



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

GUSTAVO TRAMONTIN DIAS BATISTA

**ESTUDOS ADICIONAIS PARA O PLANEJAMENTO DE LAVRA
DA MINA CAPIVARI**

ARAXÁ/MG

2021

GUSTAVO TRAMONTIN DIAS BATISTA

**ESTUDOS ADICIONAIS PARA O PLANEJAMENTO DE LAVRA
DA MINA CAPIVARI**

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

Orientador: Prof. Dr. Allan
Erlikhman Medeiros Santos

ARAXÁ/MG

2021

GUSTAVO TRAMONTIN DIAS BATISTA

**ESTUDOS ADICIONAIS PARA O PLANEJAMENTO DE LAVRA
DA MINA CAPIVARI**

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

Data de Defesa: Araxá, 7 de Julho de 2022.

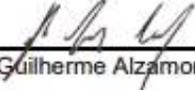
Orientador: Prof. Dr.  Allan Erlikhman Medeiros Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá



Prof. Dr. Marcelo Prado Fontes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá


Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá

RESUMO

A Mineração Capivari, localizada no estado do Paraná, é uma importante fornecedora de agregados para construção civil e de calcário para fertilização de solo na região Sul e Sudeste do país. O planejamento de mina tem como principal objetivo garantir a sustentabilidade e rentabilidade econômica da atividade mineral. Dessa forma, o planejamento de mina pode ser entendido como um sistema de dados que norteiam, o desenvolvimento da lavra, atendendo premissas de ordem ambiental, econômica e técnica de projeto. A presente pesquisa tem como objetivo geral a elaboração de um estudo que visa contribuir para o planejamento de mina da Mineração Capivari. A motivação do estudo está vinculada aos dados provenientes de recentes campanhas de amostragem, especificamente sondagens, no entorno da área da mina. A proposta é a atualização do modelo geológico e econômico da lavra que podem impactar em atualizações na cava final ótima. A metodologia aplicada é baseada no planejamento de lavra tradicional, porém neste contexto, especificamente, como se trata de uma empresa voltada a geração de agregados para construção civil o foco é o agendamento da produção, de acordo com capacidade da planta, valor presente líquido e demanda de mercado. Portanto foram elaborados o modelo geológico, determinação de cava final, *pushbacks*, sequenciamento, e operacionalização da cava final. Os dados de entrada foram os dados provenientes dos testemunhos de sondagens, e análise de caminhamento elétrico para determinação dos limites da reserva. Além disso foram utilizados a superfície topográfica atualizada e os dados do planejamento vigente. O *software* utilizado foi o Studio OP da Datamine. Como resultado, foi possível determinar a viabilidade econômica da reserva além das condições operacionais vigentes da mina para o desenvolvimento da cava. Aspectos como geometria da cava, vias de acesso, depósito de estéril, e unidade de beneficiamento foram dimensionados com foco no máximo aproveitamento da reserva. Por fim, também foi possível determinar os equipamentos necessários para operar essa expansão da atividade da mina.

Palavras-chave: Planejamento de lavra. Atualização de estudo de viabilidade. Mineração Capivari.

ABSTRACT

Mineração Capivari, located in the state of Paraná, is an important supplier of aggregates for civil construction and of limestone for soil fertilization in the South and Southeast regions of the country. Mine planning has as its main objective to ensure the sustainability and economic profitability of the mineral activity. Thus, mine planning can be understood as a data system that guides the development of mining, meeting environmental, economic, and technical project premises. The general objective of this research is to develop a study that aims to contribute to mine planning at Mineração Capivari. The motivation for the study is linked to data from recent sampling campaigns, specifically soundings, in the vicinity of the mine area. The proposal is to update the geological and economic model of the mine that can impact on updates in the final optimum pit. The methodology applied is based on traditional mine planning, but in this context, specifically, as it is a company dedicated to the generation of aggregates for construction, the focus is on production scheduling, according to plant capacity, net present value and market demand. Therefore, the geological model, final pit determination, pushbacks, sequencing, and final pit operationalization were developed. The input data were the drill core data, and electrical walkover analysis to determine the reserve boundaries. In addition the updated topographic surface and current planning data were used. The software used was Datamine's Studio OP. As a result, it was possible to determine the economic viability of the reserve in addition to the current operating conditions of the mine for pit development. Aspects such as pit geometry, access roads, waste rock dump, and processing unit were sized with a focus on maximum utilization of the reserve. Finally, it was also possible to determine the equipment required to operate this expansion of the mine activity.

Keywords: Mine planning. Feasibility study update. Capivari mining.

Índice de Figuras

Figura 1 - Etapas para delimitação de reserva lavrável.	22
Figura 2 - Modelo final do estudo de caso com base no algoritmo proposto e notas de corte de processamento modificadas: (a) Visão 1; (b) Visão 2.	23
Figura 3 - Seção final da cava com diferenciação dos pushbacks.	25
Figura 4 - Modelagem de furos de exploração amostrados.	26
Figura 5 - Coordenadas no Modelo de Blocos.	27
Figura 6 - Modelo de bloco de depósito do estudo de caso: (a) Visão 1; (b) Visão 2.	27
Figura 7 - Hipóteses da determinação da continuidade das camadas.	28
Figura 8 – Perfil geológico (A) IDs atribuídos aos contatos dos furos e (B) Resultado da interpolação dos limites de (A).	29
Figura 9 - (A) Furos com limites atribuídos, (B) cortes das interpolações dos limites, (C) sólido criado a partir da interpolação (D) seções transversais do sólido.	30
Figura 10 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	31
Figura 11 - Imagem de satélite da Mina da Empresa Capivari.	32
Figura 12 - Mapa da região da campanha de sondagem.	33
Figura 13 - Abertura das picadas para execução das linhas geofísicas (A e B); aquisição dos dados geofísicos na LG-1 (C e D); aquisição dos dados geofísicos na LG-2 (E); e resistímetro utilizado durante o levantamento (F)	35
Figura 14 - Resultados geofísicos e de planialtimetria da região estudada.	36
Figura 15 – Geometria dos taludes.	39
Figura 16 – Cava operacional final.	40
Figura 17 -Mapas temáticos ilustrando a geomorfologia das áreas em tela: Mapa hipsométrico (A), Relevo sombreado (B), Mapa de declividade (C) e Modelo Digital de Terreno - MDT (D) das poligonais ANM nos 826.031/1993, 826.865/2014, 826.399/2015 e 826.059/2017.	44
Figura 18 - Mapa planialtimétrico da mina.	45
Figura 19 - Mapa litológico do entorno da mina.	46
Figura 20 - Modelo de evolução do depósito de estéril em fases ascendentes e o processo de recuperação.	47
Figura 21 - Localização dos depósito de estéril em atividade na Mineração Capivari.	48
Figura 22 - Na sequência de imagens é possível observar a configuração atual do depósito de estéril 1.	49
Figura 23 - Vistas da localização e conformação do Depósito de estéril 2 (BF-2): Construção dos níveis do depósito de estéril, sendo que a base dos patamares ainda irá avançar, por isso não se iniciaram os trabalhos de recuperação. Tão logo a base chegar no limite de avanço do depósito de estéril os trabalhos de recuperação deverão ser iniciados (A); base do talude sem a presença de processos erosivos aparentes, bem como a vegetação composta por bracatingal que faz limite com o depósito de estéril (B e C); e detalhe da formação do talude do piso superior do depósito de estéril em construção (D).	50
Figura 24 - Diagrama composicional ternário (CaO-MgO-SiO ₂) com a classificação das rochas carbonáticas aflorantes na área do empreendimento.	52
Figura 25 - Perfil do modelo de blocos (WNW-ESE).	53
Figura 26 - Usina de beneficiamento da mina.	55

Figura 27 - Cava após os primeiros 9 anos de operação.	57
Figura 28 - Cava após 1 ano de lavra.	58
Figura 29 -Cava após 5 anos de lavra.	59
Figura 30 - Cava após 9 anos de lavra.	60
Figura 31 - Perfil da cava após 9 anos de operação.	61
Figura 32 - Fluxograma representativo da planta de beneficiamento.	64
Figura 33 – Matriz de impactos socioambientais da extração e beneficiamento de metadolomito.	67
Figura 34 – Mapa de abrangência das medidas ambientais.	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Módulos comuns em softwares de Planejamento de mina a céu aberto.	19
Tabela 2 - Dados dos furos de sondagem.	34
Tabela 3 Lista geral de equipamentos de grande porte da Mineração Cal Capivari.	41
Tabela 4 – Resultados da análise química das 14 amostras.	52
Tabela 5 - Pushbacks dos 9 primeiros anos de operação.	57
Tabela 6 – Planejamento quantitativo de minério extraído ao longo do período de nove anos.	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Conceitos iniciais	10
2.2. Minerais e Rochas	10
2.2.1. DEPÓSITOS E JAZIDAS MINERAIS.....	11
2.2.2. AGREGADOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	12
2.2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS.....	13
2.2.4. PRODUÇÃO BRASILEIRA.....	14
2.2.5. MINERAÇÃO CAPIVARI.....	15
2.3. Processo de Produção Mineral	15
2.4. Planejamento de mina	16
2.4.1. COMPUTAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE MINA.....	18
2.4.2. ESCALA DE PRODUÇÃO.....	20
2.4.3. LIMITES DE LAVRA.....	21
2.4.4. CAVA ÓTIMA.....	23
2.4.5. <i>PUSHBACKS</i>	24
2.5. Modelo geológico	25
2.5.1. MODELAGEM DA MINERALIZAÇÃO.....	27
3. METODOLOGIA	31
3.1. Análise e Organização do Banco de Dados	31
3.2. Criação do modelo de blocos	37
3.3. Sequenciamento das fases	37
3.4. Operacionalização da cava	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1. Levantamento geológico	43
4.2. Resultados do planejamento de lavra	47
4.2.1. CÁLCULO DAS RESERVAS E RESULTADOS QUÍMICOS.....	50
4.2.2. PLANO DE LAVRA.....	53
4.2.3. CARREGAMENTO E TRANSPORTE.....	61
4.2.4. BENEFICIAMENTO E EQUIPAMENTOS.....	63
4.2.5. VIDA ÚTIL E DANOS AMBIENTAIS.....	65
5. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

A mineração é umas das principais atividades da economia do Brasil.(Cerca de 3/5%) Existem inúmeras reservas e minas espalhadas pelo extenso território brasileiro, se destacando por ser um grande consumidor e exportador de produtos minerais.

Um dos produtos de largo consumo nacional são os agregados para construção civil. A produção desses recursos é comparável com a produção de minério de Ferro, o principal produto mineral do país. A indústria de mineração é um empreendimento na maioria das vezes muito oneroso, requisitando alto valor de investimento. As informações quantitativas e qualitativas do bem mineral a ser explorado devem ser corretamente apresentadas. Isso é importante para que se justifique a decisão de realizar futuros investimento na planta em operação, isso porque qualquer erro, mesmo que mínimo pode acarretar grandes prejuízos.

No entanto, um problema relacionado à produção nacional de agregados é a falta de planejamento estratégico da produção. Esta etapa consiste em programar e planejar as operações visando otimizar a exploração da reserva mineral e principalmente maximizar o lucro desses empreendimentos. Sendo assim, o planejamento estratégico define os investimentos de capital, cava ótima, sequenciamento de lavra, além das demais atividades realizadas nesta indústria.

Sendo assim, o presente trabalho possui como objetivo principal atualizar o modelo geológico e econômico para o planejamento de mina da Mineração Capivari utilizando o *Software Studio Open Pit*.

Para que o objetivo principal seja alcançado foi necessário o estudo dos dados provenientes de campanhas de amostragem por sondagens no entorno da área da mina, a avaliação dos dados da superfície topográfica e do atual planejamento da mina. Planejar os *Pushbacks*, sequenciamento e operacionalização da cava com bases nos dados coletados e validar os dados estimados pelos modelos utilizados de acordo com as informações obtidas ao longo dos anos de operação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conceitos iniciais

A mineração é o processo de extração de minerais ou outros materiais de origem geológica que possuem valor econômico na sua comercialização. Os tipos de substâncias explorados pela mineração podem ser classificados como (Ibrahimov *et al.*, 2014):

- **Minérios metálicos:** Estes incluem os metais ferrosos (ferro, manganês), os metais básicos (cobre, chumbo, zinco), os metais preciosos (ouro, prata, platina) e os metais radioativos (urânio, rádio).
- **Minerais não metálicos:** Isso inclui fosfato, calcário e enxofre.
- **Combustíveis fósseis:** Estes incluem carvão, petróleo e gás natural. A extração de petróleo e gás que possuem características físicas diferentes dos demais grupos requer tecnologias e técnicas diferentes para sua extração.

Para este trabalho, foi dado enfoque aos minerais não metálicos e suas rochas por ser o grupo que se enquadra nos minerais explorados pela Mineração Capivari na mina estudada nesta pesquisa.

Nesse sentido, o próximo tópico abordou uma revisão conceitual de termos geológicos correlatos para que haja total compreensão das ideias abordadas à frente neste trabalho.

2.2. Minerais e Rochas

Os minerais são elementos ou compostos químicos que possuem composição definida, formados e cristalizados de forma natural através de processos geológicos inorgânicos. De acordo com a composição química e características únicas do mineral, esse pode se transformar em um minério, da qual existe a possibilidade de obter proveito econômico.

Rocha é um material consolidado composto por um conjunto de minerais resultantes de um processo geológico determinado. Pode ser formada por um ou mais minerais, dispostos segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação. Quanto à origem, as rochas se classificam em ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas. Dentro desses grupos, de forma geral, a textura e a composição mineral são os critérios para a identificação dos diferentes tipos de rochas ou tipos litológicos (Press *et al.*, 2006).

As rochas ígneas são formadas a partir da consolidação do magma que pode ser em profundidade ou na superfície. Existem várias classificações para as rochas ígneas baseadas na composição química das rochas, percentagem de minerais essenciais, granulometria etc. (Press *et al.*, 2006).

A rochas metamórficas são caracterizadas por serem rochas que sofreram o processo de metamorfismo, em que rochas de outros tipos, e até mesmo metamórficas, são submetidas a condições de pressão e temperatura. Tais rochas são caracterizadas por apresentarem foliações, minerais recristalizados e textura própria.

Por fim, e o mais importante para este trabalho, as rochas sedimentares são resultadas da ação do intemperismo, erosão, transporte e sedimentação de outras rochas. Segundo sua origem, essas podem ser classificadas em detríticas e químicas. Um ótimo exemplo é o calcário, precisamente o tipo dolomítico, a principal rocha extraída da mina da empresa Capivari que foi abordado nos próximos tópicos.

Quando estas rochas e minerais interagem com diferentes eventos geológicos e climáticos, estes podem formar depósitos minerais e possivelmente jazidas, caso haja valor econômico, possibilitando sua exploração.

2.2.1. DEPÓSITOS E JAZIDAS MINERAIS

A ciência da prospecção e exploração de depósitos minerais, orientada para a avaliação econômica de depósitos. Embora tenha iniciado na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) por volta de 1920 devido a abordagem científica que sua economia planejada possuía, foi mais acentuada nos Estados Unidos da America (EUA), que por ser uma economia aberta, exigia uma abordagem mais dinâmica com relação a prospecção mineral (Weiss, 1977).

Os depósitos minerais são originados por processos geológicos resultantes de transformações que acontecem na crosta terrestre. Os depósitos minerais são caracterizados por ter uma anomalia que contenha alguma substância mineral ou rocha em concentrações mais elevadas. Quando existe a possibilidade de retirar proveito econômico, o depósito se transforma em uma jazida mineral (Hazen, 1968).

A designação de um depósito como industrialmente importante depende da forma, dimensões, qualidade e localização do depósito. De acordo com Peters, (1978) os possíveis tipos de depósitos industriais podem ser ferrosos (ferro, titânio, manganês, cromo), de metais para ligas (níquel, cobalto, tungstênio, molibdênio,

vanádio), metais não ferrosos (cobre, chumbo, zinco, estanho, mercúrio, antimônio, bismuto), metais leves (alumínio, berílio, lítio, magnésio), metais preciosos (ouro, prata, metais de platina), elementos radioativos (urânio, tório), elementos de terras raras (tântalo, nióbio e zircônio), oligoelementos, minerais e materiais para a indústria metalúrgica (fluorita, grafite, magnesita, refratário argilas e caulins, areias de fundição), materiais para a indústria química (fosfatos, enxofre e pirita, arsênio, boro, barita) e outras indústrias (amianto, micas, minerais piezoelétricos e ópticos, diamante, coríndon, minerais ricos em Al_2O_3 , talco, feldspato, filitos e areias para produção de vidro), materiais de construção e caustobiolitos.

Os processos formadores de depósitos minerais podem se classificar como endógenos, quando ocorrem no interior da crosta terrestre, representados pelo vulcanismo, hidrotermalismo, metamorfismo ou exógenos, quando ocorrem na superfície terrestre e formam os depósitos supergênicos ou associados à intemperismo, como é o caso da formação de depósitos de agregados para a construção civil.

2.2.2. AGREGADOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo “agregados para a construção civil” é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral bruta ou beneficiada de emprego imediato na indústria da construção civil (MOTTA, 2005). São formados por grãos que não têm volume nem forma definidas. A areia e a brita são exemplos de agregados bastante comuns na natureza. São materiais que apresentam baixo valor unitário, no entanto possui um consumo muito alto devido a sua utilização em grande escala para indústria civil de construção.

De acordo com Frazão e Paraguassu (1998), a relevância do setor de agregados para a sociedade é destacada por estar diretamente ligado à qualidade de vida da população tais como: a construção de moradias, saneamento básico, pavimentação e construção de rodovias, vias públicas, ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos, pontes e viadutos. Além é claro, de ser a base para a implementação da infraestrutura necessária para operacionalização, transporte e logística dos setores econômicos produtivos.

Em comparação com os principais minerais industriais os agregados possuem o menor preço unitário, no entanto seu mercado é superaquecido devido ao grande número de ocorrências dos mais variados tipos.

Outro fato importante sobre o produto é que sua produção anual é elevada, pois

existem muitos produtores, usinas de grande ou médio porte. No entanto, na maioria das vezes são empresas com pouco gerenciamento de atividades.

A prospecção desses materiais é considerada mais simples do que a prospecção de minerais industriais, como por exemplo, ferro, níquel, cobre e ouro. Suas pesquisas geralmente exigem baixa incorporação de tecnologia, constituída, em geral, por operações unitárias de lavagem, classificação ou moagem. Apesar disso, com o avanço do consumo e a necessidade de novas técnicas e novos fluxogramas de produção *softwares* de planejamento e modelamento geológico vem sendo aplicados como ferramentas de suporte à prospecção e exploração desses agregados.

2.2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS

Frazão e Paraguassu (1998), definem os agregados como materiais granulares sem forma e volume definidos que podem ser classificados considerando a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos. Quanto à origem, são denominados naturais os extraídos diretamente como fragmentos, areia e cascalho e, os artificiais são aqueles que passam por processos de fragmentação como britagem ou moagem.

Por se tratar de uma classificação de grãos, existem algumas controvérsias na literatura. A classificação pode ser baseada na petrografia, caracterização física e mecânica dos minerais como ocorre na ASTM (*American Society for Testing Material*) e na ISRM (*International Society for Rock Mechanics*). Collins e Fox em 1985 propuseram que a classificação dos agregados deve levar em consideração tais fatores:

- o local de deposição
- rocha de origem;
- a origem do material (agregados naturais ou artificiais);
- a classe ou nome petrográfico;
- idade da rocha;
- cor;
- granulometria;
- fissilidade.

No entanto, a principal forma de classificação de agregados usada atualmente pelo mercado considera o tamanho dos fragmentos, classificando os agregados em

finos (até 0,2 mm), médios (entre 0,2 e 2 mm) e grossos (> 2 mm). Por vezes, a indústria utiliza valores superiores a 5 mm para os agregados grosseiros (Prentice, 1990).

Seguindo a classificação utilizada industrialmente os agregados grossos são mais utilizados como ingrediente na fabricação do concreto e como constituinte de estradas. Os agregados médios e finos são úteis para preenchimento ou para proporcionar rigidez em uma mistura. Nesse caso, a granulometria, densidade relativa, a forma das partículas e a composição mineralógica são parâmetros importantes, pois determinam as características mecânicas de resistência do produto final. Os agregados podem ter seus fragmentos unidos por material ligante como cimento e betume, para uso como concreto hidráulico e betuminoso, respectivamente (Frazão e Paraguassu 1998).

2.2.4. PRODUÇÃO BRASILEIRA

A mineração de agregados para construção civil está espalhada por todo o território nacional e é uma das mais importantes atividades extrativas do setor mineral brasileiro, devido ao volume produzido ser comparável ao volume de produção do minério de ferro, principal produto mineral brasileiro (MOTTA, 2005). Com relação à produtividade, a mineração brasileira de agregados tem muito a desenvolver, se comparada aos países da Europa Ocidental e aos EUA, onde a mão de obra é treinada e grandes investimentos são feitos na modernização das instalações de produção.

Na produção nacional, predominam as minas artesanais, o que se explica em parte pela existência de micromercados regionalizados. Como os custos de transporte tornam o comércio em longas distâncias impraticáveis, o mercado para o qual cada mina pode alocar sua produção é limitado. Nesse caso, a escala de produção é limitada a quantidades compatíveis com o que o mercado regional pode absorver (Tannús *et al.*, 2007).

Ainda segundo Tannús *et al.*, (2007), no período de 2001 a 2007, as minas de areia e brita representavam, respectivamente, 25 e 28% do total de minas de superfície com mais de 10.000 toneladas extraídas por ano. As pedreiras de britagem são responsáveis por 41% de todas as minas de médio porte (menos de um milhão de toneladas e mais de cem mil toneladas), enquanto as minas de areia são responsáveis por 34% de todas as minas de pequena escala (Produção entre dez mil à cem mil toneladas)

2.2.5. MINERAÇÃO CAPIVARI

Empresa fundada em 1982, a mineração Capivari trabalha com a extração de calcário dolomítico para a produção de Cal. A empresa visa o trabalho com todos os segmentos de material originário de rocha calcária, agregados de todas as especificações e granulometrias, atendendo o mercado da construção civil, pavimentação, terraplanagem, ornamentação e demais ramificações.

Em 2020 passou por mudanças significativas em seu quadro de sócios ampliando seus investimentos e produção, além de iniciar uma nova linha de produtos, os Fertilizantes.

2.3. Processo de Produção Mineral

Entendendo as principais características desse produto, é possível dar sequência neste trabalho e partir para os processos que permeiam a produção desses agregados. As operações que envolvem a produção mineral são divididas em cinco fases básicas: a prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e fechamento de mina.

A prospecção mineral se refere a todos os esforços e serviços direcionados a descobertas de jazidas minerais. Nessa etapa, os profissionais visam analisar mapas, coletar amostras de rocha e solo, realizar análises, detalhar área de interesse e por fim, caracterizar como uma ocorrência ou depósito mineral (Chen *et al.*, 2016).

A segunda etapa é a exploração, também conhecida como avaliação, consiste na aplicação de técnicas para a coleta de informações necessários ao conhecimento geológico das ocorrências e depósitos. No geral, amostras podem ser retiradas para determinar as condições do depósito mineral.

Onde a espessura da cobertura excede os 5 metros, a perfuração se torna necessária para acessar a região de interesse com a utilização de equipamentos de sondagem. Estes procedimentos de amostragem para minerais foram revisados por Ottensen e Theobald (1994). Somente após os trabalhos de exploração que é possível definir se o depósito mineral, já avaliado, pode vir a se tornar uma jazida.

Já o desenvolvimento engloba todos os serviços necessário para a preparação da lavra. Nessa etapa são adquiridos todos os equipamentos, pessoal e estrutura que permitem a lavra do mineral. Também é considerado como sendo desenvolvimento, as atividades que visam o acesso ao corpo de minério, o que engloba atividades de decapeamento, construção de estradas, retirada e deposição de estéril.

A lavra ou exploração, é a extração sistemática dos trabalhos necessários ao

aproveitamento econômico da jazida. Quando a jazida está em atividade de lavra, essa passa a ser nomeada de mina. Para que a jazida perdure por muito tempo em atividade de lavra, de forma a garantir o lucro com segurança e sustentável, é necessário que haja um planejamento de produção de jazida, mais conhecido como planejamento de mina, área de estudo dessa pesquisa.

Ao final da execução da lavra, mesmo que em determinada região da mina, deve ser realizada o fechamento da mina. Essa é uma etapa que visa aproveitar ao máximo toda a área utilizada para a lavra do minério. São atividades de reaproveitamento: reconstrução da fauna e flora, construção de parques ecológicos, zoológicos e condomínios. Ainda são atividades da fase de fechamento de mina o controle, até mesmo depois de anos de encerramentos de atividade, dos contaminantes e estrutura da mina (Winde e Stoch, 2010).

Para este trabalho, o foco foi dado na sistematização da lavra e exploração do minério. Este procedimento é intitulado como planejamento de mina e foi abordado no Tópico 2.4.

2.4. Planejamento de mina

O Planejamento de Lavra é o projeto base que qualquer mina possui e tem como principal objetivo sistematizar e orientar as ações e avanços a ser tomada neste empreendimento. De forma geral, trata-se de um roteiro a ser seguido para a produção mineral para que toda a exploração do minério e estéril seja realizada de forma eficiente e segura. Ele prevê os equipamentos, a quantidade de mão de obra e os custos inerentes à operação.

O planejamento original pode sofrer constantes adaptações pois, à medida que a mina é lavrada, novas informações e mudanças de cenário, como custos, receitas e demanda de mercado, se tornam disponíveis havendo sempre, necessidade de ajustes. É determinante para garantir a segurança do empreendimento minerário de forma a maximizar o potencial econômico e limitar o impacto ambiental (Fioroni *et al.*, 2008).

Antes de dar início às atividades de lavra, é necessário aferir as transformações que a mina sofreu no espaço e no tempo. Nesse escopo, cabem aos engenheiros de minas elaborarem o planejamento de curto, médio e de longo prazo.

O planejamento de curto prazo é o que mais sofre com imprevistos, pois este acompanha as mudanças de produção e mercado num curto período de tempo, sendo influenciado por informações originárias de intervalos anuais, semestrais, mensais,

semanais e diários. Tal planejamento tem como objetivo, traçar metas de produção de minério e retirada estéril de forma que sejam alcançadas no final de um período previamente determinado.

São atividades do planejamento a curto prazo:

- Cronograma de produção de minério e estéril;
- Planejamento de formação de pilhas de minério;
- Planejamento de estocagem;
- Planejamento de deposição de estéril;
- Cálculo de aderência ao plano;
- Controle e engenharia de dados de produção;

O objetivo principal a curto prazo é manter o fluxo de minério nas condições necessárias para que a usina tenha uma boa produtividade e cumprir o plano de produção.

No entanto, devido ao fato de estar sujeito a fatores momentâneos de processo tais como quebra de equipamentos; imprevistos pessoais, fatores climáticos ou geológicos. Por isso esse tipo de planejamento sofre constantes modificações que não devem trazer alterações significantes para a produção pré-estabelecida.

Já o planejamento de médio prazo leva em consideração muitos fatores geológicos, a margem de erro nesse tipo de planejamento é maior devido ao que pode acontecer no curto prazo. Ele deve evidenciar as mudanças ao longo de sua vida, permitindo o dimensionamento dos equipamentos e, conseqüentemente, os investimentos e custos operacionais. Ele deveria fornecer toda a infraestrutura necessária para que o curto prazo aconteça (Fioroni *et al.*, 2008).

Assim algumas das atividades do planejamento de médio prazo são:

- Operacionalização de cavas;
- Promover infraestrutura;
- Acionar o setor de meio ambiente para liberações de áreas;
- Expandir rede de acesso da mina;
- Dimensionamento de produção e frota anual;
- Planejamento de produção quinquenal da mina.

Por fim, o planejamento de longo prazo é o que avalia a mina até a sua exaustão. É chamado também de "Plano Estratégico de Mina". Consiste em uma proposta que visa sequenciar a reserva com capacidade para ser lavrada, determinar o volume de

estéril a ser removido e, ainda, avaliar a quantidade de estéril a ser retirada, comparada com a quantidade de minério (Relação Estéril/ Minério – REM). O principal objetivo do planejamento de longo prazo é gerar a cava final e definir as reservas do empreendimento mineiro (Dagdelen e Johnson, 1986).

Todo este planejamento pode ser feito manualmente pelos responsáveis técnicos do empreendimento. No entanto, a complexidade dos cálculos e parâmetros envolvidos na operação de uma mina tornava muito dispendioso e demorado o acompanhamento dinâmico dessas informações. Sendo assim, a utilização de meios computacionais como ferramenta suporte para determinar e acompanhar tendências e variáveis se tornaram predominantes nas empresas de mineração.

2.4.1. COMPUTAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE MINA

O projeto de mina a céu aberto e a programação das atividades unitárias são problemas de otimização em grande escala que tem atraído considerável atenção durante os últimos 40 anos. O desenvolvimento do *know how* em projetos de mineração a céu aberto por meio do uso de técnicas de otimização matemática remonta ao início dos anos 1960. Infelizmente, até recentemente, muitos desses "algoritmos de otimização" não podiam ser implementados devido à capacidade limitada do *hardware* do computador usado em muitas operações de mineração (Akaike e Dagdelen, 1999).

Além disso, a operação e gerenciamento de uma mina a céu aberto é uma tarefa enorme e complexa, especialmente para minas com uma vida útil muito longa. As técnicas de otimização podem ser aplicadas com sucesso para resolver uma série de problemas importantes que surgem no planejamento e gestão de uma mina.

De acordo com Caccetta e Hill (2003), esses aplicativos incluem: modelagem de corpo de minério e estimativa de reserva de minério; projeto de cavas ótimas; determinação de cronogramas de produção ideais; determinação de *layouts* operacionais ideais; determinação dos equipamentos e políticas de manutenção e reposição.

Nos últimos 10 anos, avanços na tecnologia de *hardware* juntamente com desenvolvimentos de novos *softwares* permitiram a utilização dessas técnicas em todas as etapas do planejamento de mina. Vários *softwares* são responsáveis por otimizar processos, diminuir riscos, aumentar competitividade e segurança nas operações. Existem uma larga variedade de programas no mercado para o planejamento de lavra de minas, todos eles se baseiam no princípio de agilizar e

facilitar o trabalho de produção mineral (Akaike e Dagdelen, 1999).

Um problema fundamental no planejamento da mina é determinar o limite final da cava da mina. O limite máximo da cava final da mina é determinado pela superfície de contorno que gera não só o melhor resultado da extração mas que também fornece o maior lucro, ao mesmo tempo que satisfaz os requisitos operacionais dos taludes. Respeitando também os limites de propriedade, ambientais e de outorga de lavra. O limite final da cava resulta em uma imagem ilustrativa que revela o formato da mina ao final de sua vida. Normalmente, este contorno é suavizado para produzir o contorno final da cava (Caccetta e Hill, 2003).

Essas definições e conceitos foram abordadas com maior foco nos tópicos 2.4.2 ao 2.4.5, onde as informações serão mais detalhadas.

Todos os programas utilizados no planejamento são compostos por módulos. Um módulo nada mais é que um aplicativo específico que são interligados com outro. Os principais módulos são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Módulos comuns em softwares de Planejamento de mina a céu aberto.

MÓDULO	DEFINIÇÃO
Banco de Dados	Inclui toda a entrada e manipulação de dados da produção mineral. O sistema é desenvolvido com base nos dados disponíveis no banco de dados.
Gerenciador de dados topográficos	Recebe dados de topografia, realiza a atualização topográfica de forma dinâmica com geração de mapas, superfície e relatórios de forma rápida e precisa.
Gerenciador de amostragem	Realiza o tratamento estatístico e geoestatística dos dados de entrada armazenados no banco de dados. Possibilita a interpretação geológica, distinção dos tipos litologia e modelagem inicial da geologia estrutural.
Modelagem geológica tridimensional	São aceitos dados de sondagem e campanha geoquímica e geofísica que são interpretados para o corpo geológico e assim delineado de forma tridimensional. Todas as descontinuidades geológicas são mostradas. A modelagem geralmente é feita pelo método de triangulação.
Modelagem de Blocos	É o modelo capaz de representar todo o corpo de minério por meio de blocos tecnológicos. São selecionados seguindo as especificações técnicas e econômicas. Podem realizar cálculo de reserva por métodos geoestatística. Permite também a visualização em 3D do modelo de blocos.

Projeto de cavas	Responsável pelo traçado de bancos e bermas, rampas, acessos, seções geológicas e de produção, cálculo de volume de estéril, etc.
Gerenciador de escavação	Realiza a otimização de cava e planejamento de lavra matematicamente. Responsável por simular os planejamentos a longo e médio prazo considerando diversos cenários.
Interface Gráfica	O objetivo é fornecer apresentações gráfica em 3D do ambiente considerado. São sistemas capazes de construir modelos digitais de terreno (DTM). Permite a interação de vários arquivos para montagens de imagens com inúmeros parâmetros para visualização em 3D.
Gerenciador de Impressão	Permite a visualização de arquivos gerados pelo sistema para inclusão de dados. Saídas para <i>plotters</i> e impressoras são obtidos por meio das opções do sistema.

É de suma importância destacar que, anualmente, todos os módulos sofrem inúmeras atualizações. No entanto torna-se imperioso um bom serviço de seleção de *softwares*, visto que existem uma grande diversidade de empresas que oferecem esses serviços, de tal forma que o programa de planejamento de lavra deve ser capaz de realizar um modelamento que respeite a relação de custo e benefício do empreendimento se adequando de forma precisa as características da jazida.

2.4.2. ESCALA DE PRODUÇÃO

A escala de produção de um empreendimento minerário é determinada em razão das reservas minerais, da oferta tecnológica e econômica e da pesquisa de mercado.

Grandes reservas podem sugerir elevadas escalas de produção, no entanto quando essa escala de produção passa a ser muito elevada a vida útil da mina se torna menor, podendo ocorrer desvalorização do minério ou produto lavrado. O empreendimento pode não retornar financeiramente todo o investimento nela aplicado e planejado (Fioroni et al., 2008).

Dessa forma é necessário regular a escala de produção constantemente para manter estáveis essas variáveis, geometria da cava, dimensionamento de frota e capacidade de produção, em toda a vida útil da mina. Sendo assim, a escala de produção tem o objetivo de maximiza o valor líquido dos benefícios monetários futuros durante toda a vida útil da mina, ou seja, a escala de produção ideal é aquela pela qual garante a vida da mina e da empresa, mantendo a valorização do produto ano

após ano.

Existem na literatura vários métodos para determinação da escala de produção, alguns se baseiam no modelo estatístico de massa e crescimento de riqueza. Outros, mais simples, baseiam-se no modelo estático de massa que leva em consideração o investimento inicial, o preço unitário de venda; o custo unitário de produção e a escala de produção.

Com o avanço tecnológico de *softwares* de planejamento, praticamente todos esses métodos podem ser feitos de forma automática, por meio do levantamento de dados, fornecimentos de gráficos e relatórios de escala de produção (Akaike e Dagdelen, 1999).

Desta forma, para planejar o projeto de produção, é necessário limitar o volume lavrável do depósito. Esse limite é intitulado limites da cava final.

2.4.3. LIMITES DE LAVRA

O processo de limitação de lavra envolve a superposição da superfície geométrica da lavra sobre o corpo mineralizado. A reserva lavrável é a porção do corpo mineral contida dentro dos limites da geometria definida para a lavra. O tamanho de uma cava está diretamente relacionado com a relação estéril minério.

A cava final e inicial de uma mina é projetada de várias formas para a obtenção da melhor resposta para o empreendimento. Para desenvolver as cavas, são utilizadas diversas metodologias de delimitação da reserva lavrável, essas metodologias seguem procedimentos baseados nos métodos manuais, nos métodos manuais amparados por métodos informatizados e nos métodos computacionais. Ou seja, trata-se de serviços que são feitos com observações e medições em campo e em computadores, através de programas especializados para tal (Peters, 1978).

De acordo com Esmaeil *et al.*, (2018), nos últimos 50 anos ou mais, uma ampla gama de métodos numéricos para aplicações em ciências de mineração foi desenvolvida. Atualmente com a aplicação da geoestatística, modelagem tridimensional (3D), o Algoritmo Lerchs-Grossmann (Lerchs e Grossmann, 1965), o algoritmo de Lane (Lane, 1984), e outros métodos informatizados tornou-se possível criar planos de lavra cada vez mais abrangentes e satisfatórios. Uma das melhores observações para otimização do teor de corte é o método de LANE.

Esta teoria leva à construção de uma função de maximização do valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa; no entanto, também pode incluir várias restrições sobre as capacidades (mina, britagem, lixiviação e usina) na operação de mineração.

Para determinação de reservas minerais lavráveis é necessário seguir uma série de fases, descritas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas para delimitação de reserva lavrável.



Fonte - CURI, (2014)

O banco de dados geológicos está diretamente relacionado com as análises estatísticas do corpo de minério. Dessa forma são levadas em consideração a composição do corpo, a área de influência e dados geoestatísticos para que seja feito o modelo de interpolação da jazida.

O modelo geológico é originado de dados da geologia do local, topografia e da interpolação estatística dos dados. Já o modelo econômico, que leva em consideração critérios geotécnicos, operacionais e ambientais, dependeriam da geometria da mina, vias de circulação, relação estéril/minério e parametrização de reservas (Peters, 1978).

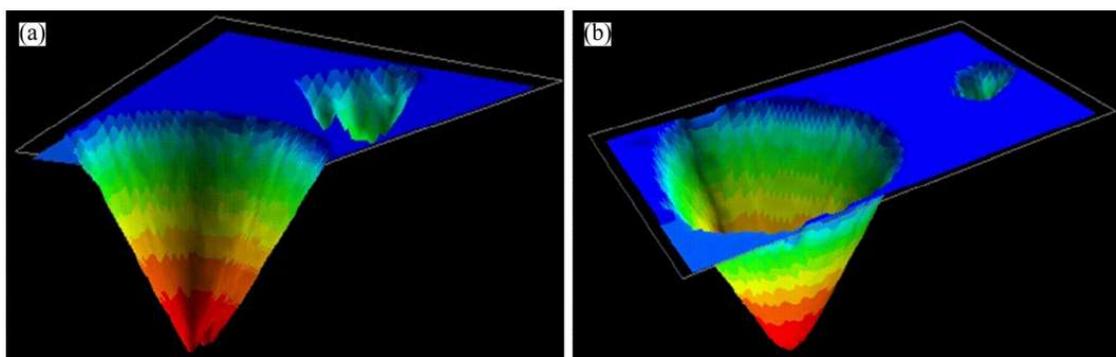
O desenho da mina considera além dos estudos já citados, o projeto de disposição de estéril e da planta de tratamento de minério. A delimitação de reserva lavrável foi concluída com a sequência de lavra definida, a avaliação das geometrias otimizadas, a realização de análises de sensibilidade, confecção de planejamento operacional e planejamento de mina de médio a curto pra

2.4.4. CAVA ÓTIMA

De acordo com as definições feitas por Guimarães (2007), uma cava ótima define o tamanho e a forma de uma mina a céu aberto no final das operações e a maximização da reserva. A cava delimitaria a extensão das reservas e a quantidade de minério e estéril a ser lavrada, no qual a fronteira limite seria aquela que iria maximizar as reservas. Trata-se de umas das primeiras atividades a serem desenvolvidas pelo planejamento de mina e deveria ser consultado com frequência e se necessário, revisto durante toda a extração mineral.

De acordo com Esmail *et al.*, (2018), a cava ótima é definida a partir de diferentes perspectivas futuras. Entre o nascimento e morte de uma mina a céu aberto, há uma série de cavas intermediárias planejadas no sequenciamento do modelo econômico do depósito. Na Figura 2, é possível ver o resultado da cava ótima para um depósito de ferro utilizando um algoritmo computacional desenvolvido por Esmail *et al.*, (2018).

Figura 2 - Modelo final do estudo de caso com base no algoritmo proposto e notas de corte de processamento modificadas: (a) Visão 1; (b) Visão 2.



Fonte - Esmail *et al.*, (2018)

Atualmente, define-se cava ótima aquela que atende algum requisito técnico buscado pelo projetista (VPL, maximização de reserva) dentre as cavas potenciais elaboradas. Seguindo parâmetros geotécnicos que definem a geometria geral dos taludes. Para tal, critérios de segurança devem ser respeitados pelas equipes responsáveis.

No entanto, a cava ótima não leva em conta a produção estimada para a usina de beneficiamento. O sequenciamento das etapas de lavra é feito de acordo com variáveis operacionais: produção máxima, REM e vida útil da mina. Esses sequenciamentos são denominados de *pushbacks*.

2.4.5. *PUSHBACKS*

Os avanços de uma mina, também chamado de *pushbacks*, podem ser interpretadas como unidades de cava individuais com seu próprio funcionamento e dinâmica de frente de lavra, permitindo ao projetista da mina desenvolver o planejamento de curto e médio prazo de acordo com o planejamento de longo prazo. Eles também contribuem para as programações de produção anuais de forma que se possa aplicar uma taxa de desconto mediante o cálculo do valor presente líquido (VPL) da mina (Meagher, 2014).

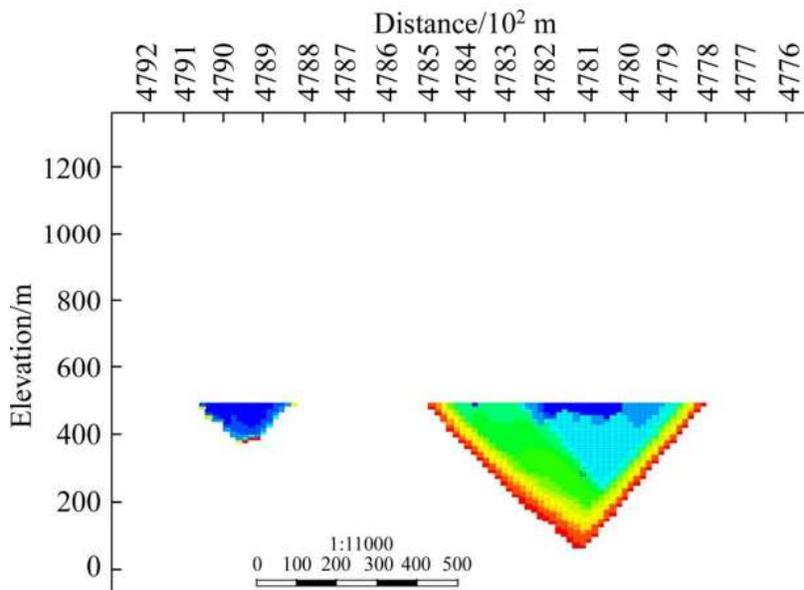
De acordo com Meagher, (2014) os métodos tradicionais de programação de produção são realizados usando *pushbacks* projetados para maximizar o valor econômico, ou conteúdo de metal a cada novo incremento.

Deve-se ressaltar que o VPL total que pode ser gerado a partir de uma operação de mineração depende fortemente do design do *pushback* que orienta a sequência de extração do minério e metal num certo período de tempo. É impossível gerar um cronograma ótimo de produção usando *pushbacks* projetados de forma não otimizada.

Uma técnica popular para produzir *pushbacks* é usar um algoritmo que produza uma cava final e executá-la várias vezes sobre o modelo do corpo de minério onde os valores do bloco econômico são reduzidos por uma série de fatores decrescentes. O corpo de minério é dividido em pequenas cavas, isso é feito aumentando o valor econômico toda vez que o algoritmo de otimização for usado para definir a cava. Em seguida, o VPL é calculado, considerando que cada cava é extraída de cima para baixo. A cava com VPL máximo é considerada a ideal.

Um exemplo de resultado pode ser visto na Figura 3 onde é possível ver uma seção de uma cava ótima colorida de acordo com 7 *pushbacks*. Esse plano garante que a produtividade da lavra respeitando os critérios da cava ótima, ao mesmo tempo que mantém a alimentação da usina. Dessa forma, a sincronia dos parâmetros produtivos garante a integração do processo de lavra e de beneficiamento

Figura 3 - Seção final da cava com diferenciação dos *pushbacks*.



Fonte - Esmail *et al.*, (2018)

Cada mina define a forma que foi feita o avanço, sendo feito do topo ao nível mais inferior da cava e ser simultâneo à duas ou mais frentes. A escolha da forma ou modo de como foi feito o avanço dependeu de como é a produção da mina e as metas a serem batidas.

Esses conceitos definem as dimensões, a geometria, o volume e o número de *pushbacks* que uma cava teria.

Essas etapas descritas nos Tópicos 2.4.2 até o 2.4.5 são a base para a operacionalização de uma cava que consiga mesclar os critérios técnicos de segurança maximizando o lucro operacional do depósito. Porém, para chegar nestes resultados é preciso um estudo profundo da geologia do local do depósito.

Para isso, no Tópico 2.5 será esclarecido como esta etapa igualmente importante é feita.

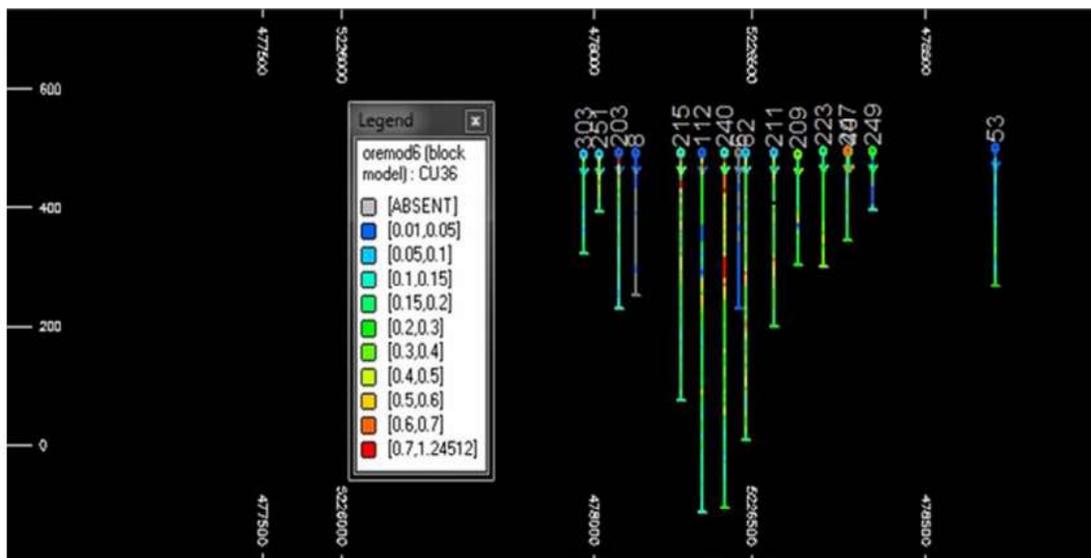
2.5. Modelo geológico

Como um dos objetivos deste trabalho é exatamente determinar os limites da mineralização para o desenvolvimento do modelo de blocos, este tópico abordou informações importantes desta etapa do projeto. Inicialmente foi discutido sobre os modelos geológicos e suas principais características.

Para determinar as extensões do depósito, é necessário interpolar os resultados obtidos nos dados de sondagem, determinando não apenas os teores em

diferentes alturas dos furos, mas também os limites da mineralização. No caso desta pesquisa, o que será usado para delimitar o que é estéril e o que é minério foi os limites entre as rochas. Na Figura 4 é possível ver a representação dos furos de sondagem e os diferentes teores de ferro em função da altura do furo de um estudo de caso.

Figura 4 - Modelagem de furos de exploração amostrados



Fonte - Esmail *et al.*, (2018).

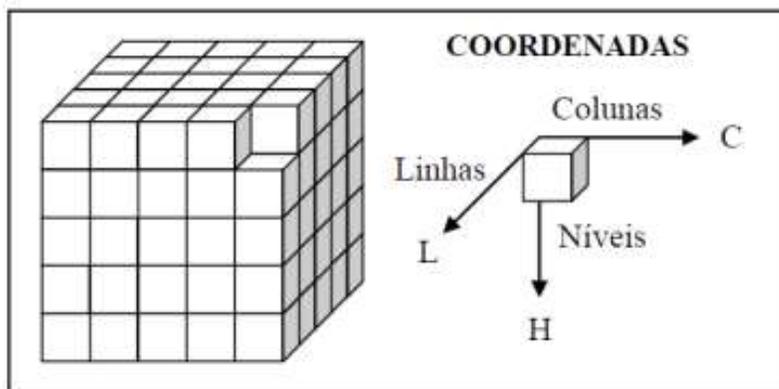
Um, modelo geológico é elaborado de tal forma que represente espacialmente feições geológicas segundo referências espaciais. O modelo geológico composto por blocos é uma representação tridimensional, por exemplo de uma mina, discretizando o volume de material em milhares ou milhões de blocos. (Espinoza, 2012)

Além disso, ele capaz de estimar a quantidade de material contido na reserva além da visualização clara dos depósitos. As dimensões dos blocos são dependentes da altura da bancada, da seletividade do material e do objetivo do depósito, sendo assim, é possível criar blocos com formatos variados nas suas três dimensões.

Em uma mina em que a seletividade do material não é requerida, é comum que os blocos sejam de dimensões maiores no seu comprimento e altura, mas quando a seletividade passa ser importante no modelo, é comum que esses blocos tenham um tamanho menor, indicando na prática, bancadas de menor altura, equipamentos de menor tamanho e a suavização dos teores. No entanto blocos reduzidos contribuem com o aumento do modelo, pelo fato de criar um maior número de blocos que por sua vez, aumentam o tempo de processamento (Andrade, 2014).

Uma mina pode ser considerada como um modelo de blocos quando cada bloco pode ser identificado por um sistema de coordenadas. Nesse sentido, na Figura 5, os eixos das coordenadas são representados por linhas, colunas e níveis

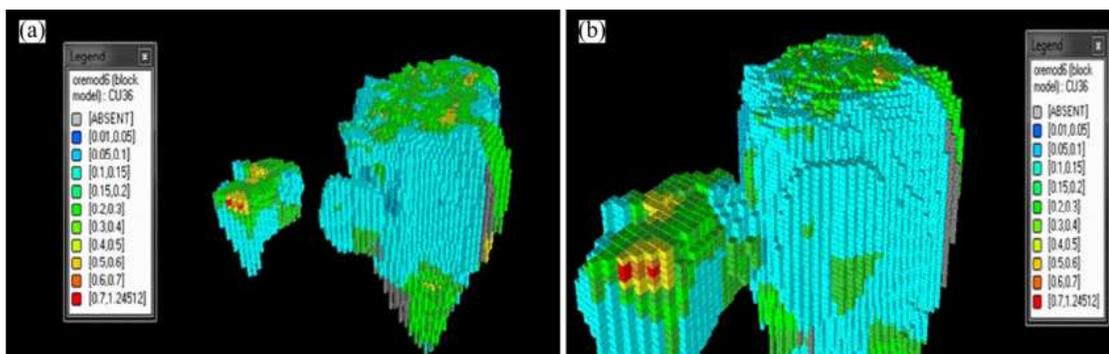
Figura 5 - Coordenadas no Modelo de Blocos.



Fonte – Andrade, (2014).

Um exemplo de modelos de blocos pode ser visto na Figura 6, nela está representado apenas os blocos classificados como minério de acordo com o teor de corte determinado por Esmaeil *et al.*, (2018).

Figura 6 - Modelo de bloco de depósito do estudo de caso: (a) Visão 1; (b) Visão 2



Fonte - Esmaeil *et al.*, (2018).

2.5.1. MODELAGEM DA MINERALIZAÇÃO

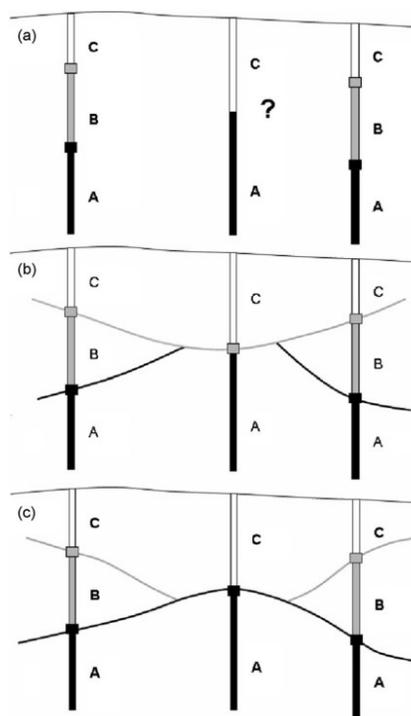
Os modelos geométricos 3D permitem compreender a geologia de um depósito e determinar o volume de minério de uma reserva (Houlding, 1994). Modelar consiste em inferir uma possível representação da realidade mesmo quando há poucos dados disponíveis.

Alternativamente, o modelo geológico 3D pode ser uma entrada para simulações usadas para quantificar processos físicos. Em ambos os casos, inferir a formação geológica em qualquer local do espaço 3D é fundamental.

A metodologia adequada para desenvolver um modelo 3D depende na complexidade da geologia e nos dados disponíveis. Estes dados podem ser originados de furos de sondagem, coleta de amostras superficiais, dados sísmicos e dados de análise química (Houlding, 1994).

A quantidade de dados nesses bancos de dados é fundamental para facilitar a interpretação da distribuição e continuidade das camadas mineralizadas. A falta de informações aumenta o grau de subjetividade já presente nestas estimativas. Um exemplo deste efeito pode ser visto na Figura 7, a incerteza na continuidade das diferentes camadas dificulta a determinação do perfil geológico. Com mais furos neste perfil, seria possível determinar com maior exatidão o comportamento das camadas.

Figura 7 - Hipóteses da determinação da continuidade das camadas.



Fonte - Calcagno *et al.*, (2008).

De acordo com a análise da Figura 7, é importante notar que um limite entre duas formações não é necessariamente atribuído à base ou ao topo de uma das duas mineralizações pois, uma sequência de erosão ou um hiato poderá ter ocorrido durante o período geológico de formação.

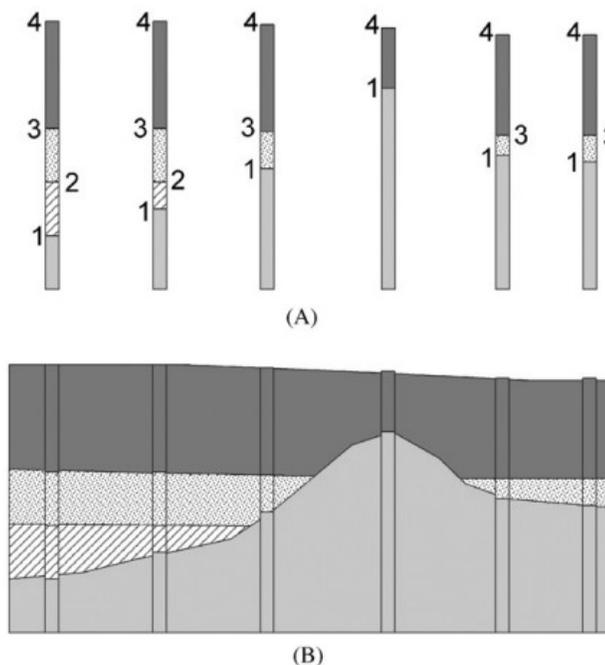
De acordo com Calcagno *et al.*, (2008) o princípio deste método consiste em usar regras geológicas para combinar vários campos potenciais:

1. Interfaces de formações geológicas tendo subparalelo os comportamentos são agrupados em séries. Um único potencial campo é usado para modelar uma série.
2. Uma cronologia define a ordem temporal da série dentro do modelo.
3. Um comportamento é definido para cada nova camada criada usando como base o comportamento das camadas cronologicamente mais velhos.

Além disso, o método de modelagem requer que os dados geológicos sejam gerenciados de forma que eles representam as interfaces geológicas relevantes. Por exemplo, limites entre formações geológicas em furos de sondagem (desviados ou não) que devem ser transformados em uma interface de pontos espaciais.

Com uma base consistente de dados, é possível determinar com boa confiança, a geologia envolvida na região de estudo como, por exemplo a ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Perfil geológico (A) identificações atribuídos aos contatos dos furos e (B) Resultado da interpolação dos limites de (A).

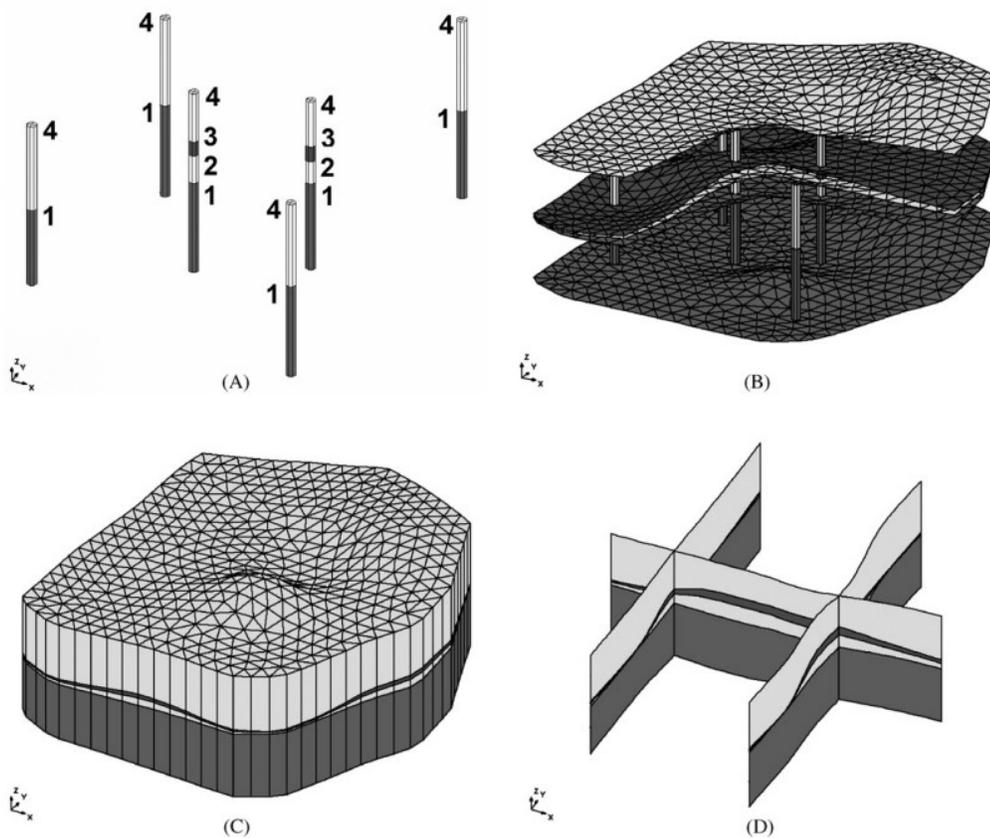


Fonte - Lemon e Jones (2003).

Estes princípios definem os pilares da interpretação geológica: um conjunto de formações geológicas, cronologicamente ordenadas, reunidos pela interação das diferentes camadas. O conhecimento obtido define a topologia do modelo permitindo mesclar as várias funções escalares interpolando a série e, assim, alcançando a geometria de um modelo 3D coerente (Calcagno *et al.*, 2008).

Com a junção de diferentes perfis de sondagem num sistema de 3 dimensões, é possível extrapolar os princípios anteriores para formar um corpo com volume e determinar uma estimativa do corpo mineralizado como pode ser visto, um exemplo na Figura 9.

Figura 9 - (A) Furos com limites atribuídos, (B) cortes das interpolações dos limites, (C) sólido criado a partir da interpolação (D) seções transversais do sólido.



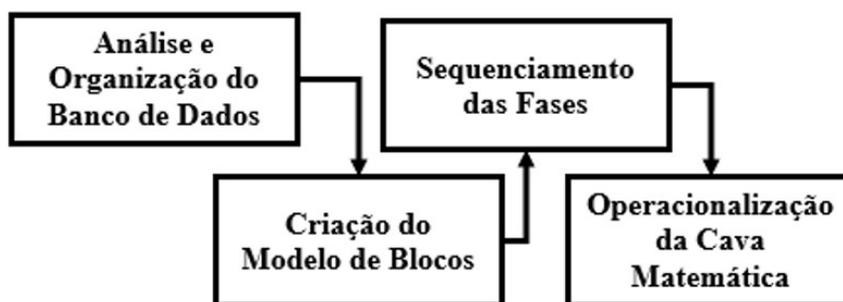
Fonte - Lemon e Jones (2003).

3. METODOLOGIA

Para elaboração do estudo foi utilizado um dos módulos da Datamine® conhecido como Studio OP® desenvolvida para aplicações em operações de mineração em cavas à céu aberto. A escolha deste módulo foi devido a ampla gama de ferramentas para a obtenção dos resultados necessários para o desenvolvimento desta pesquisa em conjunto com a facilidade e dinamismo em seu manuseio.

As etapas principais da pesquisa foram organizadas em: Análise e organização do banco de dados, Criação do modelo de blocos, cava final, sequenciamento das fases e Operacionalização da cava como pode ser visto na Figura 10

Figura 10 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Em relação aos dados utilizados, as informações usadas foram obtidas de uma campanha de sondagem levantada pela equipe de sondagem e topografia junto com os dados de produção coletadas ao longo do tempo de operação na empresa Capivari.

3.1. Análise e Organização do Banco de Dados

Os dados utilizados para esta pesquisa foram obtidos nas campanhas de sondagem e topografia da mineração Capivari, mesclando informações antigas e novas obtidas recentemente para a possível expansão da operação.

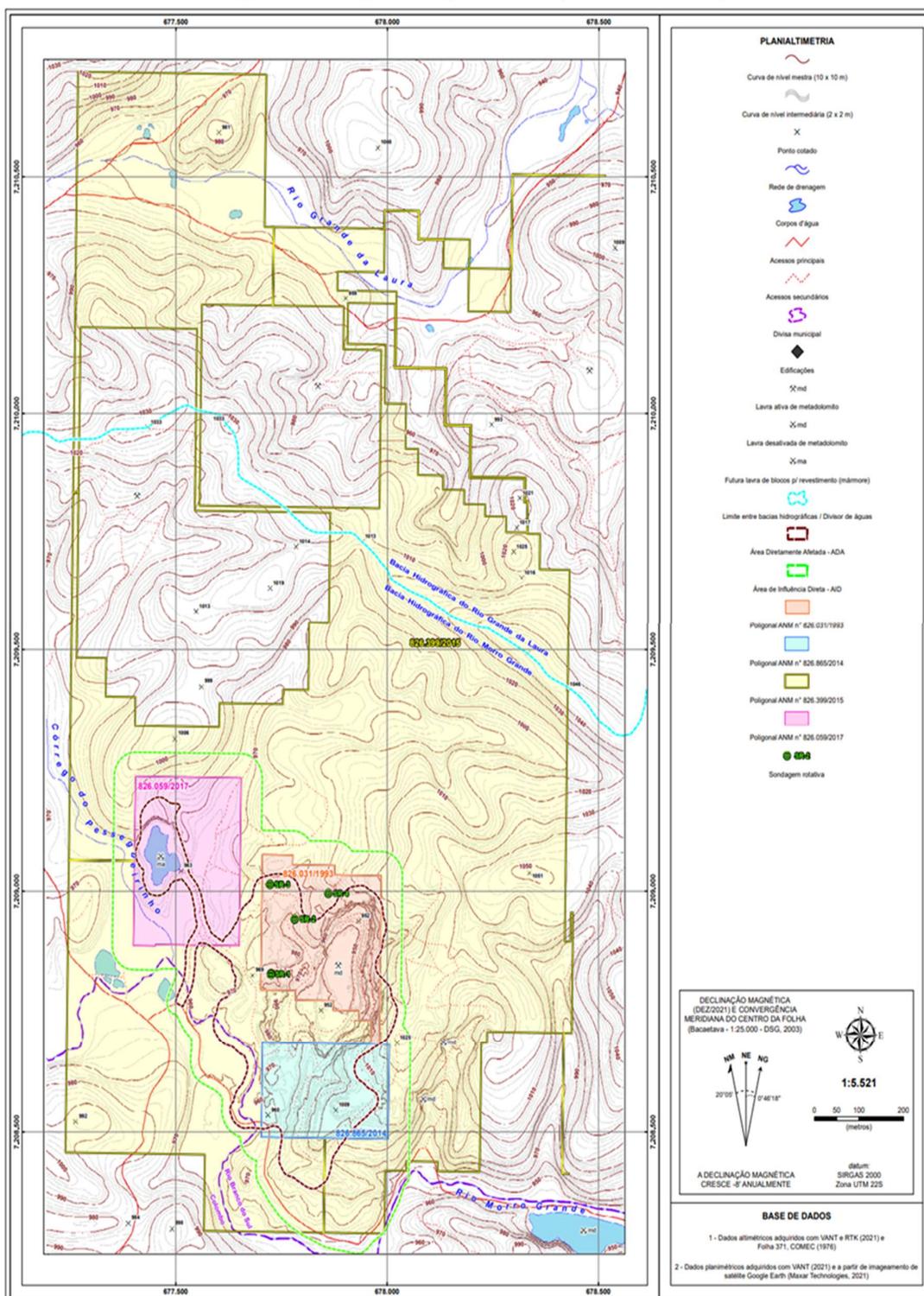
A mina é localizada no Estado do Paraná na Rua Campina dos Pintos - Campina dos Pintos, Rio Branco do Sul, ao norte da cidade de Curitiba. Na Figura 11 é possível ver a imagem aérea do empreendimento.

Figura 11 - Imagem de satélite da Mina da Empresa Capivari.



A região dos estudos e os furos de sondagem podem ser vistos na Figura 12. O local da possível expansão das operações está localizada ao norte da cava já operada pela empresa.

Figura 12 - Mapa da região da campanha de sondagem.



As informações fornecidas pela empresa foram organizadas para facilitar o entendimento como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados dos furos de sondagem.

DADOS DOS FUROS DE SONDAGEM			
Furo:	SR 01	Inclinação	60°
Data inicial	26/04/2021	Prof. Final	74,05 m
Data final	22/05/2021	Rec. Total (m)	41,58 m
UTM	7.208.829,22-N / 677.725,15-E	Rec. Total (%)	56.15%
Altitude	967,9 m	ANM n°	826.031/1993
Dir./Mergulho	00° N	Portaria de Lavra	236/2009
Furo:	SR 01^a	Inclinação	60°
Data inicial	26/04/2021	Prof. Final	20,00 m
Data final	22/05/2021	Rec. Total (m)	6,94 m
UTM	677.725,28-E / 7.208.828,26-N	Rec. Total (%)	34.70%
Altitude	967,6 m	ANM n°	826.031/1993
Dir./Mergulho	00° N	Portaria de Lavra	236/2009
Furo:	SR 02	Inclinação	60°
Data inicial	13/05/2021	Prof. Final	39,58 m
Data final	21/05/2021	Rec. Total (m)	17,28 m
UTM	7.208.942,14-N / 677.781,21-E	Rec. Total (%)	43.66%
Altitude	967,8 m	ANM n°	826.031/1993
Dir./Mergulho	00° N	Portaria de Lavra	236/2009
Furo:	SR 03	Inclinação	60°
Data inicial	26/05/2021	Prof. Final	52,80 m
Data final	02/06/2021	Rec. Total (m)	27,85 m
UTM	7.209.014,00-N / 677.722,85-E	Rec. Total (%)	52.74%
Altitude	977,0 m	ANM n°	826.031/1993
Dir./Mergulho	00° N	Portaria de Lavra	236/2009
Furo:	SR 04	Inclinação	60°
Data inicial	08/06/2021	Prof. Final	47,70 m
Data final	16/06/2021	Rec. Total (m)	32,50 m
UTM	7.208.955,65-N / 677.860,41-E	Rec. Total (%)	68.13%
Altitude	983,2 m	ANM n°	826.031/1993
Dir./Mergulho	N0° / 60°	Portaria de Lavra	236/2009

Além da sondagem, a prospecção geofísica foi realizada através de Caminhamento Elétrico 2D (Método Eletroresistivimétrico, Arranjo Dipolo-Dipolo), com o objetivo de determinar, indiretamente, a espessura do manto de alteração da rocha, estimando-se assim a profundidade do topo da rocha sã na área prevista para a expansão da lavra, localizada na porção leste da frente de lavra atual.

A Figura 13 apresenta as etapas realizadas sequencialmente: o levantamento foi iniciado com a abertura de picadas com o auxílio de um receptor GNSS/RTK. Em seguida foi realizada a aquisição de dados geoeletricos ao longo de duas seções de caminhamento elétrico. A técnica foi executada na direção N -S. A LG-1 teve comprimento de 440 m, e a LG-2 220 m, totalizando assim 660 m de investigação geoeletrica.

Figura 13 - Abertura das picadas para execução das linhas geofísicas (A e B); aquisição dos dados geofísicos na LG-1 (C e D); aquisição dos dados geofísicos na LG-2 (E); e resistivímetro utilizado durante o levantamento (F)



Afim de atualizar a planialtimetria da área do empreendimento e capturar imagens atuais do local, foram realizados, pela Geoplanejamento SS Ltda, voos com Drone/VANT utilizando o equipamento *Phantom 4 Advanced*, da fabricante DJI. Para o georreferenciamento adequado das fotos capturadas pelo drone foi necessário a implantação de alvos em toda a área do voo, estes alvos tiveram suas coordenadas

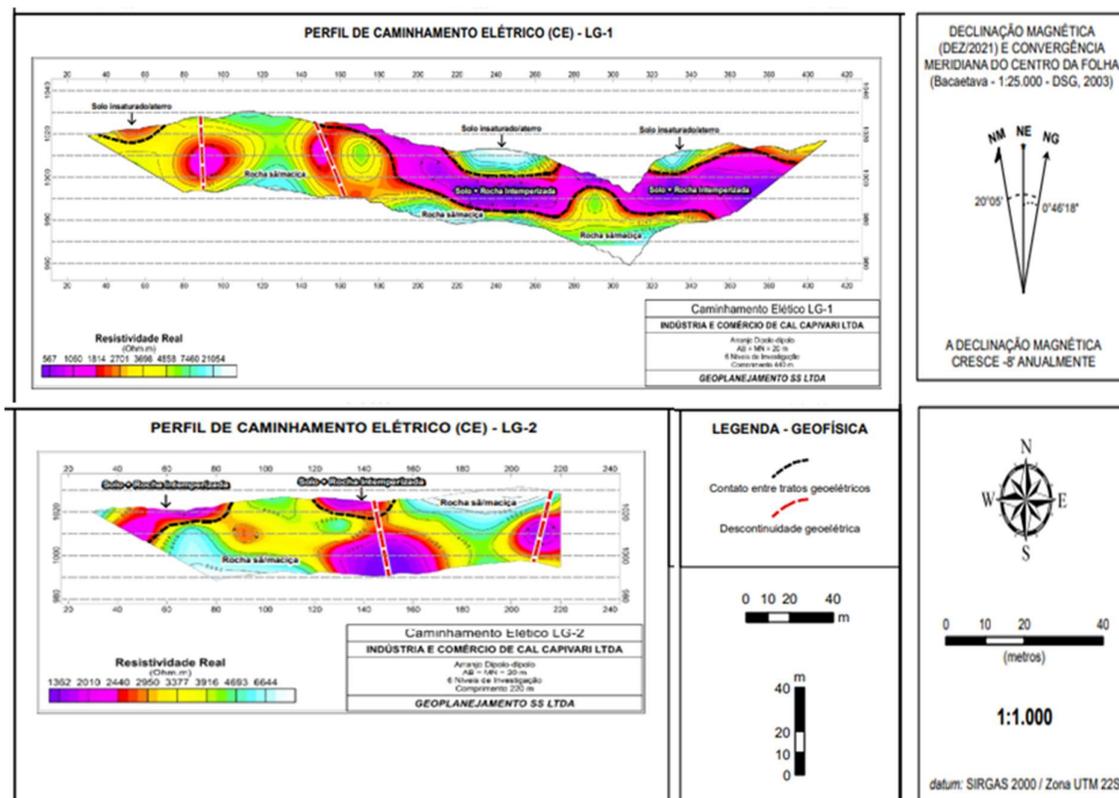
(X, Y e Z) adquiridas com um receptor GNSS/RTK da marca Topcon, este procedimento possibilitou o incremento da precisão do mapeamento realizado com VANT.

As fotografias aéreas adquiridas com o VANT foram tomadas a uma altitude de 200 m, com direção do voo E-W e N-S (crosshatch 3D), e velocidade média do voo de 15 m/s; o espaçamento entre as linhas de voo foi de aproximadamente 130 m, numa área total recoberta de 1.010.000 m²; ao todo foram adquiridas 411 fotos, com sobreposição frontal de 75% e lateral de 65%.

Após feita a verificação e a organização dos dados, foi efetuada a importação para o *software* para a criação do modelo de blocos. Porém, antes de criar o modelo de blocos é necessário determinar os limites da região mineralizada.

Com o modelo da mineralização, foi possível criar o modelo de blocos utilizando os parâmetros de operação já consolidados na operação da mina. Sendo assim, foi possível determinar as dimensões dos blocos levando em conta tanto as condições geológicas do local, quanto os volumes de produção esperados e determinar o número destes de acordo com as extensões da área estudada. Os resultados dessas medições podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14 - Resultados geofísicos e de planialtimetria da região estudada.



Um ponto importante que deve ser comentado foi a determinação das reservas medidas e estimadas da mina. Tanto os volumes anteriores determinados nos antigos Relatórios Finais de Pesquisa e Planos de Aproveitamento Econômico (PAE) referentes a cada um dos processos (826.031/1993; 826.865/2014; 826.399/2015 e 826.059/2017) quanto dos novos volumes foram determinados utilizando o volume dos blocos estimados no modelo multiplicado pela densidade média do material.

Para determinação da nova reserva explotável, foi utilizado um fator de correção de 20% em cima da reserva estimada. Esse fator foi utilizado baseado nos PAEs anteriores citados no parágrafo anterior. Esse valor foi determinado utilizando os conhecimentos prévios adquiridos na operação da mina, baseado principalmente nas características vistas nos materiais amostrados no local.

3.2. Criação do modelo de blocos

A dimensão dos blocos do modelo foi definida de acordo com os parâmetros vigentes da operação da mina. Desta forma, se torna mais fácil mesclar e comparar as novas informações obtidas com os dados antigos da operação da mina. Os blocos ficaram com dimensões de 10x10x10 metros

Com o modelo de blocos feito, é possível determinar alguns parâmetros técnicos da reserva, como o volume de rocha da mineralização de calcário dolomítico e a massa do depósito.

É importante salientar que para o desenvolvimento deste planejamento, os valores econômicos associados a extração dos blocos de calcário dolomítico possui um papel secundário na determinação do que é estéril e o que é minério. Isso ocorreu por causa da forma que as sondagens foram desenvolvidas neste empreendimento.

Como apenas os limites da mineralização são considerados para a determinação da geometria do corpo de minério, todos os blocos do modelo contidos nesta geometria foram considerados como minério de calcário e tudo externo a isto foi considerado estéril.

Unindo o *grid* de blocos com a geometria da mineralização, Tópico 3.1, foi possível desenvolver o modelo de blocos e o domínio geológico necessário para próxima etapa do planejamento, o sequenciamento das fases.

3.3. Sequenciamento das fases

Com o modelo de blocos criado, foi possível criar o plano de extração dos blocos classificados como minério. Utilizando os dados geotécnicos, limitações

especiais referentes a área de operação do empreendimento e as capacidades dos equipamentos da mina, foi possível determinar o sequenciamento da mineralização de calcário.

Esse sequenciamento precisa respeitar fatores técnicos para garantir não apenas os parâmetros econômicos da lavra, como custo de extração e preço de venda da tonelada de calcário, mas também os parâmetros de segurança e o perímetro legal da extração.

Em relação à segurança, o principal fator levado em conta é o ângulo geral do talude. Quanto maior for este ângulo, menor foi a diluição do minério e menor foi os custos com o deslocamento de estéril, porém ângulos maiores geram um aumento da instabilidade dos taludes, podendo gerar acidentes na operação da cava.

Já em relação aos limites da cava, é necessário respeitar os limites legais da extração e as áreas operacionais como estradas de acesso, regiões para o empilhamento e carregamento de estéril e minério, além é claro dos demais locais operacionais fixos da mina.

Todas essas informações foram carregadas no *software* para o sequenciamento correto da reserva. Cada bloco sequenciado foi então agrupado em avanços (*pushbacks*) para organizar melhor o plano de extração anual, respeitando a geometria das cavas intermediárias e a produção máxima planejada.

Por fim, com esses dados foi possível passar para etapa de operacionalização da cava, esta tem como principal objetivo planejar as estruturas que garantiram a estrutura física para a exploração do calcário na região.

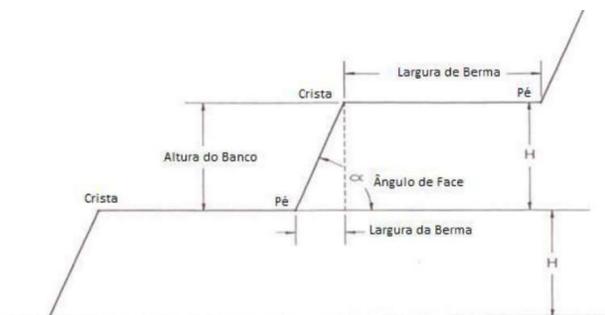
3.4. Operacionalização da cava

Migrando os dados obtidos no sequenciamento das fases, foi possível operacionalizar a nova cava. Para isto, os últimos dados geométricos foram inseridos no *Studio OP*.

A primeira informação está relacionada com a geometria das bancadas do talude. Os ângulos das bancadas foram escolhidos de acordo com os dados obtidos pela área de geotecnia maximizando a estabilidade das bancadas equilibrando este parâmetro com o aumento da diluição do minério extraído.

Além disso, as alturas das bancadas e o comprimento das bermas também foram determinados de acordo com o tamanho dos equipamentos de carga e transporte. Estas variáveis devem ser adequadas para a passagem e operação desses equipamentos de forma segura e eficiente. Estes parâmetros podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15 – Geometria dos taludes



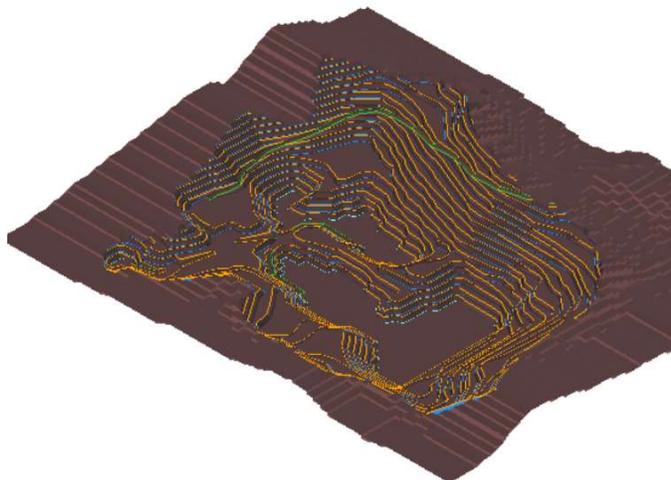
Fonte – Adaptado de Hustrulid e Kuchta (2013).

Por fim, para ligar os diferentes níveis das bancadas do talude, os acessos foram determinados respeitando a topografia da região, garantindo que os equipamentos de transporte consigam circular em todas as diferentes bancadas.

Para criar estes acessos, variáveis como inclinação e largura das rampas foram determinados de acordo com o tamanho e capacidade dos equipamentos de transporte. Além disso, os pontos de início e fim destes acessos foram determinados para minimizar o tempo de percurso entre a frente de lavra e as pilhas de descarga.

Um exemplo de uma cava operacional pode ser visto na Figura 16, nela é possível ver as rampas de acesso (verde) em relação às bancadas de uma cava final.

Figura 16 – Cava operacional final.



Fonte – Campos *et al.*, (2018)

Seguindo todos estes passos descritos no Tópico 3, foi possível obter os resultados do planejamento da cava. Estes resultados estão apresentados no Tópico 4.

3.5. Dimensionamento de frota

Com levantamento de dados realizados no empreendimento juntamente com os demais já obtidos da operação diária, para a o cálculo do dimensionamento de frota foram consideradas o somatório das seguintes variáveis: capacidade de carga do caminhões, fator de enchimento, número de caçambas para cargas dos caminhões, tempo de carregamento, tempo de descarregamento, tempo de descarga, velocidade média carregado, velocidade média descarregado, tempo médio de ida e volta, tempo de ciclo, volume transportado pelos caminhões dia, volume transportado pelos caminhões mês.

Salienta-se que os cálculos para obtenção do dimensionamento de frota foram feitos buscando maximizar a utilização dos equipamentos já presentes no local, uma vez que os investimentos no setor de carregamento e transporte não são o foco da empresa em um primeiro momento.

A lista a seguir apresenta os equipamentos e suas funções. Todos presentes na tabela 3 são operantes no empreendimento e os quais serão alvo de uma análise para

uma possível realocação caso necessário.

Tabela 3 Lista geral de equipamentos de grande porte da Mineração Cal Capivari

ATIVIDADE	EQUIPAMENTO
Perfuração	Compressor - GRANDEVER
	Compressor ATLAS - XA520
	Perfuratriz Pneumática - WOLF - PW5000
	Perfuratriz Pneumática - WOLF - PW5000
Carregamento	Escavadeira Hidráulica - CAT - 336LSP
	Escavadeira Hidráulica CASE - CX220B
	Pá-carregadeira - CASE - 821E
	Pá-carregadeira - CASE - 721E
	Pá-carregadeira - SEM - 656D
	Trator Esteira CAT - D6K
Transporte	Caminhão Basculante VOLKSWAGEN - 31320
	Caminhão Basculante FORD CARGO 2629
	Caminhão Basculante SCANIA - 420
	Caminhão Basculante MERCEDES-BENZ - 1113
	Caminhão Basculante MERCEDES-BENZ Atron 2629
	Veículo Utilitário FIAT Estrada Endurance CS
Expedição	Retroescavadeira - CAT - 416
	Balança Fixa - DIGITRON

A definição da DTM entre a planta de beneficiamento e as frentes de lavra foram calculadas usando a média das distâncias entre elas, assim sendo o centro geométrico da praça o ponto de referência.

Em relação as escavadeiras (CAT336, Case 220B), ambas foram dimensionadas utilizando o volume de movimentação anual dividido em volume hora assim resultando em um valor possível de estar dentro da capacidade nominal dos equipamentos de carregamento.

Após o carregamento a etapa de transporte foi dimensionada usando dados de sua capacidade nominal descontando fator de enchimento das caçambas. Os tempos de ciclo já existentes no memorial de dados da empresa foram úteis para calcular o tempo necessário para o transporte do minério e conseguir um valor em volume de minério transportado.

3.6. Considerações especiais metodológicas

Dois aspectos importantes que foram abordados no próximo tópico desse trabalho é o desenvolvimento dos depósitos de estéril e a unidade de beneficiamento mineral. Os dois depósitos de estéril já haviam sido planejados anteriormente e no desenvolvimento da cava original do empreendimento. Seguindo as diretrizes iniciais do plano, essas duas estruturas foram expandidas para se adequar aos novos volumes esperados.

A usina de beneficiamento seguiu as mesmas condições dos depósitos de estéril, como já está implantada na região do empreendimento, apenas foi necessária uma revisão do planejamento anterior.

Por fim, foram apresentados também o dimensionamento dos equipamentos de carregamento e transporte para o desenvolvimento da frente de lavra. Essas condições de dimensionamento foram determinantes para a produção mensal de calcário e desenho da cava para viabilizar o trânsito e operação dos equipamentos.

Devido ao uso de equipamentos de grande porte nas operações de lavra, além das bancadas e praças de trabalho, é preciso estabelecer as leiras de segurança e largura das vias sobre essas bancadas. Para largura das vias de fluxo cruzado o valor de 2,5 vezes a dimensão do maior equipamento em relação a sua largura, já para vias de mão única foi adotado o valor de 1,5 vezes.

Já as leiras são formadas por material fragmentado e depositado junto às cristas das bermas. Em termos de dimensionamento, propõe-se que a altura da leira (h) seja função da altura da bancada (H) e esta por sua vez seja em função da largura total da bancada (L_T).

As expressões que correlacionam esses elementos do dimensionamento das leiras de proteção são:

$$h = 1 + 0,04.H \text{ (m); e}$$

$$L_T = 4,5 + 0,20.H \text{ (m)}.$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para apresentar os resultados deste trabalho, duas seções distintas foram criadas. A primeira tem como principal objetivo apresentar e discutir os resultados geológicos do estudo. Já a segunda parte trata do sequenciamento e operacionalização da cava.

4.1. Levantamento geológico

As imagens aéreas geraram os produtos de imageamento Ortofotomosaico com resolução de 5,00 cm/pixel e o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 20,00 cm/pixel. O geoprocessamento dos dados adquiridos com VANT possibilitou a confecção de curvas de nível detalhadas de 2 x 2 m, além do Modelo Digital de Terreno (MDT) e mapas de relevo sombreado, declividade e hipsométrico.

Com esses dados, foi possível entender melhor o relevo nas poligonais cadastrados da ANM (Agência Nacional de Mineração) que englobam o perímetro do empreendimento.

A poligonal ANM nº 826.399/2015 engloba a região com as maiores altitudes da área de interesse, sendo a cota máxima de 1.051 metros acima do nível do mar (m.s.n.m), como observado na Figura 17a. Já as menores cotas são verificadas nos vales das drenagens locais (Rio Grande da Laura, Córrego do Pessegueirinho e Rio Morro Grande), com um valor mínimo de 935 m.s.n.m. identificado no Rio Grande de Laura. Com isso, ocorre na área um gradiente de 116 metros (Figura 17a e d).

As declividades (Figura 17c) mais baixas situam-se na faixa de 0-20%, e correspondem a relevos plano a suave ondulados, e ocorrem nas planícies aluviais das drenagens locais e nos sopés das elevações. As declividades superiores a 45%, e que correspondem a relevos montanhosos e escarpados, estão distribuídas nas cristas e encostas dos morros da região. De forma geral, o relevo de toda a área é caracterizado como sendo predominantemente ondulado a forte ondulado, com declividades entre 8 e 45%.

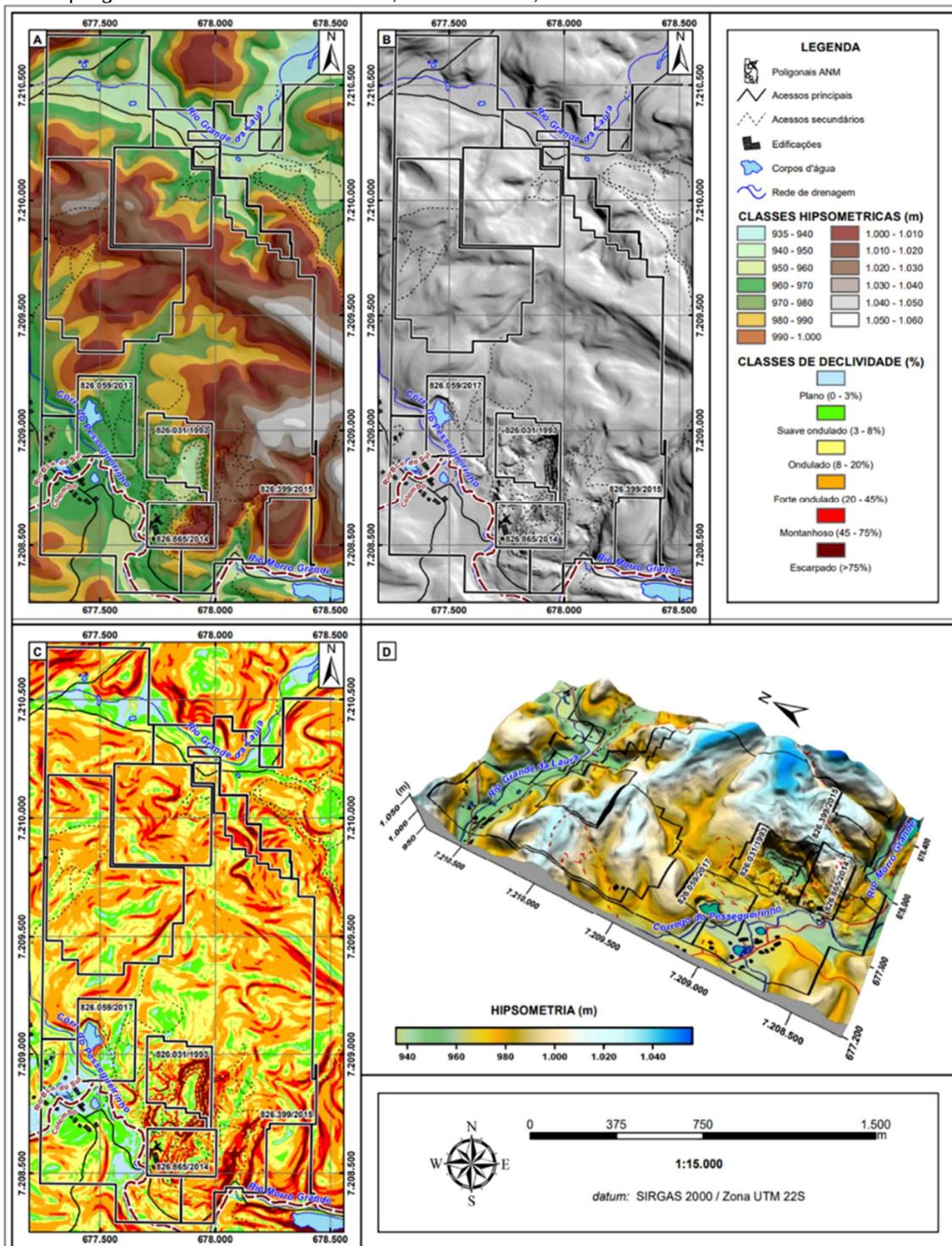
No interior da poligonal ANM nº 826.031/1993 são identificadas declividades elevadas e grandes gradientes, em função das atividades de lavra que ocorrem no local, incluindo bancadas e depósito de estéril. A poligonal nº 826.865/2014, mais ao sul, também apresenta variações expressivas em sua declividade e em seu gradiente, principalmente em razão do depósito de estéril existente nesta poligonal.

A poligonal nº 826.059/2017 que apresenta relevo mais suave, com relevo predominante suave ondulado e gradiente que não ultrapassa os 20 metros, entretanto, são observados paredões em uma antiga área de lavra que atualmente encontra-se paralisada (Figura 17).

A poligonal ANM de nº 826.399/2015 é a que possui menor interferência antropogênica em seu relevo, destacando-se cristas alongadas de direção NW e

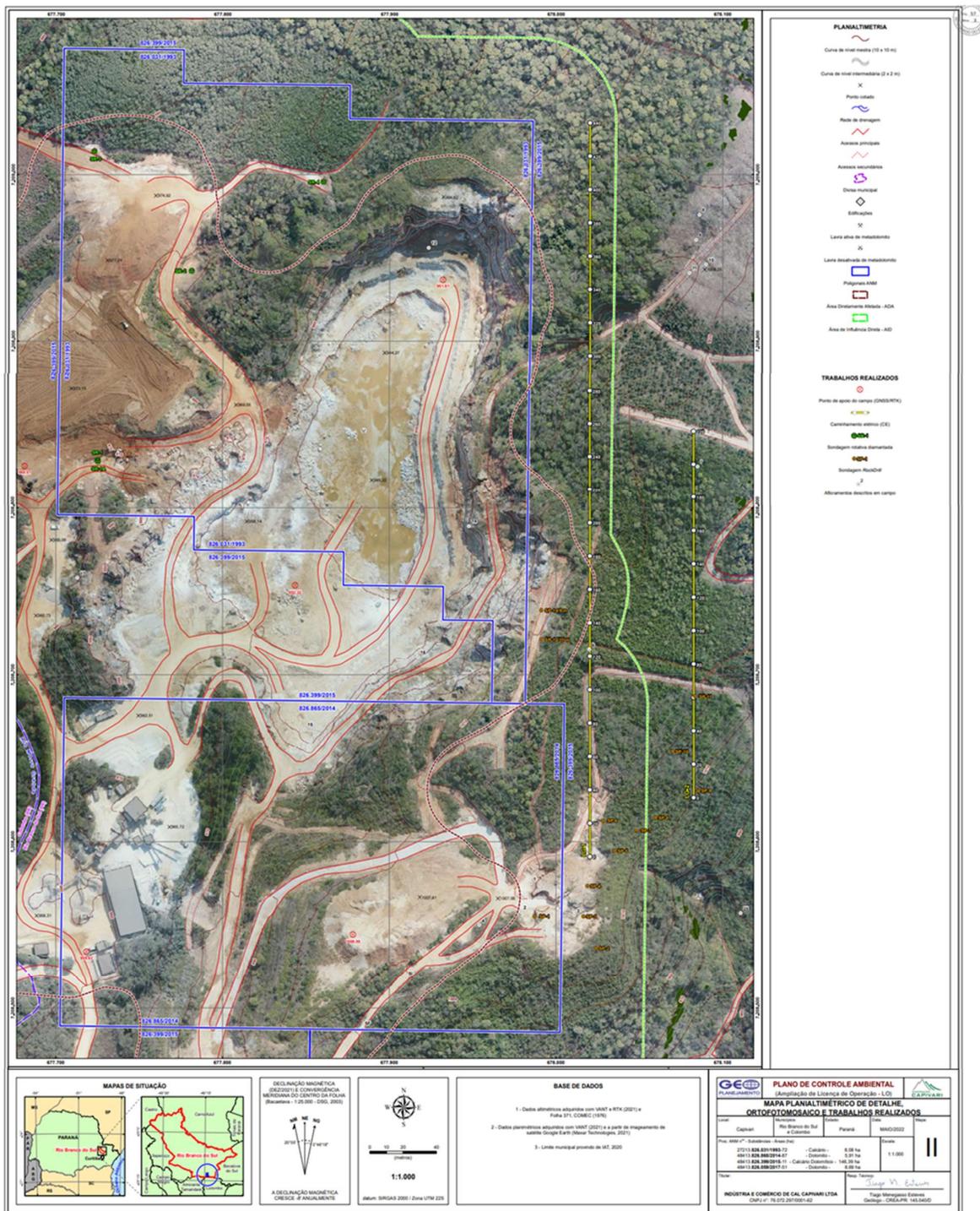
planícies aluviais localizadas nas porções norte e sul da poligonal.

Figura 17 -Mapas temáticos ilustrando a geomorfologia das áreas em tela: Mapa hipsométrico (A), Relevo sombreado (B), Mapa de declividade (C) e Modelo Digital de Terreno - MDT (D) das poligonais ANM nos 826.031/1993, 826.865/2014, 826.399/2015 e 826.059/2017.



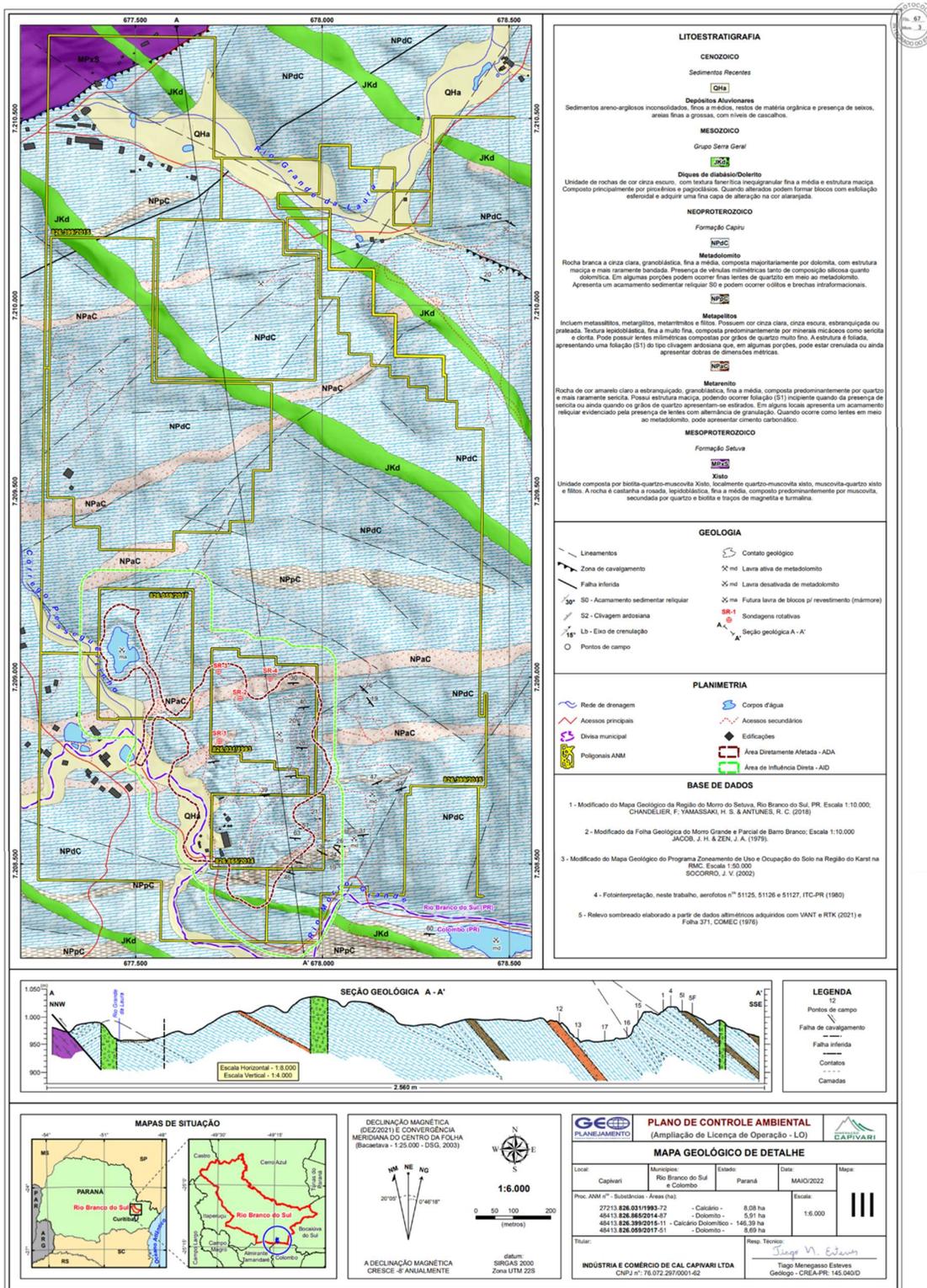
Já os resultados da planialtimetria podem ser vistos na Figura 18. Estes resultados foram importantes para determinar as dimensões de algumas estruturas operacionais como drenagens e acessos de trabalho.

Figura 18 - Mapa planialtimétrico da mina.



Por fim, utilizando dados históricos da geologia da região, com os dados obtidos da sondagem e do caminhamento elétrico 2D feitos foi possível construir o mapa da Figura 19. Este serviu de base para as análises litológicas da região.

Figura 19 - Mapa litológico do entorno da mina.



Essas informações foram a base para o desenvolvimento do plano de lavra, discutido no Tópico 4.2 desta pesquisa.

4.2. Resultados do planejamento de lavra

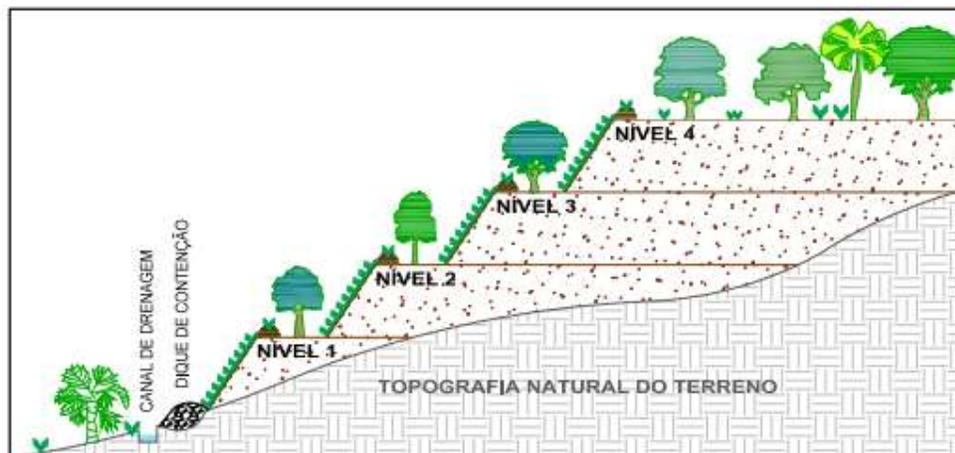
A primeira etapa a ser considerada para o início das operações foi planejar a utilização dos depósitos de estéril para receber o material oriundo da operação desse novo local de operação. Como na área em análise o minério está exposto em grande parte da mina em exploração, há pouca cobertura de solo a ser removida. Já em algumas áreas projetadas para o avanço da lavra, os trabalhos de limpeza são extensivos, sendo que grande parte deste material foi incorporado na manutenção de estradas e para recuperação de áreas após sua exaustão.

A empresa utiliza atualmente dois depósitos de estéril em atividade, localizados nas coordenadas centrais UTM (SIRGAS 2000):

- UTM 677.889,90/ 7.208.543,83 Depósito de estéril (BF-1);
- UTM 677.745,75/ 7.208.980,61 Depósito de estéril (BF-2).

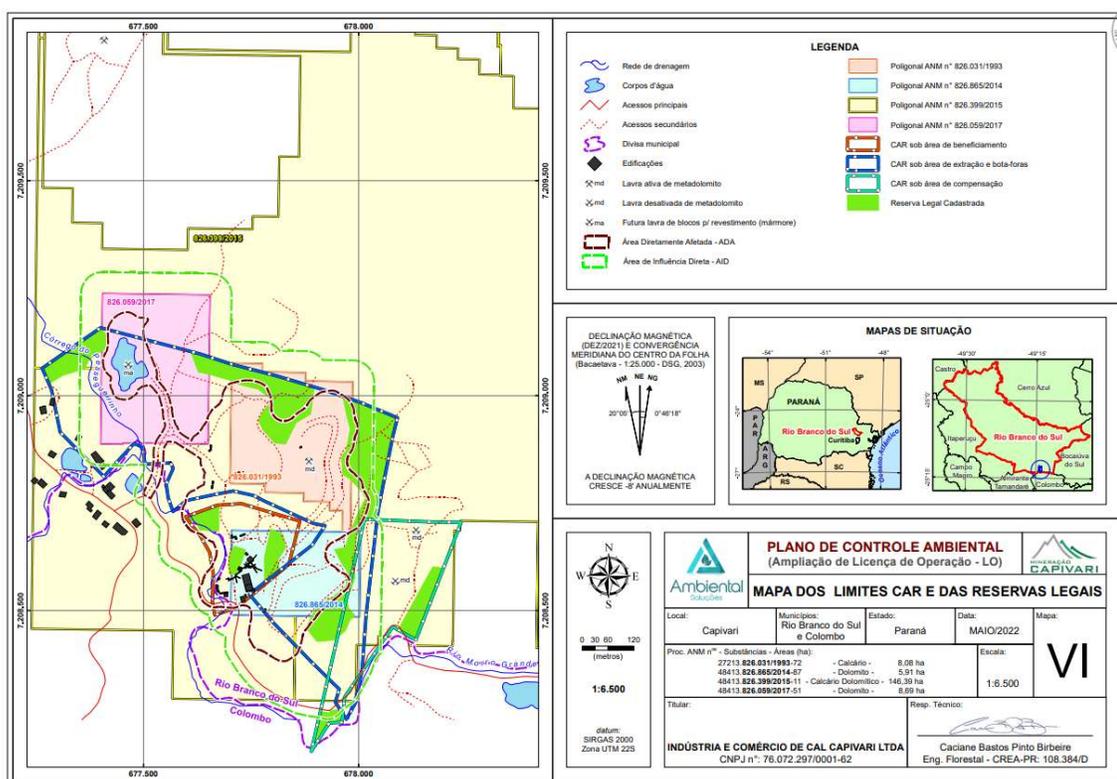
O desenvolvimento do depósito de estéril ocorreu em fases ascendentes e sobrepostas, visando maior estabilidade estrutural e redução do impacto visual. Para tal, os trabalhos de recuperação devem prever o plantio de vegetação de rápido desenvolvimento (gramíneas), para o aumento de sua estabilidade (Figura 20).

Figura 20 - Modelo de evolução do depósito de estéril em fases ascendentes e o processo de recuperação.



O desenvolvimento do depósito de estéril foi realizado segundo as Normas Reguladoras de Mineração (NRM), mais especificamente, a NRM 19, tópico 19.1, relativa a depósitos de substâncias sólidas. A Figura 21 ilustra a localização dos depósitos de estéril em atividades da empresa.

Figura 21 - Localização dos depósitos de estéril em atividade na Mineração Capivari.



As áreas de depósito de estéril encontram-se em desenvolvimento, e por este motivo os processos de recuperação/estabilização ainda não foram concluídos.

A área indicada como depósito de estéril 1 (BF-1) se encontra em fase final de construção/ampliação, desta maneira, se planeja o início do processo de estabilização e reconfiguração de taludes para que seja dado sequência ao processo de recuperação florística do referido depósito de estéril.

O depósito de estéril 2 (BF-2) encontra-se em sua fase inicial, com taludes e

bermas iniciais ainda em construção. A Figura 22 apresenta os aspectos relacionados a localização e conformação do depósito de estéril 1 (BF-1).

Figura 22 - Na sequência de imagens é possível observar a configuração atual do depósito de estéril 1 (BF-1): vista do piso superior do depósito de estéril (A); posição do Depósito de estéril 1 (BF-1) em relação à área de extração (seta em vermelho) (B); e a configuração dos taludes, onde é possível observar a base do depósito de estéril, já em processo de recuperação (C e D).



Na Figura 23 a seguir está presente os aspectos relacionados a localização e conformação do depósito de estéril 2 (BF-2). Vistas da localização e conformação do Depósito de estéril 2 (BF-2): Construção dos níveis do depósito de estéril, sendo que a base dos patamares ainda irá avançar, por isso não se iniciaram os trabalhos de recuperação.

Tão logo a base chegar no limite de avanço do depósito de estéril os trabalhos de recuperação deverão ser iniciados (Figura 23A); base do talude sem a presença de processos erosivos aparentes, bem como a vegetação composta por bracatingal que faz limite com o depósito de estéril (Figura 23A B e C); e detalhe da formação do talude do piso superior do depósito de estéril em construção (Figura 23A D).

Figura 23 - Vistas da localização e conformação do Depósito de estéril 2 (BF-2) aparentes, bem como a vegetação composta por bracingal que faz limite com o depósito de estéril (B e C); e detalhe da formação do talude do piso superior do depósito de estéril em construção (D).



4.2.1. CÁLCULO DAS RESERVAS E RESULTADOS QUÍMICOS

As reservas anteriores aqui adotadas constam nos Relatórios Finais de Pesquisa e Planos de Aproveitamento Econômico (PAE) referentes a cada um dos processos. Desta forma, destaca-se abaixo a reserva para cada poligonal da ANM:

a) 826.031/1993: É a detentora da lavra atual. As reservas foram apresentadas no Relatório Final de Pesquisa, em 1999:

- Reserva Medida (RM) = 1.951.345 t
- Reserva Indicada (RI) = 772.147 t
- Reserva Explotável (Re) = 1.756.210 t

b) 826.865/2014: Com base no Relatório Final de Pesquisa apresentado em 2001, e no PAE elaborado em 2003, tem-se que seguintes reservas:

- Reserva Medida (RM) = 450.002 t
- Reserva Indicada (RI) = 602.929 t
- Reserva Explotável (Re) = 405.002 t

c) 826.399/2015: Apresentado no Relatório Final de Pesquisa em 2018, as reservas calculadas para essa área são:

- Reserva Medida (RM) = 27.888.250 t
- Reserva Medida (RM) = 30.956.320 t
- Reserva Explotável (Re) = 25.099.425 t

d) 826.059/2017: As reservas dessa área foram obtidas a partir do Relatório Final de Pesquisa e PAE, apresentados em 2001 e 2004, respectivamente. Para a lavra de blocos para revestimento foi realizada uma nova cubagem.

- Reserva Medida (RM) = 241.212 t
- Reserva Indicada (RI) = 383.637 t
- Reserva Explotável (Re) = 217.091 t

As características químicas do minério foram obtidas a partir de 14 amostras, encaminhadas ao Laboratório LAMIR/UFPR para análise química dos teores dos óxidos maiores e perda ao fogo (Fornazzari Neto, 2018).

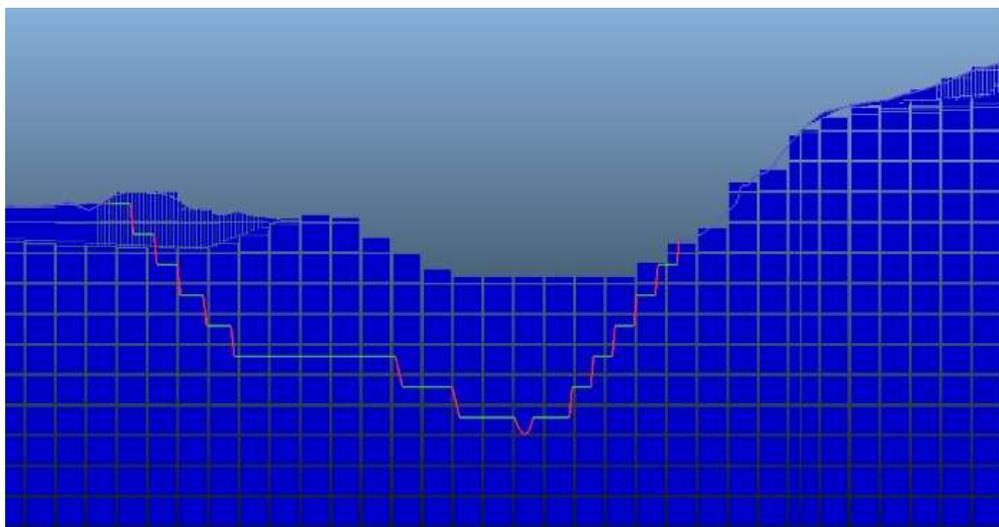
As amostras analisadas apresentaram homogeneidade ao se tratar dos teores de CaO e MgO; por outro lado, a sílica apresentou variação de 1,63 a 22%. Todos os outros óxidos ficaram abaixo de 1% na composição das amostras, e a perda ao fogo ficou na média dos 43% (Tabela 3).

A soma entre CaO e MgO é >50% na maioria das amostras e a razão CaO/MgO mostrou-se relativamente homogênea, caracterizando a rocha positivamente para a produção de cal.

A Figura 24 mostra a plotagem das amostras num diagrama composicional ternário (CaO/MgO/SiO₂), onde todas as amostras analisadas se concentram no campo dos dolomitos.

Utilizando essas informações foi possível criar o modelo de blocos necessário para dimensionar as reservas da nova cava. Como cada bloco possui em média 1000m^3 de volume e utilizando uma densidade de $2,5\text{ t/m}^3$ foi estimada uma reserva medida de $32.973.274\text{ t}$. Aplicando o fator de correção de 20%, a reserva explotável alcançou o valor de $27.477.729\text{ t}$. Na Figura 25 é possível ver o perfil da modelo de blocos criado. (seção WNW-ESE)

Figura 25 - Perfil do modelo de blocos (WNW-ESE).



4.2.2. PLANO DE LAVRA

Em função das características geológicas e topográficas das jazidas, o método de lavra estabelecido é o de mineração a céu aberto em cava aprofundada por estar próximo a uma cava já em operação. Considera-se primordialmente, que para tal, o minério de metadolomito se apresenta em boa espessura vertical ao longo de todos os pontos prospectados (sondagens e mapeamento) e mecanicamente consistentes.

Considere-se ainda que o plano de exploração da jazida é estabelecido segundo o volume máximo viável de ser extraído da reserva. Em decorrência disso, todos os trabalhos de infraestrutura ficam diretamente relacionados com essas possibilidades trazidas pelo minerador.

Em termos de equipamentos para a lavra, a empresa seguiu disponibilizando seu maquinário próprio, já lotados e operacionais no local. A operação da nova área será feita em conjunto com a frente de lavra atual. Perfuratrizes, compressor de ar, escavadeiras hidráulicas sob esteiras e carregadeiras sob pneus para o carregamento de caminhões basculantes com capacidade de até 15 t , os quais foram realizados nos

trabalhos internos de transportes e estocagem.

Para a conjuntura em questão, conforme o dimensionamento dos investimentos necessários (descritos a frente) é prevista uma produção anual total de 300.000 t/ano de minério R.O.M (Run of Mine).

O metadolomito extraído pela lavra é direcionado para a planta de beneficiamento, que com os devidos ajustes, permitirá a obtenção de produtos como: pedra classificada para produtores da cal, britas, pó para corretivo agrícola de solo, além de agregados mais simples, como pedrisco e rachão, aplicáveis na construção civil em geral (estradas, aterros, etc).

Para dimensionamento da carga horária, considera-se um ritmo de trabalho de dois turnos: um matinal de 8 horas ao dia, indo das 07h00 às 15h00 e outro vespertino, também de 8 horas ao dia, indo das 15h00 às 23h00, ambos periodizados em 6 dias semanais.

No contexto anual, isso resulta que descontados os domingos (53 dias/ano), feriados (10 dias/ano), dias impeditivos por chuva intensa (15 dias/ano) e paradas não previstas (6 dias/ano), obtenha-se um regime de 281 dias/ano. Chegando assim em praticamente 4.496 horas programadas ao ano.

Nesse contexto, pode-se estimar o seguinte esquema de produção:

- Anual: 300.000 t;
- Mensal: 25.000 t;
- Diário: 1.067 t; e
- Horário: 67 t.

Foi descontado desse montante aproximadamente uma perda de 5% de materiais inadequados: ultrafinos, bem como de rejeitos do processo, por não se enquadrarem às condições de comercialização.

Foi previsto que inicialmente, a lavra siga seu fluxo por onde o minério já está mais acessível. Portanto, para a continuidade dos trabalhos mineiros, atenuou-se o máximo possível a necessidade de realizarem-se cortes de vegetação, decapeamentos de solo e aumento volumétrico de depósito de estéril.

A metodologia de extração segue de forma relativamente simples, dado que a verticalidade e os espaços das praças formadas garantem a lavra no curto prazo. Cabe salientar que se trata de uma jazida com pouca cobertura estéril, porém, nos primeiros 20 a 30 metros de camada de minério, são significativos os volumes de espaços vazios devido a dissolução do metadolomito e o consequente preenchimento

rolamento continuado de material. Também pretende-se instalar, na crista e no pé das bancadas, canais de drenagem que auxiliem no escoamento das águas e assim dificultem a ação de processos erosivos e escorregamentos.

Devido ao uso de equipamentos de grande porte nas operações de lavra, além das bancadas e praças de trabalho, é preciso estabelecer as leiras de segurança sobre essas bancadas. Essas leiras são formadas por material fragmentado e depositado junto às cristas das bermas.

Consideradas as alturas das bancadas usualmente utilizadas na mineração por cava aprofundada (10 a 12 m) tem-se o seguinte intervalo ($h-h'$ e L_T-L_T') para o tamanho das leiras:

$$h = 1 + 0,04 \cdot 10 = 1,40 \text{ m para leira;}$$

$$L_T = 4,5 + 0,2 \cdot 10 = 6,50 \text{ m para largura da bancada;}$$

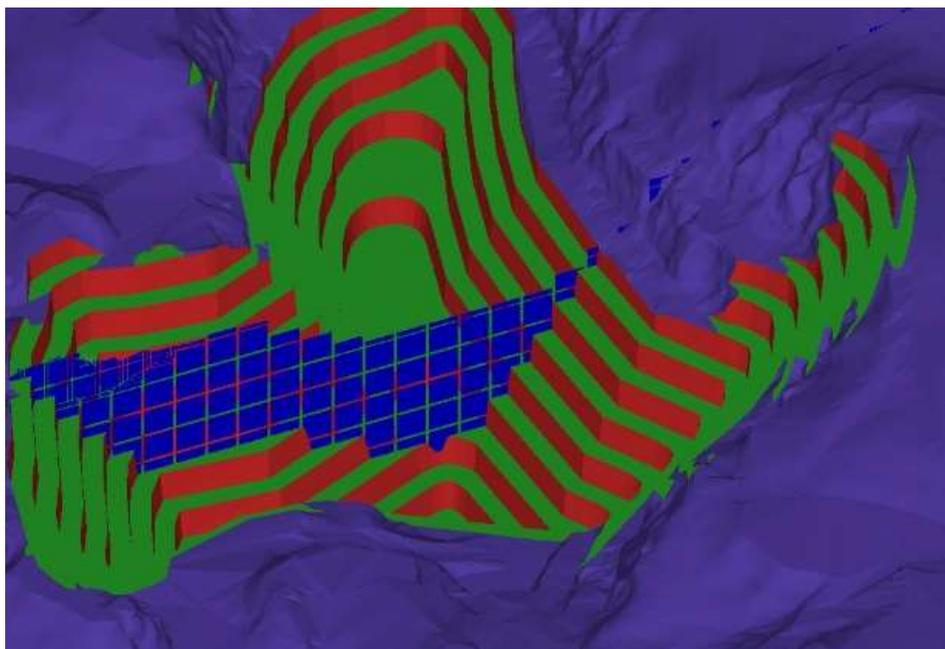
$$h' = 1 + 0,04 \cdot 12 = 1,48 \text{ m para leira;}$$

$$L_T' = 4,5 + 0,2 \cdot 12 = 6,90 \text{ m para largura da bancada.}$$

Sendo assim, admite-se que para uma bancada com altura de 10 m, a largura desta deve se aproximar de 6,50 m, enquanto que para uma bancada de 12 m, a largura é de aproximadamente 6,90 m. Conforme citado anteriormente, no projeto atual, pretende-se manter uma altura de 10 m para a bancada, com largura mínima de cerca de 7 m, por motivos de segurança.

Com essas informações, foi possível criar o design da cava operacional da mina. O resultado pode ser visto na Figura 27. Nela estão apresentados a cava após os primeiros 9 anos de operação da lavra e o perfil do modelo de blocos (WNW-ESE) na topografia do local.

Figura 27 - Cava após os primeiros 9 anos de operação.



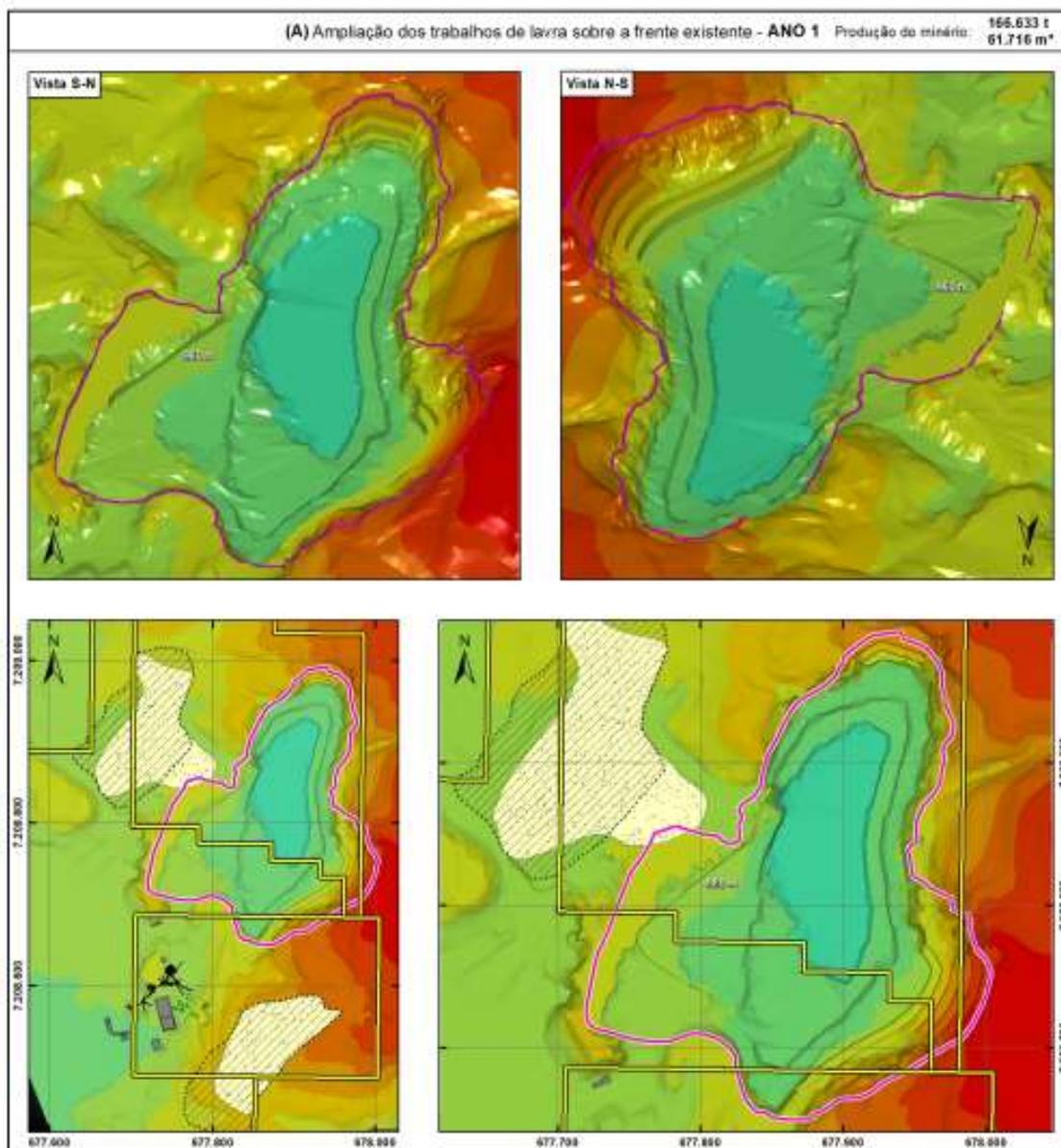
O planejamento levou em conta os primeiros 9 anos de lavra para uma determinação primária do plano de lavra. Ao longo dos anos, esse planejamento foi avançado para a criação do plano de longo prazo da mina. Os *pushbacks* anuais podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - *Pushbacks* dos 9 primeiros anos de operação.

ANO	PRODUÇÃO ANUAL (t)
1	166.633
2	299.927
3	298.566
4	298.995
5	300.421
6	298.733
7	297.556
8	297.802
9	303.720

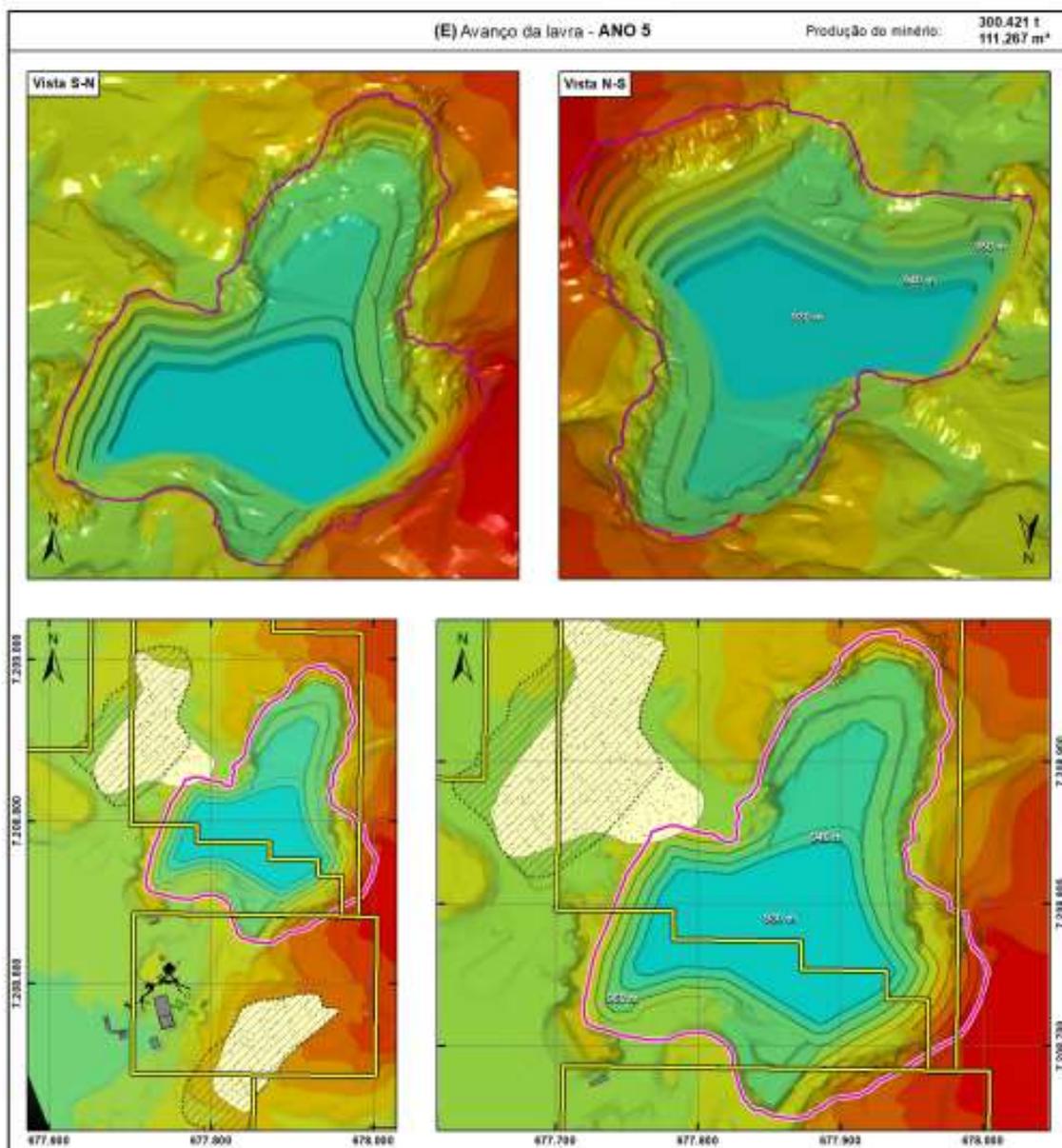
Na Figura 28, é possível ver a cava esperada após o primeiro ano de operação. Essa primeira cava acompanhou o desenvolvimento já feito da frente de lavra atual desenvolvida pela empresa.

Figura 28 - Cava após 1 ano de lavra.



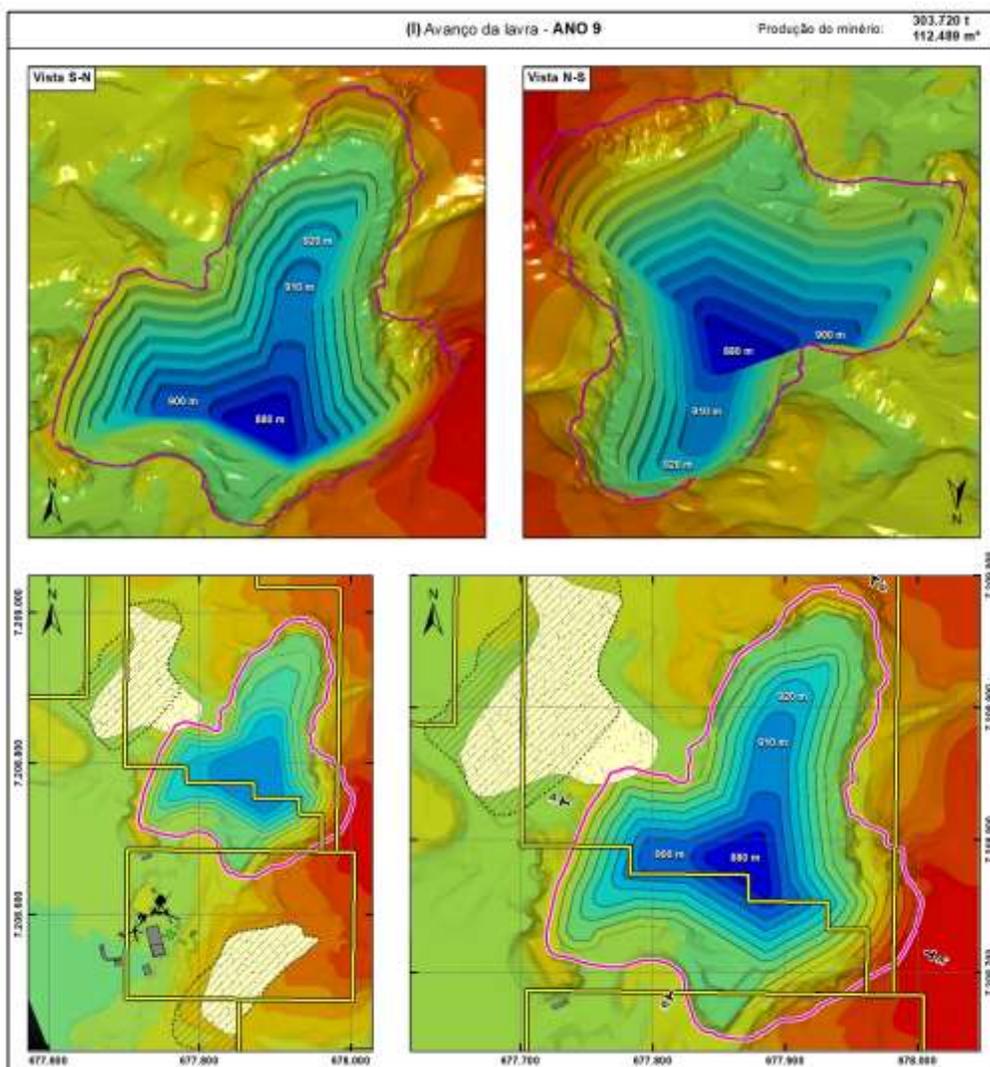
Após 5 anos de lavra, espera-se que tenha sido extraída 1.364.542 t de material dolomítico. Na figura 29 é possível ver o desenho da cava após esse período.

Figura 29 -Cava após 5 anos de lavra.



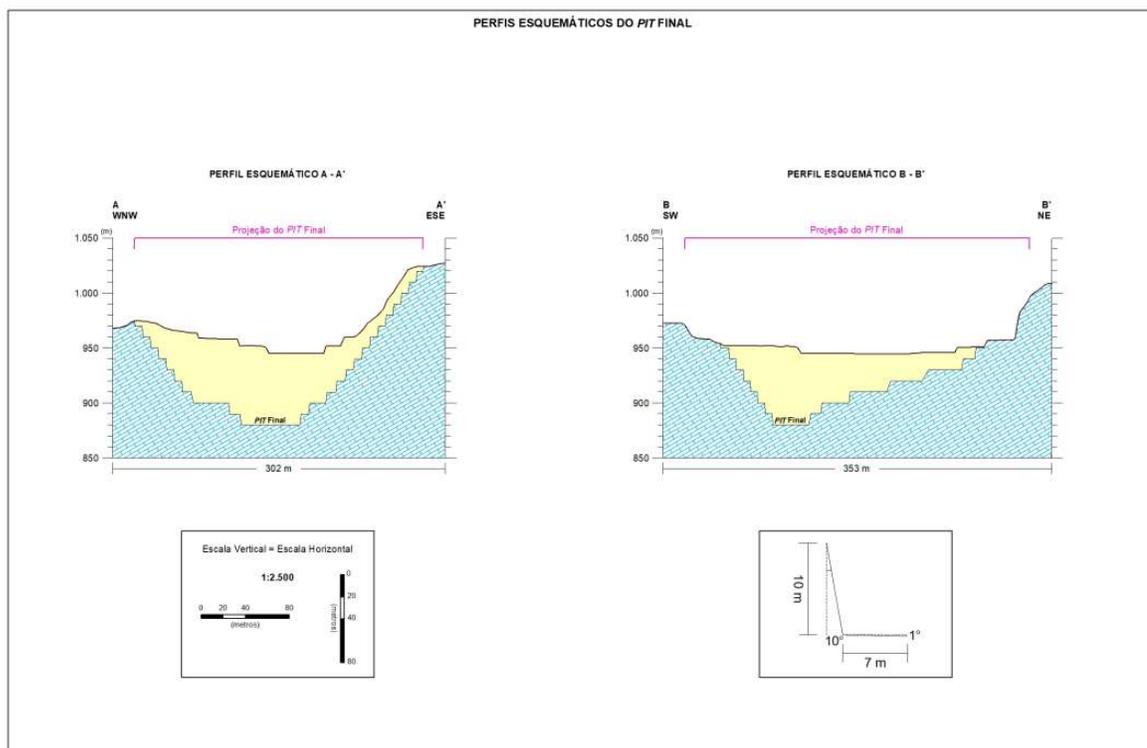
Por fim, após 9 anos de lavra, espera-se que tenha sido extraída 2.562.354 t de material dolomítico. Na figura 30 é possível ver o desenho da cava após esse período.

Figura 30 - Cava após 9 anos de lavra.



Os perfis da cava após esses 9 primeiros anos de operação podem ser vistos na Figura 31. Nela estão apresentadas duas seções nas direções ESE e NE.

Figura 31 - Perfil da cava após 9 anos de operação.



Tendo o plano de lavra desenvolvido foi possível dimensionar a frota necessária para operacionalizar os volumes de produção propostos no Tópico 4.2.2.

4.2.3. CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Os equipamentos de lavra consistirão em cinco caminhões traçados (duplo eixo com 15 t de capacidade) para o transporte; de duas escavadeiras hidráulicas: Caterpillar 336L e CX220B.

A primeira escavadeira possui 36 toneladas de peso e caçamba de até 2,5 m³, ofertando boa estabilidade e segurança na operação de desagregar o capeamento argiloso do metadolomito, os quais se encontram em estado de compactação natural não muito consistente.

Já o segundo modelo CX220B possui 22 toneladas e possui caçamba de 1,0 a 1,5 m³. Para apoio às escavadeiras e serviços na planta de beneficiamento, conta-se com três pás-carregadeiras sob pneus. Para serviços de depósito de estéril e preparação de frente de lavra, a frota do Cal Capivari conta com um trator de lâmina frontal sob esteira, Caterpillar modelo D6K.

Quanto ao sistema de perfuração para elaboração da malha de desmonte por explosivos e extração de metadolomito, a empresa possui duas perfuratrizes, dois compressores e um rompedor hidráulico, que foram aproveitadas nessas etapas.

Parte dos equipamentos foram trocados por novos o que exigirá investimentos adicionais que foram compensados pela redução significativa dos custos de manutenção mecânicas, baixa reposição de peças e diminuição das paralisações durante a lavra, que comumente ocorrem quando se utilizam equipamentos usados.

O minério após o desmonte por explosivos, foi carregado nos caminhões (já dimensionados) para transporte à unidade de beneficiamento, DMT 400 m do centro da frente de lavra atual.

Com relação ao dimensionamento das escavadeiras, o volume de material a ser carregado para transporte à planta de beneficiamento tem:

- Volume anual de minério a ser carregado: 109.100 m³; e
- Volume horário a ser carregado: 24,26m³/h.

O cálculo da capacidade efetiva foi feito utilizando um tempo de carga por caçamba de 30", já o tempo de descarga e manobra foi de 15" totalizando 45" para um ciclo completo. Utilizando uma taxa de 80 ciclos/hora e uma capacidade de 1,1m³ por caçamba, a capacidade efetiva foi de:

- Fator de eficiência da operação: 80%;
- Fator de enchimento: 80%;
- Capacidade efetiva da caçamba: $1,1\text{m}^3 \times 0,80 \times 0,80 = 0,704 \text{ m}^3$; e
- Capacidade efetiva de carregamento: $0,704\text{m}^3 \times 80 \text{ ciclos/hora} = 56 \text{ m}^3/\text{hora}$.

De acordo com o nível de produção prevista, o equipamento atua na carga do minério à uma taxa horária de 24,26 m³/hora (65,51 t/hora). Assim sendo, as escavadeiras com caçambas de 1,1 m³ (CAT 336LSP ou CASE CX220B), de maneira independente, atendem à necessidade de carregamento previsto.

O dimensionamento extrapolado fica justificado por conta da robustez dessa categoria de escavadeira frente ao trabalho em maciço rochoso metadolomito e ao desmonte mecânico do capeamento estéril, o que exige estabilidade e força mecânica, bem como a possibilidade de haver extração simultaneamente em duas frentes de lavra.

Após o desmonte e carregamento do minério da frente, ocorre o transporte até a unidade de beneficiamento situado 400 m de distância. Conforme anteriormente dimensionado, foram utilizados caminhões basculantes de 15 t (6 m³).

O dimensionamento do número de caminhões necessários ao transporte dos minérios é demonstrado da seguinte forma:

- Capacidade de carga dos caminhões: 6 m³;
- Fator de enchimento: 90%;
- Número de caçambas para carga dos caminhões: $(6 \text{ m}^3 \times 0,90) \div 1,1 \text{ m}^3 = 4,9$ caçambas (5 caçambas por caminhão);
- Tempo de carregamento de duas viagens (2 caminhões): $10 \text{ ciclos} \times 45'' = 7,5'$
- Tempo de descarga e manobra: 2';
- Velocidade média carregado: 30 km/h = 500 m/minuto;
- Velocidade média descarregado: 40 km/h = 670 m/minuto;
- Tempo médio de ida e volta: $(400 \text{ m} \div 500 \text{ m/minuto}) + (400 \text{ m} \div 670 \text{ m/minuto}) = 0,8 + 0,6 = 1,4'$;
- Tempo de ciclo = $3,75' + 2' + 1,4' = 7,15'$;
- Volume transp. Pelos caminhões/dia = $((8\text{h}+8\text{h}) \times 60') \div 7,15' \times 5,4\text{m}^3 = 725\text{m}^3/\text{dia}$;
- Volume transportado pelos caminhões/mês: $(281 \text{ dias} / 12 \text{ meses}) \times 725 \text{ m}^3/\text{dia} = 16.977 \text{ m}^3/\text{mês}$.

O que satisfaz a demanda mensal de 9.090 m³ (25.000 t) da produção. O dimensionamento extrapolado deve-se à necessidade de trabalhos de preparação de frentes, descobertas, trabalhos em acessos e drenagens e demais manutenções da mina, bem como o apoio logístico à usina de beneficiamento.

4.2.4. BENEFICIAMENTO E EQUIPAMENTOS

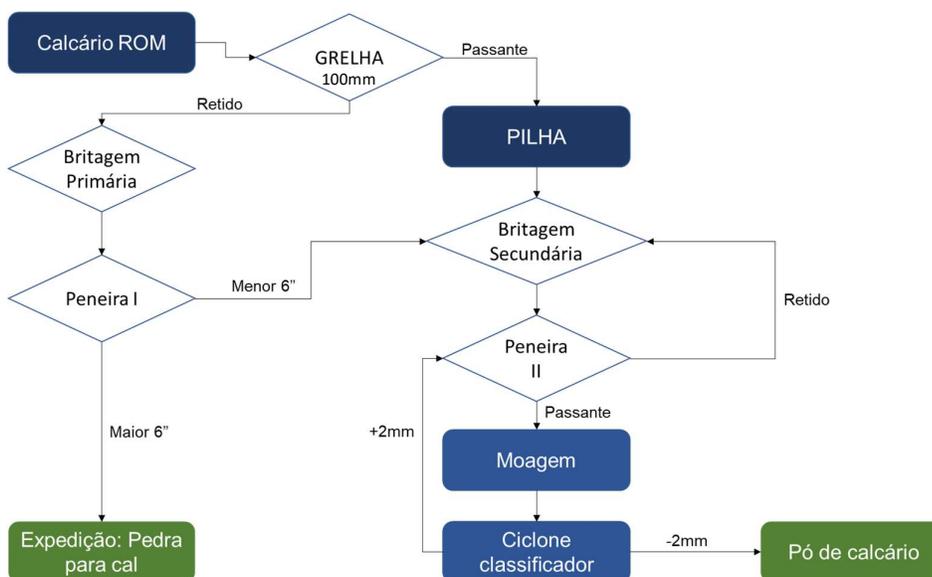
No presente momento, a Mineração Cal Capivari busca expandir o fornecimento de metadolomito para a fabricação da cal e pó de metadolomito para corretivo de solo.

Para tal, a empresa pretende executar reformulações e expansões em sua planta de beneficiamento, com obras já avançadas de instalação de moinhos de martelo em conjunto com sistema de classificação granulométrica apropriado e filtro manga para controle da qualidade do ar.

Para tanto, nesse momento, a estratégia é estabelecer uma planta de beneficiamento em circuito fechado, fazendo com que após a obtenção e estocagem

da fração de pedra +6" para o mercado da fabricação da cal, as operações se concentram em alimentar com granulometria adequada a operação de moagem e classificação para obtenção de pó metadolomito para corretivo de solo. A seguir, apresenta-se na Figura 32 o fluxograma representativo do processo descrito, visando a produção dos produtos pedra para cal e pó de metadolomito.

Figura 32 - Fluxograma representativo da planta de beneficiamento.



Cabe salientar que a concepção da planta não se limita a estratégia descrita acima. Apesar da necessidade de pequenas alterações na planta de beneficiamento atual, a mesma foi capaz de produzir a tradicional gama de produtos do ramo de agregados, tanto grãos como miúdos (britas nºs 1, 2, 3, pedrisco e rachão).

Para tanto, a Mineração Cal Capivari conta com equipamentos da atual planta de beneficiamento e com equipamentos novos em instalação. São eles:

- Grelha alimentadora vibratória SXA 0940;
- Britador primário de mandíbula SXBM 9060;
- Peneira primária 4.000 x 1.500 Faço;
- Rebritador 120 x 40 Faço;
- Peneira 1.000 x 2.600 Faço;
- Moinho MM5/8 G1 Tamandaré;
- Moinho 65 IMETEC;
- Filtro de mangas BRCAL PER; e

- Balança fixa Digitron.

Utilizando os dados descritos anteriormente, foi possível estimar a vida útil da reserva prevista. Esta parte está descrita no Tópico 4.2.5.

4.2.5. VIDA ÚTIL E DANOS AMBIENTAIS

Estima-se uma produção mensal de 25.000 t/mês ou 300.000 t/ano de metadolomito, destinados à utilização na produção de cal e como corretivo agrícola. Considerando uma reserva explotável de 27.477.729 t e tendo em vista a produção estimada em 25.000 t/mês, a vida útil para o depósito é de aproximadamente 92 anos.

Neste plano procedeu-se o sequenciamento de lavra para os próximos 9 anos neste sequenciamento foram utilizados dados de sondagens para a confecção do modelo de blocos e em seguida foram inseridos os parâmetros das bancadas, como altura, inclinação e largura, também foi estabelecido um limite para o *pit* final visando a preservação das áreas de reserva legal. Como resultado deste sequenciamento, obteve-se a Tabela 6 onde foram previstas as produções anuais médias decorrentes da extração de metadolomito.

Tabela 6 – Planejamento quantitativo de minério extraído ao longo do período de nove anos.

ANO	VOLUME EXTRAÍDO (m ³)	MASSA EXTRAÍDA (t)	PRODUÇÃO ANUAL (m ³)	PRODUÇÃO ANUAL (t)
1	61.716	166.633	61.716	166.633
2	172.800	466.560	111.084	299.927
3	283.380	765.126	110.580	298.566
4	394.119	1.064.121	110.739	298.995
5	505.386	1.364.542	111.267	300.421
6	616.028	1.663.276	110.642	298.733
7	726.234	1.960.832	110.206	297.556
8	836.531	2.258.634	110.297	297.802
9	949.020	2.562.354	112.489	303.720

As escavações do solo necessárias para a abertura da cava, o desmonte de rocha para a conformação das bancadas e a construção de depósito de estéril proporcionam a descaracterização da paisagem geomorfológica local e alterações pedológicas, entretanto, este impacto ocorre de forma localizada e restrita.

Devido às profundidades que a cava a céu aberto atinge neste tipo de empreendimento, a reconstituição da morfologia original após a exaustão da mina é

praticamente impossível. A redução destes impactos, durante a operação de lavra, pode ser realizada a partir da implantação de cortinas vegetais para isolar o entorno da zona considerada de manejo intensivo (cava, depósito de estéril e beneficiamento).

O capeamento composto por solo fértil e que foi previamente estocado, pode ser utilizado em uma tentativa de revegetação das bancadas (praças), mitigando, em parte, este efeito negativo através da regeneração natural da vegetação circundante.

Visando a compilação dos impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes da atividade de extração e beneficiamento de metadolomito, utilizou-se o Método de Matriz de Interação (Figura 33), neste método os impactos são identificados e classificados segundo atributos pré-determinados. Uma vez listados, os impactos foram classificados segundo:

- a) Natureza do Impacto: identifica se o impacto será positivo ou negativo;
- b) Manifestação do Impacto: determina se o impacto é causado diretamente ou indiretamente pelo empreendimento;
- c) Duração do Impacto: classifica o impacto como de curto ou de longo prazo;
- d) Reversibilidade: se o impacto é reversível ou não, compensável ou não;
- e) Abrangência: indica a área de influência do impacto; e
- f) Magnitude: expressa a severidade do impacto no meio em que ocorreu.

Figura 33 – Matriz de impactos socioambientais da extração e beneficiamento de metadolomito.

Impacto	Avaliação do Impacto												
	Natureza		Manifestação		Duração		Reversibilidade		Abrangência		Magnitude		
	P	N	D	I	C	L	R	IR	LO	RE	B	M	A
Contaminação de corpos hídricos		X	X			X	X		X				X
Assoreamento dos corpos hídricos		X	X			X	X		X			X	
Turbidez das águas superficiais		X	X			X	X		X			X	
Atuação de processos erosivos		X	X		X		X		X			X	
Impacto visual		X	X			X		X	X		X		
Alterações das feições naturais do relevo		X	X			X		X	X		X		
Remoção e inversão dos horizontes pedológicos		X	X			X		X	X		X		
Emissão e dispersão de poeiras		X	X		X		X		X		X		
Poluição atmosférica		X	X		X		X		X		X		
Poluição sonora		X	X		X		X		X		X		
Contaminação por óleos, graxas e esgoto		X	X		X	X	X		X				X
Acidentes de trabalho		X	X		X	X	X	X	X				X
Arrecadação de impostos	X		X			X		X		X			X
Geração de matéria-prima	X		X			X		X		X			X
Geração de empregos	X		X			X	X	X	X				X
Movimentação de renda	X		X	X		X		X		X			X

Legenda dos Impactos				
P = Positivo	N = Negativo	D = Direto	I = Indireto	C = Curto Prazo
L = Longo Prazo	R = Reversível	IR = Irreversível	LO = Local	RE = Regional
B = Baixo	M = Médio	A = Alto		

Tendo em visto os impactos, o planejamento realizado levou em conta diversas ações necessárias para mitigar os efeitos causados pelas operações humanas no local.

O primeiro ponto está relacionado com os danos causados por derramamentos de graxas, óleos e combustíveis. Para evitar a infiltração de substâncias nocivas e eventual contaminação do lençol freático, a área de manutenção (oficina) e de disposição dos tanques de combustível deverá ser cimentada e impermeabilizada.

Também foram instaladas canaletas que conduzirão as águas pluviais até locais adequados, onde foram instaladas as caixas separadoras de água e óleo, as quais irão armazenar os materiais eventualmente contaminantes.

Na hipótese de contaminação acidental do solo, o material atingido deve ser removido e devidamente armazenado, para posterior disposição adequada em aterro específico, preparado e licenciado para receber esse tipo de contaminante. Os funcionários devem ser orientados quanto aos procedimentos a serem tomados para evitar a ocorrência de vazamentos ou derrames e quanto aos procedimentos necessários à correta disposição dos resíduos.

Para o controle de emissões atmosféricas e da geração de ruídos, como medida mitigadora das emissões, o empreendedor executará a manutenção periódica dos equipamentos, reduzindo assim o volume de gases oriundos da queima de combustíveis. A densa vegetação existente ao redor da cava, composta principalmente por bracatinga, e as cortinas vegetais a serem implantadas contribuirão para reduzir o impacto gerado pelos ruídos e pela dispersão de poeiras resultante do funcionamento e circulação de máquinas, britador e caminhões.

Objetivando o controle e redução de poeiras decorrentes do trânsito intenso de caminhões e maquinários em acessos e pátios de britagem, bem como de processos de beneficiamento (correias transportadoras) pretende-se dar continuidade nas ações de umidificação de vias e pátios através do uso de caminhões pipa. Além disso prevê-se a instalação de aspersores de água nas correias transportadoras da área de britagem e moagem.

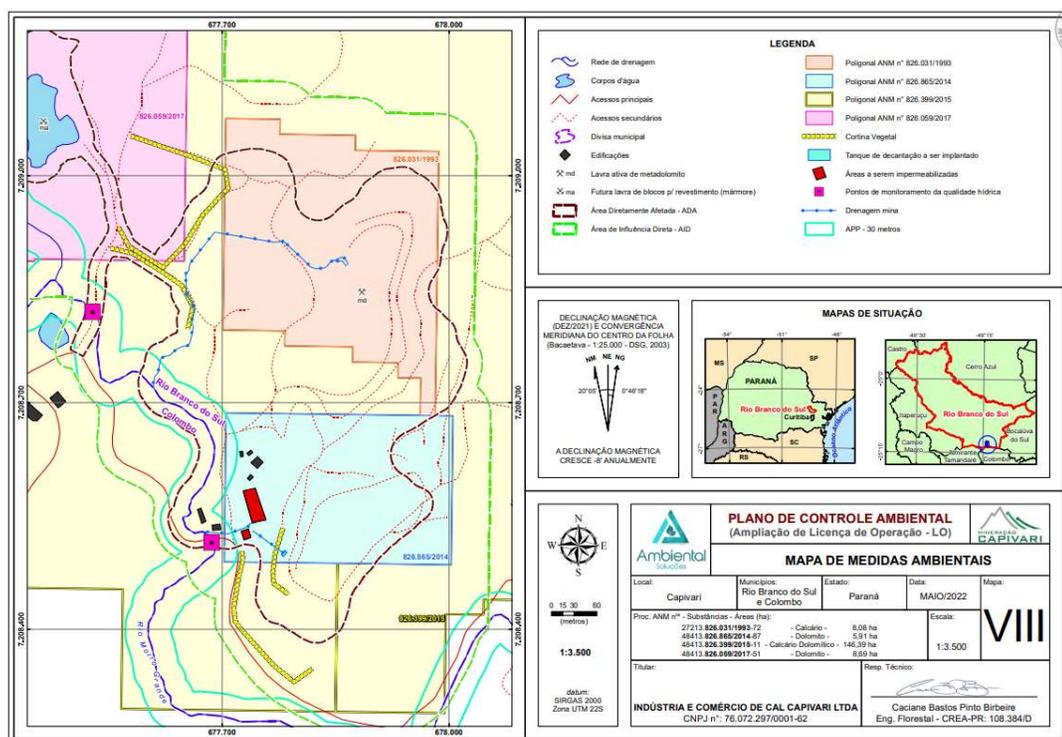
Para evitar os problemas ocupacionais relacionados à saúde e segurança do trabalho, o empreendedor fornecerá EPIs aos funcionários, principalmente no que se refere a equipamentos de proteção auricular e óculos de proteção.

Por fim, para a recomposição paisagística e revegetação das áreas degradadas, um programa de ações que visam proporcionar uma recuperação paisagística será implementado nas áreas degradadas durante a ampliação efetiva do projeto. A recomposição paisagística, por sua vez, diminui o impacto visual gerado pela atividade mineral ao mesmo tempo em que, na medida em que, recobre áreas desprovidas de vegetação, protege o solo e evita que ocorram processos erosivos no local. Dentro deste programa de recuperação prevê-se a revegetação de eventuais áreas que possam ser afetadas pela extração do metadolomito, utilizando-se principalmente espécies herbáceas para a estabilização de taludes dos depósitos de

estéril.

Sempre que possível foram utilizadas espécies nativas ou exóticas pouco agressivas e com efetiva atividade de contenção de encostas. Ao final da operação de lavra, pretende-se utilizar o solo estocado na recuperação das praças das bancadas, possibilitando o crescimento de vegetação nestes locais, de forma a atenuar o impacto visual (Figura 34).

Figura 34 – Mapa de abrangência das medidas ambientais.



5. CONCLUSÕES

A mineração é umas das principais atividades da economia do Brasil, e está representada por inúmeras reservas e minas espalhadas pelo extenso território brasileiro. O Brasil se destaca também por ser um grande consumidor dos produtos minerais.

Um dos produtos de largo consumo nacional são os agregados para construção civil. A produção desses recursos é comparável com a produção de minério de Ferro, o principal recurso mineral do país. Seguindo essa tendência, a Mineração Cal Capivari buscou ampliar sua produção de calcário dolomítico para atender essa demanda da construção civil.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi dimensionar e operacionalizar uma extensão de reserva de calcário localizado em uma das minas em operação da empresa, abordando os principais pontos desse desenvolvimento. Para isso, criou-se o modelo geológico da reserva usado para determinar os limites econômicos da cava, respeitando os limites espaciais da área.

Aspectos da geologia foram estudados utilizando técnicas de sondagem e caminhamento eletrônico necessários para desenhar a reserva e estimar os volumes de produção. Esses volumes foram utilizados para determinar o melhor plano de lavra para o local e determinar as capacidades necessárias para operar as operações de perfuração, carregamento, transporte e beneficiamento da mina. E por fim, determinou-se as ações de mitigação dos danos ambientais para minimizar os danos causados com a ação humana no local.

Os resultados de produção mensal são estimados em 25.000 t/mês ou 300.000 t/ano de metadolomito, destinados à utilização na produção de cal e como corretivo agrícola. Considerando uma reserva explotável de 27.477.729 t, e tendo em vista a produção estimada em 25.000 t/mês a mina pode operar por 92 anos.

Para as próximas etapas, espera-se o início das primeiras atividades extrativas no local. Para manter um bom desenvolvimento será necessário novas pesquisas para acompanhar as evoluções ao longo da exploração da reserva com o objetivo de otimizar os processos produtivos da mina mantendo os cuidados ambientais do início ao fim da lavra.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, A. and DAGDELEN, K.. 1999, "A strategic Production Scheduling Method for an Open Pit Mine", Proceedings of 28th APCOM, pp. 729 to 738.

ALBUQUERQUE, H. P.; Estimativa e Classificação de Recurso Mineral para um Depósito de Ferro. Trabalho de Conclusão de Curso, 2021 – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, Minas Gerais, 2021.

ANDRADE, A. Q.; Sequenciamento e Programação de Lavra com Alocação de Equipamentos de Carga. Dissertação de Mestrado, 2014 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CACCETTA, L., & HILL, S. P. (2003). Journal of Global Optimization, 27(2/3), 349–365. doi:10.1023/a:1024835022186

CALCAGNO, P., CHILÈS, J. P., COURRIOUX, G., & GUILLEN, A. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171(1-4), 147–157. doi:10.1016/j.pepi.2008.06.013

CAMPOS, P. H. A., CABRAL, I. E., ORTIZ, C. E. A., & MORALES, N. (2018). Comparison between the application of the conventional mine planning and of the direct block scheduling on an open pit mine Project. REM - International Engineering Journal, 71(2), 269–274. doi:10.1590/0370-44672017710037

CHEN, Y., & WU, W. (2016). A prospecting cost-benefit strategy for mineral potential mapping based on ROC curve analysis. Ore Geology Reviews, 74, 26–38. doi:10.1016/j.oregeorev.2015.11.0

COLLINS, L. e FOX, R. A. (1985). Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. The Geological Society publ., 220 p.

CURI, A.; Minas a Céu Aberto – Planejamento de Lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014, 376p

DAGDELEN, K. e JOHNSON, T.B., Optimum Open Pit Mine Production Scheduling by Lagrangian Parameterization, Proc. 19th APCOM Symp. of the Society of Mining Engineers (AIME), 1986.

ESMAEIL, R., EHSAN, M., REZA, S., & MEHRAN, G. (2018). Optimized algorithm in mine production planning, mined material destination, and ultimate pit limit. Journal of Central South University, 25(6), 1475–1488. doi:10.1007/s11771-018-3841-5

ESPINOZA, D.; GOYCOOLEA, M.; MORENO, E.; NEWMAN, A. MineLib: a

library of open pit problems Library of Open Pit Mining Problems. Anal Operations Reserch, New York, p 1-22 Springer US, 2012.

FIORONI, M. M., FRANZESE, L. A. G., BIANCHI, T. J., EZAWA, L., PINTO, L. R., & de MIRANDA, G. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. 2008 Winter Simulation Conference. doi:10.1109/wsc.2008.4736138

FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. (1998). Materiais Rochosos para Construção. In: Antônio Manoel dos Santos Oliveira; Sérgio Nertan Alves de Brito. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. único, p. 331-342.

FORNAZZARI Neto, L, 2018. Relatório Final de Pesquisa Mineral para calcário no processo DNPM 826.399/2015. Inédito. Colombo, Paraná.

GUIMARÃES, O. R. A. Aplicação de algoritmos genéticos na determinação de cava final e sequenciamento de lavra em minas a céu aberto. 2007. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) -Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

HAZEN, S. W. Jr., 1968. Ore reserve calculations in ore reserve estimation and grade control. In: The Canadian Inst. of Mining and Metallurgy, Spec. Vol. 9, Montreal, pp. 11—32.

HOULDING, S.W., 1994. 3D Geoscience Modeling; Computer Techniques for Geological Characterization. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

HUSTRULID W. & M. KUCHTA. Open Pit Mine Planning & Design. Rotterdam, Balkema, 1995. 1308 p.

IBRAHIMOV, M., Mohais, A., Schellenberg, S., & Michalewicz, Z. (2014). Scheduling in iron ore open-pit mining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 72(5-8), 1021–1037. doi:10.1007/s00170-014-5619-8

INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE CAL CAPIVARI LTDA, 2003 Plano de Controle Ambiental. Campina dos Pintos, Rio B. do Sul (PR), 35p.

LANE K F. Cut-off grades for two minerals , Proceedings of the 18th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM1984). London, 1984: 485–492.

LEMON, A. M., & JONES, N. L. (2003). Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Computers & Geosciences, 29(5), 547–555. doi:10.1016/s0098-3004(03)00051-7

LERCHS H. e GROSSMANN I. F. Optimum design of open pit mines. CIM

Bull., 58, 1965, 47–54.

MEAGHER, C., DIMITRAKOPOULOS, R., & AVIS, D. (2014). Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem—a review. *Journal of Mining Science*, 50(3), 508–526. doi:10.1134/s1062739114030132.

MOUGOUEI, D., & POWERS, D. M. W. (2020). Dependency-aware software release planning through mining user preferences. *Soft Computing*. doi:10.1007/s00500-019-04630-y

MOTTA, R. S. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego, Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Univesidades de São Paulo. São Paulo, 2005

OTTENSEN, R.T. & THEOBALD, P.K. 1994. Stream sediments in mineral exploration. In: HALE, M. & PLANT, J.A. (eds) *Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry*, 6, 147–184.

PETERS, W. C, 1978. *Exploration and mining geology*. J. Wiley and Sons, New York, pp. 1—696.

PRENTICE, J. E. (1990). *Geology of Construction Materials*. Topics in the Earth Sciences, n° 4, Chapman and Hall ed. 202p.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J. AND JORDAN, T. H. (2006). *Understanding Earth*, Bookmans Ed., Tradução Menegat R., 656 p.

TANNÚS (et al.) *Agregados para a construção civil no Brasil. Contribuição para a formulação de políticas públicas*. MG: MME/SGM/CETEC, 2007.

WEISS. N. ed. 1977. *Mineral processing handbook*. Amer. Inst. Mining. Metall. Petroleum Engineers,

WINDE F and STOCH EJ (2010) Threats and opportunities for postclosure development in dolomitic gold mining areas of the West Rand and Far West Rand (South Africa) – an hydraulic view. Part 2: Opportunities. *Water SA* 36 (1) 75-82.

YAMAMOTO, J. K.; ROCHA, M. M. D. Revisão e Recomendações para o Cálculo e Classificação de Reservas Minerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 4, p. 243-254, 1 dez. 1996.