ANTONIO CARLOS DA COSTA MARTINS

**Impacto da aplicação da Geofísica no planejamento de lavra da mineração de
pequena escala**

São Paulo

2017

ANTONIO CARLOS DA COSTA MARTINS

**Impacto da aplicação da Geofísica no planejamento de lavra da mineração de
pequena escala**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2017

ANTONIO CARLOS DA COSTA MARTINS

**Impacto da aplicação da Geofísica no planejamento de lavra da mineração de
pequena escala**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Martins, Antonio Carlos da Costa

Impacto da aplicação da Geofísica no planejamento de lavra da mineração de pequena escala / A. C. C. Martins -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
107 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Mineração a Céu Aberto 2.Geofísica 3.Mineração de Pequena Escala
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Dedico este trabalho à minha família, especialmente aos meus irmãos Francisco Roberto e Carlos Antonio que sempre deram apoio para o meu desenvolvimento acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Giorgio de Tomi e ao Professor Dr. Vagner Elis, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo trabalho.

Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre.

Albert Einstein

RESUMO

A pesquisa é focada na aplicação de métodos indiretos de exploração mineral no planejamento de lavra em mineração de pequena escala (MPE). O objetivo é demonstrar o potencial de contribuição dos métodos geofísicos no planejamento de lavra. Para isso, foi desenvolvida uma nova metodologia para seleção e aplicação de métodos geofísicos e foram realizados experimentos conduzidos em três depósitos minerais, um de ouro, um de manganês e um de calcário, em que os métodos geofísicos testados apresentaram contribuições efetivas para o planejamento de lavra na MPE. Nos três experimentos realizados, foram utilizados métodos geofísicos de eletrorresistividade e de polarização induzida, com técnicas de sondagem elétrica vertical e de caminhamento elétrico, para identificar as estruturas geológicas de interesse. Esses métodos permitem, de maneira geral, determinar a profundidade e a espessura da camada de solo e das estruturas geológicas de interesse no horizonte investigado. Os resultados da aplicação dos métodos geofísicos comprovaram que as informações geofísicas permitem acelerar o processo de tomada de decisão no planejamento de lavra, pois reduzem o tempo e os custos associados à pesquisa mineral e à modelagem geológica utilizada no planejamento de lavra da MPE.

Palavras Chaves: Geofísica, Planejamento de Lavra, Mineração de Pequena Escala.

ABSTRACT

This research focus on the application of indirect methods of mineral exploration to support decision-making during mine planning of small-scale mines. The objective is to demonstrate the potential contribution of the introduction of geophysical methods to the mine planning cycle. A new methodology is proposed for selecting and applying geophysical methods in small-scale deposits in order, to test its impact in the mine planning process. The methodology has been applied to three small-scale deposits of gold, of limestone and of manganese ore. The selected geophysical methods were electro-resistivity and induced polarization, with vertical electrical sounding and electric mapping techniques in order to identify the geological structures of interest. In general, the selected methods allowed the gathering of quick and precise information of the depth and the thickness of the geological structures within the investigated horizons. The results obtained in the experiments have proven that the incorporation of geophysical methods allow for faster decision-making in the mine planning process of small-scale mines because they reduce the time and the costs associated to the acquisition of geological information in small-scale mining.

KEYWORDS: Geophysics, Mining Planning, Small Scale Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos hipotéticos da variação do nível de incerteza nos horizontes do planejamento lavra de longo prazo, médio prazo, curto prazo e operacional. ...	17
Figura 2 - Exemplo do impacto da utilização de métodos geofísicos na variação do nível de incerteza da MPE nos horizontes do planejamento de lavra de longo prazo, médio prazo, curto prazo e operacional.	18
Figura 3 - Distribuição das minas pelas principais UF'S e distribuição em porcentagem por porte	23
Figura 4 - Diagrama de captura de dados geológico.....	26
Figura 5 - Ilustração da cava matemática e a cava operacional.....	29
Figura 6 - Tópicos do ciclo de planejamento de lavra	33
Figura 7 - Determinações de resistividade aparente, eletrodos de emissão e recepção.....	36
Figura 8 - Disposição dos eletrodos para técnica - SEV	37
Figura 9 - Disposição, dos eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial, no desenvolvimento da técnica do CE - arranjo dipolo dipolo	38
Figura 10 - Curva de descarga IP (Domínio do Tempo).....	40
Figura 11 - Diagrama de atividades estabelecido para o desenvolvimento da pesquisa.....	43
Figura 12 - Mineração de manganês local onde foi realizada a pesquisa	44
Figura 13 - Diagrama de atividades de pesquisa	45
Figura 14 - Área com afloramentos	46
Figura 15 - Zona de cisalhamento regional com ocorrências de corpos de manganês	47
Figura 16 - Estrutura sinforme com eixo de direção aproximada NE-SW, com caimento suave para NE	48
Figura 17 - Mapeamento realizado na área com a identificação de afloramentos.	49
Figura 18 - Vista geral da cava e aspecto das dobras recumbentes na área de estudo	49
Figura 19 - Modelo conceitual do depósito de manganês com um perfil sigmoidal	50
Figura 20 - Resultado do levantamento topográfico realizado em campo.....	51
Figura 21 - Curvas de nível resultantes do levantamento topográfico.....	51

Figura 22 - Superfície topográfica da área em perspectiva	52
Figura 23 - Perfis dos ensaios de CE realizados.....	54
Figura 24 - Gráfico da resistividade e polarização induzida das SEV105	55
Figura 25 - Gráfico da resistividade e cargabilidade das SEV107.....	55
Figura 26 - Gráfico da resistividade e cargabilidade das SEV108.....	56
Figura 27 - Gráfico da resistividade e cargabilidade da SEV109	56
Figura 28 - CE102, CE100, CE101	57
Figura 29 - CE106, CE104	58
Figura 30 - Modelo geológico com as seções interpretadas	59
Figura 31 - Perspectiva da Interpretação do corpo de minério com a utilização das seções geofísicas.....	59
Figura 32 - Modelo geológico do depósito disposto em perspectiva nos eixos x, y e z, se afastando para NE.....	59
Figura 33 - Modelo geológico do depósito em perspectiva nos eixos x, y e z, afastando para NO.....	60
Figura 34 - Modelo geológico do depósito disposto em função dos eixos x, y e z, afastamento para N.....	60
Figura 35 - Modelo geológico do depósito com vista em planta.....	60
Figura 36 - Cava conceitual vista em planta.....	61
Figura 37 - Cava conceitual com vista em perspectiva.	62
Figura 38 - Planejamento de sondagem de sondagem.....	63
Figura 39 - Local da ocorrência no município de São Roque (SP).....	65
Figura 40 - Diagrama de atividades da pesquisa	66
Figura 41- Localização e mapa geológico de São Roque (SP)	68
Figura 42 - Mapa Geológico Regional, com detalhe na área de estudo.....	69
Figura 43 - Mapa de solo da área de estudo.....	71
Figura 44 - Mapa com a localização das sondagens	72
Figura 45 - Mapa com localização das linhas CEs.....	74
Figura 46 - Atividades de campo durante o levantamento de geofísica em São Roque.....	75
Figura 47 - Resultado da SEV01	76
Figura 48 - Resultado SEV02.....	77
Figura 49 - Resultados CE01 e CE02B.....	78
Figura 50 - Resultado CE03, CE04, CE05	79

Figura 51 - CE06, CE07	79
Figura 52 - Mapa da região de estudo com o limite do modelo de blocos e a posição das duas seções verticais no modelo de blocos	81
Figura 53 - seção vertical na posição da Linha Base da sondagem a trado	81
Figura 54 - Seção vertical na Linha Transversal da sondagem a trado.	82
Figura 55 - Vista em perspectiva da cava conceitual desenhada no entorno da região com maior potencial de ocorrência de Au em São Roque	83
Figura 56 - Vista em planta da cava conceitual desenhada em São Roque entorno da região com maior pontencial de ocorrência de Au.	83
Figura 57 - Localização da mineração	85
Figura 58 - Título minerário atual com manifesto de lavra e novo título com alvará de pesquisa.....	86
Figura 59 - Localização das SEVs	88
Figura 60 - SEV10.....	89
Figura 61 - SEV 05.....	90
Figura 62 - Modelo geológico expandido atualizado	93
Figura 63 - Seção geológica AA'	93
Figura 64 - Seção geológica BB"	94
Figura 65 - Resultados da variação da incerteza geológica no horizonte do planejamento lavra de LP, MP, CP para a mineração de grande porte e para a MPE levando em conta o impacto da utilização de métodos geofísicos.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística sobre as MPE e artesanal no mundo e América Latina e Caribe	21
Tabela 2 - Interpretação das SEVs	54
Tabela 3 - Parâmetros de desenho de cava	61
Tabela 4 - Resultado da cubagem	62
Tabela 5 - Fase 1 do plano de sondagem	64
Tabela 6 - Fase 2 do plano de sondagem	64
Tabela 7 - Localização das sondagens referentes às amostras.....	73
Tabela 8 - Coordenadas da aplicação da geofísica com a técnica de caminhamento elétrico (CE) e técnica de sondagem elétrica vertical (SEV)	75
Tabela 9 - Resultados da SEV01 e da SEV02	77
Tabela 10 - Coordenadas das SEVs	87
Tabela 11 - Modelo geoeletrico da SEV10 e SEV05.....	90
Tabela 12 - Profundidade interpretada da parte superior da rocha	92
Tabela 13 - Custos relativos à aplicação do método de sondagem rotativa	96
Tabela 14 - Preços de sondagem DAER (2016)	96
Tabela 15 - comparação em relação ao tempo e custos, entre o método geofísico e o método de sondagem rotativa.....	97

São Paulo

2017

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Questões de pesquisa.....	18
1.2. Contribuição da tese.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Mineração em pequena escala.....	20
2.1.1. Mineração de pequena escala no Brasil.....	22
2.1.2. Importância da mineração de pequena escala no Brasil - DNPM (2010).....	23
2.2. Projeto de mineração.....	24
2.2.1. Estimativa de recursos e reservas minerais.....	24
2.2.2. Estudos Preliminares no planejamento de lavra.....	26
2.2.3. Planejamento de lavra.....	27
2.2.3.1. Otimização da cava e sequenciamento de lavra.....	28
2.2.3.2. Planejamento da vida da mina.....	30
2.2.3.3. Planejamento operacional da cava.....	31
2.2.3.4. Ciclo do planejamento de lavra.....	31
2.3. Geofísica aplicada.....	33
2.3.1. Métodos elétricos e eletromagnéticos.....	34
2.3.1.1. Método de Eletorresistividade.....	34
2.3.1.1.1. Técnica de sondagem elétrica vertical (SEV)	36
2.3.1.1.2. Técnica de caminhamento elétrico (CE).....	37
2.3.1.2. Método de Polarização Induzida (IP)	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1. Trabalhos experimentais.....	42
3.1.1. Mineração de Manganês.....	43
3.1.1.1. Conhecimento geológico regional.....	45
3.1.1.2. Mapeamento geoestrutural e Modelos propostos.....	48
3.1.1.3. Levantamento topográfico e Modelagem da topografia.....	50
3.1.1.3.1. Modelo topográfico proposto.....	50

3.1.1.3.2.	Avaliação do modelo topográfico.....	52
3.1.1.4.	Ensaio geofísico.....	52
3.1.1.5.	Modelagem geológica preliminar.....	58
3.1.1.6.	Elaboração da cava conceitual.....	61
3.1.1.7.	Comentários sobre os trabalhos realizados.....	63
3.1.2.	Mineralização de Ouro.....	65
3.1.2.1.	Trabalho de campo com Abertura de picadas e demarcação de furos.....	66
3.1.2.2.	Geologia regional.....	67
3.1.2.3.	Reconhecimento de campo.....	69
3.1.2.4.	Sondagem a Trado.....	71
3.1.2.4.1.	Análise Química das amostras.....	71
3.1.2.4.2.	Comentários Sobre os Resultados das Amostras.....	73
3.1.2.5.	Ensaio Geofísico.....	73
3.1.2.6.	Modelo geológico preliminar.....	80
3.1.2.6.1.	Avaliação do modelo de blocos.....	82
3.1.2.6.2.	Estudo Conceitual de Cava.....	82
3.1.2.7.	Comentários sobre os trabalhos realizados.....	83
3.1.3.	Mineração de calcário.....	84
3.1.3.1.	Ensaio geofísico.....	86
3.1.3.2.	Expansão do modelo geológico.....	91
3.1.3.3.	Comentários sobre os trabalhos realizados.....	94
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	98
4.1.	Resumo dos resultados dos estudos realizados.....	98
4.2.	Análise da redução do nível de incerteza geológica.....	99
5.	CONCLUSÕES.....	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

A imagem que a sociedade tem da mineração está, de maneira geral, associada às grandes empresas do setor. No Brasil, calcula-se que existam milhares de Minerações em Pequena Escala (MPE). De acordo com Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM (2010), as MPE, representam cerca de 70,5% das minerações no Brasil. A grande questão sobre essas minerações é como identificam as jazidas que darão início aos projetos com tão pouco recursos e insuficiência de capital de investimento para as atividades exigidas. De acordo com Singer e Kouda (1999), a instalação de uma mina necessita de investimento significativo e de gestão cuidadosa dos riscos associados ao negócio. Por isso, é de vital importância a existência de capital para investir, não somente na etapa que envolve pesquisa de exploração geológica, mas também nas várias etapas posteriores de um empreendimento mineiro.

Conforme DNPM (2010), uma das características principais da MPE é a insuficiência das informações geológicas. Considerando os diferentes tipos e características da MPE e observando aquelas que fazem o planejamento de lavra, a ausência de uma base de conhecimento geológico é o fator principal para um planejamento sem consistência e aproveitamento mineral ineficiente.

Segundo Hentschel et al. (2002), a escassez de capital de investimento na etapa de exploração na MPE é uma das principais causas do aproveitamento mineral ineficiente. Para Hruschka e Echavarria (2011), é nessa etapa que surgem os inúmeros desafios para MPE, que, geralmente são negligenciados devido à insuficiência de capital.

De acordo com Ericsson (2010), o cenário atual da mineração apresenta uma tendência geral para a lavra de depósitos médios e pequenos com teores mais baixos devido ao esgotamento de depósitos grandes com teores altos. Para Buxton (2013), a mineração artesanal e de pequena escala contribui com 15 a 20% da produção global de minerais e metais. Isso significa que, apesar de todas as dificuldades, a MPE está desempenhando um papel cada vez mais significativo na produção mundial, sinalizando uma tendência crescente de aproveitamento de depósitos minerais de menor porte e com teores mais baixos.

Por outro lado, a utilização de métodos geofísicos pode ser uma opção que viabilize a obtenção de conhecimentos geológicos em depósitos de menor porte de forma rápida e econômica. A utilização de métodos geofísicos como ferramenta complementar à pesquisa mineral é reconhecidamente uma abordagem adequada para contribuir tanto no aspecto de conhecimento geológico quanto na diminuição dos custos associados à pesquisa mineral. Segundo Ribeiro (2010), o uso de métodos geofísicos para a indicação de zonas mineralizadas pode reduzir de 30% a 50% a quantidade de perfurações negativas (furos estéreis). De acordo com CINTRA, AJUB, STURARO (2003), o custo médio da sondagem direta é de US\$100/m. Embora as técnicas geofísicas ainda sejam mais frequentes durante a fase inicial da exploração geológica, observa-se uma tendência de sua utilização nas fases mais avançadas de um projeto de mineração (Sena, 2010). Segundo Endo (2010), se a sociedade contemporânea elevar os níveis de consumo de bens ligados à produção de bens minerais, como minério de ferro e petróleo, a geofísica deverá alcançar ou superar, em breve, o status adquirido pela ciência geológica.

O foco de pesquisa desta tese é a utilização dos métodos geofísicos como forma de contribuir para melhorar o conhecimento geológico do depósito e ajudar no planejamento de lavra da MPE. A Figura 1 ilustra exemplos hipotéticos da variação do nível de incerteza nos horizontes de planejamento de lavra de longo prazo (LP), de médio prazo (MP), de curto prazo (CP) e operacional (OP), tanto em uma empresa de mineração de grande porte quanto em uma empresa de pequeno porte. No caso das empresas de grande porte, o exemplo hipotético ilustra a redução da incerteza geológica referente à introdução de novas sondagens para reduzir as malhas de pesquisa nas campanhas de amostragem nos horizontes de planejamento LP, MP, CP e OP. Já no caso da MPE, o nível de incerteza é sempre maior pelo fato do reduzido número de sondagens, normalmente, realizadas, com pouca redução nessa incerteza nos horizontes de planejamento LP, MP e CP; especificamente para o horizonte OP, há, normalmente, uma queda maior no nível de incerteza devido à abertura das frentes de lavra nessa fase.

Figura 1 - Exemplos hipotéticos da variação do nível de incerteza nos horizontes do planejamento lavra de longo prazo, médio prazo, curto prazo e operacional.

Fonte: 1. Baseado em Tichauer (2016). 2.Ferreira (2016).

Já a Figura 2, ilustra o impacto potencial que a aplicação da geofísica pode oferecer no planejamento de lavra na MPE por meio do aumento do conhecimento geológico ao longo das diversas fases do ciclo de planejamento de lavra. A linha que representa o nível de incerteza geológica na MPE com apoio da geofísica ilustra a redução da incerteza geológica em todos os horizontes de planejamento de lavra com a utilização de métodos geofísicos.

Figura 2 - Exemplo do impacto da utilização de métodos geofísicos na variação do nível de incerteza da MPE nos horizontes do planejamento de lavra de longo prazo, médio prazo, curto prazo e operacional.

Fonte: 1. Baseado em Tichauer (2016). 2. Ferreira (2016). 3. Autor

A pesquisa considera como MPE a mineração cujas características incluem a atividade de mineração que produz menos de 100.000 t/a e a mineração artesanal como um subconjunto da mineração de pequena escala, em que a operação não segue os princípios ecológicos e convencionais de engenharia de mineração e usa técnicas simples rudimentares ou básicas para extrair minerais. (SECCATORE et al. 2014, p. 663).

1.1. Questões de pesquisa

- A geofísica como método indireto de pesquisa mineral, pode contribuir para o planejamento de lavra da MPE?
- Que métodos geofísicos podem atender o planejamento de lavra na MPE?
- Quais os benefícios que os métodos geofísicos podem proporcionar à MPE?

1.2. Contribuição da tese

Esta pesquisa considera a utilização de métodos geofísicos na MPE como ferramenta complementar de pesquisa mineral de forma a reduzir o nível de incerteza geológica no ciclo de planejamento de lavra. Conforme Peroni (2002), o propósito do ciclo de planejamento de lavra é prover subsídios suficientes dentro de um projeto de mineração para o processo de tomada de decisão sob o ponto de vista da capacidade de se lavar determinadas áreas do depósito a partir de teores estimados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mineração em pequena escala

Uma das principais atividades da MPE é a produção de minerais industriais e agregados e de bens minerais de alto valor como ouro, diamante e pedras preciosas. Segundo Leite et al. (2007), apesar da indústria da mineração estar voltada para as grandes empresas, principalmente nos países em desenvolvimento, os minerais em grande parte, são extraídos pelas MPE, que operam com equipamentos e ferramentas simples e até mesmo rudimentares. O assunto sobre uma classificação ou formalização mais precisa sobre a MPE tem provocado muitas discussões na comunidade mineira internacional. A Organização Internacional do Trabalho-OIT (1999) aponta que, em dezenas de países de vocação mineira, a definição de mineração em pequena escala varia grandemente e, em vários países o critério adotado é puramente subjetivo e qualitativo, limitando-se a assertivas como: operações artesanais, operações a céu aberto, utilização de equipamentos simples e operações com baixos níveis de mecanização. De acordo com (HENTSCHEL; HRUSCHKA; PRIESTER, 2002), as legislações dos países em desenvolvimento referem-se à mineração artesanal e de pequena escala, como "indivíduos, grupos, famílias ou cooperativas de mineração com o mínimo ou nenhuma mecanização, trabalhando na ilegalidade no setor informal do mercado". Ainda de acordo com esses autores, a discussão sobre a precisão de uma classificação relativa à MPE e mineração artesanal vem sendo discutida há, pelo menos 30 anos, na comunidade de desenvolvimento internacional. Segundo Seccatore et al. (2014), a MPE pode ser também definida pelos níveis baixos de produção, despesas e receitas. Conforme (Barreto, 2003), embora existam deficiências estatísticas e de informação em torno da atividade das MPEs em todos os países da América Latina e Caribe, sua importância é facilmente comprovada. De acordo com (Jennings, 1999), um estudo elaborado pela OIT em (1999), sobre as MPEs, fornece alguns números agregados que ajudam a construir uma visão sobre a MPE na América Latina e Caribe. No relatório OIT (1999), as MPEs têm uma participação significativa:

- 15 a 20% da produção mundial de minerais não combustíveis;
- 90% a 100% da produção de pedras preciosas produzidas;
- 80% a 100% de diamantes.

- O mesmo estudo ainda identifica que:
- Mais de 13 milhões de pessoas trabalham na MPE;
- 80 a 100 milhões de pessoas dependem da Mineração de Pequena Escala para subsistência;
- 35 países estudados, todos na categoria de países em desenvolvimento situados na África, América Latina, Caribe e Ásia, 21 apresentam crescimento no setor da mineração de pequena escala (MPE) OIT (1999);
- 10,9 a 12,5 milhões de latino-americanos dependem desta

A Tabela 1 apresenta dados estatísticos fornecidos pela OIT (1999) sobre MPE e mineração artesanal no mundo, América Latina e Caribe.

Tabela 1 - Estatística sobre as MPE e artesanal no mundo e América Latina e Caribe

País	Total de número de trabalhadores
Bolivia	72.000
Brasil	10.000
Burkina Faso	100.000 a 200.000
China	3 000 a 15 000
Equador	92.000
Gana	200.000
Índia	500.000
Indonésia	109.000
Malawi	40.000
Mali	200.000
Moçambique	60.000
Peru	30.000
Filipinas	185.400
Papua-Nova Guiné	50.000 a 60.000
África do Sul	10.000
Tanzânia	550.000
Zâmbia	30.000
Zimbabwe	350.000

Fonte: OIT (1999)

Com esse quadro, nota-se a significativa participação da MPE na mineração. Segundo (Danielson, 2003) e (Leite *et al.*, 2007), a maioria das pessoas que vivem em países industrializados, associam a produção de minerais a grandes corporações que utilizam equipamentos mecanizados para extrair enormes quantidades de minerais. De fato, ficam surpresos ao saber que em todo o mundo a maioria dos minerais são extraídos por minerações artesanais e de pequena escala e por

peessoas que trabalham com ferramentas simples. Para Bryceson et al (2010), existe uma grande tendência de êxodo de trabalhos rurais para mineração. Uma recente pesquisa, na Tanzânia, demonstrou que os trabalhadores rurais que deixaram a atividade agrária para se dedicar à mineração de pequena escala puderam superar os desafios dessa atividade e foram recompensados. De acordo com Maconachie (2011), uma melhor compreensão da relação entre as atividades de mineração e agricultura informais é essencial para reduzir a pobreza e promover meios de subsistência rurais sustentáveis.

No entanto, as limitações gerenciais, econômicas e estratégicas da pequena mineração, normalmente, representam um obstáculo para o seu desenvolvimento sustentável. Conforme citam (Sousa *et al.*, 2011), (Spiegel, 2009), (Hilson e Pardie, 2006), essa situação é resultado de uma combinação de falta de vontade política, políticas inadequadas e falta de infraestrutura para fazer cumprir os regulamentos existentes e, principalmente, a falta de incentivos para que mineiros possam operar em conformidade e obter maiores lucros. De acordo com Kemp (2013) e Buxton (2013), o desenvolvimento sustentável na mineração de pequena escala ainda não é parte fundamental entre as atividades da mineração e os governos precisam ter políticas mais direcionadas à atividade.

2.1.1. Mineração de pequena escala no Brasil

A mineração de pequena escala no Brasil é uma importante fonte de geração de empregos com atividades em todo território nacional e atua como um grande agente dinamizador de economias locais. A carência de políticas corretas e adequadas para o seu desenvolvimento sustentável dificulta a sua atuação. Do ponto de vista social e econômico, a situação das MPEs no Brasil não é diferente da dos outros países mencionados nessa pesquisa, valendo as mesmas dificuldades e desafios para as MPEs no Brasil. A inexistência de capital de investimento próprio não permite o aproveitamento do bem mineral dentro de uma abordagem sustentável. De acordo com Gamarra Chilmaza (2005), a mineração em pequena escala é, em sua maior parte, informal, e não atende às exigências legais. De acordo com o DNPM (2010), existem 3.370 lavras de minas no território brasileiro distribuídas em 4,7% de grande porte, 24,7% de médio porte e com uma participação significativa 70,5% de pequeno porte.

A Figura 3 apresenta a distribuição das minas pelas principais Unidades Federativas -UF'S e a distribuição em porcentagem com classificação por porte.

Figura 3 - Distribuição das minas pelas principais UF'S e distribuição em porcentagem por porte

Fonte: OIT (1999)

2.1.2. Importância da mineração de pequena escala no Brasil - DNPM (2010)

- Grande peso na estrutura do setor mineral brasileiro:
 - pequenas e as médias empresas de mineração representam aproximadamente 70,5% do número de empresas de mineração ativas no país.
- Grande empregadora de mão de obra:
 - pequenas empresas são responsáveis por cerca de 30% do total de empregos formais na atividade mineral. Se forem considerados os empregos oriundos da informalidade, esse número pode atingir 40%.
- Estrutura de capital e administrativa:
 - geralmente de controle familiar ou sociedade por cotas de responsabilidade limitada.
 - administração feita pelos próprios sócios, quase sempre com base em métodos empíricos.
- Atua na produção de bens minerais industriais e de emprego imediato:
 - a MPE predomina na produção de argila, areia, ardósia, brita, calcário, gipsita, granito (construção, saneamento, infraestrutura), bentonita, calcita, diamante, diatomita, dolomita, feldspato, filito, mica, magnesita, pirofilita, sílex, quartzito, talco, vermiculita (indústrias diversas).

2.2. Projeto de mineração

O processo de extração mineral é chamado de mineração, cujo produto final da atividade atinge diversos setores da sociedade: setores industriais, automobilísticos, eletroeletrônicos, entre outros, abastecidos frequentemente por produtos minerais que chegam às indústrias e em nossas casas, proporcionando-nos conforto e bem estar. A mineração, de maneira geral, é imprescindível na vida da sociedade moderna, além de ser de extrema importância para a economia de um país.

De acordo com Curi (2014), os procedimentos para atingir-se o produto final, no contexto de um projeto de mineração, envolvem quatro etapas, que são chamadas de operações de lavra e divididas em: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e fechamento da mina. O autor relata que a descoberta de um depósito mineral nasce a partir de processos geológicos que ocorrem no nível da crosta terrestre. Tais processos envolvem alterações na crosta terrestre formando as rochas e compostos minerais. Um projeto de mineração desenvolve-se a partir da busca de minerais que tenham interesse econômico e inicia-se com as estimativas de recurso e reservas minerais.

2.2.1. Estimativa de recursos e reservas minerais

"O processo de avaliação de um depósito inicia-se com a sua amostragem e tem como objetivos a identificação e reconhecimento da área mineralizada em toda sua extensão, bem como a geometria do corpo mineralizado, seus teores e sua distribuição espacial" (YAMAMOTO, 2001, p.15).

Para Yamamoto (2001), o cálculo de reservas minerais é baseado nos dados coletados nos pontos de amostra obtidos por meio do processo de sondagem, ou seja, amostras recolhidas em furos de sondagem nos depósitos. Segundo o autor, o material coletado é submetido à análise que visa ao conhecimento da geologia e à geometria do minério constituindo-se como base de informação para a determinação dos parâmetros geológicos.

O modelo geológico obtido por meio de dados coletados nos furos de sondagem, permite o início dos cálculos das reservas minerais. Para o autor acima citado, os dados coletados devem ser de extrema confiabilidade e refletir com fidelidade

teores, densidade e quantidade do minério nos pontos de amostra. Ele menciona que, estrategicamente, a pesquisa que envolve processo de cálculo da reserva tem que considerar a divisão do depósito em blocos de cubagem em que haja o domínio dos pontos de amostragem, ressaltando que essa medida levará ao modelo de bloco.

De acordo com Yamamoto (2001), a análise geoestatística é importante no processo de cálculo de reservas e trata-se de elemento fundamental no processo de pesquisa que permite determinar a variabilidade do depósito, por meio do variograma que utiliza as variáveis regionalizadas e o local onde se originam os dados para os cálculos variográficos. O variograma real finaliza o processo de análise geoestatística, fornecendo subsídios suficientes para o desenvolvimento do processo de estimativa por krigagem.

O autor define a krigagem como um método de interpolação que faz a estimativa nos pontos não amostrados utilizando-se dos dados obtidos do variograma por meio dos valores das variáveis regionalizadas, considerando os teores e densidade das amostras. Para o referido autor, o processo aplica-se ao modelo de blocos geológicos que representam a jazida mineral. De acordo com Popoff, (1966), são necessárias considerações a respeito do corpo de minério, avaliações geológicas, método de pesquisa e amostragem, dados da pesquisa, delimitação do corpo mineral e aspectos estruturais, litológicos e mineralógicos. As técnicas de sondagem e de amostragem devem ser adequadas, bem como a densidade das amostras para que se identifique a continuidade da mineralização. A Figura 4 apresenta o diagrama de captura de dados geológicos.

Figura 4 - Diagrama de captura de dados geológico.

Fonte: Autor

2.2.2. Estudos Preliminares no planejamento de lavra

De acordo com Curi (2014), com os resultados obtidos, relativos aos estudos de avaliação do depósito mineral e, portanto, a identificação da reserva mineral (Jazida), a próxima etapa consiste na elaboração de um plano de lavra, isto é, o planejamento de lavra. No entanto, três estágios de estudos antecedem o desenvolvimento desse planejamento de lavra: estudos conceituais, estudos preliminares e estudos de viabilidade econômica.

Para o citado autor, os estágios de estudo preliminares e, principalmente, o estágio de estudo de viabilidade econômica já incluem a programação da lavra, isto é, o planejamento de lavra com previsão da lavra. O mesmo relata que as informações adquiridas nas fases de estágio de estudo estão direcionadas na identificação dos riscos ao projeto. Durante os estágios de estudo, já é possível quantificar a matéria relativa ao mineral e a matéria relativa ao estéril, fazer cálculos sobre custos operacionais, receita, cálculo de reservas e fazer uma abordagem de aspecto financeiro.

Hustrulid, Kuchta (2013), comentam que o planejamento de lavra tem como objetivo reduzir os custos e potencializar a lucratividade no projeto final do empreendimento. Freitas (2015), também comenta que o planejamento de lavra dentro de um empreendimento mineiro, tem como incumbência diminuir os riscos e maximizar os ganhos e seu desenvolvimento deve estender-se durante todas as atividades da mina até o seu fechamento.

De acordo com Silva (2008) para obter-se um resultado eficiente do planejamento de lavra é de fundamental importância que se obtenha o maior conhecimento da jazida para conseguir-se um bom retorno do investimento aplicado.

De acordo com Kreuzer e Etheridge (2010), o risco na mineração é a probabilidade de um projeto produzir um resultado econômico não desejado, significando dizer que o plano de lavra precisa ter informações seguras a respeito da jazida e deve estar associado às estimativas de erros aceitáveis para andamento do projeto. Para Silva (2008), o planejamento de lavra deve ser revisado periodicamente em razão de mudanças que podem ser de caráter financeiro, mercado ou de novas informações a respeito do corpo mineralizado.

Dessa forma é evidente que a utilização do planejamento de lavra como ferramenta é de fundamental importância para o empreendimento mineiro, e que para a sua realização é necessário o conhecimento preliminar do depósito na fase de pesquisa.

2.2.3. Planejamento de lavra

O planejamento estratégico de lavra é efetuado ainda nos estágios de estudo e baseia-se nas informações sobre jazida. A cava ou pit é criteriosamente desenhada e utiliza conceitos matemáticos por meio de algoritmos.

De acordo com Silva (2008), as atividades de otimização de cava, sequenciamento de lavra, simulação de transporte de carga, operacionalização de cava, bem como a análise econômica da lavra, estão correlacionadas e são atividades obrigatórias do planejamento de lavra. Para Hustrulid & Kuchta (2013) essas atividades têm o objetivo de assegurar a cava final ótima, bem como a estimativa da reserva lavrável, considerando o longo prazo.

2.2.3.1. Otimização de cava e sequenciamento de lavra

"A etapa de sequenciamento é parte integral do processo de otimização da mina, permitindo o melhor controle das restrições econômicas, geométricas, técnicas e ambientais[...]" (SILVA, 2008, p.61). Segundo Achireko (1998), a otimização da cava é importante porque produz informações relevantes para a avaliação econômica do depósito mineral, além de possibilitar a projeção para o desenvolvimento dos planos de longo, médio e curto prazos.

A otimização da cava determina a melhor geometria da cava ou pit e utiliza algoritmos para a determinação dos seus limites finais, definindo o tamanho e a geometria da mina no final de sua vida útil. Curi (2014) relata que um grande esforço por parte dos especialistas na busca de novas soluções para obtenção da cava ótima favoreceu o surgimento de novas opções a respeito dos algoritmos os quais determinam que blocos do modelo sejam economicamente viáveis para a extração, de acordo com os custos de remoção do estéril e extração do minério, buscando a maximização da riqueza futura. Ainda, de acordo com esse autor, a cava ótima é a representação do resultado da configuração do algoritmo que tem como proposta:

- maior lucratividade;
- maior Valor Presente Líquido-VPL;
- maior aproveitamento dos recursos minerais

A Figura 5 apresenta um exemplo de otimização de cava por meio do software Micromine.

Figura 5 - Ilustração da cava matemática e a cava operacional

Fonte: Autor.

"O sequenciamento da lavra define a melhor opção de sequência para retirada e aproveitamento do material (minério) em função das pit shell e pushbacks geradas. Dentro do sequenciamento de lavra, determina-se: a vida útil da mina dada pela razão da sua produção, projetos dos avanços operacionais (pushbacks) e a determinação da sequência de extração dos blocos".

Um dos pontos chave no sequenciamento da lavra é minimizar a cava ao máximo possível, reduzindo, assim, os custos. Contudo, o ângulo do talude, que é o fator limitante para o tamanho da cava, é uma variável importante que deve ser considerada, sobretudo pelo fator segurança da mina. Na determinação do ângulo de talude devem-se considerar as características geomecânicas do maciço. (SILVA, 2008, p. 47).

De acordo com Couzens (1979), existem dois tipos de planejamento de produção:

- Operacional ou planejamento de curto prazo: necessário para o funcionamento de uma mina em operação.
- Planejamento de produção de longo prazo; usualmente realizado para estudos de viabilidade e financiamento de uma mina, o que subentende trabalhos de avaliação de reservas e definição de cava final, elementos determinantes no processo de tomada de decisão.

Para Barták (1999), o operacional trata a produção em curtos períodos de tempo, limitando suas atividades a um único departamento que envolve os equipamentos, homens e máquinas associados, planejamento de curto prazo operacional de produção. O planejamento de produção de longo prazo refere-se à tarefa de planejar e resolver situações complexas que envolvem longos períodos de tempo e nas quais as atividades estão relacionadas a diversos departamentos e, eventualmente, a toda corporação industrial.

O assunto sobre o sequenciamento de lavra é relativamente extenso, não sendo a finalidade desta pesquisa, o seu aprofundamento. Então, para finalizar, o principal objetivo do sequenciamento de lavra é determinar uma sequência estratégica de escavação suficiente para atender à produção.

2.2.3.2. Planejamento da vida da mina

Do ponto de vista de tempo de duração de uma mina e para atender às necessidades do projeto da mina, a estratégia do planejamento de lavra, bem como os objetivos aos quais estão relacionados, podem ser classificados como de longo, médio e curto prazos.

Planejamento de longo prazo: "No longo prazo", as atividades de planejamento de lavra estão associadas à cava final ótima, à estimativa da reserva lavrável, bem como à determinação do ângulo geral de talude, para que se obtenham as garantias relativas à viabilidade das operações da mina. Essa etapa tem como proposta projetar o layout da mina, estudar cenários e prever os custos de operação, de forma a reduzir os investimentos em instalações e equipamentos e maximizar o retorno financeiro do empreendimento.

Planejamento de curto prazo e médio prazo: Planejamento de lavra no médio e curto prazos são orientados segundo o que foi estabelecido no longo prazo, isto é, segue-se os objetivos do planejamento de longo prazo, mas traduzindo o plano para períodos mensais, semanais e diários. Nesses estudos, são considerados a qualidade do minério e, geralmente, a evolução da cava é representada por uma sucessão de pequenas cavas que são diferenciadas pelo teor de corte. Em termos agregados, podem ainda ser incorporados aspectos relacionados à capacidade da planta de tratamento e ao atendimento da Relação Estéril Minério (REM).

2.2.3.3. Planejamento operacional da cava

De acordo com Gama (1986), o planejamento operacional visa ao estado atual da mineração, no seu dia a dia, dentro das especificações do mais recente plano a curto prazo que constitui um guia essencial aos operadores da mina, para que sejam atingidos os objetivos imediatos da lavra. Ainda, de acordo com esse autor, nessa etapa, são projetadas as primeiras estradas de ligação (das primeiras frentes de lavra abertas ao britador primário e à área de disposição de estéril), as praças iniciais de operação das escavadeiras, ou carregadeiras e os trabalhos gerais de desmatamento e limpeza mínima necessária para iniciar-se a produção.

Essa etapa consiste basicamente no desenho da cava, incluindo seus aspectos construtivos, como bermas, taludes, rampas e vias de acessos. A extensão e profundidade das cavas dependem da geologia do depósito mineral. No cálculo da inclinação e altura dos taludes, é necessário considerar aspectos da geotecnia: maciço ou solo escavado, bem como os modos de ruptura que podem ocorrer, nos volumes que podem ser mobilizados e estrutura da rocha e das propriedades das descontinuidades. Existe uma relação inversa entre esses fatores: taludes mais altos exigem ângulos mais suaves. Na definição da inclinação de talude, devem ser considerados os itens de economia e segurança, necessários a uma definição que satisfaça um ponto de equilíbrio.

Como regra geral, a altura recomendada tem que estar na faixa de 10 a 15 m. As bermas construídas entre os taludes auxiliam na estabilidade, aumentam a segurança e previnem rolamentos de blocos e facilitando a drenagem.

De acordo com Gama (1986), o planejamento operacional visa ao estado atual da mineração, no seu dia a dia, dentro das especificações do mais recente plano a curto prazo. Ele constitui um guia essencial aos operadores da mina, para que sejam atingidos os objetivos imediatos da lavra. Ainda de acordo com o autor, nessa etapa são projetadas as primeiras estradas de ligação (das primeiras frentes de lavra abertas ao britador primário e à área de disposição de estéril), as praças iniciais de operação das escavadeiras ou carregadeiras e os trabalhos gerais de desmatamento e limpeza mínima necessária para iniciar-se a produção.

2.2.3.4. Ciclo do planejamento de lavra

Segundo Curi (2014), o planejamento de lavra corresponde ao projeto de avanço da lavra de mina, envolvendo a previsão dos recursos e a determinação dos custos intrínsecos a esse avanço, significando dizer que o planejamento de lavra tem um caráter muito dinâmico. À medida que a mina vai sendo lavrada novas informações sobre a reserva são obtidas e sujeitas a novas avaliações, havendo uma constante readaptação relativa ao plano original e às novas condições da mina. Esse constante processo, de maneira geral, integra o ciclo do planejamento de lavra. As avaliações feitas durante a existência da mina são baseadas no processo de reconciliação que, de acordo com Câmara (2013), busca maior aderência do planejamento de lavra com as quantidades efetivamente lavradas.

"Os objetivos básicos da reconciliação são:

- medir o desempenho da operação contra alvos;
- garantir que a avaliação dos ativos minerais é precisa;
- confirmar a eficiência da estimativa da tonelagem e da tonelagem;
- fornecer indicadores-chave de desempenho - em particular para predições de controle de teor". (MORLEY, 2003, p. 185).

De acordo com Câmara (2013), estudos sistemáticos de reconciliação fornecem a validação do modelo final com o efetivamente realizado e também fornecem um meio de monitorar a qualidade da estimativa das reservas de minério produzida a partir de dados de exploração para o estudo de viabilidade e para estimativa de controle de teores. O diagrama da Figura 6 apresenta os tópicos do ciclo do planejamento.

Figura 6 - Tópicos do ciclo de planejamento de lavra

Fonte: Autor

2.3. Geofísica aplicada

Nos últimos anos, a geofísica ganhou mais força na mineração brasileira e tornou-se muito útil nas fases iniciais da pesquisa mineral. As principais razões para essa constatação são a possibilidade de redução de incerteza geológica e o fornecimento de informações com alto grau de confiabilidade para a tomada de decisão.

A geofísica apresenta uma quantidade de aplicações, como por exemplo, na lavra de recursos naturais como petróleo e água subterrânea. Segundo Parasnis (1962), a gama de pesquisas de geofísica, que até o início dos anos 90 era, essencialmente, direcionada para petróleo, tem progressivamente ampliado seu campo de atuação para outras áreas. A tendência é de um avanço significativo no uso de métodos geofísicos a ponto de atingir-se um equilíbrio cada vez maior do emprego para as mais diferentes áreas.

Um exemplo disso é a geofísica rasa que envolve a investigação de estruturas geológicas, localizadas na parte superior da crosta terrestre com dimensões pequenas. Atualmente, são utilizadas com grande frequência na mineração e atuam na identificação das propriedades físicas do mineral, agindo sobre essas estruturas geológicas superficiais, bem como nas rochas. Os trabalhos com método geoeletrico têm se intensificado, Ravindran (2010) realizou levantamento de resistividade geoeletrica ao longo de um trajeto de 14 quilômetros na fronteira entre Kericho e municípios Nakuru (Índia) para observar a estrutura em superfície, sua relação com a terra e a ocorrência de água. O método em 2 D de resistividade elétrica de imagem revelou-se como uma excelente ferramenta para delinear camadas subterrâneas, potenciais zonas de superfície litológica. .

Dentre os principais métodos para pesquisa mineral em superfícies destacam-se os métodos geoeletricos e eletromagnéticos, método gravimétrico, magnéticos e sísmicos (refração). Segundo Frasher (1995), os métodos geofísicos mais importantes utilizados para esse fim são prospecção elétrica, gravimetria, magnetometria e prospecção eletromagnética. Nessa pesquisa serão abordados, exclusivamente, os métodos geoeletricos e eletromagnéticos que foram utilizados para a finalidade da pesquisa.

2.3.1. Métodos elétricos e eletromagnéticos

Os métodos elétricos e eletromagnéticos baseiam-se no fato de que as rochas, em função de suas composições, mineralizações, texturas e disposições, apresentam propriedades elétricas próprias, tais como, resistividade e permeabilidade magnética. Conforme Berry e Saad (2012), o método de resistividade pode ser utilizado para a medição das propriedades elétricas do solo e testado em diferentes estudos de resistividade elétrica do solo. Haile (2014) comenta que técnicas geofísicas são rotineiramente usadas como parte das investigações geológicas para fornecerem informações sobre os parâmetros de superfície local e, portanto, mapear a geologia do subsolo e estruturas geológicas no local.

2.3.1.1. Método de Eletrorresistividade

Esse método geofísico emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), com o objetivo de medir o

potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo, assim, calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Para esse dispositivo de quatro eletrodos, a resistividade é assumida como constante e pode ser calculada através da expressão eq.(1)

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \text{ (ohm.m)} \quad (1)$$

Onde

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B

Na interpretação dos dados de campo de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV), obtém-se a distribuição das resistividades e espessuras reais das camadas do subsolo, atribuindo-se esta distribuição de maneira vertical a partir do ponto central do arranjo utilizado em superfície. As curvas de campo são interpretadas pelo método das aproximações sucessivas ou de inversão, usando regressão em cadeia. O processo baseia-se na observação dos valores de resistividade aparente, em um ponto fixo, a profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos A e B de corrente. Segundo Elis et al (2008), os valores de resistividade aparente obtidos nas SEVs são representados, em relação às distâncias entre os eletrodos de corrente, utilizando-se de uma curva construída sobre uma base bilogarítmica. A Figura 7 apresenta uma ilustração com uma série de determinações de resistividade aparente, com dispositivo eletródico e separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção.

Figura 7 - Determinações de resistividade aparente, eletrodos de emissão e recepção

Fonte: (Braga, 1999).

No método da eletrorresistividade, existem várias técnicas de aplicação dos ensaios em campo e são divididas, basicamente, em técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico.

2.3.1.1.1. Técnica de sondagem elétrica vertical (SEV)

A técnica da SEV consiste em uma sucessão de medidas de um parâmetro físico, a resistividade aparente. A corrente artificial é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B). Essa medida tem o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Aumentando-se a distância entre os eletrodos de corrente A e B, o volume total da subsuperfície incluída na medida também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas. Os resultados sucessivos estarão, portanto, estritamente ligados com as variações da resistividade e com a profundidade. Atzemoglou et al (2003) relata que a pesquisa realizada, combinando a interpretação dos resultados SEV 1D, pode gerar resultados em 2 D e 3D em pleno acordo com a geologia local. Recomenda-se que os trabalhos com SEV sejam efetuados em locais planos para obtenção de resultados mais reais. De acordo com Sahbi et al (1997), quando as

sondagens elétricas são feitas ao longo de um terreno irregular, efeitos topográficos podem influenciar os valores de resistividade aparente e levar à interpretação errônea 1D. A Figura 8 apresenta a disposição dos eletrodos para técnica SEV.

Figura 8 - Disposição dos eletrodos para técnica - SEV

Fonte: (Braga, 1999).

2.3.1.1.2. Técnica de caminhamento elétrico (CE) arranjo dipolo-dipolo

As investigações pelo Caminhamento Elétrico (CE) são realizadas ao longo de perfis e os resultados obtidos relacionam-se entre si através de estudo em mapas a uma ou mais profundidades determinadas ou de seções com várias profundidades de investigação. (Vários níveis de investigação). A Figura 9 ilustra a disposição, dos eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial, no desenvolvimento da técnica do CE - arranjo dipolo dipolo.

Figura 9 - Disposição, dos eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial, no desenvolvimento da técnica do CE - arranjo dipolo dipolo

Fonte: Braga (1997)

O arranjo de campo dipolo-dipolo permite a utilização simultânea de vários dipolos de recepção, ordenados ao longo da linha a ser levantada e cada um deles corresponde a um nível de investigação, caracterizando as variações horizontais de um parâmetro físico ao longo de um perfil. A interpretação da profundidade de alcance depende do número de dipolos. Nesse tipo de arranjo, a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, pode ser tomada como $R/2$ (metros).

O ensaio é desenvolvido ao longo de perfis com espaçamento constante, em função das profundidades de investigações requeridas. Após a disposição do arranjo no terreno, fixados os níveis de investigações e de obter-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando o procedimento sucessivamente até atingir-se o final do perfil a ser levantado. Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geoeletrica aparente, que pode ser utilizada como base para interpretação geológica. Com o desenvolvimento da informática para Geociências foram desenvolvidos softwares que, utilizando o

processo de inversão por mínimos quadrados, transformam os dados de campo em seção modelada de resistividade, na qual os valores observados são de resistividades e profundidades reais. Nas seções interpretadas as isolinhas de resistividade e cargabilidade tendem a mostrar a forma dos corpos geológicos existentes. Roqué et.al (2012) relata em seu trabalho, no nordeste da Espanha, que fraturas em granito com até 3m de largura e preenchidas de água foram detectadas por tomografia de resistividade elétrica (ERT) também com técnica de caminhamento elétrico (CE).

2.3.1.2. Método de Polarização Induzida (IP)

O fenómeno físico de polarização induzida (IP) é gerado pela concentração de cargas elétricas na interface sólido-líquido entre um mineral metálico que realize troca iônica (argilominerais) e a solução eletrolítica, que permeia os poros das rochas. Ao aplicar-se, por intermédio de eletrodos de corrente denominados convencionalmente de A e B, cravados na superfície do terreno, uma diferença de potencial primária ao solo, é provocada e consequentemente, uma polarização do mesmo. Essa diferença de potencial primária (ΔV_p) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Ela varia com o tempo na forma de uma curva $\Delta V_{ip} = f(t)$ que liga a assíntota (ΔV_p) em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente (Figura 10). A amplitude de um valor $\Delta V_{ip} = f(t)$ está diretamente ligada à maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo-se, portanto, na base do método. Essa capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais da terra. Analogamente, pode-se descrever o fenómeno da polarização induzida como se o solo contivesse pequenos condensadores que se carregariam durante a emissão de corrente, descarregando-se após o corte. A curva $\Delta V_{ip} = f(t)$ poderia ser chamada, então, de curva de descarga IP.

Figura 10 - Curva de descarga IP (Domínio do Tempo)

Fonte: Braga (1999)

No IP-Domínio do Tempo, a curva de descarga $\Delta V_{ip} = f(t)$ é o objeto de estudo. Na Figura 10 mostrada anteriormente, tem-se a forma da onda primária transmitida e a curva de descarga IP que pode ser estudada em sua totalidade ou, apenas, mostrada em alguns intervalos de tempo. O parâmetro medido em IP (Tempo) é chamado de cargabilidade (M) e pode ser expressa em % ou milivolt/Volt (mV/V) conforme eq.(2):

$$M = \frac{\Delta V_{ip} \times 100}{\Delta V_p} \left(\frac{mV}{V} \right) \quad (2)$$

Como ocorre no método da eletrorresistividade, se as medidas da polarização induzida são efetuadas sobre um terreno cujo subsolo é homogêneo, qualquer das magnitudes definidas acima podem ser utilizadas como medida de sua polarização verdadeira. Na prática, como o meio pode ser considerado heterogêneo, o resultado das medidas dependerá da posição dos eletrodos que compõem o arranjo de campo utilizado em relação às heterogeneidades polarizáveis. Resulta, portanto, que os dados de campo expressam polarizações aparentes. Como neste trabalho será

utilizado o IP-Domínio do Tempo, o parâmetro resultante das medidas será denominado de cargabilidade aparente (Ma). Segundo Okay et al (2013), polarização induzida (IP) é um método geofísico, potencialmente sensível à presença de fissuras em rochas porosas. Nesse trabalho, a cargabilidade foi utilizada em uma superfície plana para ajudar na definição de contatos e para refinar a interpretação, portanto o parâmetro utilizado para a interpretação, será realizada em conjunto com a resistividade. De acordo com a Ogilvy e Bogoslovsky (1979), a observação das mudanças na resistividade elétrica específica com o tempo (IP), nas encostas das pedreiras é também intensamente utilizada na avaliação da estabilidade de taludes e para prever risco de deslizamento de terra.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa foi desenvolvida para ser aplicada em três depósitos de pequeno porte de forma a avaliar o impacto dos resultados no processo de planejamento de lavra dos mesmos. Foram estudados uma mineração com atividades interrompidas com tipo de mineralização de manganês, na região de Campinas/SP, uma área com mineralização de ouro, na região de São Roque/SP e uma mineração de pequeno porte em atividade que lava calcário, na região de Taubaté/SP.

O desenvolvimento dos trabalhos em cada depósito estudado está descrito nas seções a seguir.

3.1. Trabalhos experimentais

Os trabalhos experimentais foram realizados em áreas onde foram observadas indicações de ocorrência mineral. Assim, com o conhecimento prévio das áreas, foi estabelecido um planejamento da pesquisa, objetivando o conhecimento geológico dos depósitos com mais profundidade:

- Planejamento de trabalho de campo;
- Conhecimento da geologia local;
- Levantamento e modelagem da topografia;
- Seleção e aplicação de métodos geofísicos adequados para o tipo de depósito;
- Processamento de dados para modelagem geológica do depósito;
- Modelagem do corpo geológico
- Integração do modelo geológico com o topográfico;
- Elaboração da cava conceitual e seções;
- Utilização do modelo geológico atualizado para estudar o planejamento de lavra

A Figura 11 mostra o diagrama de atividades estabelecido para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 11 - Diagrama de atividades estabelecido para o desenvolvimento da pesquisa

Fonte: Autor

3.1.1. Mineração de Manganês

A área estudada está localizada no município de Itapira/ SP, próxima à cidade de Campinas. Foram observados afloramentos de manganês e uma cava lavrada já existente com potencial promissor. A Figura 12 apresenta a mineração de manganês, local onde foi realizada a pesquisa.

Figura 12 - Mineração de manganês local onde foi realizada a pesquisa

Fonte: Adaptada do GOOGLE. Google Earth. 2016.

Em virtude do potencial identificado de manganês foi programado um estudo compreendendo as atividades:

- Reconhecimento geológico;
- Mapeamento geoestrutural e modelos propostos
- Levantamento topográfico e modelagem da superfície topográfica;
- Levantamento geofísico;
- Modelagem do corpo geológico preliminar;
- Elaboração da cava conceitual

A Figura 13 apresenta o diagrama de atividades executadas na pesquisa

Figura 13 - Diagrama de atividades de pesquisa

Fonte: Autor

A pesquisa iniciou-se com o levantamento na literatura sobre a geologia da área em estudo. Na sequência, executou-se o mapeamento geoestrutural e o levantamento topográfico seguidos dos ensaios geofísicos. Os resultados obtidos foram a base para elaborar um modelo preliminar do depósito de manganês e um modelo conceitual de cava.

3.1.1.1. Reconhecimento geológico regional

Foram identificados afloramentos de rochas manganesíferas com várias fases de dobramentos cujos planos axiais acompanham, de maneira geral, o trend NE-SW. As variações encontradas referem-se à direção de mergulho, que mantém um valor alto, mas que varia de quadrante, ora para NW ora para SE (NAP. Mineração/USP, 2014).

A Figura 14 apresenta a área onde foram feitos os levantamentos com afloramentos, ainda dentro do polígono do DNPM e confirma o comportamento estrutural encontrado em campo e na literatura disponível. A visita e o mapeamento das áreas foram de grande importância para o entendimento do comportamento da geometria

geral dos corpos, destacando-se as áreas parcialmente lavradas, com ótimas exposições do minério, essenciais para o adensamento de medidas de atitudes que compõem um trabalho de natureza estrutural.

Figura 14 - Área com afloramentos

Fonte: Adaptada do GOOGLE. Google Earth. 2016.

A geologia estrutural regional apresenta falhas e dobramentos com superposição tectônica das diversas litologias preexistentes e exhibe uma faixa de cisalhamento com ocorrências de corpos de manganês estirados em uma região com mais de 100 quilômetros de extensão. A Figura 15 apresenta Zona de cisalhamento regional com ocorrências de corpos de manganês da cidade de Ouro Fino à cidade de Itapira conforme relatório (NAP.Mineração/USP, 2014).

Figura 15 - Zona de cisalhamento regional com ocorrências de corpos de manganês

Fonte: (NAP.Mineração/USP, 2014)

Na região de Itapira, a tectônica gerou uma estrutura sinforme com eixo de direção aproximada NE-SW, com caimento suave para NE. Na aba leste dessa estrutura, ocorrem os corpos de manganês, objeto deste estudo (Figura 16). Tais ocorrências acompanham a direção geral do eixo do sinclinal e são representadas por corpos extremamente deformados e boudinados suportando altos topográficos (NETO, 2014).

Figura 16 - Estrutura sinforme com eixo de direção aproximada NE-SW, com caimento suave para NE

Fonte: Neto (2014)

3.1.1.2. Mapeamento geoestrutural e Modelos propostos

O mapeamento realizado na área permitiu a identificação de um afloramento de uma rocha quartzo feldspática com granada e manganês a qual apresenta uma deformação que reflete o modelo proposto para a investigação geológica. Trata-se de uma dobra recumbente com um flanco estirado (Figura 17A) em que o comportamento estrutural das porções estiradas e seccionadas (Figura 17B) podem representar os corpos de manganês encontrados. Em profundidade, o caráter sigmoidal das estruturas se mantém (Figura 17C) e, em alguns locais, ele é seccionado por falhas (Figura 17D). (NETO 2014)

Figura 17 - Mapeamento realizado na área com a identificação de afloramentos.

Fonte: Neto (2014)

A Figura 18A apresenta uma vista geral da cava na área de estudo e a Figura 18B, o aspecto das dobras recumbentes na área de estudo.

Figura 18 - Vista geral da cava e aspecto das dobras recumbentes na área de estudo

Fonte: Neto (2014)

O modelo conceitual do depósito desenvolvido no mapeamento geoestrutural foi utilizado na elaboração do plano para os levantamentos geofísicos e as interpretações geológicas foram a base para interpretação do corpo no modelo

conceitual. O mapeamento geoestrutural gerou um modelo conceitual do depósito de manganês com um perfil sigmoidal (Figura 19).

Figura 19 - Modelo conceitual do depósito de manganês com um perfil sigmoidal

Fonte: Neto (2014)

3.1.1.3. Levantamento topográfico e Modelagem da topografia

As atividades de campo iniciaram-se com um levantamento na área e seu objetivo consistiu no detalhamento das áreas próximas aos afloramentos de minério de manganês e aos antigos trabalhos de lavra. Posteriormente, dados topográficos complementares foram levantados a partir da carta IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Mogi Guaçu (Id: SF-23-Y-A-III-3). Para trabalho de campo, foi usado um equipamento do Sistema de Posicionamento Global-GPS portátil, previamente calibrado para o elipsóide WGS-84 e a altitude de cada ponto determinada pelo barômetro do equipamento. Para o modelo digital foi utilizado o sistema Micromine 2011 SP 5. As construções das curvas de nível foram feitas no Micromine, a partir dos pontos colhidos, conforme os métodos acima citados. As informações resultantes foram, posteriormente, exportadas para o formato dwg e dxf.

3.1.1.3.1. Modelo topográfico proposto

A Figura 20 apresenta o resultado do levantamento topográfico realizado em campo.

Figura 20 - Resultado do levantamento topográfico realizado em campo

Fonte: Adaptada do GOOGLE. Google Earth. 2016.

A Figura 21 apresenta curvas de nível resultantes do levantamento topográfico.

Figura 21 - Curvas de nível resultantes do levantamento topográfico

Fonte: Autor

A Figura 22 apresenta a superfície topográfica da área em perspectiva.

Figura 22 - Superfície topográfica da área em perspectiva

Fonte: Autor

3.1.1.3.2. Avaliação do modelo topográfico

Foram observados afloramentos de minério de manganês nas áreas conhecidas como “Cava” e como “Bubula”, além de nas áreas intermediárias, próximas ao córrego local.

As atitudes das camadas aflorantes de minério de manganês foram consistentemente próximas a 285° de azimuth com mergulho subvertical. Foram também observadas zonas de cisalhamento que podem indicar a descontinuidade nas ocorrências de minério de manganês. As diversas ocorrências foram marcadas e as informações, repassadas à equipe de geofísica.

3.1.1.4. Ensaios geofísicos

Para realização dos trabalhos de campo relativos à aplicação de métodos geofísicos, foi efetuado um plano de atividades cujos ensaios foram feitos com a utilização dos métodos de eletrorresistividade, através da técnica de caminhamento elétrico (CE), técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) e do método de polarização induzida em uma área de 500m^2 . Esses métodos possibilitam determinar as espessuras aproximadas de camadas em depósitos pouco profundos de forma simples e econômica.

Na área em questão, a aplicação do método geofísico foi baseado em áreas de ocorrências de manganês identificadas no levantamento geoestrutural e topográfico realizado anteriormente.

O ensaio geofísico foi conduzido na área do depósito para a medição preliminar das profundidades e espessuras da camada mineralizada. A análise dos dados obtidos pelo mapeamento geoestrutural e levantamento topográfico resultou na determinação dos pontos e perfis em que os ensaios geofísicos foram realizados. Como já citado, não havia à disposição capital suficiente para as sondagens, assim, a utilização dos métodos geofísicos foi de fundamental importância na interpretação geológica que contribuiu diretamente na geração do modelo geológico preliminar.

O plano de execução do levantamento geofísico tiveram as seguintes características:

- 03 linhas espaçadas de 150 m (caminhamento elétrico), com 120 m de extensão;
- 01 linha espaçada de 75 m (caminhamento elétrico) com 120 m de extensão;
- 01 linha espaçada de 150 m (caminhamento elétrico) com 240 m de extensão;
- 04 pontos de sondagem elétrica vertical (SEV)
- Área de cobertura em torno de 500 m².

De acordo com as informações anteriores, a camada rica em manganês apresenta valores de resistividade mais baixos em relação ao solo e à rocha encaixante. Os ensaios de SEV foram realizados com o objetivo de procurar individualizar a camada com manganês e os de caminhamento elétrico tiveram os mesmos objetivos. Como a polaridade induzida confirma os resultados obtidos com a eletrorresistividade, as seções de CE mostram, apenas, as resistividades, isto é, representam, apenas, os dados obtidos através da eletrorresistividade. Foram planejados e realizados ensaios de SEV em 4 pontos e de Caminhamento Eletrônico (CE) por 5 perfis. A Figura 23 mostra, no mapa, os perfis dos ensaios de CE realizados.

Figura 23 - Perfis dos ensaios de CE realizados

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios das SEVs, conforme a Tabela 2, indica que a espessura da camada mineralizada pode ultrapassar 10 metros e a profundidade pode passar de 40m. As Figuras 24, 25, 26, 27 apresentam os gráficos da resistividade e cargabilidade da SEV105, SEV107, SEV108, SEV109.

Tabela 2 - Interpretação das SEVs

SEV	BHID	De	Para	LITOLOGIA
SEV 105	S-01	0	0,6	Solo alteração
	S-01	0,6	1,1	Solo alteração
	S-01	1,1	10,0	Rocha alterada
	S-01	10,0	35,0	Rocha alterada
	S-01	35,0		Manganês
SEV 107	S-02	0	0,7	Solo alteração
	S-02	0,7	9,8	Solo alteração
	S-02	9,8	28,0	Rocha alterada
	S-02	28,0		Manganês
SEV 108	S-03	0	0,6	Solo alteração
	S-03	0,6	13,5	Solo alteração
	S-03	13,5	18,6	Rocha alterada
	S-03	18,6	29,0	Manganês
SEV 109	S-04	0,0	0,5	Solo alteração
	S-04	0,5	6,6	Solo alteração
	S-04	6,6	42,9	Rocha alterada
	S-04	42,9	55,0	Manganês
	S-04	55,0		Rocha sã

Fonte: Autor

Figura 24 - Gráfico da resistividade e polarização induzida das SEV105

Fonte: Autor

Figura 25 - Gráfico da resistividade e cargabilidade das SEV107

Fonte: Autor

Figura 26 - Gráfico da resistividade e cargabilidade das SEV108

Fonte: Autor

Figura 27 - Gráfico da resistividade e cargabilidade da SEV109

Fonte: Autor

Nos ensaios de CE, também foi identificada a camada de baixa resistividade que sugere a zona mineralizada. Essa camada é representada por

resistividades menores que 200 ohm. m e foram ilustradas com tons de verde e azul nas seções dos ensaios de CE apresentadas abaixo. Em todos os perfis, essa camada ocorre com mergulho aproximadamente para oeste. As seções dos ensaios de CE trazem mais dados, indicando que a espessura da camada pode chegar ou ultrapassar 10m. As ilustrações das CEs indicam também que, parte expressiva do depósito, pode ser encontrada em profundidades não superiores a 15 metros. No perfil 106, ocorre, do outro lado da drenagem, uma anomalia superficial cujas características elétricas sugerem a ocorrência de zona mineralizada mais rasa. As seções dos ensaios de CE, abaixo, estão apresentadas no sentido NW-SE. A Figura 28 apresenta os perfis de caminhamento elétrico das CE102, CE100, CE101 e a Figura 29 apresenta os perfis de caminhamento CE106, 104.

Figura 28 - CE102, CE100, CE101

Fonte: Autor

Figura 29 - CE106, CE104

Fonte: Autor

A geofísica teve papel fundamental, determinando a espessura da camada mineralizada (manganês). Os dados obtidos, através dos ensaios de SEV e CE, indicam que parte expressiva da camada de manganês deve ser encontrada entre 0 metro (afloramento) e 15 metros de profundidade e que a espessura da camada pode chegar ou ultrapassar 10 metros. Essas informações detalhadas da geofísica permitiram a interpretação geológica em software de mineração e viabilizaram a interpretação do modelo geológico.

3.1.1.5. Modelagem geológica preliminar

O levantamento topográfico e o mapeamento geoestrutural indicam que os corpos, na região manganífera de Itapira, podem ser extremamente deformados e boudinados, suportando altos desníveis e alinhados no eixo NE-SW. A análise geoestrutural indicou que o formato da seção vertical do depósito deve ser sigmoidal. A Figura 30 mostra o modelo geológico com as seções interpretadas.

Figura 30 - Modelo geológico com as seções interpretadas

Fonte: Autor

As Figuras 31,32, 33, 34 e 35 destacam o modelo geológico gerado a partir da interpretação da seções geológicas.

Figura 31 - Perspectiva da Interpretação do corpo de minério com a utilização das seções geofísicas

Fonte: Autor

As Figuras 32, 33 e 34 e 35 representam o modelo geológico preliminar gerado.

Figura 32 - Modelo geológico do depósito disposto em perspectiva nos eixos x, y e z, se afastando para NE

Fonte: Autor

Figura 33 - Modelo geológico do depósito em perspectiva nos eixos x, y e z, afastando para NO

Fonte: Autor

Figura 34 - Modelo geológico do depósito disposto em função dos eixos x, y e z, afastamento para N

Fonte: Autor

Figura 35 - Modelo geológico do depósito com vista em planta

Fonte: Autor

3.1.1.6. Elaboração da cava conceitual

Com a simulação de bancadas de lavra em cava conceitual, podemos visualizar o modelo preliminar do depósito parcialmente exposto na superfície. Essas informações permitiram determinar em associação com os dados de densidade do manganês e do solo (NAP.Mineração,2014) a massa e volume do minério, possibilitando a cubagem. A Tabela 3 apresenta os parâmetros do desenho de cava.

Tabela 3 - Parâmetros de desenho de cava

Parâmetros de cava	Medidas Parâmetros de cava
Largura da berma	6 m
Altura do banco	10 m
Largura da rampa	8 m
Ângulo de face	75°
Densidade do Mn	3,48 t/m ³
Densidade do solo	1,6 t/m ³

Fonte: Autor

As Figuras 36 e 37 apresentam o modelo de cava conceitual.

Figura 36 - Cava conceitual vista em planta

Fonte: Autor

Figura 37 - Cava conceitual com vista em perspectiva.

Fonte: Autor

A Tabela 4 apresenta os dados obtidos com a cubagem.

Tabela 4 - Resultado da cubagem

Dados de Cubagem	
Volume do corpo mineralizado (m ³)	137.225,73
Volume da Cava (m ³)	1.066.975,24
Volume do estéril (m ³)	929.749,51
Tonelagem do minério (t)	477.545,54
Tonelagem do estéril (t)	1.487.599,22
REM	3,12

Fonte: Autor

Na pesquisa do depósito com mineralização de manganês, não houve disponibilidade da utilização de sondagens na investigação. A proposta era determinar a espessura da camada de manganês e gerar um modelo preliminar do depósito. A espessura da camada de manganês foi identificada com a utilização do método de eletrorresistividade e as técnicas SEV e CE, que possibilitaram os cálculos de volume e massa do minério para a geração do modelo geológico preliminar e cava conceitual.

3.1.1.7. Comentários sobre os trabalhos realizados

A interpretação dos dados obtidos em campo e o modelo geológico preliminar gerado mostram ocorrência de manganês. A partir dos dados integrados relativos ao modelo geoestrutural, modelo topográfico e modelo geológico, foi possível direcionar um plano de sondagem como o apresentado na Figura 38. O planejamento prevê que os furos de sondagem devem ser executados em duas etapas com um total de 1.660 metros, de acordo com os seguintes parâmetros:

Fase 1: aproximadamente 150m x 50m, em linhas paralelas coincidentes com as linhas do perfil horizontal, com 10 furos de sondagem com comprimento total de 780 metros de perfuração.

Fase 2: Aproximadamente 75 m x 50m, com linhas paralelas e intercaladas com as linhas da fase 1, com 12 furos de sondagem com estimativa de comprimento total de 880 metros de perfuração. Os furos devem ser executados com mergulho vertical e profundidade entre 60 a 100 metros, de acordo com a morfologia conceitual do modelo geológico preliminar.

Figura 38 - Planejamento de sondagem de sondagem

Fonte: Tichauer, (2016). Adaptado pelo autor

A Tabela 5 apresenta as coordenadas das sondagens propostas para a Fase 1, assim como a profundidade e espessura estimadas para a ocorrência de minério de manganês, conforme a morfologia conceitual do modelo geológico preliminar elaborado para a área. A Tabela 6 apresenta as coordenadas das sondagens propostas para a Fase 2, assim como a profundidade e espessura estimadas para a ocorrência de minério de manganês, conforme a morfologia conceitual do modelo geológico preliminar elaborado para a área.

Tabela 5 - Fase 1 do plano de sondagem

BHID	Perfil	xcollar (m)	ycollar (m)	zcollar (m)	Prof.(m)	Espess. (m)	Prof.Total (m)
SAN10-01	10	317 522	7 513 560	684	27	15	60
SAN10-02	10	317 457	7 513 578	675	5	12	60
SAN20-01	20	317 561	7 513 705	704	38	35	90
SAN20-02	20	317 495	7 513 722	701	40	35	90
SAN30-01	30	317 664	7 513 837	700	35	10	80
SAN30-02	30	317 601	7 513 854	690	46	30	80
SAN30-03	30	317 536	7 513 872	683	50	10	80
SAN30-04	30	317 471	7 513 889	677	26	34	80
SAN40-01	40	317 637	7 513 991	671	34	30	80
SAN40-02	40	317 572	7 514 998	667	35	25	80
Total Estimado (m):							780

Fonte: (NAP.Mineração/USP, 2014)

Tabela 6 - Fase 2 do plano de sondagem

BHID	Perfil	xcollar (m)	ycollar(m)	zcollar(m)	Prof.(m)	Espess. (m)	Prof.Total(m)
SAN05-01	05	317 511	7 513 504	668	40	10	60
SAN05-02	05	317 445	7 513 521	660	31	10	60
SAN15-01	15	317 537	7 513 631	703	46	20	80
SAN15-02	15	317 473	7 513 649	692	30	20	80
SAN25-01	25	317 583	7 513 781	698	41	25	80
SAN25-02	25	317 515	7 513 799	692	22	39	80
SAN25-03	25	317 445	7 513 818	678	30	10	80
SAN35-01	35	317 620	7 513 930	677	35	30	80
SAN35-01	35	317 556	7 513 947	672	45	20	80
SAN35-01	35	317 491	7 513 964	671	40	10	80
SAN45-01	45	317 656	7 514 059	665	38	10	60
SAN45-02	45	317 591	7 514 077	659	34	10	60
Total Estimado (m):							880

Fonte: (NAP. Mineração/USP, 2014)

Na visão da MPE, a geofísica proporcionou uma contribuição relevante, considerando que a propriedade em questão possuía limitadas informações geológicas. A geofísica contribuiu para a proposição do modelo geológico, que

indicou a localização, profundidade e geometria do corpo geológico em um curto espaço de tempo. A execução de um plano de sondagem exploratória no local prolongar-se-ia por um mês e com a geofísica limitou-se a uma semana, isto é, uma redução de 77% no tempo de execução do levantamento.

3.1.2. Mineralização de Ouro

A área de ocorrência está localizada no município de São Roque/SP 17 quilômetros de uma das poucas operações de ouro que já existiram em São Paulo, a mina de Araçariguama, conforme apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Local da ocorrência no município de São Roque (SP)

Fonte: Adaptada do GOOGLE. Google Earth. 2016.

Na área de mineralização de São Roque, foi identificada uma possível ocorrência de ouro através da coleta de amostras em três poços de água com 10m de profundidade. O material coletado gerou 49 amostras que, depois de processadas e analisadas para o teor de ouro, produziram resultados expressivos. Embora os resultados, em um primeiro momento, fossem promissores, o critério adotado para o estudo não foi suficientemente satisfatório, havendo, dessa forma, a necessidade de estudo complementar de forma sistêmica para verificar a efetividade dos recursos

minerais existentes. Para validar a hipótese da existência de ouro na área, foi elaborado um plano de pesquisa que consistiu nas seguintes atividades:

- Trabalho de campo com abertura de picadas e demarcação dos furos,
- Levantamento da geologia regional,
- Reconhecimento geológico de superfície,
- Execução de furos rasos com trado de 10",
- Levantamento geofísico
- Modelagem geológica preliminar
- Cava conceitual.

Os resultados obtidos foram a base para elaborar um modelo preliminar do depósito de ouro e um modelo conceitual de cava. A Figura 40 mostra o diagrama de atividades da pesquisa.

Figura 40 - Diagrama de atividades da pesquisa

Fonte: Autor

3.1.2.1. Trabalho de campo com Abertura de picadas e demarcação de furos.

Para realização dos trabalhos de campo, houve um planejamento estratégico, com a definição dos locais para execução de 08 furos com 4m de profundidade, com a

utilização de trado para produção de amostras de 0 á 2m e 2 á 4m de profundidade. As atividades foram divididas em duas etapas, a primeira com a abertura de picada, fixação de estacas e georreferenciamento dos locais dos furos e a segunda, com a execução dos furos.

3.1.2.2. Geologia regional

A região de São Roque encontra-se dentro do Terreno Apiaí, Província Mantiqueira, entre as Zonas de Cisalhamento Caucaia, ao sul e Taxaquara, ao norte. O embasamento da área é representado pelo Complexo Embu, constituído por rochas gnáissico-migmatíticas, metassedimentos pelíticos e psamíticos plataformais intercalados com vulcânicas básicas (Hackspacher et al. 1993). Especificamente a localização da realização dos estudos está a oeste da cidade de São Paulo, dentro do Grupo Caucaia, definido por Hasui (1975) (Figura 41), individualizado como Granito Itapevi por Salvador et al (2005). O Granito Itapevi é um corpo intrusivo na unidade terrígena da sequência metavulcanossedimentar do Grupo Votuverava e do Grupo Serra do Itaberaba (Figura 42). Salvador et al (2005) agrupa o Granito Itapevi ao Granito Tapiraí e classifica-os como granitoides quimicamente indiferenciados, pré sincolisionais, do Orógeno Paranapiacaba.

Figura 41- Localização e mapa geológico de São Roque (SP)

Fonte: Adaptado de Hackspacher et al (1993)

Figura 42 - Mapa Geológico Regional, com detalhe na área de estudo

Fonte: Relatório (NAP. Mineração/USP, 2015)

3.1.2.3. Reconhecimento de campo

Poços da região mostram que o solo atinge espessuras superiores a 15 m. O solo de alteração de rocha é, predominantemente, silto arenoso, com cristais de quartzo angulosos, chegando a 8 mm, com mica, muito comumente caulinítico, de coloração rósea a avermelhada. Porções de solo muito ricas em micas e pobres em quartzo também são observadas, evidenciando heterogeneidades na rocha que deu origem ao solo. É possível observar estruturas reliquias da rocha no solo, como bandamento composicional, por exemplo. Acima do solo de alteração de rocha, há uma camada de solo superficial, com espessura inferior a 30 cm, que possui o mesmo protótipo que o solo de alteração de rocha, composição similar, contudo com matéria orgânica, que lhe confere coloração acinzentada e não possui estruturas

reliquiaries devido a maior influência de processos intempéricos, desconsiderados na representação em mapa.

Não foram encontradas descrições de mineralizações de ouro em corpos granitóides da região, contudo, diversas ocorrências de ouro foram descritas associadas às rochas metavulcanossedimentares encaixantes desses corpos. Nesse contexto, um depósito epigenético de ouro mobilizado das encaixantes e depositado em falhas e fraturas do corpo granítico é o modelo mais provável. A Figura 43 mostra o mapa de solo da área de estudo relativo. Limites retirados do relatório (NAP. Mineração/USP, 2015).

Matacões submétricos a decamétricos são comuns, com nível de alteração variando de médio a baixo, são os únicos afloramentos observados na área, predominantes de rocha foliada de granulação fina a grossa, com textura lepidogranoblástica, variando entre inequigranular seriada a porfiroclástica, composta por quartzo, feldspato alcalino (que ocorre tanto na matriz quanto como porfiroclasto), plagioclásio e biotita, com granada milimétrica como acessório, caracterizando uma biotita gnaisse, com monzogranito como protólito. A rocha apresenta bandamento entre porções de granulação média a grossa, com índice de cor menor (inferior a 10%), e bandas finas a médias mais ricas em biotita, com índice de cor entre 15 e 20. Contudo, foram observados matacões de rocha mais homogênea, com textura equigranular hipidiomórfica, e índice de cor inferior a 5%. Essas diferenças de composição da rocha resultam nas diferenças nos solos de alteração (NAP. Mineração/USP, 2015).

Figura 43 - Mapa de solo da área de estudo

Fonte: Relatório (NAP Mineração/USP, 2015)

3.1.2.4. Sondagem a Trado

Foram coletadas 17 amostras de campo, as quais foram encaminhadas ao Laboratório de Tratamento de minério/EPUSP (LTM) para preparação, homogeneização e quarteamento. Os ensaios de caracterização incluíram cinco etapas: peneiramento e britagem, concentração em mesa vibratória, separação magnética a 5.500 Gauss, separação magnética a 10.000 Gauss e concentração em mesa Mozley. Alíquotas dos diferentes concentrados foram, em seguida, encaminhadas para análises do tipo “fire-assay” do conteúdo de Au.

3.1.2.4.1. Análise química das amostras

O trabalho de coleta das amostras na região de São Roque foi efetuado com um número de amostras menor que o planejado; porém as amostras Furo LB 01 -

Intervalo de 4 a 6m - 20 ppb, Furo LB 04 - Intervalo de 0 a 2m - 30 ppb, Furo LB 04 - Intervalo de 2 a 4m -90 ppb, Furo TR 04 - Intervalo de 0 a 2m - 5 ppb apresentaram excelentes características para a avaliação da presença de ouro na região. A Tabela 7 apresenta a localização das sondagens que originaram as amostras. A Figura 44 apresenta o mapa com a localização das sondagens.

Figura 44 - Mapa com a localização das sondagens

Fonte: Autor

Tabela 7 - Localização das sondagens referentes às amostras

Furo	Estado	Profundidade	Localização
TR01	concluído	4,00m	23K 290458.39 UTM 7390517.75 Elevação 976 m
TR02	concluído	2,30m	23K 290598.99 UTM 7390656.17 Elevação 1014 m
TR03	concluído	4,00m	23K 290742.05 UTM 7390785.03 Elevação 988 m
TR04	concluído	3,00m	23K 290894.23 UTM 7390908.25 Elevação 952 m
TR05	Cancelado	Cancelado	Cancelado
TR06	Cancelado	Cancelado	Cancelado
LB01	concluído	5,00m	23K 290961.38 UTM 7390455.28 Elevação 939 m
LB02	concluído	4,00m	23K 290816.65 UTM 7390592.15 Elevação 974 m
LB03	concluído	4,00m	23K 290537.85 UTM 7390864.99 Elevação 1033 m
LB04D	concluído	2,34m	23K290885.13 UTM 7390503.22 Elevação 950 m

Fonte: Relatório (NAP. Mineração/USP, 2015)

Embora os teores detectados sejam baixos (limitados até 90 ppb de Au), o levantamento geológico realizado durante a pesquisa exploratória indicou que a mineralização detectada ocorre na camada de solo de alteração onde foram realizadas as sondagens a trado. Esse pode ser o caso de sistemas de fraturamento, falhas e outras estruturas associadas à mineralização local. Isso sugere que teores mais elevados de Au possam ocorrer em níveis mais profundos da camada de solo, em São Roque.

3.1.2.4.2. Comentários sobre os resultados das amostras

O principal resultado da pesquisa exploratória é que as análises realizadas confirmaram a presença de Au em todas as sondagens realizadas. Esse é um resultado expressivo, mesmo que os teores identificados ainda estejam longe de um nível que possibilite seu aproveitamento econômico.

3.1.2.5. Ensaios Geofísicos

A investigação por sondagem a trado não teve um alcance de profundidade suficiente para determinar o limite de alcance do solo até a rocha para efeito dos cálculos de cubagem.

A delimitação do solo e rocha é um fator importante para quantificar os volumes e massas do solo para a geração do modelo geológico. Dessa forma, com a comprovação que a ocorrência de ouro está em níveis mais profundos da camada de

solo planejou-se uma campanha de pesquisa através da geofísica para determinar a espessura da cobertura de solo até o contato com a rocha na área de interesse.

Nos ensaios de geofísica, foi utilizado o método da eletrorresistividade por meio das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e de caminhamento elétrico dipolo-dipolo (CE). Foram realizadas 02 SEVs e 07 CEs. A Figura 45 apresenta o mapa com localização das linhas CEs do levantamento de geofísica realizados.

Figura 45 - Mapa com localização das linhas CEs

Fonte: Autor

A Figura 46 ilustra as atividades de campo durante o levantamento de geofísica em São Roque. A Tabela 8 mostra as coordenadas da aplicação da geofísica com a técnica de caminhamento elétrico (CE) e técnica de sondagem elétrica vertical SEV.

Figura 46 - Atividades de campo durante o levantamento de geofísica em São Roque.

Fonte: Autor

Tabela 8 - Coordenadas da aplicação da geofísica com a técnica de caminhamento elétrico (CE) e técnica de sondagem elétrica vertical (SEV)

CEs / SEVs	PGI - PGF	LESTE	NORTE	ELEVAÇÃO
CE01	PG01I	23 K 290961	7390464	419m
	PG01F	23 K 290838	7390511	913m
CE02B	PG02BI	23 K 290631	7390451	665m
	PG02BF	23 K 290727	7390530	902m
CE03	PG03I	23 K 290831	7390428	935m
	PG03F	23 K 290916	7390304	950m
CE04	PG04I	23 K 290810	7390430	984m
	PG04F	23 K 290696	7390409	1020m
CE05	PG05I	23 K 290775	7390703	1010m
	PG05F	23 K 290793	7390549	997m
CE06	PG06I	23 K 290681	7390706	971m
	PG06F	23 K 290796	7390808	1035m
CE07	PG07I	23 K 290542	7390464	906m
	PG07F	23 K 290627	7390431	908m
SEV01	PTO	23 K 290918	7390485	913m
SEV02	PTO	23 K 290777	7390641	900m

Fonte: Autor

O levantamento geofísico em São Roque foi focado na identificação da espessura da cobertura de solo e, portanto, na definição da profundidade do contato solo-rocha. A Figura 47 apresenta o resultado da SEV01 e a Figura 48, o resultado da SEV02. Na SEV01, o contato do solo com a rocha inalterada foi estimado a 28

metros de profundidade. Na SEV02, o contato solo-rocha foi estimado a 21 metros de profundidade. A Tabela 9, apresenta o resultados da SEV01 e SEV02.

Figura 47 - Resultado da SEV01

Fonte: Autor

Figura 48 - Resultado SEV02

Fonte: Autor

Tabela 9 - Resultados da SEV01 e da SEV02

SEV	BHID	De	Para	LITOLOGIA
SEV01	S-01	0	1,2	Solo superficial
	S-01	1,2	5,4	Solo alteração
	S-01	5,4	28	Solo de alteração com maior teor de umidade
	S-01	28		Rocha alterada
SEV02	S-02	0	0,8	Solo superficial
	S-02	0,8	5,4	Solo de alteração
	S-02	5,4	21	Solo de alteração com maior teor de umidade
	S-02	21		Rocha alterada

Fonte: Autor

Os levantamentos CE01 e CE03 não alcançaram a profundidade do contato, o que indica que ela é acima de 17 metros.

Já nos demais levantamentos, o contato foi interpretado a partir dos resultados dos levantamentos e uma linha (pontilhada) de interpretação do contato que foi lançada em cada um dos perfis. Em todos os perfis, o contato com a rocha

inalterada é representado por resistividades maiores que 1000 ohm. m em profundidade. As camadas resistivas superiores são, provavelmente, relacionadas a camadas de solo com baixo teor de umidade.

Em todos os perfis, o topo da rocha sã ocorre de forma irregular, possivelmente devido a zonas de graus de fraturamento diferentes. Em particular, nos perfis CE02B e CE06, foram identificadas irregularidades que podem estar associadas a zonas de falha, o que poderia favorecer as condições de mineralização nessas posições. Eventuais investigações geológicas no futuro devem levar em conta essa possibilidade. A Figura 49 apresenta os resultados das CEs (CE01, CE02B), a Figura 50, (CE03, CE04, CE05) e a Figura 51 (CE06 e CE07).

Figura 49 - Resultados CE01 e CE02B

Fonte: Autor

Figura 50 - Resultado CE03, CE04, CE05

Fonte: Autor

Figura 51 - CE06, CE07

Fonte: Autor

As informações coletadas durante as Fases 1 e 2 foram utilizadas para a elaboração de um modelo geológico preliminar da área de estudo. O resultado do levantamento

geofísico, sobretudo, permitiu o modelo do contato solo-rocha, incluindo as interpretações do contato nos sete levantamentos das CEs e nas duas SEVs.

A utilização da geofísica possibilitou a identificação do topo da rocha e a espessura da camada de solo em vários pontos, fato que não ocorreu na investigação através da sondagem a trado.

As informações disponíveis nas CEs e nas SEVs foram interpoladas em toda a extensão da área modelada por meio de um modelo de tendência com polinômio de primeira ordem. A superfície resultante foi utilizada para representar o contato solo rocha na área.

O cálculo da tendência de continuidade da superfície viabilizou a avaliação do potencial de produção com um modelo de blocos com maior precisão, permitindo, dessa forma os cálculos do volume estimado de solo, densidade estimada do solo bem como a massa estimada. Essas informações contribuíram diretamente na elaboração de um modelo geológico preliminar da área de estudo.

3.1.2.6. Modelo geológico preliminar

A área de interesse foi modelada em formato de modelo de blocos utilizando o banco de dados georreferenciados criado para o projeto. Os parâmetros do modelo de blocos criado foram os seguintes:

- Origem do modelo na coordenada X (m) = 290 250 m
- Origem do modelo na coordenada Y (m) = 390 300 m
- Origem do modelo na coordenada Z (m) = 800 m
- Dimensão máxima dos blocos na direção X (m) = 10 m
- Dimensão máxima dos blocos na direção Y (m) = 10 m
- Dimensão máxima dos blocos na direção Z (m) = 1 m
- Número de blocos na direção X = 90 blocos
- Número de blocos na direção Y = 83 blocos
- Número de blocos na direção Z = 300 blocos

A Figura 52 apresenta o mapa da região de estudo com o limite do modelo de blocos e a posição das duas seções verticais no modelo de blocos.

Figura 52 - Mapa da região de estudo com o limite do modelo de blocos e a posição das duas seções verticais no modelo de blocos

Fonte: Autor

A Figura 53 mostra a seção vertical na posição da Linha Base da sondagem a trado e a Figura 54 mostra a seção vertical na Linha Transversal da sondagem a trado.

Figura 53 - seção vertical na posição da Linha Base da sondagem a trado

Fonte: Autor

Figura 54 - Seção vertical na Linha Transversal da sondagem a trado.

Fonte: Autor

3.1.2.6.1. Avaliação do modelo de blocos

O modelo de blocos, elaborado na Fase 2 do projeto, com superfície topográfica e a superfície modelada do contato solo-rocha, foi avaliado em relação à quantidade de solo presente dentro da área modelada. Os resultados foram os seguintes:

- Volume estimado de solo=4 385 900 m³;
- Densidade estimada do solo=1.6 t/m³;
- Massa estimada de solo na área modelada=7 017 440 t.

3.1.2.6.2. Estudo Conceitual de Cava

Foi realizado um estudo conceitual de cava na litologia solo no entorno da região com maior potencial de ocorrência de Au (LB01 a LB04). Os parâmetros de desenho de cava foram os seguintes:

- Largura da berma = 5 m;
- Altura do banco = 6 m;
- Ângulo de face = 60°;
- Ângulo geral de talude (calculado com base nos parâmetros acima)-35°.

A Figura 55 apresenta uma vista em perspectiva da cava conceitual desenhada no entorno da região com maior potencial de ocorrência de Au em São Roque e a Figura 56 apresenta a cava conceitual com vista em planta.

Figura 55 - Vista em perspectiva da cava conceitual desenhada no entorno da região com maior potencial de ocorrência de Au em São Roque

Fonte: Autor

Figura 56 - Vista em planta da cava conceitual desenhada em São Roque entorno da região com maior pontencial de ocorrência de Au.

Fonte: Autor

3.1.2.7. Comentários sobre os trabalhos realizados

Na pesquisa do depósito com de mineralização de ouro, o objetivo, a princípio, era identificar a ocorrência de ouro no depósito e, posteriormente, gerar o modelo

geológico com os resultados da sondagem. No entanto, a geofísica teve uma participação significativa e foi utilizada em conjunto com a investigação de sondagem a trado que identificou a ocorrência de ouro, cujas análises da pesquisa exploratória confirmaram a presença de ouro em todas as sondagens realizadas. O ouro identificado é considerado expressivo, mesmo que os teores identificados ainda estejam longe de um nível que possibilite o seu aproveitamento econômico. No entanto, a investigação por sondagem a trado não teve um alcance de profundidade suficiente para determinar o limite de alcance do solo até a rocha. Essa parte da investigação coube aos métodos geofísicos, método de eletrorresistividade através das técnicas de SEV e CE que tornaram possível a diferenciação do solo e topo da rocha com precisão e viabilizaram os cálculos para quantificar os volumes e massas do solo para a geração do modelo geológico preliminar e cava conceitual. A geofísica, portanto, permitiu conhecimento geológico em curto espaço de tempo e proporcionou informações para auxiliar o processo de planejamento de lavra.

3.1.3. Mineração de calcário

O pesquisa realizada na mineração de calcário teve como objetivo a atualização do modelo geológico. A mineração está localizada próxima à cidade de Taubaté, SP com uma área (manifesto de lavra) de 50 ha com uma proposta de ampliação do título minerário para um alvará de pesquisa dentro de uma área de 246 ha (Figura 57)

Figura 57 - Localização da mineração

Fonte: Adaptada do GOOGLE. Google Earth. 2016.

O levantamento de dados para a atualização do modelo geológico na área do novo título minerário estava condicionado a prazos e, portanto, havia uma necessidade de que os trabalhos fossem agilizados para cumprir os prazos especificados. O método convencional utilizado, normalmente, pela mineração para o levantamento desse tipo de dados, é baseado em sondagens rotativas. No entanto, devido aos prazos estabelecidos, a campanha de sondagem que havia sido planejada com abordagem convencional tomaria um tempo de aproximadamente 60 dias, utilizando entre 3 e 4 equipamentos de sondagem. A Figura 58 apresenta a área com título minerário atual com manifesto de lavra e novo título com alvará de pesquisa e os pontos de sondagem planejados com o método convencional.

Figura 58 - Título minerário atual com manifesto de lavra e novo título com alvará de pesquisa

Fonte: Autor

3.1.3.1. Ensaios geofísicos

Para reduzir o tempo do levantamento de dados necessários para atualização da modelagem geológica do depósito, foram introduzidos métodos geofísicos em substituição ao método convencional que permitiram a obtenção de dados confiáveis das variáveis de interesse (que incluem a espessura da camada de solo e a profundidade do topo da rocha sã). O trabalho teve início com um teste de verificação da precisão dos métodos geofísicos e foi realizado na mesma posição de uma sondagem existente, validando a aderência dos resultados do levantamento geofísico com as informações dos testemunhos de sondagem. Com isso, foi confirmada a viabilidade de utilizar os métodos de eletrorresistividade (ER) com sondagem elétrica vertical (SEV), com arranjo Schlumberger com o objetivo de identificar as estruturas geológicas de interesse e de polarização induzida (IP) e utilizar as informações para atualização do modelo geológico. Com os resultados satisfatórios, foram planejadas e realizadas 31 SEVs na porção sul da área do novo título minerário. A Tabela 10 apresenta as coordenadas das SEVs e a Figura 59 apresenta o mapa com a localização das SEVs.

Tabela 10 - Coordenadas das SEVs

Ponto	Coord. UTM E-W	Coord. UTM N-S
SEV01	460272	7439974
SEV02	460292	7440072
SEV03	460390	7440046
SEV04	460440	7440103
SEV05	460530	7440217
SEV06	460465	7440008
SEV07	460394	7439931
SEV08	460889	7439888
SEV09	460991	7439935
SEV10	461093	7439772
SEV11	461153	7439735
SEV12	461063	7439772
SEV13	460999	7439659
SEV14	461111	7440079
SEV15	461163	7439947
SEV16	461262	7439890
SEV17	461323	7439776
SEV18	460810	7439708
SEV19	461562	7439608
SEV20	461193	7439613
SEV21	461365	7439346
SEV22	460776	7439552
SEV23	460622	7439201
SEV24	460080	7439474
SEV25	460318	7439337
SEV26	460283	7439194
SEV27	459959	7439368
SEV28		
SEV29	459962	7439499
SEV30	459948	7439144
SEV31	460036	7439407

Fonte: Autor

Figura 59 - Localização das SEVs

Fonte: Autor

Os resultados mostram que foi possível identificar as camadas de interesse estabelecidas nas premissas do estudo.

A maioria das SEVs apresentou modelos de quatro camadas. As camadas 1, 2 e 3 foram interpretadas respectivamente como solo superficial (resistividades baixas a médias, cargabilidade baixas a médias), solo de alteração não saturado (resistividades altas devido ao baixo teor de umidade e cargabilidades médias) e solo de alteração ou saprolito (resistividades baixas a médias e cargabilidades baixas). A quarta camada, normalmente, apresentou valores altos de resistividade (superiores a 2000 ohm.m) e cargabilidades mais altas (normalmente, acima de 10 mV/V) interpretadas como gnaiss são. Os valores altos de resistividade são esperados para o gnaiss e são devidos ao baixo grau de alteração e baixa porosidade. Os valores maiores de cargabilidade podem estar relacionados a minerais acessórios metálicos dentro do gnaiss, que ainda não foram transformados pelo intemperismo. Nos pontos referentes às SEVs 05, 06, 24, 27 e 28, foram observados valores de resistividade abaixo de 1000 ohm. m para a última camada, interpretada como gnaiss alterado ou saprolítico. Esses valores,

relativamente baixos, sugerem uma rocha com algum grau de alteração e/ou fraturamento.

Outra SEV, com resultado que destoa dos demais modelos, é a de número 19, em que a resistividade da camada, sobre a camada interpretada como rocha sã, é relativamente alta (superior a 2000 ohm. m). Nesse ponto é possível que a terceira camada seja caracterizada por uma rocha levemente alterada ou fraturada. Na Figura 60, é apresentado o modelo geoeletrico da SEV10, na Figura 61 a SEV05, na qual a quarta camada é caracterizada como gnaiss alterado ou saprolítico. A Tabela 11 apresenta os resultados das SEV10 e SeV05.

Figura 60 - SEV10

Fonte: Autor

Figura 61 - SEV 05

Fonte: Autor

Tabela 11 - Modelo geoeletrico da SEV10 e SEV05

SEV	BHID	De	Para	LITOLOGIA
SEV 10	S-01	0	0,5	Solo superficial
	S-01	0,5	2,8	Solo alteração
	S-01	2,8	5,3	Solo/saprolito pouco saturado
	S-01	5,3		Rocha alterada
SEV 05	S-02	0	1,9	Solo superficial
	S-02	1,9	8,5	Solo não saturado
	S-02	8,5	13,8	Solo/saprolito pouco saturado
	S-02	13,8		Gnaiss alterado / saprolítico

Fonte: Autor

Os resultados do levantamento geofísico com a aplicação do método de eletrorresistividade, através da técnica de sondagem elétrica vertical e o método de polarização induzida, permitiram a identificação da espessura da camada de solo sobre o topo da rocha que foram a base para os estudos geológicos. Os resultados obtidos dos ensaios geofísicos foram a base para os estudos geológicos e permitiram expandir o modelo geológico da jazida, considerando as premissas estabelecidas:

- Interpretação com precisão adequada das unidades litológicas de interesse (camada de solo e contato com a rocha);
- Realização do levantamento na área de interesse dentro dos prazos estabelecidos pela empresa

Em termos práticos, a introdução dos métodos e das técnicas de geofísicas propostas permitiu que o levantamento das informações necessárias para a atualização do modelo geológico que, normalmente teria sido realizado em aproximadamente 60 dias (utilizando entre 3 e 4 equipamentos de sondagem), fosse realizado em 15 dias, significando uma redução de 75% no tempo de execução do levantamento.

3.1.3.2. Expansão do modelo geológico

Os dados interpretados da camada referente ao topo da rocha em todas SEVs da área de interesse foram utilizados para atualizar o modelo geológico. A Tabela 12 mostra a profundidade interpretada da parte superior da rocha, que foi utilizada para a atualização do modelo geológico.

Tabela 12 - Profundidade interpretada da parte superior da rocha

Ponto	Prof. do topo da rocha(m)
SEV 01	18,2
SEV 02	11,8
SEV 03	26,1
SEV 04	8,6
SEV 05	13,8
SEV 06	21
SEV 07	26,3
SEV 08	34,5
SEV 09	28,5
SEV 10	5,4
SEV 11	7,2
SEV 12	7,2
SEV 13	38,4
SEV 14	16
SEV 15	13,2
SEV 16	15,1
SEV 17	17,9
SEV 18	8,6
SEV 19	17
SEV 20	26,8
SEV 21	18,6
SEV 22	24
SEV 23	24,4
SEV 24	11,4
SEV 25	16,6
SEV 26	35,6
SEV 27	7,4
SEV 28	-
SEV 29	8,8
SEV 30	8,3
SEV 31	7,2

Fonte: Autor

A Figura 62 mostra as seções geológicas através do modelo geológico expandido atualizado.

Figura 62 - Modelo geológico expandido atualizado

Fonte: Autor

As Figuras 63 e 64 mostram as seções geológicas AA' e BB' respectivamente com o modelo original e a interpretação expandida usando dados de SEVs.

Figura 63 - Seção geológica AA'

Fonte: Autor

Figura 64 - Seção geológica BB''

Fonte: Autor

3.1.3.3. Comentários sobre os trabalhos realizados

Os ensaios geofísicos foram realizados em substituição parcial às sondagens rotativas para identificar as estruturas geológicas de interesse e expandir o modelo geológico. Foram realizados ensaios com o método de eletrorresistividade com técnica de sondagem elétrica vertical (SEV). Os ensaios de SEV foram realizados com o objetivo de procurar individualizar as camadas de solo de alteração sobre o gnaisse.

Os resultados mostram que foi possível identificar os contrastes de interesse e, dessa maneira, possibilitaram a atualização do modelo geológico dentro das exigências que eram necessárias.

Os resultados do levantamento geofísico foram utilizados na atualização do modelo geológico, em conformidade com as demandas estabelecidas pela empresa interessada:

- Interpretação com precisão adequada das unidades litológicas de interesse (camada de solo e contato com a rocha);
- Realização do levantamento na área de interesse dentro dos prazos estabelecidos pela empresa;

As 31 SEVs tiveram um alcance total de profundidade em torno de 523m e, em termos práticos, a introdução dos métodos e das técnicas geofísicas propostas

permitiram que o levantamento das informações necessárias para a atualização do modelo geológico, que normalmente, teriam sido realizados em aproximadamente 60 dias (utilizando entre 3 e 4 equipamentos de sondagem), fossem realizados em 15 dias, o que significou uma redução de 75% no tempo de execução do levantamento.

No boletim de sondagem da empresa de Taubaté para o período de 08h não foi considerado a logística de deslocamento do equipamento para áreas de interesse. Essa informação é relevante, porque o deslocamento do equipamento de sondagem para áreas planejadas para a execução dos furos, demandam um tempo extremamente grande. Através dos cálculos, concluiu-se que para a execução dos 31 furos de sondagem, incluindo o tempo gasto com deslocamento do equipamento, a execução do trabalho sofreria um acréscimo de aproximadamente 35 dias, elevando os dias de trabalho para 60 dias no total.

Com relação a custos, a utilização do método geofísico mostrou ser mais econômico, quando comparado ao método de sondagem rotativa. De acordo com a tabela de honorários da APSG (2012), o custo das SEVs (até 50 m de profundidade) é aproximadamente R\$ 800,00.

De acordo com a tabela de honorários do Departamento Autônomo de Estradas de Riodagem - DAER (2016), o custo da sondagem rotativa em rocha alterada dB (BWG) é de R\$275,00/m. A Tabela 13, adaptada da Associação Profissional Sul-Brasileira de Geólogos - APSG (2012), mostra os custos relativos à aplicação dos métodos geofísicos e a Tabela 14, adaptada da DAER-Departamento Autônomo de Estrada de Rodagem (2016), mostra os custos relativos à aplicação do método de sondagem rotativa.

Tabela 13 - Custos relativos à aplicação do método de sondagem rotativa

Método Geofísico	Valor mínimo (R\$)
Sondagem Elétrica Vertical – SEV (até 50 m de profundidade)	800,00
Sondagem Elétrica Vertical – SEV (acima de 50 m de profundidade)	1.000,00
Sísmica de refração ou reflexão (por medida)	3.300,00
Gravimetria	3.300,00
Magnetometria (por medida)	3.300,00
Eletroresistividade - Caminhamento Elétrico (por metro linear)	6,00
Gamaespectrometria (por quilômetro)	550,00
Imageamento Elétrico 2D (por quilômetro)	2.500,00
IP Espectral (por quilômetro)	3.400,00
Perfilagem geofísica em furo de sondagem (poço tubular) - padrão API, perfis SP, GR, IEL, BHC, CALIPER e Perfil Interpretado/m	70,00

Fonte: Adaptada APSG (2014)

Tabela 14 - Preços de sondagem DAER (2016)

Método de Sondagem	Unidade	Preço unitário(R\$)
Sondagem Rotativa em Rocha Alterada d B (BWG)	M	275,21
Sondagem Rotativa em Rocha Vulcânica d A (AWG)	M	426,18
Sondagem Rotativa em Rocha Vulcânica d B (BWG)	M	620,19
Sondagem Rotativa em Rocha Vulcânica d N (NWG)	M	855,76
Sondagem Rotativa em Rocha Plutônica d A (AWG)	M	923,22
Sondagem Rotativa em Rocha Plutônica d B (BWG)	M	1.306,99
Sondagem Rotativa em Rocha Sedimentar d A (AWG)	M	223,56
Sondagem Rotativa em Rocha Sedimentar d B (BWG)	M	330,25
Sondagem Rotativa em Cascalho d A (AWG)	M	816,07
Sondagem Rotativa em Cascalho d B (BWG)	M	1.160,49
Sondagem com Instalação de Piezômetros	M	1.118,94

Fonte: Adaptada DAER (2016)

A Tabela 15 faz uma comparação em relação ao tempo e custos, entre o método geofísico e o método de sondagem rotativa, incluindo o deslocamento do equipamento.

Tabela 15 - comparação em relação ao tempo e custos, entre o método geofísico e o método de sondagem rotativa

Tipo de Método	Tempo gasto	Perfuração atingida	Custo (R\$)/m	Custo Total (R\$)
Geofísica (SEV	15(dias)	523 m	16,00	8.368,00
Sondagem Rotativa	60(dias)	523 m	275,21	143.934,83

Fonte: Autor

Nota-se, na tabela de comparação entre os métodos, que o custo total com a utilização do método geofísico é menor, em aproximadamente 94%, em relação ao custo por sondagem rotativa. Trata-se de um valor significativo que, para a MPE, pode ser a diferença entre dar sequência ou não ao projeto.

De maneira geral, os resultados alcançados, nesse caso, mostram que os métodos e as técnicas de geofísica permitiram um conhecimento geológico melhor do depósito.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nessa pesquisa, foi avaliado o impacto da aplicação de métodos geofísicos no planejamento de lavra de três depósitos minerais de pequeno porte, sendo um depósito com mineralização de ouro, um segundo, com mineralização de manganês e um outro, com mineralização de calcário.

4.1. Resumo dos resultados dos estudos realizados

Principais resultados do estudo no depósito de manganês:

- Modelagem geológica preliminar para estabelecer o conceito do depósito com base nas informações de mapeamento superficial e da aplicação de métodos geofísicos;
- Desenho de cava conceitual para estimar a relação estéril-minério e para determinar a área impactada pela futura cava;
- Planejamento de sondagem numa campanha de duas fases, a primeira com uma malha de 150 x 50 m e a segunda, com sondagens complementares para uma malha de 75 x 50 m.
- Redução estimada de 77% no tempo de aquisição de informações para a elaboração de um modelo geológico preliminar comparado ao método tradicional de sondagens.

Principais resultados do estudo no depósito de ouro:

- Modelagem geológica preliminar para estabelecer o conceito do depósito com base nas informações de mapeamento superficial, de sondagens a trado e da aplicação de métodos geofísicos;
- Desenho de cava conceitual para estimar a relação estéril-minério e para determinar a área impactada pela futura cava;
- Determinação de forma rápida e precisa da espessura da camada de solo mineralizado para complementar os trabalhos de sondagem a trado cuja limitação de profundidade de perfuração não permitiu estimar a espessura do solo.

Principais resultados do estudo no depósito de calcário:

- Modelagem geológica de detalhe para estabelecer a espessura de cobertura em toda a área do direito minerário sem a necessidade de sondagens tradicionais adicionais.
- O modelo resultante foi utilizado para guiar as atividades de planejamento de lavra da mineração de calcário.
- Redução de 75% no tempo de execução do levantamento geofísico em comparação com o método tradicional de sondagens rotativas.
- Redução de 94% no custo estimado de pesquisa mineral, comparando às 31 SEVs realizadas com um trabalho equivalente com sondagens rotativas.

4.2. Análise da redução do nível de incerteza geológica

O diagrama de variação do nível de incerteza geológica, discutido na Introdução, foi utilizado como modelo para a construção de um gráfico com dados reais, com a seguinte configuração:

- Para a curva da mineração de grande escala, foram utilizados dados publicados por Ferreira (2016). Nesse caso, os valores do coeficiente de variação encontrados para os horizontes LP, MP e CP, foram 59%, 54% e 51% respectivamente.
- Para a curva inicial da mineração de pequena escala, foi aplicada a matriz Tichauer-De Tomi, conforme publicada por Tichauer (2016), aos três estudos em depósitos de pequeno porte realizados nesta pesquisa, levando em conta as condições originais de conhecimento geológico nos três casos.
- Para a curva da mineração de pequena escala com utilização de geofísica, a mesma matriz (Tichauer, 2016) foi aplicada aos três estudos realizados, mas, agora, levando em conta a redução da incerteza geológica em função da utilização de métodos geofísicos.

Para o horizonte de LP, foi utilizado o depósito de ouro, em que o índice CEBIm inicial era 2,5 (correspondendo a um nível de 75% de incerteza em relação às

melhores práticas internacionais) e, após a utilização de geofísica, o índice CEBIm passou a ser 3,2 (68% de incerteza), representando uma redução proporcional de 10% na incerteza geológica.

No caso do horizonte MP, foi utilizado o depósito de manganês, em uma mina em pré-operação, em que o índice CEBIm inicial era 3,1 (69% de incerteza) e, após a aplicação de métodos geofísicos, passou a ser 3,9 (61% de incerteza), representando uma redução proporcional de 13% na incerteza geológica.

Já para o horizonte CP, foi utilizado o depósito de calcário, numa mina em operação, com índice CEBIm inicial era 4,0 (57% de incerteza) e passou a ser 4,5 (55% de incerteza), representando uma redução proporcional de 4% na incerteza geológica.

Os resultados da variação da incerteza geológica estão representados na Figura 65, cujas informações sobre a mineração de grande porte foram obtidas de Ferreira (2016), e as informações sobre a MPE foram estimados a partir da aplicação do índice CEBIm (Tichauer, 2016) para os depósitos de ouro (representando o horizonte LP), de manganês (horizonte MP) e de calcário (horizonte CP).

Figura 65 - Resultados da variação da incerteza geológica no horizonte do planejamento lavra de LP, MP, CP para a mineração de grande porte e para a MPE levando em conta o impacto da utilização de métodos geofísicos.

Fonte: Autor

5. CONCLUSÕES

Os resultados alcançados na pesquisa permitiram comprovar que a utilização de métodos geofísicos pode efetivamente contribuir para reduzir os níveis de incerteza geológica nos diferentes horizontes de planejamento de lavra, conforme a análise e avaliação das questões de pesquisa apresentadas na introdução.

- A geofísica, como método indireto de pesquisa mineral, pode contribuir para o planejamento de lavra da MPE?
 - A metodologia de seleção e aplicação de métodos geofísicos permitiu a obtenção de redução de tempo e de custo de execução da pesquisa mineral nos três depósitos estudados em relação aos métodos tradicionais de sondagem;
 - A principal contribuição para o planejamento de lavra é na redução da incerteza geológica nos diferentes horizontes de planejamento; os resultados obtidos indicaram uma redução proporcional da incerteza na ordem de 10% para o depósito de ouro (que representou o horizonte de longo prazo de planejamento de lavra por ser uma área em fase de projeto conceitual de lavra), de 13% para o depósito de manganês (horizonte de médio prazo de planejamento de lavra por ser uma mina em fase de pré-operação), e de 4% para o depósito de calcário (horizonte de curto prazo de planejamento de lavra, por ser uma mina em operação).
- Que métodos geofísicos podem atender o planejamento de lavra na MPE?
 - Conforme indicado na revisão bibliográfica, há diversos métodos geofísicos que podem ser aplicados para o aumento do nível de conhecimento geológico na MPE;
 - Nos três casos estudados nesta pesquisa, foram selecionados métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida (IP-domínio do tempo) com técnicas de sondagem elétrica vertical (“SEV”) e de caminhamento elétrico (“CE”) para identificar as estruturas geológicas de interesse;
 - No entanto, a própria revisão bibliográfica indicou que os diferentes métodos geofísicos estão em constante evolução, com a introdução de inovações de hardware e de software, bem como no grau de automatização dos equipamentos e das rotinas de processamento e interpretação de dados;

- Conforme indicado na metodologia proposta nesta pesquisa, os desafios de planejamento de lavra devem ser entendidos e o método geofísico mais adequado para responder àquele desafio selecionado;
- Quais os benefícios que os métodos geofísicos podem proporcionar à MPE?
 - Os ganhos de tempo de execução verificados variaram de 75 a 77% em comparação com o método tradicional de sondagens rotativas;
 - Os ganhos de custo de pesquisa alcançaram 94% no caso da mineração de calcário, sendo possível uma comparação direta com o método de sondagens rotativas;
 - Em todos os depósitos estudados, foi possível construir modelos geológicos, que foram utilizados na tomada de decisões de planejamento de lavra (longo prazo para o depósito de ouro, médio, para o depósito de manganês e curto, para o depósito de calcário);

É importante ressaltar que, na MPE, a limitação de recursos financeiros, característica comum de pequenos empreendimentos, não permite, na maioria das vezes, que os mineradores realizem trabalhos de pesquisa mineral detalhada, o que faz com que os recursos minerais não sejam devidamente aproveitados.

Esta pesquisa demonstrou que a utilização de métodos geofísicos podem reduzir o custo e o tempo de execução dos trabalhos de pesquisa mineral, permitindo maior precisão na tomada de decisão de planejamento de lavra da MPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHIREKO, P. K. **Application of modified conditional simulation and artificial neural networks to open pit optimization**. 1998. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Engineering, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 1998.

ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO 2010. Brasília: DNPM, 2010. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral/arquivos/ANUARIO_MINERAL_2010.pdf> Acesso em: 21 Set. 2015.

ASSOCIAÇÃO PROFISSIONAL SUL-BRASILEIRA DE GEÓLOGOS. **Tabela de honorários profissionais para geólogos**. Aprovada na Sessão Plenária nº 1.702 do Crea- RS, em 13 de abril de 2012. Porto Alegre: CREA-RS, 2012. Disponível em: <http://www.crea-rs.org.br/site/documentos/Tabela_de_Honorarios_Profissionais_APSG.pdf>. Acesso em: 16 Jul 2014

ATZEMOGLU, A.; TSOURLOS, P.; PAVLIDES, S. Investigation of the tectonic structure of the NW part of the Amynteon Basin (NW Greece) by means of a vertical electrical sounding (VES) survey. **Journal of the Balkan Geophysical Society**, v. 6, n. 4, p. 188-201, 2003.

BARRETO, M. L. **Formalização da mineração a pequena escala (MPE) na América Latina e Caribe**. s.L.: IDRC/CRDI/MPRI/IIPM, julho 2003. Disponível em: <http://web.idrc.ca/uploads/user-S/11177213001form_barreto.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2011.

BARTÁK, R. On the boundary of planning and scheduling: a study. In: WORKSHOP OF THE UK PLANNING AND SCHEDULING SPECIAL INTEREST GROUP, 18th, 1999, Manchester, U.K. **Proceedings**. s.L.: s.n., 1999. p 28-39.

BERRY, A. A.; SAAD, A. Tropical clayey sand soil's behaviour analysis and its empirical correlations via geophysics electrical resistivity method and engineering soil characterizations. **International Journal of Geosciences**, v. 3, p. 111-116, 2012.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica**: formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro, SP . 173 p. 1997. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP.

BRAGA, A.C.O. **Métodos de Prospeção em Hidrogeologia**. Apostila Interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP. 1999.

BRYCESON, D. F.; JONSSON, J. B. Gold digging careers in rural east Africa-small-scale miners' livelihood choices. **World Development**, v. 38, n. 3, p. 379-392, 2010.

BUXTON, A. **Responding to the challenge of artisanal and small-scale mining. How can knowledge networks help**. London: International Institute for Environment and Development, 2013. Disponível em: <<http://pubs.iied.org/pdfs/16532IIED.pdf>>. Acesso em: junho 2015.]

CÂMARA, T. R. **Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto**. 2013. 88 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

CINTRA, E. C.; AJUB, R. R. E.; STURARO, J. R. Comparação de amostragens em sondagens rotativas diamantadas com sondagens tricônicas de circulação reversa em uma pesquisa mineral. *Geociencias*, v. 22, n. 1, p. 95-103, 2003. ISSN 0101-9082.

COUZENS, T. R. Aspects of production planning: operating layout and phase plans. *Open Pit Mine Planning and Design* (JT Crawford and W. A. Hustrulid, editors), p. 217-232, 1979.

CURI, A. Minas a Céu Aberto: Planejamento de Lavra. ISBN: 978-85-7975-149-3 P.232. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. www.oftexto.com.br.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADA DE RODAGEM. Tabela de preços unitários. Disponível em: <http://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201608/02133624-4tabela-projeto-maio-16-oficial.pdf> Acesso em: 16 Fev 2016.

DANIELSON, L. Artisanal and small-scale mining from an NGO perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 11, n. 2, p. 97-98, 2003. ISSN 0959-6526.

DNPM. Anuario Mineral Brasileiro 2010. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 1, p. 860, 2010. , I. A Geofísica na Indústria da Mineração. Rio de Janeiro: SBGf. 2010. p.12

ELIS, V. R., C. A., PORSANI, J. L., & STROBINO, E. D. F. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2008 26(3), 317-325.

ENDO, I. A Geofísica na Indústria da Mineração. Rio de Janeiro: SBGf. 2010. p.12.

ERICSSON, M. World mining boom continues Global mining. 2010.

FERREIRA, T. C. O. Análise de incertezas do modelo de teores associado aos investimentos de pesquisa de longo prazo. Dissertação (Mestrado) : IGc/USP São Paulo, 2016. 88 p.

FREITAS, S.B.M., **Planejamento estocástico de lavra: metodologias de simulação, otimização e gestão de risco para a mina do futuro**. 2015. 179 p. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FRASHERI, A., LUBONJA, L., & ALIKAJ, P. On the application of geophysics in the exploration for copper and chrome ores in Albania. *Geophysical prospecting*, 1995 43(6), 743-757.

GAMA, C.D Metodologia de Controle de Lucro em Mineração. Publicação IPT 1661. São Paulo: IPT, 1986. 24p.

GAMARRA CHILMAZA, F. Programa para la prevención y eliminación progresiva del trabajo infantil en la minería artesanal de oro en sudamérica: estudio sociolaboral en los centros poblados de la Rinconada y Cerro Lunar". Puno: International Labour Organization. 2005. Disponível em: <http://redsocial.pe/IIISOCIOLABORAL.pdf>. Acesso em: junho 2015.

GOOGLE. Google Earth. Version 7.1.5.1557 . ano. Nota (nome do local). Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earthsite> >. Acesso em: 2016

HACKSPACHER, P.C., GODOY, A.M., OLIVEIRA, M.A.F. Evolução crustal do bloco São Roque, na região sudeste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, 1993 23(3):260-264.

HAILE, T., &ATSBAHA, S. Electrical resistivity tomography, VES and magnetic surveys for dam site characterization, Wukro, 2014 Northern Ethiopia. Journal of African Earth Sciences, 97, 67-77.

HASUI, Y., 1975. Geologia da Folha de São Roque. São Paulo, 1975.USP, Boletim IG (6)-157-183.

HENTSCHEL, T.; HRUSCHKA, F.; PRIESTER, M. Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining. v. V.20, n. 70, p. 1–67, 2002.

HILSON, G.; PARDIE, S. Mercury: An agent of poverty in Ghana's small-scale gold-mining sector. Resources Policy, v. 31, n. 2, p. 106-116, 2006. ISSN 0301-4207

HRUSCHKA, F.; ECHAVARRIA, C. Rock-solid chances for responsible artisanal mining: ARM Series on responsible ASM, No. 3. [s.l: s.n.] 2011.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning & design-Fundamentals**. Taylor & Francis inc. 3.ed. 2013. v. 1. 1308 p.

IBGE (2014). Carta SF-23-Y-A-III-3. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Consultado em 25/01/2014. <http://biblioteca.ibge.gov.br/detalhes.php?id=64060>.

JENNINGS, N. Los problemas sociales y laborales en las explotaciones mineras pequeñas. Informe para el debate de la Reunión tripartita sobre los problemas sociales y laborales en las explotaciones mineras pequeñas. Oficina Internacional del Trabajo (OIT). Informe TMSSM/1999, Ginebra, p. 17-21, 1999.

KEMP, D.; OWEN, J. R. Community relations and mining-Core to business but not "core business". Resources Policy38(2013)523–531, Elsevier, 2013.

KREUZER, O. P.; ETHERIDGE, M. A. Risk and uncertainty in mineral exploration: implications for valuing mineral exploration properties. **Australian Institute of Geoscientists News**, v. 100, p. 20-28, 2010.

LEITE, J. Y. P., VERAS, M. M., SANTOS, E. P., LIMA, R. F. S., PAULO, J. B. A., & PINHEIRO, M. Technological characterization of kaolin tailing from small-scale mining in RN and PB states - Brazil. Minerals Engineering, v. 20, n. 9 SPEC. ISS., p. 959–961, 2007.

MACONACHIE, R. Re-agrarianising livelihoods in Sierra Leone. Journal of International Development. 23, 1054–1067 (2011), Wiley Online Library, 2011.

MICROMINE. **Intuitive Mining Solutions.** Disponível em: <<http://www.micromine.com/about-micromine/>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

NÚCLEO DE APOIO À PESQUISA PARA A PEQUENA MINERAÇÃO RESPONSÁVEL(NAP.MINERAÇÃO-USP). Modelo preliminar do depósito de manganês a Fazenda Santana. São Paulo"Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo", 2014. * * Documento acessível mediante autorização da Empresa/Instituição.

NÚCLEO DE APOIO À PESQUISA PARA A PEQUENA MINERAÇÃO RESPONSÁVEL(NAP.Mineração-USP). **Projeto VALLE GIALLO. Relatório de Pesquisa Exploratória**São Paulo"Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo", 2015. * * Documento acessível mediante autorização da Empresa/Instituição.

MORLEY, C. Beyond reconciliation: a proactive approach to using mining data. In: **Large Open Pit Mining Conference**. 2003. p. 185-192.

NETO, L.S. **Relatório Preliminar do Mapeamento Geoestrutural na Faz. Santana.** Núcleo de Apoio à Pesquisa para a Pequena Mineração Responsável(NAP.Mineração-USP). 2014.

OGILVY, A. A., &BOGOSLOVSKY, V. A. The Possibilities of Geophysical Methods Applied for Investigating the Impact of Man on the Geological MEDIUM*. 1979 *Geophysical Prospecting*, 27(4), 775-789.

OIT. Programa de Actividades Sectoriais. Los problemas Sociales y laborales en las explotaciones mineras pequeñas. Ginebra, Mayo de 1999.

OKAY, G., COSENZA, P., GHORBANI, A., CAMERLYNCK, C., CABRERA, J., FLORSCH, N., &REVIL, A. Localization and characterization of cracks in clay- rocks using frequency and time- domain induced polarization. 2013 *Geophysical Prospecting*, 61(1), 134-152.

PARASNIS, D. S. Principles of applied geophysics. *GFF*, 84(4), 534-535. 1962.

PERONI, R. L. Análise de sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, 143 p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

POPOFF, Constantine C. **Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods.** US Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1966.

RAFAEL RACHID ELIAS AJUB, EVANDRO CARDOSO CINTRA 1, J. R. As Reversa Em Uma Pesquisa Mineral. p. 95–103, 2003.

RAVINDRAN, A. A. Characterization of the geology of subsurface shallow conglomerate using 2d electrical resistivity imaging at baragadi, panna district, madhyapradesh, india. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(3). 2010.

RIBEIRO, A. A Geofísica na Indústria da Mineração. Rio de Janeiro: SBGf. 2010. p.10.

ROQUÉ, C.; ZARROCA, M.; LINARES, R. Subsurface initiation of tafoni in granite terrains — Geophysical evidence from NE Spain-Geomorphological Implications. *Geomorphology* 196 (2013) 94–105, 2012.

SAHBI, H., JONGMANS, D., &CHARLIER, R. Theoretical study of slope effects in resistivity surveys and applications. *Geophysical prospecting*,45(5), 795-808. 1997.

SALVADOR, E.D., MARCONATO, A., TURRA, B.B., CHIEREGATI, L.A., D'AGOSTINO, L.Z., PERROTA, M.M., LOPES, R.C. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. CPRM, São Paulo. 2005. Mapa e texto explicativo, 195p.

SECCATORE, J. An Estimation of Artisanal Small-scale production of Gold in the World. *Science of the Total Environment*, 496, p. 3-8, 2014.

SENA, F.O. A Geofísica na Indústria da Mineração. Rio de Janeiro: SBGf. 2010. p.10.

SILVA, N.C.S., **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. 2008. 124 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SINGER, D. A; KOUDA, R. Examining Risk in Mineral Exploration. *Natural Resources Research*, v. 8, n. 2, p. 111–122, 1999.

SOUSA, R. et al. Policies and regulations for Brazil's artisanal gold mining sector: analysis and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 6, p. 742-750, 2011. ISSN 0959-6526.

SPIEGEL, S. J. Resource policies and small-scale gold mining in Zimbabwe. *Resources Policy*, v. 34, n. 1, p. 39-44, 2009. ISSN 0301-4207.

TICHAUER, R. **Matriz de priorização aplicada à pesquisa mineral na pequena mineração Dissertação (mestrado)** 2016. 71 p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 2016. 71 p.

YAMAMOTO, J.K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. ISBN: 85-314-0626-9 Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, Edusp, 2001. 226 p.