

PROPOSTA DE RETOMADA E EXPANSÃO PARA UMA MINA DE CALCÁRIO

Tatiane Fortes Pereira

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luciana Arnt Abichequer

RESUMO

Os teores e as tonelagens do minério de interesse e as quantidades de estéril presentes em um depósito mineral têm influência direta na decisão de um investimento mineiro, bem como até que estágio de seu desenvolvimento este empreendimento será viável ou não. Este trabalho tem como objetivo propor um plano para a retomada das atividades e expansão da cava de uma mina de calcário, estando diretamente relacionado com a análise quantitativa e qualitativa do corpo de minério, com as quantidades de estéril e com os parâmetros operacionais da cava em avanço. Para atender ao objetivo proposto foram utilizados dados da campanha de sondagem realizada na área para onde se pretende estender a cava, juntamente com dados coletados de topografia, geologia e geoquímica, que serviram de base para a delimitação do desenho do corpo geológico. O desenho tridimensional do corpo foi discretizado em blocos, para os quais foram calculados os volumes e porcentagens de interesse, neste caso, o Poder de Neutralização (PN) do calcário, pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Por fim, os parâmetros operacionais da cava já em funcionamento foram utilizados como base para o desenvolvimento do plano de recorrência da cava. Foram projetadas duas cavas, uma restrita pela pilha de estéril localizada próxima à área de avanço ao leste da cava, e outra sem esta restrição, sendo a decisão sobre qual cava implementar, utilizando critérios econômicos, cabível à empresa.

Palavra chave: plano de recorrência, mineração, modelagem geológica, modelo de blocos.

ABSTRACT

The contents and tonnages of the ore of interest and the amounts of sterile present in a mineral deposit have a direct influence on the decision of a mining investment, as well as to what stage of its development this undertaking will be viable or not. The objective of this work is to propose a plan for the resumption of activities and expansion of the pit of a limestone mine, being directly related to the quantitative and qualitative analysis of the ore body, the amounts of sterile and the operational parameters of the pit progress. In order to meet the proposed objective, data from the survey campaign carried out in the area where the cava was intended to be used, together with data collected from topography, geology and geochemistry, were used as the basis for the delineation of the geological body design. The three-dimensional design of the body was discretized in blocks, for which the volumes and percentages of interest were calculated, in this case, the Neutralization Power (PN) of the limestone by the Inverse Distance Square (IQD) method. Finally, the operational parameters of the cava already in operation were used as a basis for the development of the cava recurrence plan. Two cavas were designed, one restricted by the sterile pile located near the advancement area to the east of the pit, and another without this restriction, being the decision on which to implement, using economic criteria, appropriate to the company.

Keywords: recurrence plan, mining, geological modeling, block model.

1 Introdução

A realização de um planejamento de lavra consiste de um processo que irá influenciar em todas as demais decisões tomadas em uma atividade mineira e deve viabilizar um dinamismo entre as mesmas. Um plano de lavra deve ser sempre atualizado com o decorrer das atividades mineiras e interligado aos modelos de sólido geológico e de blocos que, por sua vez, também são atualizados no decorrer do avanço das pesquisas.

Ao longo da vida útil de uma mina, novas perspectivas irão se apresentando e o planejamento de lavra deve ir se moldando às diferentes situações que vão surgindo, tanto geológicas e econômicas, quanto tecnológicas. A realização contínua de pesquisas contribui para que, na medida em que a extração vá ocorrendo, a empresa consiga fazer um planejamento de como prosseguir com o sequenciamento da lavra, de acordo com sua estratégia produtiva.

O objetivo desse trabalho é propor um plano para o avanço da cava de uma mina de calcário, onde foi constatado, por pesquisas com furos de sondagem e análises químicas, minério de alta qualidade para a fabricação de cal.

Para atender ao objetivo proposto, inicialmente foi realizada a coleta de diversos dados e informações operacionais da mina, como: coleta de dados topográficos, planialtimétricos, informações sobre ângulos de talude, gradientes de rampas e dimensões das bancadas em operação, assim como informações sobre a densidade do material e sobre dados dos furos de sondagem da área em avanço. De posse destes dados, foi possível a proposição de dois planos de expansão para a cava e o cálculo das quantidades de minério e estéril existentes em cada um deles.

1.1 Histórico e Problema

A cava da mina de calcário, área de interesse do estudo, iniciou suas atividades em meados de 1970, com a finalidade de suprir a necessidade do mercado através da extração, beneficiamento e comercialização de materiais de qualidade.

No ano de 2008, esta cava começou a enfrentar problemas devido à localização de uma falha ao lado oeste, que lentamente começou a provocar o deslizamento de grande quantidade de estéril para o interior do pit inviabilizando, na época, a continuidade da lavra devido à grande relação estéril/minério (REM) originada por este fato. Como no período a REM foi considerada bastante alta e havia grandes quantidades de minério disponíveis nas outras cavas, optou-se por suspender a extração na área e por aproximadamente oito anos, esta se manteve paralizada.

No ano de 2015, frente às novas realidades, como disponibilidade menor de minério em outras áreas e decapeamentos cada vez maiores, a empresa resolveu analisar novamente a relação custo/benefício atual da cava e, após a drenagem do local, foram realizados estudos que, indicaram teores de alta qualidade no piso da cava. Fato este que, em face à irregularidade dos depósitos da região, mostrou-se estratégico, viabilizando a retomada da lavra no local. Agregando como fator de grande relevância, a cava está bastante próxima à área industrial, o que reduz os gastos com transporte.

Frente a todos estes fatores, ao novo cenário de lavra, mudanças no mercado econômico e do setor de mineração, decidiu-se pela retomada das atividades no local. Atualmente, a situação é de finalização desta fase de aprofundamento do piso, após essa fase a empresa pretende dar continuidade as atividades em direção nordeste, onde se verifica a possibilidade de um decapeamento menor. Para isso é necessário que um planejamento de lavra

seja realizado levando-se em consideração todas as características e restrições envolvendo essa expansão.

O presente estudo propõe a comparação de dois projetos para a expansão dessa cava já existente. Para isto foi feita a modelagem geológica e a estimativa da distribuição espacial dos valores de PN ao longo do corpo de calcário, para as duas propostas de recorrência para a cava em avanço. Como resultado almejou-se a obtenção de dados quantitativos e qualitativos de extrema importância para as práticas técnico-econômicas das atividades da empresa.

1.2 Contexto Geológico

A formação Vacacaí, onde está inserido o complexo metamórfico Vacacaí e o complexo Passo Feio, em Caçapava do Sul, aflora circundando a suíte granítica de Caçapava, numa faixa alongada de direção N-S que varia de largura no lado oeste do mesmo. A formação Vacacaí é representada por filitos, quartzitos, xistos verdes e pequenas lentes de calcário (Bocchi, 1970).

Já o complexo metamórfico Vacacaí é composto, segundo Ribeiro *et al.* (1966), de filitos, muscovita-xistos, metagrauvacas, metatufitos e metabasitos com seus derivados de variável grau de metamorfismo, como: clorita-actinolita-xistos, anfibolitos, quartzitos, quartzitos carbonosos, mármores, metarcoses, metariolitos e metaconglomerados.

O complexo Passo Feio está localizada no entorno do Granito Caçapava e trata-se de uma sequência vulcano-sedimentar metamorfisada. Essa sequência é composta por xistos pelíticos, mármores, filitos, quartzitos, metaconglomerados, rochas calcissilicáticas e anfibolitos (Ribeiro *et al.*, 1966; Bitencourt, 1983).

A suíte granítica Caçapava do Sul compreende dois corpos graníticos intrusivos no complexo metamórfico Vacacaí. O corpo maior possui uma forma ovalada cujo eixo de maior extensão, cerca de 30km, está orientado segundo uma direção N-S e denomina a suíte. Esta suíte é constituída predominantemente de monzo e sienogranitos com participação subordinada de rochas de composição granodioríticas a tonalíticas (CPRM, 2000).

Na cidade de Caçapava do Sul encontra-se uma extensa área de calcário aflorante que pertence à Sequência Passo Feio, sendo que este está disposto em lentes que apresentam direção dominante N10°E e possuem a maioria dos contatos com as encaixantes determinados por falhas de direção NE e NW (Holz & De Ros, 2000).

A empresa explora mármore, denominado localmente de calcário, e extrai para dois produtos: calcário e cal, havendo também a produção de argamassa e fertilizante.

1.2.1. Calcário

Quando moída em partículas finas, esta rocha tem poder neutralizante e corrige a acidez do solo. O processo de produção consiste de extração, britagem, seleção manual, rebritagem, moagem e peneiramento, não sendo necessária a calcinação.

A qualidade do calcário depende basicamente, do seu Poder Relativo de Neutralização Total (PRTN), definido pelo teor de carbonatos presentes na rocha calcária e sua granulometria.

Os teores de PN definem qual o destino que o material lavrado terá, podendo ser utilizado para produção de cal, calcário ou ser descartado caso não atinja o teor mínimo.

Os principais usos do calcário são: produção de cal e correção do pH do solo.

1.2.2. Cal

Também conhecida como óxido de cálcio, é obtida por decomposição térmica de calcário à temperaturas entre 900°C a 1000°C.

Depois que o calcário é extraído de forma seletiva ele passa para os processos de britagem, peneiramento, seleção manual e é submetido a elevadas temperaturas, num processo denominado calcinação. Após a calcinação é feita a moagem, o peneiramento e a aero separação, dando origem ao CaO (óxido de cálcio), MgO (óxido de magnésio) e CO₂ (gás carbônico). A maioria da cal produzida no Brasil resulta da calcinação de calcários/dolomíticos metamórficos de diferentes idades geológicas (Pré-Cambriano), possuindo pureza variável.

A cal é utilizada principalmente na fabricação de argamassas para a construção civil e, na agricultura, o óxido de cálcio é usado para produzir hidróxido de cálcio, que tem por finalidade corrigir a acidez do solo.

2 Estado da Arte

2.1 Modelagem Geológica

O modelo geológico é a base fundamental para a avaliação dos recursos minerais, servindo como ponto de partida para a definição da tonelagem e anisotropia do corpo mineralizado. Um modelo geológico nada mais é do que uma representação e interpretação de um depósito mineral num espaço amostral. É uma ferramenta que auxilia inicialmente na estimativa de recursos/reservas e em seguida, no planejamento de lavra até a exaustão da jazida.

Após a coleta de dados espaciais, químicos, mineralógicos e informações topográficas, pode-se seguir para a etapa de elaboração do modelo geológico de fato, que é o processo de interpretação das seções dos furos de sondagem, desenho das envoltórias e transformação dessas envoltórias em sólidos. Este desenho tridimensional permitirá uma visão global do depósito, assim como também possibilitará a determinação da extensão, padrão geométrico e distribuição espacial da mineralização, sendo assim capaz de fornecer dados como volume e massa do minério.

Existem vários métodos de modelagem geológica, como a modelagem geoestatística pela Krigagem dos Indicadores (Isaaks & Srivastava, 1989) e a modelagem implícita (Yamamoto, 2001), mas neste trabalho foi utilizada a modelagem manual utilizando seções paralelas.

2.1.1 Modelagem Manual

Na modelagem manual, a geometria de uma zona mineralizada é interpretada em uma série de seções verticais ou horizontais de maneira sistemática, sendo que estas seções são conectadas entre si, gerando um modelo tridimensional do corpo de minério. Esta é a técnica mais amplamente empregada pela indústria mineral para vasta gama de commodities.

As seções horizontais são geradas em determinados níveis ou cotas de acordo com o interesse e são construídas baseadas na interpolação das informações das seções verticais já interpretadas. Geralmente os dados estão mais concentrados ao longo das seções dispostas perpendicularmente à direção de maior continuidade geológica do depósito (Sinclair & Blackwell, 2002).

Batista (2014), realizou um trabalho em um depósito de minério de ferro para analisar comparativamente três métodos de elaboração de modelos sólidos digitais que envolveram metodologias de modelagem manual, geoestatística e implícita. Os resultados obtidos

apresentam semelhanças na determinação dos modelos entre os contatos litológicos, porém houve divergências significativas em termos quantitativos dos resultados obtidos pela modelagem implícita, quando comparada com as modelagens manual e por indicadores.

Palmieri (2011) realizou um trabalho de modelagem geológica e avaliação de recursos minerais de um depósito de Nióbio, onde técnicas geoestatísticas foram utilizadas para entender espacialmente as distribuições das diferentes populações presentes na área. Os dados de geoquímica exploratória foram interpolados por Krigagem Ordinária (Matheron, 1965) para obter teores estimados ao longo de todo o volume mineralizado. A modelagem de diferentes tipos de rochas e dos corpos mineralizados, apoiada em várias informações, permitiu estabelecer a geometria, relações de contato e evolução tanto das rochas, quanto dos minérios primário e supergênico do depósito.

2.1.2 Modelo de Blocos

Um dos problemas comuns enfrentados na modelagem e na estimativa dos teores de um depósito mineral é a definição dos limites do corpo de minério, assim como a correta avaliação das quantidades dos parâmetros de interesse. O modelo de blocos tem a finalidade de auxiliar na definição desses limites de extensão dos recursos, assim como estimar os valores desconhecidos para as variáveis em estudo.

Feito o modelo geológico do corpo mineralizado, é realizada a discretização deste corpo em blocos, que após a realização das estimativas dos valores dos atributos em questão, dará origem ao chamado modelo de blocos. Este modelo possibilita o cálculo dos volumes e massas de minério, assim como o conhecimento da distribuição espacial da variável de interesse, neste estudo o PN. O método utilizado, dentre os vários métodos existentes para se obter uma estimativa para uma variável de interesse, foi o método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) (Shepard, 1968).

O Inverso da Distância à uma Potência (IDP) é um interpolador comumente utilizado nos meios topográficos e nos meios de quantificação de teores em depósitos. A potência dois é a mais utilizada em trabalhos práticos, sendo um caso particular e denominado de Inverso do Quadrado da Distância (IQD). No método, o fator potência pode ser pré determinado pelo usuário, sendo que quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó que se quer estimar. Inversamente, quanto menor a potência, maior o efeito de pontos distantes sobre toda a malha. Este é um método rápido e que requer pouco custo computacional (Mazzini & Schettini, 2009).

A escolha do método foi baseada em estimativas realizadas anteriormente em casos semelhantes a este, onde se obteve resultados satisfatórios. Os resultados das estimativas obtidas neste trabalho também foram validados e coerentes com os valores reais.

2.2 Poder de Neutralização

Corretivos da acidez do solo são produtos capazes de neutralizar (diminuir ou eliminar) a acidez dos solos e ainda carrear nutrientes vegetais ao solo, principalmente cálcio e magnésio (Alcarde, 1992). A acidez de um solo é originada por H^+ livres gerados por componentes ácidos presentes nos solos (ácidos orgânicos e fertilizantes nitrogenados). A neutralização da acidez consiste em neutralizar os H^+ , o que é feito pelo ânion OH^- , portanto, os corretivos de acidez devem ter componentes básicos para gerar OH^- e promover a neutralização.

Os corretivos para controlar a acidez dos solos mais utilizados no Brasil são as rochas calcárias moídas, contendo Calcita (CaCO_3), Magnesita (MgCO_3) e Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, sendo que os calcários são classificados de acordo com a concentração de MgO como magnesianos (5% a 12%), dolomíticos (acima de 12%) e calcíticos (menos de 5%) (Alcarde, 1992; Boeira & Queiroz, 2006).

O calcário é o corretivo mais utilizado na agricultura, pois é um produto de ocorrência natural, disponível com relativa frequência, abundância e boa distribuição geográfica. É um produto de baixa solubilidade em água e sua ação neutralizante depende da superfície de contato e da umidade do solo (Tedesco & Gianello, 2000; Alcarde & Rodella, 1992).

As características de Reatividade (RE), em que o fator relevante é a granulometria do material e Poder de Neutralização (PN) determinam a ação do corretivo. Para adequada avaliação da ação dos corretivos, essas duas características devem ser associadas e fornecem o índice denominado Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT), calculado pela equação: $\text{PRNT} = \text{PN} \times \text{RE}(\%) / 100$.

O poder de neutralização de um corretivo de acidez é determinado analiticamente, fazendo-se uma amostra do mesmo reagir com uma quantidade conhecida e em excesso de ácido clorídrico relativamente diluído (0,5mol/l) e à determinada temperatura. Desta forma, é dada oportunidade ao corretivo de exercer toda sua capacidade de neutralizar o ácido. Posteriormente, determina-se o excesso de ácido e por diferença calcula-se a quantidade de ácido neutralizada pelo corretivo. De acordo com o princípio da equivalência química, a quantidade de ácido neutralizada equivale à quantidade de constituinte neutralizante contido na amostra. Assim calcula-se a quantidade de CaCO_3 que deveria existir na amostra e o resultado é expresso em “porcentagem equivalente de carbonato de cálcio”. O PN indica, portanto, a capacidade potencial ou teórica do corretivo em neutralizar a acidez dos solos.

Devido às regiões de altos teores, em geral, representarem zonas bastante restritas, a importância do conhecimento destas áreas de alto poder de neutralização, está no fato de que a empresa pode optar por retirar este material que possui maior valor e procura no mercado, em um momento de maiores custos operacionais e econômicos, ou ainda, contrabalancear com a retirada de um material que irá gerar uma receita menor. Ou seja, administrar a lavra do material com maior poder de neutralização para que assim haja um equilíbrio econômico financeiro, ou seguindo uma estratégia administrativa da empresa.

2.3 Planejamento de Lavra

Segundo Costa (1979), entende-se por planejamento de lavra o projeto de evolução da mina compreendendo a previsão de meios e a determinação dos custos inerentes a esta evolução. Os meios utilizados são os equipamentos e o pessoal e os custos são aqueles decorrentes da operação desses equipamentos e pessoal, assim como um roteiro das operações que se desenvolverão na mina, desde sua preparação para início da produção até o seu término, quando a mina se tornar exaurida.

O planejamento de lavra deve ser uma atividade estratégica da empresa e deve corresponder a um processo para determinar o melhor projeto e sequenciamento para a retirada de material e para a otimização do lucro desse material. Seguindo uma estratégia previamente estabelecida, serve também para antecipar a ocorrência de um problema futuro, dando assim possibilidade de tentar evitá-lo ou pelo menos minimizá-lo.

O planejamento deve atender às mudanças do cenário ambiental e às necessidades que vão se apresentando no decorrer da vida útil do empreendimento: mudanças na tecnologia,

alteração na economia global, inclusive de preços do minério, emprego de mão de obra, políticas governamentais, concorrência e disponibilidade ou surgimento de novas matérias primas.

É por esse motivo que o planejamento não é algo definitivo e, assim como o modelo geológico, também deve ser constantemente atualizado, deve estar em constante análise e no decorrer das atividades da mina, da conformidade da cava, das mudanças geológicas que irão se apresentando com a retirada de material, deve ser revisto e estudado novamente para ir se adequando às realidades que irão se apresentando ao longo do período em que a empresa mantiver suas atividades.

2.3.1 Relação Estéril-Minério

A relação estéril-minério (REM) é um fator de grande relevância no estudo de viabilidade de uma mina a céu aberto. Sendo a remoção do estéril um dos maiores impactos nos custos de produção de uma mina, a REM é quase universalmente utilizada e representa a quantidade de material não econômico que precisa ser removida para viabilizar a retirada de uma unidade de minério.

Esta relação será influenciada diretamente pela definição da geometria final dos taludes, passando por modificações durante o aprofundamento da cava, de acordo com a evolução do planejamento da mina.

A REM pode ser calculada de forma global, onde se utilizam parâmetros geomecânicos e operacionais, envolvendo as quantidades totais de estéril e minério que serão removidas durante toda a vida útil da mina. Já a relação que é utilizada para se obter os limites da cava é a REM limite, que determina até que ponto é viável se lavar a céu aberto, existindo ainda a REM local, onde para cada unidade de lavra é calculada essa relação entre estéril e minério.

Com a finalidade de determinar a profundidade máxima baseada na rentabilidade da operação a céu aberto, é essencial saber a respeito dos custos totais e das receitas advindas da venda do produto final (Tatya, 2005). Estes custos irão servir como base para definir o que será minério e estéril, viabilizando o cálculo da relação estéril-minério limite.

Esta relação é um dos valores fundamentais de qualquer planejamento de lavra, bem como os denominados teores de corte, já que para a mesma jazida haverão teores de corte diferentes se ela for lavrada por métodos a céu aberto ou subterrâneo, admitindo como tecnicamente viável ambos os tipos de lavra (Hartman, 1992).

A REM limite envolve custos, quantidade de materiais extraídos e preços que são praticados na venda do minério lavrado por cada método, céu aberto e subterrâneo. Calculando-se a relação entre o estéril a ser extraído e o custo unitário desta extração, a REM máxima, ou o limite até onde haverá viabilidade econômica na lavra à céu aberto, também deve levar em consideração vários fatores como incertezas geológicas, programação de investimentos em equipamentos, mão de obra, infraestrutura, custos, parâmetros geomecânicos e impactos ambientais.

Neste trabalho, em face a não obtenção de dados econômicos junto à empresa, não foi possível a realização de cálculos para obtenção de REM limite.

2.3.2 Cava Ótima e Operacional

O processo de otimização e geração de cava final em minas a céu aberto é um processo de decisão que determina o valor econômico do empreendimento, definindo as áreas de lavra

economicamente viáveis e a sequência em que os recursos devem ser aproveitados dentro destas áreas (Ascarza, 2008).

O principal objetivo do projeto da cava final é tentar obter o máximo benefício econômico possível, levando-se em conta as atividades operacionais realizadas com segurança e com a extração de um conjunto de blocos que maximize o lucro.

Nas últimas décadas, diferentes algoritmos foram desenvolvidos com o objetivo de encontrar a geometria final ótima para a cava de uma mina a céu aberto. Praticamente a totalidade dos algoritmos utilizados na otimização trabalha sob um modelo de mineralização constituído inicialmente por um bloco tridimensional suficientemente grande para englobar toda a área da jazida. Este bloco é subdividido em outros blocos menores aos quais são atribuídos valores estimados para cada um deles, ou seja, o modelo de blocos de teores. Estes teores são então transformados em valores econômicos, o benefício ou lucro, que se obtém com a extração, tratamento e venda do minério presente nos blocos. A transformação de teores em valores econômicos é feita por meio da utilização da função benefício, que considera os custos e valores obtidos com a venda do material no seu cálculo (Bustillo & López, 1997).

Em uma mina a céu aberto, quando se deseja obter a definição do limite econômico final da cava, o critério mais comumente utilizado é o da maximização do valor presente líquido (VPL). Através do contorno resultante da lavra do material que maximiza o VPL da mina, o limite da cava ótima fica definido. Estes contornos servirão de base para a construção do desenho da cava operacional, já que a cava ótima é uma cava meramente matemática que não considera dados necessários operacionalmente como: a definição das dimensões das bancadas, ângulos de talude e estradas compatíveis com os equipamentos utilizados nas operações.

Nesse trabalho, como a mina em estudo já se encontra em operação, os parâmetros da cava operacional já existente foram utilizados como base para projetar a recorrência, sendo esta expansão necessária para dar continuidade ao desenvolvimento da mina e à retirada de material até os limites do corpo de minério e da área disponível.

Freitas (2015) realizou um trabalho sobre planejamento de lavra com o objetivo de propor um modelo geológico e de avanço de lavra para a área de expansão da Mina Dom Feliciano. No estudo, a cava operacional foi desenhada a partir da projeção da cava matemática e através de seu trabalho foi possível o cálculo de volumes e tonelagens da área da cava em avanço.

3 Metodologia

Conforme o fluxograma da Figura 1, várias etapas foram realizadas para atingir o objetivo do trabalho. Iniciando com a campanha de sondagem da área onde será realizado o avanço da cava, a descrição dos furos e a análise química destes furos para obtenção dos teores de PN e descrição litológica, dados estes obtidos junto à empresa.

A coleta de informações topográficas, geoquímicas e dados litológicos serviram de base para a construção do banco de dados para a modelagem do corpo de minério, sendo que os levantamentos planialtimétricos foram realizados por uma empresa terceirizada.

Com estas informações foi alimentado o banco de dados dentro do *software* Micromine[®], assim criando um espaço virtual em três dimensões, com os furos localizados em suas respectivas coordenadas dentro da topografia da área.

Os furos receberam, de acordo com a geologia, diferentes cores para diferenciação litológica, facilitando a modelagem geológica do material de interesse e do estéril. O modelo geológico gerado foi então discretizado em blocos com os valores estimados de PN, que juntamente com os parâmetros operacionais possibilitaram as projeções da recorrência da cava operacional.



Figura 1: Fluxograma das etapas do projeto.

3.1 Banco de Dados

Para se iniciar uma avaliação técnico-econômica de um depósito mineral é necessária a coleta de amostras, que começa com a realização de uma campanha de sondagem da área.

Esta campanha objetiva a determinação do tamanho, da forma, da posição e a orientação do corpo mineralizado e conseqüentemente, a distribuição espacial dos seus teores.

As amostras providas de testemunhos de sondagem, para que sejam representativas, devem fornecer informações como:

- I) localização e distribuição das amostras;
- II) unidade de amostragem (dimensão do testemunho de sondagem);
- III) modo de preparação de amostras;
- IV) método de determinação analítica.

3.2 Sondagem Rotativa

Os furos de sondagem foram executados por equipamento de sonda do modelo Mach 700 e o critério considerado para a escolha do local dos furos foi baseado nas dimensões da área de avanço. Na área onde pretende-se seguir com a cava, foram feitas seis perfurações até o momento.

Estes furos possuem profundidade média de 70-80m, sendo que um furo com profundidade de 43m, alcançou unicamente material estéril e o sexto furo não chegou a ser finalizado até a conclusão do presente trabalho, sendo utilizado parcialmente, com profundidade de 67m. O total de amostras utilizadas para o projeto foram cento e onze, sendo que quatro amostras foram excluídas por possuírem valores bem menores que as demais.

Através dos testemunhos de sondagem e das medidas dos ângulos de mergulho já pode-se ter uma primeira interpretação do comportamento do corpo, onde presume-se que este mergulha em sentido leste, com aproximadamente 20° a 35°.

3.3 Descrição Litológica

Os testemunhos de sondagem são analisados geologicamente para a descrição do tipo de material encontrado e as características físicas de cada um são especificadas ao longo da profundidade do furo (Figura 2). Nesta fase já é possível a distinção entre minério e estéril, ao passo que a cada 2m do material de interesse são retiradas amostras desses testemunhos que são encaminhadas para laboratório, onde se faz a análise química para obtenção dos valores de PN.

Figura 2: Descrição litológica do furo 27: minério em verde, saibro em azul, diabásio em verde/branco.

3.5 Modelagem Geológica

No *software* Micromine, após a criação do banco de dados e com a visualização dos furos na plataforma tridimensional, são geradas as seções manuais.

Neste trabalho foram utilizadas 5 seções (Figura 3.a), para que houvesse uma melhor distribuição dos furos, ajudando na modelagem geológica (Figura 3.b).

Através da utilização de um equipamento *laser scanner* terrestre, foram obtidas imagens georreferenciadas das bancadas posicionadas em frente à área de avanço. Como mostra a porção esquerda da figura 3a, através das coordenadas obtidas pelo equipamento, foram geradas polilinhas referentes à primeira e segunda bancadas de calcário, representadas pelas polilinhas em verde, e a terceira bancada, representada pela polilinha em vermelho, referente ao material estéril.

Para gerar coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, os aparelhos *Laser Scanner 3D* emitem pulsos de laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso atinge um objeto e parte dessa energia volta para o sistema. Desse modo é possível medir a distância entre sensor e objeto.

Estas polilinhas foram encaixadas na topografia dentro do *software* e incluídas nas seções junto com os furos, integrando um conjunto de informações tridimensionais para a modelagem manual do corpo.

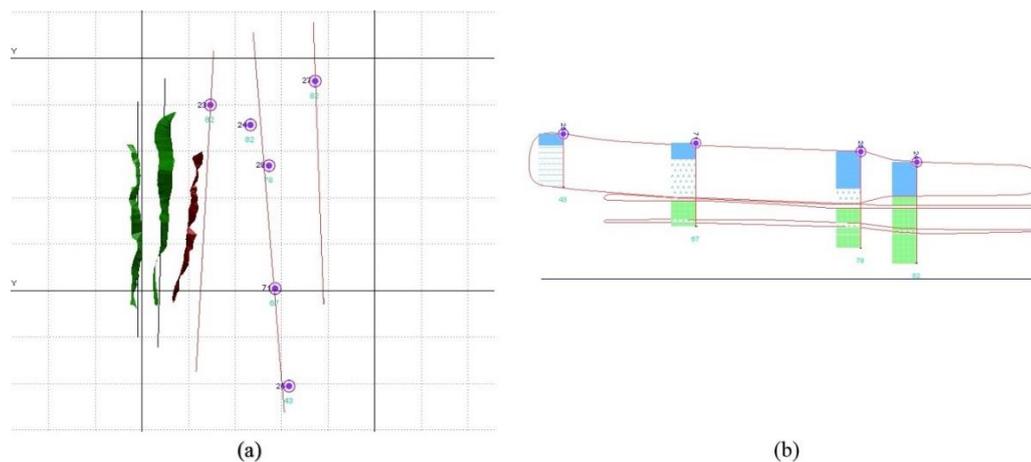


Figura 3: (a) As 5 seções distribuídas entre as polilinhas e os furos de sondagem; (b) Seção n°4 com os furos 24,28,25 e 71 e as envoltórias dos corpos de estéril desenhadas em vermelho.

As polilinhas possibilitaram estender o desenho do corpo geológico até a frente de lavra, e a comparação das polilinhas com as informações obtidas através de furos de sondagem e topografia auxiliaram na interpretação do comportamento das camadas dos corpos de minério e estéril e sua modelagem.

3.6 Modelo de Blocos

Após a modelagem geológica, os corpos de minério foram discretizados em blocos, a partir dos quais foi possível quantificar os valores de PN do minério e sua respectiva tonelagem, fundamentais para o seguimento do planejamento mineiro.

A decisão sobre o tamanho e a localização dos blocos, que podem ser de vários tamanhos e formas, se baseia geralmente no fato da espessura (z) ser usualmente a altura do banco operacional de lavra ou um submúltiplo dele. Usualmente a largura (x) e a profundidade (y) do bloco em planta não deve ser muito menor do que um quarto do espaçamento da malha utilizada na exploração mineral. Os blocos foram discretizados com as seguintes dimensões: 10m leste-oeste (x), 10m norte-sul (y) e 5m de altura (z). Essas dimensões são baseadas no fato dos furos de sondagem possuírem espaçamento irregular que varia de 48m à 131m.

O método utilizado para a interpolação dos pontos da área sem informações a respeito dos teores foi o Inverso do Quadrado da Distância, que leva em consideração a distância entre as amostras e os pontos a serem estimados. Conforme essa distância as amostras recebem pesos que variam de 0 a 1, sendo que quanto menor a distância maior o peso que a amostra receberá.

Após as estimativas concluídas foram feitas três validações: visual, global e local.

3.7 Cava Operacional

O tamanho e a forma da cava operacional dependem dos fatores econômicos, do limite legal de concessão de lavra e das restrições de projeto e produção, geralmente se utilizando do modelo da cava ótima como base para o desenvolvimento da cava operacional.

Deve-se ter em conta a grande utilidade em se obter os limites máximos que pode alcançar uma cava, refletindo-se na obtenção do potencial da jazida no que se refere ao cálculo de recursos e limites lavráveis. Isto permite definir a possível vida útil da mina, como também definir a localização de pilhas de estéril, usinas de beneficiamento ou de outras áreas que requeiram uma posição definitiva.

Os ângulos de talude afetam significativamente o tamanho e forma da cava e determinam a quantidade de estéril que precisa ser removida para que o minério possa ser exposto. Ensaios geotécnicos precisam ser realizados para que se possa estimar um modelo de ângulos de taludes da cava, sendo que a inclusão de rampas pode afetar de maneira considerável o ângulo de talude e conseqüentemente aumentar a quantidade de estéril a ser removida.

As principais restrições enfrentadas para o planejamento do avanço da cava em estudo são o posicionamento de uma pilha de estéril próximo à área, a localização de uma estrada municipal ao norte e a existência de uma falha ao lado oeste da cava, sendo que a projeção não pode se estender muito nesse sentido, pois não há estudos sobre o comportamento da mesma em profundidade.

Os parâmetros operacionais utilizados para a cava final são os mesmos já utilizados na cava existente e contidos na Licença de Operação: taludes com 10m de altura, bancadas de trabalho de 6m e bermas finais de 4m. Os acessos foram definidos junto à empresa com largura de 6m, utilizando rampas com 20% de inclinação.

4 Resultados e Discussões

As propostas apresentadas neste trabalho foram baseadas nas informações disponíveis previamente, bem como aquelas obtidas no decorrer do processo de desenvolvimento do projeto. Com estas informações foi possível obter as estimativas das distribuições de teores, tonelagens, volumes, recuperação, REM e a projeção de duas cavas operacionais. Mas como não foram levados em consideração dados econômicos, não se pôde concluir a viabilidade econômica do projeto, ficando os resultados obtidos à disposição da empresa para auxiliar na decisão sobre qual das duas propostas adotar.

Salienta-se novamente a importância de que à medida que novas informações sejam disponibilizadas e atualizadas, haverá sempre a necessidade que este planejamento de lavra esteja em constante adaptação.

4.1 Modelagem Geológica

O modelo geológico criado é composto por três corpos de minério e três corpos de estéril (Figura 4). Através da modelagem separa-se estéril de minério e possibilita-se obter resultados de valores como volume, relação estéril/minério e tonelagens.

Figura 4: Corpos geológicos de estéril em vermelho e minério em verde.

4.2 Modelo de Blocos

O modelo de blocos foi criado neste trabalho com o principal objetivo de se obter estimativas dos teores de PN nos locais não amostrados, mas este modelo também é essencial no processo de otimização da cava, onde para cada bloco a empresa poderá atribuir valores econômicos como custos de extração, preço de venda do material, custos de beneficiamento, que dependendo da tonelagem e qualidade do material, auxiliariam na definição dos limites econômicos da cava.

A quantidade de dados existentes é o fator que mais restringe a determinação do tamanho dos blocos e as estimativas podem ser melhores ou piores de acordo com essa quantidade de dados existentes. O conhecimento que se tem sobre a jazida e o modo como foram feitas as amostras, irão influenciar no grau de confiabilidade de todo o processo. Contudo, independentemente dos critérios que são adotados e da qualidade de todos os dados utilizados, o que se procura é que se tenha o mínimo de erro possível nos resultados.

O modelo de blocos estimado estende-se por toda área onde encontram-se os furos de sondagem. Foram gerados três modelos de blocos estimados referentes a cada um dos corpos geológicos de minério modelados. Os valores das médias globais dos modelos estimados e dos dados reais podem ser analisados na Tabela 1. Comparando-se os resultados obtidos para as médias das estimativas dos blocos de minério verifica-se que estas possuem valores bem próximos da média real das compostas dos furos de sondagem.

Tabela 1: Médias globais dos valores de PN dos blocos estimados e compostas dos furos de sondagem.

	Média (%)
Blocos estimados I	103
Blocos estimados II	101
Blocos estimados III	98
Compostas dos furos de sondagem	99

Os valores estimados obtidos pelo IQD foram validados visualmente, a Figura 5 exibe a distribuição dos teores de PN diferenciada por cores: na imagem é possível observar que as áreas coloridas em laranja nos blocos são correspondentes às áreas dos furos também em laranja, que possuem valores de PN com intervalo correspondente ao minério utilizado para calcário, e as áreas em verde nos blocos correspondem às áreas em verde nos furos e representam o intervalo de PN correspondente ao minério utilizado para cal.

Visualmente as distribuições de cores dos blocos se assemelham com as áreas dos furos correspondentes ao mesmo intervalo de cores dos respectivos intervalos de PN, o que demonstra a similitude existente entre a estimativa e os valores reais.

A outra validação realizada foi a comparação das médias locais ao longo dos eixos X, Y e Z com as médias dos furos nesse mesmo intervalo de coordenadas. Em X e Y utilizou-se intervalos de 40m e em Z intervalos de 5m. A Figura 6 representa os dados obtidos no eixo Y, essa validação obteve resultados satisfatórios com erros menores que os 10% toleráveis, assim como as realizadas para os eixos X e Z.

Considerando os resultados das validações realizadas, o método de estimativa aplicado foi satisfatório, ou seja, o modelo estimado apresenta coerência com a realidade.

Figura 5: Validação visual dos blocos estimados I (a), II (b) e III (c), comparando-se com os valores o intervalo de cores dos furos com o intervalo de cores dos blocos estimados.

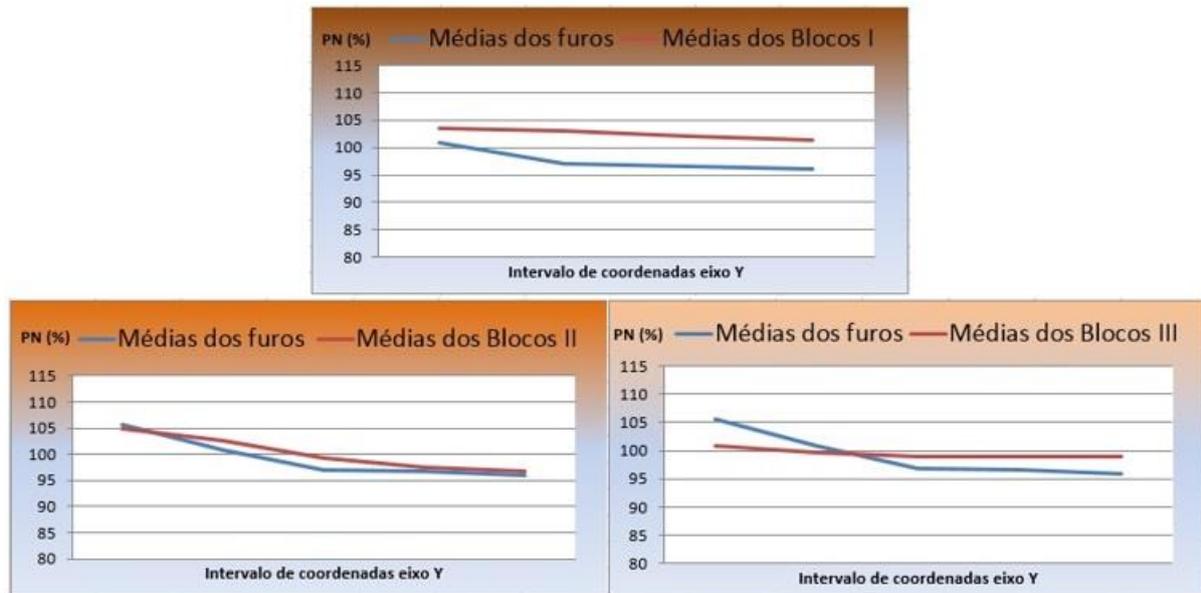


Figura 6: Validação das médias dos blocos x médias dos furos em intervalos de coordenadas no eixo Y.

4.3 Cava Operacional

Foram criadas duas alternativas de cavas para o projeto: uma sem restrição à pilha de estéril, restringindo apenas à estrada municipal, à falha e aos limites dos blocos (Figura 7); e outra restringindo, além dos anteriores à pilha de estéril (Figura 8).

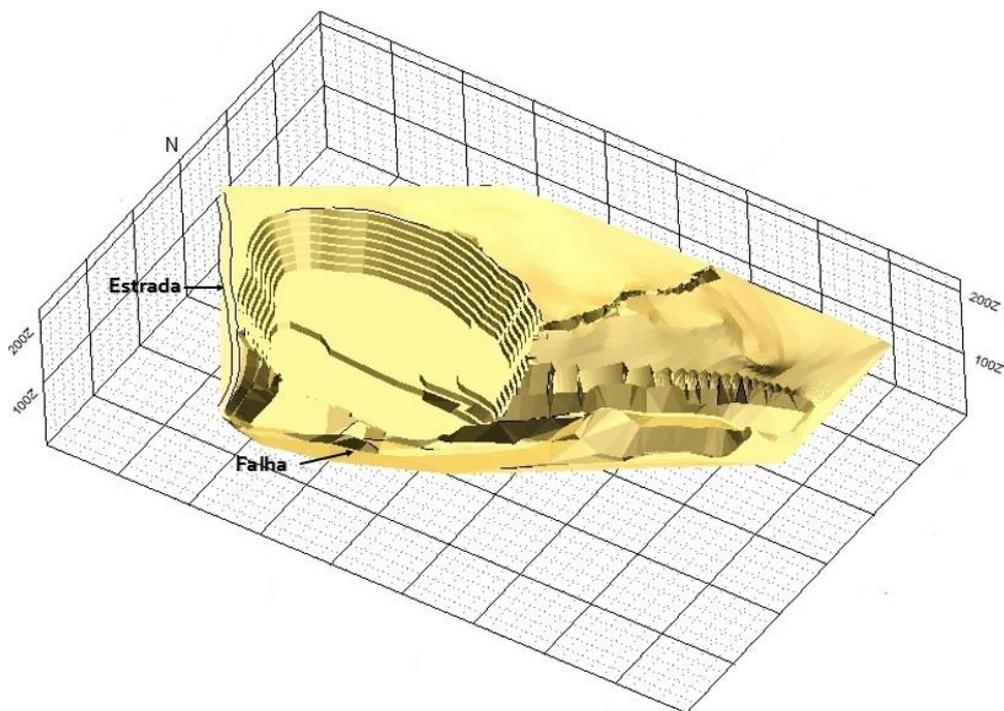


Figura 7: Cava operacional sem restrição a pilha de estéril.

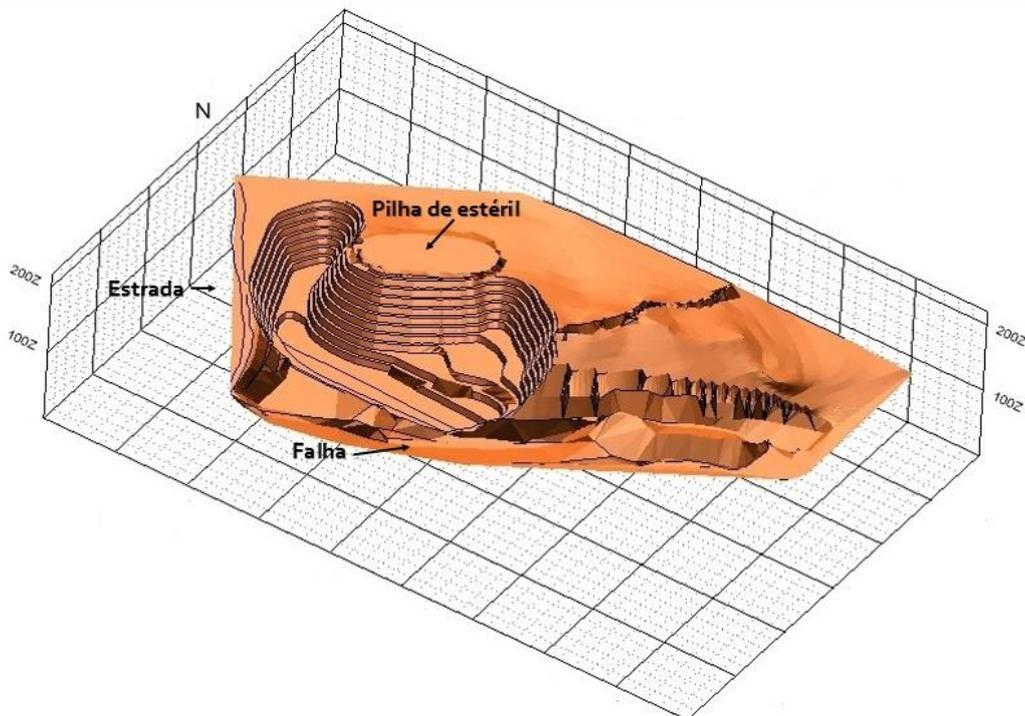


Figura 8: Cava operacional com restrição a pilha de estéril.

Na Figura 9 podem ser comparados os valores obtidos dos cálculos de volume (m^3), toneladas dentro da Cava I (restringindo a pilha de estéril) e Cava II (sem restrição da pilha de estéril).

Tem-se um acréscimo de 36,5% de minério na Cava II em comparação à Cava I, sendo que o aumento da remoção de estéril chega a 60,6%. O que explica o fato da REM (Figura

10.a) não apresentar grande diferença de uma cava para outra (Cava I com 0,43m³/t de REM e Cava II 0,50m³/t) apesar da Cava II aumentar bastante a quantidade de estéril, a quantidade de minério também teve um aumento significativo. Já a recuperação (Figura 10.b) mostra-se maior na Cava II com 95,9% enquanto na Cava I obteve-se 70,2% de recuperação, pelo fato de haver menos restrição para a sua extensão, o que possibilitou que maior quantidade de blocos de minério fossem incluídos dentro da Cava II.

Outro fato para contrabalançar com a REM seria a recuperação maior da Cava II e a quantidade de material com PN para cal, que chega aos 28,9% a mais na Cava II. O que dependendo do preço desse material, poderá influenciar na equação custo/benefício e definição de qual projeção teria maior lucratividade.

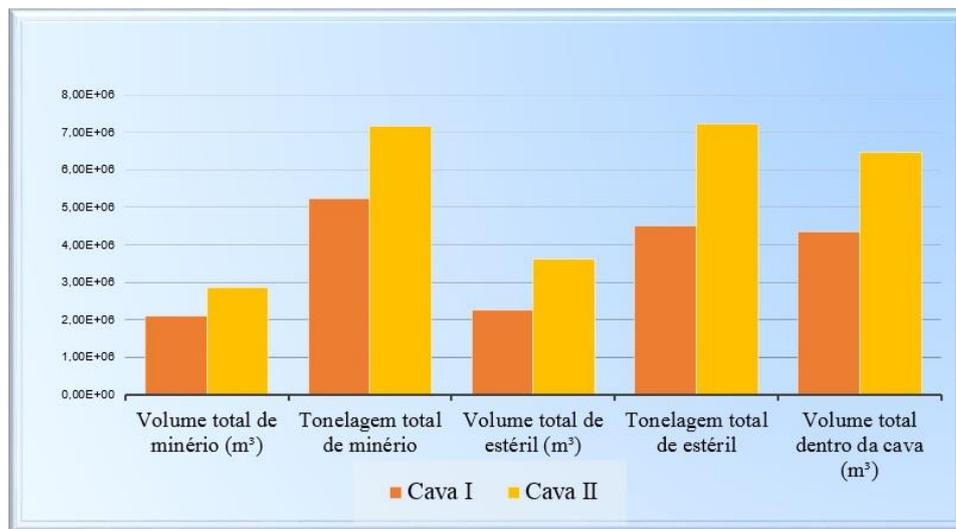


Figura 9: Comparação dos resultados de volumes e tonelagens de minério e estéril dentro da Cava I (laranja) e Cava II (amarelo) projetadas.



Figura 10: (a) REM em m³/t da Cava I em laranja e Cava II em amarelo; (b) Recuperação Cava I em laranja, Cava II em amarelo.

5 Conclusões

Devido à complexidade de cada aplicação, a modelagem sempre envolve um grau de compromisso entre a realidade e a manuseabilidade que o software utilizado permite. A questão é saber até que ponto, em termos de realidade, o modelo pode ser aceitável com o intuito de se chegar a uma representação fidedigna e exequível tecnicamente.

Devido à não disponibilidade de dados econômicos, a cava ótima, geralmente utilizada como base para se projetar a cava operacional, não pôde ser calculada.

Na falta desses valores as cavas criadas mostram os volumes e tonelagens de minério que seriam retirados não levando-se em consideração todos os custos e benefícios inerentes a todos os fatores envolvidos na retirada desse material, sendo assim, caberá a empresa a decisão sobre a melhor opção dentre as duas propostas, a partir de dados econômicos.

Com a flutuação dos preços de venda, aumento do custo de lavra e a introdução de técnicas de mineração mais sofisticadas, o planejamento da mina e a relação estéril-minério poderão mudar assim como a vida útil da mina.

E como mencionado anteriormente, na medida em que novas informações irão sendo atualizadas, principalmente em relação a dados obtidos através de furos de sondagem, este trabalho poderá ir sendo atualizado com as novas informações que irão sendo disponibilizadas ao longo das atividades da empresa, obtendo assim resultados o mais próximo possível da realidade e conseqüentemente agregando maior confiabilidade nas estimativas e no planejamento de lavra.

6 Referências Bibliográficas

ALCARDE, J.C. *Corretivos da acidez dos Solos: características e interpretações técnicas*. São Paulo. ANDA, 1992, p.26 (ANDA, Boletim Técnico, 6).

ALCARDE, J.C. *Corretivos da acidez dos Solos*. São Paulo, ANDA, 2005. (Boletim técnico, 6).

ALCARDE, J.C. *A Avaliação da Qualidade dos Corretivos da Acidez dos Solos*. Campinas: Fundação Cargill, p. 40, 1986.

ALCARDE, J.A.; RODELLA, A. A. *Qualidade e Legislação de Fertilizantes e Corretivos*. São Paulo, ANDA, 1992.

ASCARZA, B.F. *Planejamento de Lavra Estratégico e Tático de Morro da Mina-Conselho Lafayete-MG*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola de Minas da Universidade Federal Ouro Preto, p.132, 2008.

BATISTA J.D., *Análise Comparativa entre Métodos de Modelagem Geológica*, 2014.

BITENCOURT, M.F., 1983. *Geologia, petrologia, e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS*. Porto Alegre. 175p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BOCCHI P.B *Geologia da folha de Caçapava do Sul/RS*. Rio de Janeiro: DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral, 1970.

BOEIRA, R.C.; QUEIROZ, J. *Calagem e Controle da Acidez dos Viveiros de Aquicultura*. Circular Técnica 14 jaguariúna, São Paulo, 2006.

BUSTILLO, R.M. & LÓPEZ, J.C. *Manual da evaluación y diseño de explotaciones mineras*. Madrid, Espanha, 1997.

CPRM- *Serviço Geológico do Brasil. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Cachoeira do Sul, Folha SH.22-Y-A. Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:250.000. Organizado por Carlos Alfredo Porcher e Ricardo da Cunha Lopes. Brasília: CPRM, 2000.

COSTA, R.R.. *Projeto de Mineração*, 1º ed. Ouro Preto, UFOP, vol.1, p. 4-29, 1979.

HARTMAN, H.L.SME *Mining Engineering Handbook* (volume 2), AIME, New York, p. 1276-1277, 1992.

HOLZ, M; DE ROS, L.F., editores. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

FREITAS, J.L., *Proposição de avanço de lavra para a mina Dom Feliciano*, 2015.

ISAAKS, E.H, SRIVASTAVA, R.M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 1989.

MATHERON, G. (1965). *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*. Paris , masson.

MAZZINI, P.L.F. & SCHETTINI, C.A.F. *Avaliação de Metodologias de Interpolação Espacial Aplicadas a Dados Hidrográficos Costeiros Quase-Sinóticos*. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology. V13, n.1, 53-64, 2009.

PALMIERI M., *Modelo Geológico e Avaliação de Recursos Minerais do Depósito de Nióbio Morro do Padre, Complexo Alcalino- Carbonático Catalão II, GO*, 2011.

RIBEIRO.M.; BOCCHI P.B; FIGUEIREDO P.M. *Geologia da Quadrícula de Caçapava Su/RS*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1966.

SHEPARD, D., *A Two- dimensional interpolation for irregularly-spaced data function*. ACM National Conference, Proceedings 1968, p. 517 à 524, 1968. EUA.

SINCLAIR, A.J.; BLACKWELL, G.H. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 381, 2002.

TATYA, R.R; *Surface and Underground Excavations* (Methods, Techniques and Equipment), p. 516- 520, 2005.

TEDESCO, M.J. ; GIANELLO , C. Escolha do Corretivo da Acidez do Solo.In: KAMINSKI , J. (coord.). *Uso de Corretivos na Ácidez do Solo no Plantio Direto*. Boletim técnico,4 .p.95-104, 2000.

YAMAMOTO.J.K. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo, EDUSP, pp. 114 , 2001.