e é interessante na teoria. Em primeira mão a indústria ficou satisfeita com sua performance. O algoritmo é baseado em aproximações de alguns algoritmos de fluxo máximo (CARMO et al., 2006).

É possível ainda através da combinação do algoritmo sendo rodado várias vezes com um fator de redução de receita, gerar cavas aninhadas. Tais cavas podem ser de grande importância para o sequenciamento da lavra. De forma prática a cava matemática é gerada pelo valor mais provável do minério enquanto as cavas maiores ficam condicionam cavas menores. Fato é que isso leva os limites para o local com menor decapeamento ou maior teor. (*HUSTRULID et al., 2013*).

Carmo *et al.* (2001), faz proposições para critérios de se obter os valores otimizados do valor total de uma cava através do grupo de blocos. Cada bloco dispõe dos seguintes atributos:

1. Renda (R): valor da parte recuperável e vendável do bloco.
2. Custos Diretos ou fixos (CD): custos que podem ser atribuídos diretamente ao bloco, como por exemplo, custos de perfuração, detonação, carregamento e transporte, etc.;
3. Custos Indiretos ou variáveis (CI): custos gerais que não podem ser imputados diretamente aos blocos individuais. Tais custos são dependentes do tempo, sendo incluso nestes montantes relativos a salários, depreciações dos equipamentos, etc.

Assim, que podem ser atribuídos aos blocos são:

- Custo por tonelada;
- Custo de processamento por tonelada;
- Custo de reabilitação da área;
- Custo de venda por unidade de produto produzido.

A partir disso o autor define o valor econômico de um bloco (VEB), sendo definido como:

$$\text{VEB} = R - \text{CD} \quad (2)$$

Sendo que o valor econômico do bloco não é o mesmo que lucro ou prejuízo. Segue abaixo a definição para isso:

$$\text{Lucro (ou prejuízo)} = \Sigma(\text{VEB}) - \text{CI} \quad (3)$$

Nesse sentido, Carmo *et al.* (2001) lembram que o bloco de estéril normalmente terá VEB negativo. Já blocos mistos terão valores menores que zero, igual a zero ou maior que zero, a depender da quantidade e qualidade de

minério contido no bloco. Assim é possível definir o critério de otimização para projeto de ótima como sendo:

$$\text{Maximizar } Z = \sum (\text{VEB})_j \quad (4)$$

Sujeito ainda a restrições de ordem técnica.

Alguns desses custos elencados por Carmo (2001) são:

- Amostragem e ensaios de geologia;
- Limpeza do terreno e remoção do solo fértil;
- Rebaixamento do lençol freático da cava;
- Perfuração e desmonte de rochas;
- Mão de obra;
- Carregamento e transporte;
- Serviço de mina, como geológicos, controle de teores, supervisão da mina, manutenção.

Custos de processamento:

- Britagem, moagem e separação do minério;
- Controle de teores;
- Reagentes;
- Manutenção e mão de obra.

Custos de venda:

- Tratamento do minério;
- Seguros
- Outros

2.4 Operacionalização da cava

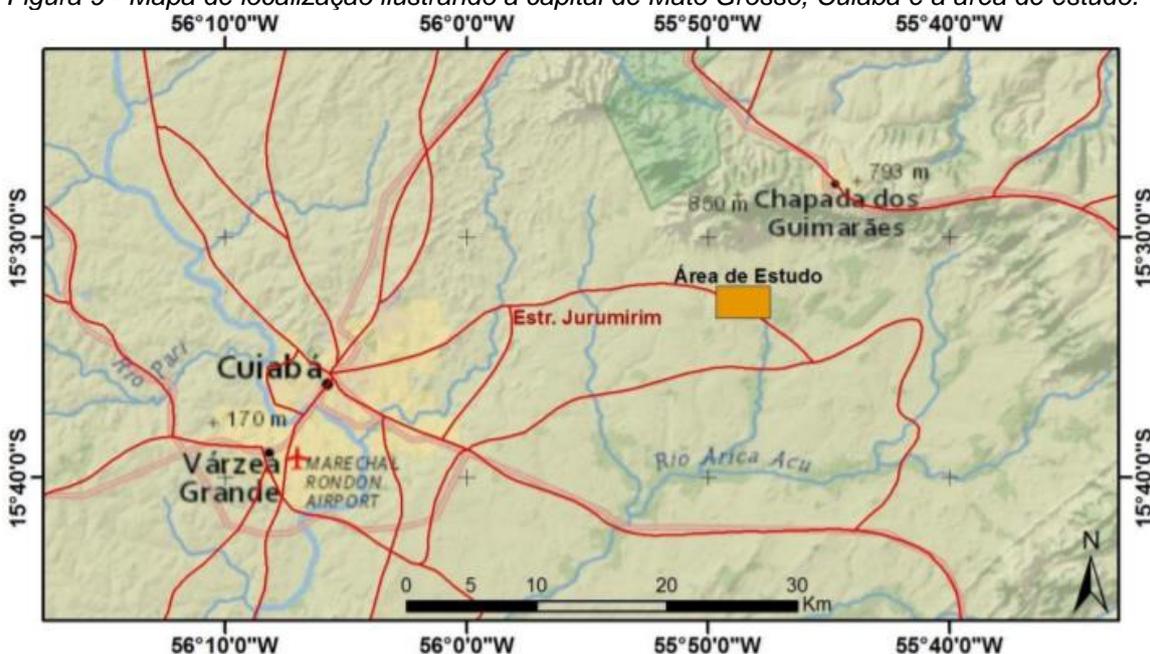
Uma cava final e as fases geradas no processo otimização são representações matemáticas, as quais não irão comportar operações da lavra, o que impossibilita a exaustão da jazida. Assim, para sanar esse problema é necessário operacionalizar a cava, de modo que os diversos equipamentos possam transitar (*GRIEBELER, 2007*).

O projeto dever ser exequível do ponto de vista construtivo e operacional, respeitando, portanto, o ângulo geral de taludes, os detalhamentos geométricos, e as estruturas geológicas. (*SOUZA, 2012*).

3. Metodologia

A área de estudo está situada na Baixada Cuiabana, que é uma região crustal, relacionada com a bacia do pantanal mato-grossense na região de Cuiabá, sendo os municípios limítrofes: Várzea Grande, Nossa Senhora do Livramento, Poconé, Nossa Senhora da Guia e Santo Antônio do Leverger. O local do empreendimento é privilegiado pela proximidade com a capital, a cerca de 30 Km da zona urbana de Cuiabá (Fig. 9).

Figura 9 - Mapa de localização ilustrando a capital de Mato Grosso, Cuiabá e a área de estudo.

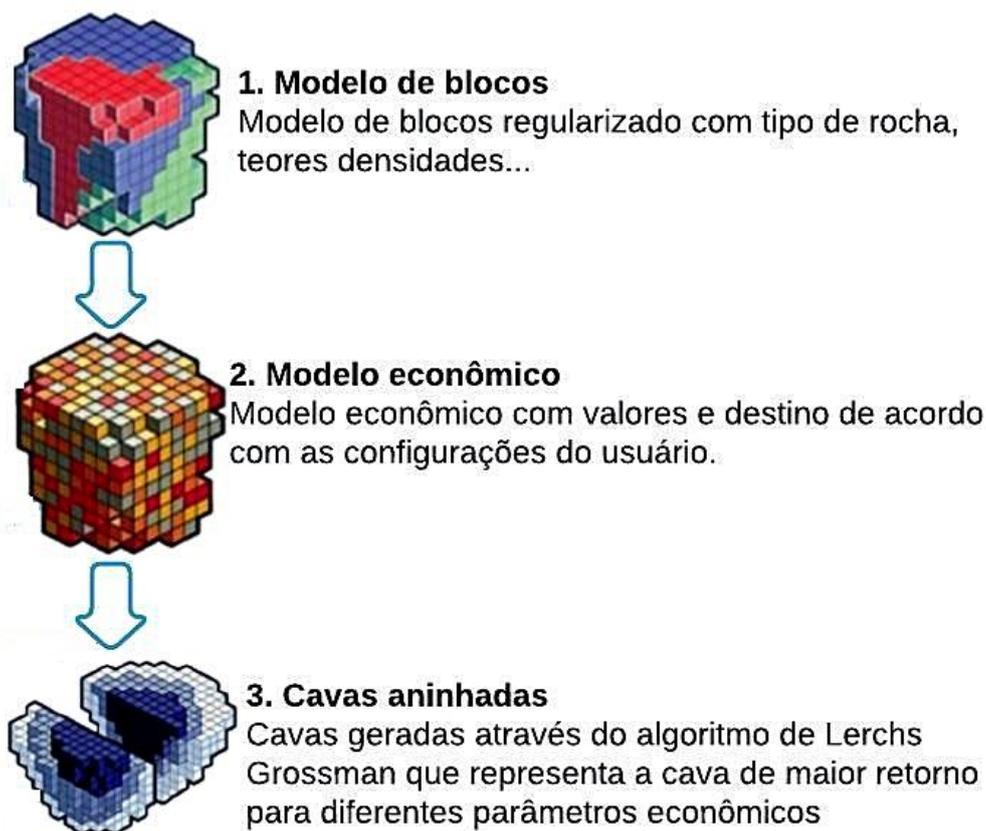


Fonte: (Colombo et al., 2017).

Dada essa facilidade de acesso a região e ao bom relacionamento da mineração Aricá com FAENG-UFMT, foi cedido para este trabalho um modelo de blocos e uma *string* com a topografia do relevo e dados de produção foram fornecidos pela empresa. Essas informações alimentaram o programa da Datamine NPV *Scheduler*, resultando em um fluxo de trabalho possível de ser executado com esse *software* (Fig. 10). Para a realização desse trabalho, utilizou-se os valores (Tab. 1) para a configuração do item 1 para chegar a um

modelo econômico (item 2). Com isso, foi possível realizar a geração da cava ótima (item 3), um dos objetos desse estudo.

Figura 10- Fluxo de trabalho utilizado no 'software' NPV Scheduler.



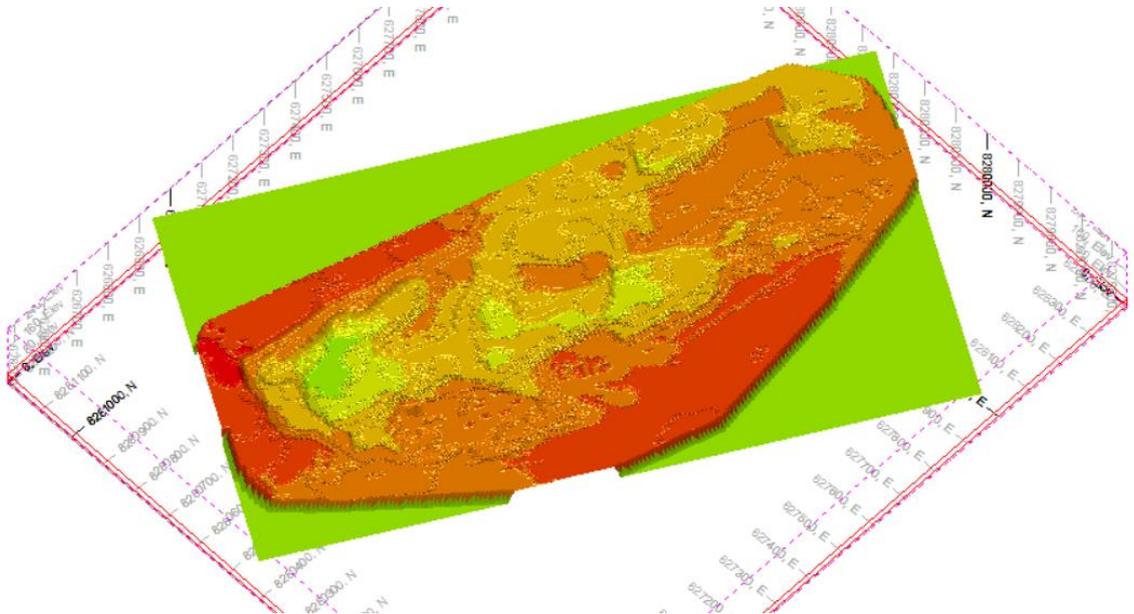
Fonte: Adaptado de (Datamine Brasil, 2020).

Tabela 1 - Parâmetros econômicos fornecidos pela empresa, os quais alimentaram o software NPV Scheduler para geração do modelo econômico.

MATERIAL	PREÇO DE VENDA	CUSTO DE LAVRA	CUSTO DE PROCESSAMENTO	RECUPERAÇÃO
MINÉRIO	\$45,00 /g	\$0,81 /t	\$3,12 /g	85 %
ESTÉRIL	-	\$0,81 \$/t	-	-

Com esses dados de entrada, uma movimentação mensal de aproximadamente 300.000t, e mais o modelo de blocos cedidos pela empresa, foi gerado um modelo econômico do qual se obteve dados diversos. Em seguida, através do *software* *Datamine NPV Schedule*, que se baseia no algoritmo de *Lerchs Grossman*, foram geradas duas cavas de maior retorno financeiro (Fig. 11), sendo assim possível extrair todos valores de interesse para o fluxo de caixa e ainda utilizá-las como base para operacionalização. Além disso, foi possível também gerar cavas aninhadas com uma entrada de redução de receita de 10%.

Figura 11 - Cava matemática gerada no NPV Scheduler, com as respectivas direções N e E.

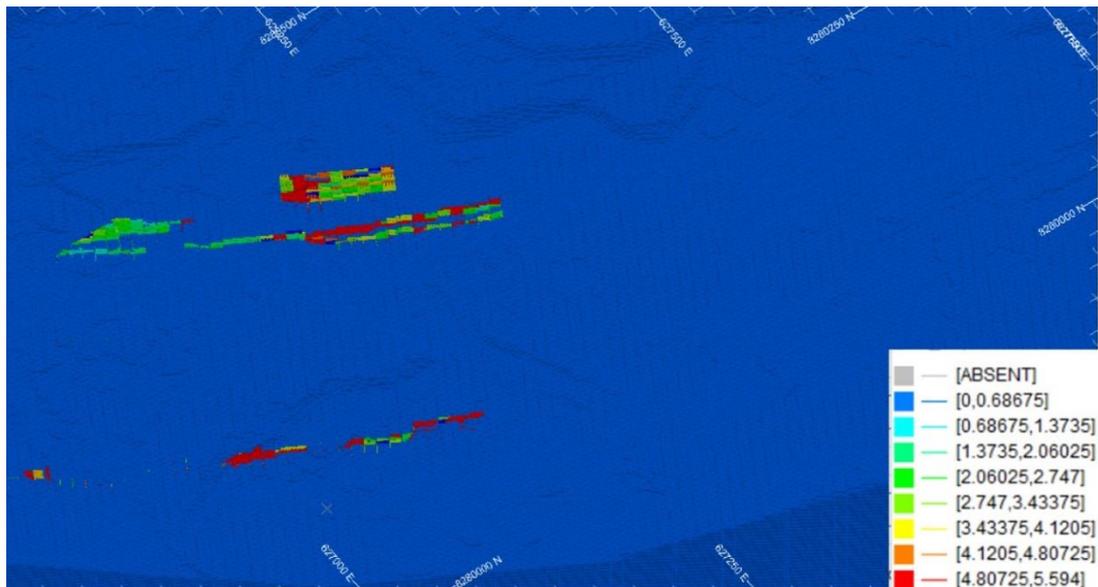


Desse modo, para a operacionalização das cavas, optou-se pela utilização do *software* *Studio OP*, também da *Datamine*. Nele, foram carregados os arquivos com as cavas ótimas, modelo de blocos e topografia, para manipular e adequar às necessidades do trabalho.

Ademais, ao adicionar o modelo de blocos (MDB), foi necessário gerar uma legenda (Fig. 12) para facilitar a visualização quanto a classificação dos teores, e quanto a necessidade prolongar ou não algum atributo das cavas, como a berma por exemplo, para otimizar os recursos. Isso porque o algoritmo de Lerchs-Grossmann é um procedimento otimizados de VPL, não de recursos. Ou

seja, de forma manual é possível verificar se é justificável aumentar as reservas. Assim, conforme se geravam os *pits*, se tornou pertinente estender as cavas, para além do que o próprio *software* gerou (Fig. 12).

Figura 12 - Vista de perfil das cavas matemáticas combinadas com MDB e legenda gerada para discriminar os teores médios dos blocos. Em branco estão as direções.



Os elementos estruturais da operacionalização consistiram nos traçados de pés, cristas dos bancos, das rampas de acesso, bermas de segurança etc; (Fig. 13 e 14). Com esses elementos projetados adequadamente a situação é possível desenvolver a lavra de forma segura e eficientemente. Os parâmetros utilizados para o processo estão dispostos na Tabela 2.

Figura 13 - Vistas de planta (a) e perfil (a) das cavas operacionalizadas (XYZ).

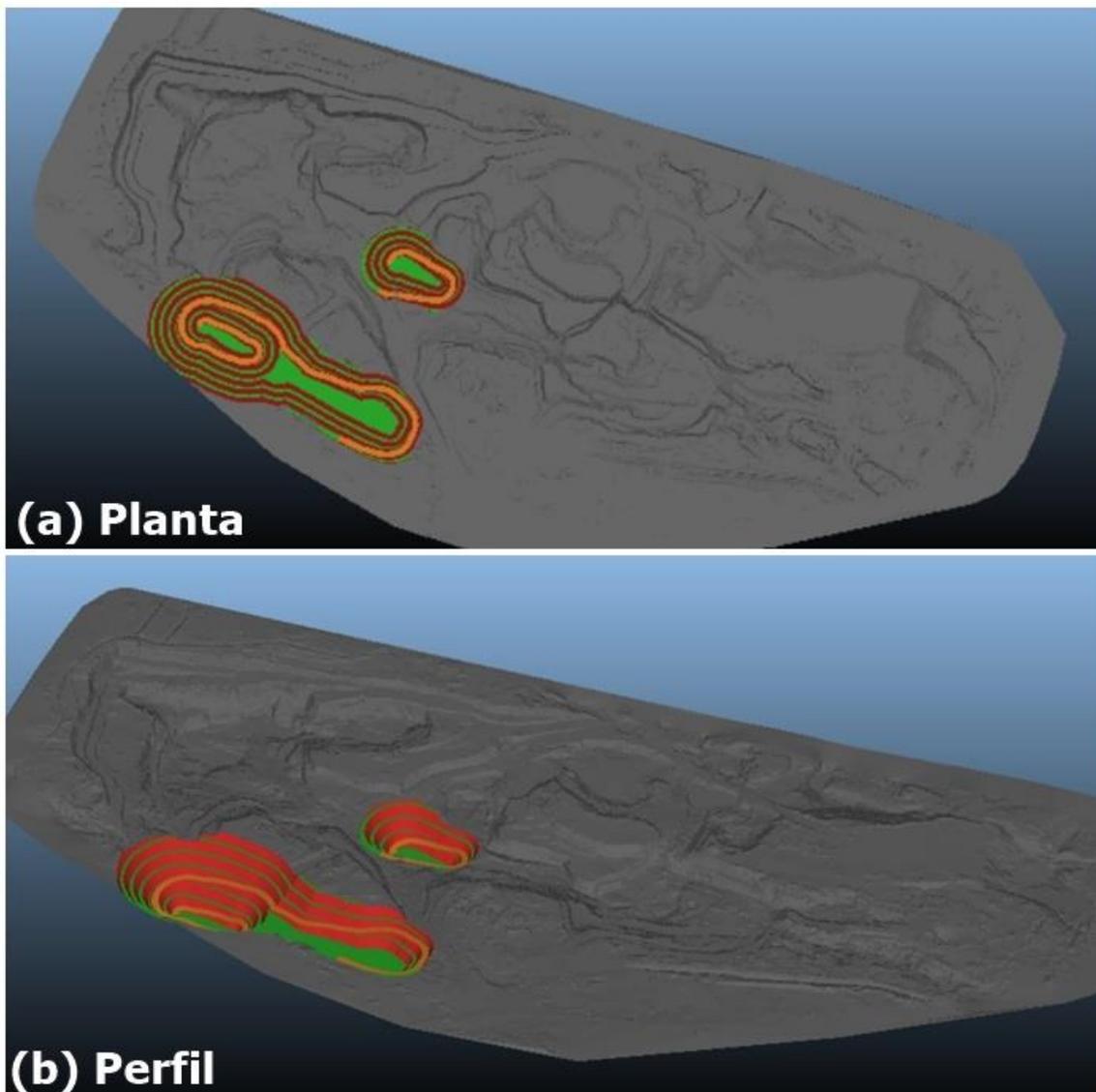
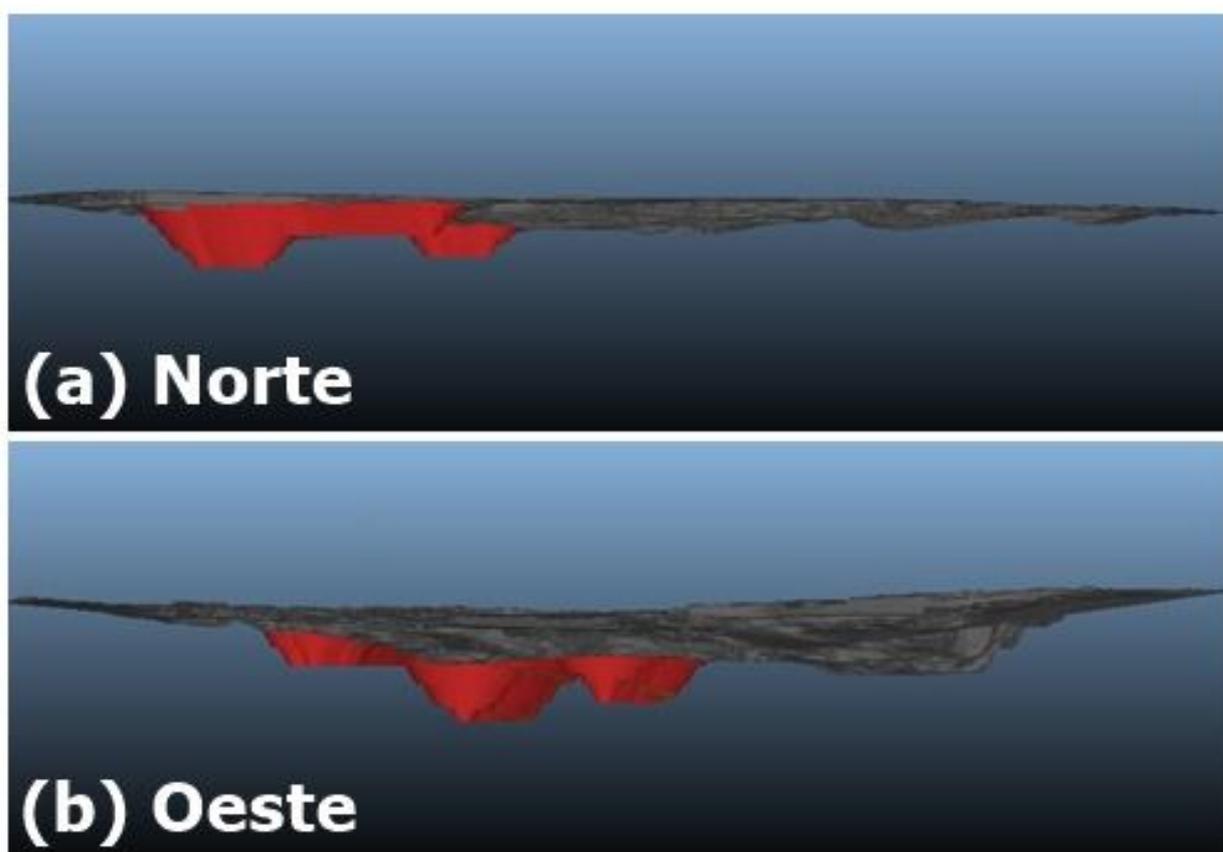


Tabela 2 - Parâmetros geométricos aplicados na operacionalização

Bancada	Ângulo geral da face (grau ou °)	60
	Altura (m)	15
	Berma (m)	5
Rampa	Largura (m)	10
	Gradiente (%)	10

O ângulo escolhido para o desenvolvimento deste estudo, embora seja genérico, tem ampla aplicação na indústria mineral, sendo que a própria mineração Aricá o utiliza em outras cavas em operação. Essa escolha se deve ao fato de o levantamento geotécnico não fazer parte do escopo deste trabalho, bem como pela indisponibilidade de uma metodologia consolidada para a área por parte da empresa.

Figura 14 - Vistas norte (a) e oeste (b) das cavas matemáticas operacionalizadas (XYZ).



4. Resultados e Discussões

Como resultado da análise econômica feita no *Datamine NPV Scheduler*, baseando-se nos dados fornecidos pela empresa, tais como os potenciais custos, valor de venda do minério e outros, foi possível projetar um fluxo de caixa e assim encontrar o valor presente líquido. Conforme o fluxo de trabalho apresentado na Fig. 8, foi gerado primeiramente um modelo econômico, e conforme esperado, por não haver restrições, este resultou em um VPL negativo devido a uma REM global alta (22,94t/t).

Tabela 3 - Resultados do modelo econômico

	N° blocos	Massa (t)	Valor líquido
Minério	227	2.546.100	-R\$ 2.510.237.178,50
Estéril	1.894.222	584.149.710	
Total	1.894.449	584.175.171	

Na sequência, foram configuradas no *software* entradas para otimização do VPL através do algoritmo de Lerchs Grosman, gerando assim a cava ótima e também para geração de cavas aninhadas. Pode-se nesse momento verificar um retorno positivo. A REM global para a cava ótima ficou em 3,40t/t, conforme tabela abaixo. Isso se deu através da diminuição de 40,20% da massa de minério e um redução da ordem de 99,11% da massa de estéril.

Tabela 4 - Resultado para o pit ótimo

	N° blocos	Massa (t)	Valor líquido
Minério	145	1.522.546	R\$ 1.426.359,10
Estéril	162	5.171.612	
Total	307	6.696.981	

Tabela 5 - Resultado para as cavas aninhadas com um desconto por período de 10%.

Fase	Fator	Minério (Mt)	Estéril (Mt)	REM	VPL (R\$)
Pit 1	10,00%	582,62	1.861,29	3,19	67.681,00
Pit 2	20,00%	1.964,57	1.491,01	0,76	575.854,00
Pit 3	30,00%	755,53	1.026,08	1,36	133.443,00
Pit 4	40,00%	2.444,12	1.290,69	0,53	141.157,00
Pit 5	50,00%	494,04	473,05	0,96	42.734,00
Pit 6	60,00%	1.181,50	1.351,40	1,14	18.507,00
Pit 7	70,00%	406,12	605,66	1,49	9.892,00
Pit 8	90,00%	53,26	102,54	1,93	4.562,00
Pit 9	100,00%	1.288,21	553,96	0,43	1.132,00
Total		9.170,00	8.755,72	0,95	1.280.143,00

Foi verificada a viabilidade de se extrair o minério das cavas, conforme se pode verificar na Tabela 4. Também é possível verificar na tabela 5 vários cenários com relação ao decréscimo de 10% o qual multiplica o preço de venda.

Observando-se as cavas aninhadas, foi possível gerar uma cava para cada redução, começando já com 10%. É possível constatar que fica complicado estabelecer uma lei para o aumento ou decréscimo do VPL, e que este atinge o seu maior valor na fase com o Pit 2. Embora seja difícil estabelecer alguma correlação, aparentemente quando a REM tende a diminuir, o VPL parece retornar valores melhores, exceto para os casos em que a quantidade de minério fica baixa.

Contudo, o fato é que há cavas rentáveis e passíveis de serem exauridas segundo os dados obtidos. Logo, após maximizar o VPL através do algoritmo de *Lerchs Grosman*, foi escopo também desse trabalho operacionalizar as cavas ótimas. Ou seja, viabilizar também a operação quanto a parte técnica e ambiental, respeitando todas normas de segurança. E o resultado, como esperado foi um significativo aumento da REM global.

Isso porque, se valendo dos dados apresentados na Tabela 4, é possível notar que a REM para cava ótima é de 3,40t/t. Enquanto após a operacionalização essa vai para 5,65t/t (Tabela 6), ou seja, um aumento de aproximadamente 66,2%. Isso se dá em função do desenvolvimento dos acessos necessários às cavas e ao aumento dessas em algumas direções a fim de maximizar um pouco mais os recursos (Fig. 11 e 12).

Tabela 6 - Resultados após operacionalização

	Densidade	Massa (t)
Minério	2.4	997.847
Estéril	2.5	5.634.618
Total	-	6.632.465

Por fim, com a operacionalização e, portanto, com todas restrições impostas, foi possível também fazer uma estimativa de vida útil com base na cubagem e parâmetros fornecidos pela empresa. Portanto com base na Tabela 6 e observando a produção de aproximadamente 300.000,0ton/mês, é verificada uma vida útil de 22,11 meses ou 1,84 ano. É importante ressaltar que o teor de corte após a definição da cava final ficou em aproximadamente 0,14g/t.

5. Conclusões

Pelos resultados apresentados, é possível ratificar duas cavas absolutamente rentáveis para a Mineração Aricá, com um teor de corte de aproximadamente 0,14g/t. Elas renderão material para as linhas de planta de beneficiamento por pelo menos 22,11 meses, podendo esses dados serem melhorados conforme forem sendo lavradas as bancadas e adensadas as malhas de sondagem.

Pode-se verificar também um significativo aumento na REM global das cavas após a operacionalização, o que pode vir a penalizar mais um pouco o VPL. Isso já era esperado tendo em vista a maior movimentação de material para o desenvolvimento dos acessos e pertinente aumento das cavas, visando a maximização dos recursos.

Como já comentado, não foi parte do escopo desse trabalho um estudo geotécnico com finalidade de definir o ângulo de talude geral ou de face. Os valores apresentados são de uso prático da empresa, definidos com ampla observação e baseados em técnicas ao longo dos anos.

Assim, apesar de diversos autores, pesquisadores e profissionais terem o consenso de que só é possível ter total dimensão do tamanho da jazida quando essa é exaurida economicamente, através desse trabalho foi possível acrescentar informações importantes para um planejamento de longo prazo, dando embasamento suficiente para uma lavra viável e segura.

6. Referências bibliográficas

BLOM, M. *et al.*, (Março de 2018). *Short-Term Planning for Open Pit Mines: A Review. International Journal of Mining Reclamation and Environment*. Parkville, Australia; The University of Melbourne, 2018. doi:10.1080/17480930.2018.1448248, 2018.

BRANCO, P. M. *Mina: como ser dono de uma*. CPRM, Brasília, 2016., disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Mina%3A-como-ser-dono-de-uma-1268.html>> Acesso em 11 de dezembro de 2020.

CARMO A. R. *et al.*, *Otimização econômica de explorações a céu aberto*. *Rev. Esc. Minas vol.59 no.3 Ouro Preto, 2006*. doi:<https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000300011>.

CARMO, F. D. R., *Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas.*, PPGEM/UFOP, 2001.

COLOMBO, G. *et al.* *Caracterização do minério da jazida casa de pedra, Cuiabá (MT)*. *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa.*, disponível em <[https://www.artigos.entmme.org/download/2017/COLOMBO%20G,%20BONFIM%20E%20RC,%20NASCIMENTO%20N%20D%20C%20-%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DO%20MIN%C3%89RIO%20DA%20JAZIDA%20CASA%20DE%20PEDRA,%20CUIAB%C3%81%20\(MT\).pdf](https://www.artigos.entmme.org/download/2017/COLOMBO%20G,%20BONFIM%20E%20RC,%20NASCIMENTO%20N%20D%20C%20-%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DO%20MIN%C3%89RIO%20DA%20JAZIDA%20CASA%20DE%20PEDRA,%20CUIAB%C3%81%20(MT).pdf)> Acesso em 12 de setembro de 2020.

CURI, A. *Minas a Céu Aberto: Planejamento de Lavra*. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CURI, A. (2017). *Lavra de minas*. São Paulo: Oficina de textos, 2017.

DATAMINE BRASIL. *NPVS - Geração de Modelo Econômico e Cava Final | Datamine Brasil Webinar*. 07 de Maio de 2020., disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=X7dtYUi5Ax0&ab_channel=DatamineSoftware> Acesso em 20 de Maio de 2020.

GRIEBELER, E. E. *Estudo de caso para o seqüenciamento de longo prazo de um depósito de Cobre e Molibdênio. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.*, disponível em https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/45081/Poster_8076.pdf?sequenc e=2&isAllowed=y Acesso em 15 de 08 de 2020.

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

HUSTRULID, W. *et al. Open pit mine planning & Design*. Londres: CRC Press, 2013.

LERCHS, H., GROSSMANN, I. F. *Optimum Design of Open-Pit Mines*. C.I.M., Vol LXVIII, Montreal, Canadá, 1965.

LUZ, J. D. *Projeto Coxipó-Relatório final fase II*. Cuiabá: CPRM, 1980., disponível em <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/8134?show=full> Acesso em 16 de julho de 2020.

MIRANDA, J. G., *A produção de ouro no estado de Mato Grosso. UNICAMP, São Paulo, 1997.*

NETO, H. A., *Projeto de assistência técnica ao setor de energia, produto 19, relatório técnico 19 (minério de ouro)*. J. Mendo consultoria, 2009.

OLIVEIRA, B. J. (2016). *Avaliação geométrica do ângulo de talude na delineação da cava final- estudo de caso: mina f4, vale fertilizantes* . Araxá, MG, 2016., disponível em http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Bernardo_jose_Akel_Lemos_Oliveira.pdf Acesso em 25 de Junho de 2016.

SOUZA, J. C. *Métodos de lavra a Céu Aberto. Universidade de Pernambuco*, 2001., disponível em <https://www.passeidireto.com/arquivo/1628320/apostila-lavra-a-ceu-aberto> Acesso em 24 de Junho de 2020.

TOKASHIKI, C. D., & SAES, G. D. Revisão estratigráfica e faciologia do Grupo Cuiabá no alinhamento. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), 2008., disponível em <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7616> Acesso em 18 de Agosto de 2020