

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE DE DADOS DE CARGABILIDADE, RESISTIVIDADE
ELÉTRICA E SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA NA MINA DO
BRUCUTU, MG.**

RODRIGO TUSI COSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. FARID CHEMALE JR.

**COMISSÃO EXAMINADORA: Prof. Dr. Arthur Ayres Neto
Prof. Dr. Arthur Bastos Neto
Prof. Dr. José Carlos Frantz**

**Dissertação apresentada como
requisito para obtenção do Título de
Mestre em Geociências.**

Porto Alegre – 2007

Agradecimentos

- Primeiramente aos meus pais, pelo apoio que eles vêm me dando ao longo de todos esses anos;

- À Dani e a Luana por tudo de bom que a gente tem vivido juntos;

- À Flaviane, ao Ricardo e ao Pedro Henrique pelos bons momentos que estamos sempre passando;

- Aos professores e orientadores Farid Chemale Jr e Issamu Endo pela orientação e discussões sobre os resultados obtidos neste trabalho;

- Ao Marco Antonio Braga por ter sido um grande apoiador e parceiro ao longo destes dois anos;

- Ao Jordão Ramos e a toda a equipe de geologia da Mina do Brucutu pelo suporte técnico fundamental ao andamento do trabalho;

- A todas as pessoas da equipe do longo prazo de Itabira (Nélson, Paulo Orlandi, Tiago, etc – espero não estar esquecendo de ninguém), que de alguma forma participaram e contribuíram com o trabalho;

- À Companhia Vale do Rio Doce por ter me dado à oportunidade de realizar este trabalho;

- À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a pós-graduação em Geociências.

RESUMO

O depósito ferrífero da Mina Brucutu contém uma das maiores reservas do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, apresentando um complexo arranjo de tipos de minérios de ferro e estruturas. A aplicação de métodos geofísicos é, portanto utilizado para caracterizar o comportamento dos materiais mineralizados e estéreis, bem como estabelecer critérios para definir novos alvos de exploração. Assim, neste trabalho foram utilizados dados de sondagens elétricas verticais e de medições de susceptibilidade magnética realizadas em afloramentos, medições de resistividade e cargabilidade em amostras de campo e de sondagens, além de dados de um levantamento de IP, com o objetivo de caracterizar as propriedades físicas das diferentes litologias presentes na Mina do Brucutu e arredores. Modelos 1D, 2D e 3D de resistividade foram gerados com os dados de IP e das sondagens elétricas. Em geral, o minério de ferro apresenta resistividade maior que as encaixantes, principalmente se compararmos os valores de resistividade maiores que 100.000 ohm.m do itabirito friável com os menores que 1000 ohm.m, apresentados pelos xistos do grupo Nova Lima. Com relação à susceptibilidade magnética, o minério de ferro apresenta valores maiores que 1000 (CGS $\cdot 10^{-6}$), enquanto que a maioria das rochas encaixantes apresentam valores menores. O estudo realizado indica a possibilidade de ocorrência de minério fora dos limites estabelecidos pelos modelos geológicos da mina, o que deve ser testado em trabalhos futuros de exploração direta.

ABSTRACT

The iron deposit Brucutu has one of largest reserves of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, with a complex arrangement of iron ore types and structures. The use of geophysical methods can be applied to characterize the behaviour of mineralized materials and hosted rocks as well to establish criteria for definition of new exploration targets. In this work were used vertical electrical sounding data, resistivity and chargeability sample analyses and magnetic susceptibility measurements in outcrops and samples, and a dipole-dipole induced polarization survey with the goal to characterize physical properties of lithologies present in Brucutu Iron Ore Mine and surroundings. 1D, 2D and 3D models resistivity were generated with IP and vertical electrical sounding data. In general, iron ore presented higher resistivity than other lithologies, mainly comparing the high resistivity of soft itabirite, values higher than 100.000 ohm.m, with the low resistivity of Nova Lima schists, values lower than 1000 ohm.m. In relation to magnetic susceptibility, iron ore showed values higher than 1000 (CGS $\cdot 10^{-6}$), while the majority of the lithologies presented values lower than it. The present study indicated the possibility of occurrence of iron ore outside the limit established for mine geologic models which can be tested by direct exploration methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e vias de acesso para a Mina do Brucutu.....	2
Figura 2. Mapa geológico da Mina do Brucutu com localização das seções geofísicas..	5
Figura 3. Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.....	6
Figura 4. Mapa geológico regional.....	7
Figura 5. Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Dorr 1969, Almeida et al. 2003). Idades Pb/Pb (mínima de deposição) de ¹ Babinski et al. (1991); Pb/Pb (Fm. Moeda, mínima de deposição) ² Endo (1997); U/Pb (Gr. Nova Lima, metamorfismo) ³ Carneiro (1992); U/Pb (Fm. Saramenha, máxima de deposição) ⁴ Endo et al. (2002); Pb/Pb (Form. Cauê, metamorfismo) ⁵ Olivo et al. (1996); ⁶ Endo & Machado (2002). (⁷)A unidade sem nome do Grupo Tamanduá de Simmons & Maxwell (1961) é designada aqui, informalmente, de Formação Morro Grande. (⁸) Lipski (2002). (⁹) Maizatto (2001) (¹⁰) Maxwell (1972).....	9
Figura 6. Padrão de redobramento coaxial. A: Flanco da dobra recumbente com dobras de 2ª ordem em padrão “Z”. B: Efeito do redobramento das dobras em padrão “Z” (A) com interferência do tipo 3. C: Posição estrutural do segmento do sinclinal entre Gralhos-Brucutu.....	19
Figura 7. Síntese do modelo geológico-estrutural do sinclinal Gandarela com detalhe da extremidade oriental.....	20
Figura 8. Cronologia dos eventos tectônicos proposto por Endo <i>et al</i> (2004).....	21
Figura 9. Esquema do método Eletrorresistividade - quatro eletrodos AMNB.....	23
Figura 10. Variações de resistividade em rochas e solos. Modificado de Ward.(1990). 23	
Figura 11. Influência dos processos geológicos na resistividade das rochas. Modificado de Ward (1990).....	24
Figura 12. Exemplo de curvas de caimento da voltagem nas medições no domínio do tempo. Modificado de Ward.(1990).....	25
Figura 13. Tipos de polarização.....	27
Figura 14. Modelo de blocos gerado e dados medidos em campo apresentados na pseudoseção.....	28
Figura 15. Exemplo de inversão 2D em local de ocorrência de dois blocos retangulares.....	29
Figura 16. Exemplo de ocorrência de uma zona fraturada verticalizada.....	30

Figura 17. Exemplo de modelagem 3D apresentada em diferentes profundidades ("layers").	31
Figura 18. Gráfico Litologia X Resistividade.	36
Figura 19. Curvas de resistividade obtidas com os dados medidos nas sondagens elétricas.	39
Figura 20. Gráfico Litologia X Susceptibilidade magnética.	40
Figura 21. modelos de resistividade utilizando diferentes parâmetros de inversão.	44
Figura 22. Exemplos de diferentes qualidades nos dados de IP.	45
Figura 23. Legenda das litologias das seções geológicas da Mina do Brucutu.	46
Figura 24. Linha SV01.	51
Figura 25. Modelos geológicos propostos para a Linha SV01.	52
Figura 26. Linha SV02.	53
Figura 27. Modelos geológicos propostos para a Linha SV02.	54
Figura 28. Linha SV03.	55
Figura 29. Modelos geológicos propostos para a Linha SV03.	56
Figura 30. Linha SV04.	57
Figura 31. Modelos geológicos propostos para a Linha SV04.	58
Figura 32. Linha SV06.	59
Figura 33. Modelos geológicos propostos para a Linha SV06.	60
Figura 34. Linha SV07.	61
Figura 35. Modelos geológicos propostos para a Linha SV07.	62
Figura 36. Linha SV08.	63
Figura 37. Modelos geológicos propostos para a Linha SV08.	64
Figura 38. Linha SV09.	65
Figura 39. Modelos geológicos propostos para a Linha SV09.	66
Figura 40. Linha SV10.	67
Figura 41. Modelos geológicos propostos para a Linha SV10.	68
Figura 42. Linha SV11.	69
Figura 43. Modelos geológicos propostos para a Linha SV11.	70
Figura 44. Linha SV14.	71
Figura 45. Modelos geológicos propostos para a Linha SV14.	72
Figura 46. Linha SV15.	73
Figura 47. Modelos geológicos propostos para a Linha SV15.	74

Figura 48. Resultado do modelo 3D para diferentes profundidades de investigação (10, 30, 50, 70 e 90 metros).	77
Figura 49. Modelo 3D de resistividade e mapa geológico da mina para uma profundidade de 30 metros.	78
Figura 50. Modelo 3D de resistividade (profundidade 70 metros) e mapa geológico da mina (profundidade 40 metros).	79
Figura 51. Mapa geológico da Mina do Brucutu com lineamentos marcados pela geofísica.....	80
Figura 52. Comparação entre a quantidade de medidas realizadas através de levantamento de IP tradicional e da técnica de imageamento elétrico 2D.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Amostras analisadas e sondagens elétricas verticais realizadas em diferentes litologias.	2
Tabela 2. Linhas de IP levantadas em 2003.	3
Tabela 3. Medições nas amostras coletadas nos furos de sonda.	32
Tabela 4. Medições nas amostras coletadas nos afloramentos.	33
Tabela 5. Resultados das sondagens elétricas e das medições de susceptibilidade magnética medida nos afloramentos.	34
Tabela 6. Comentários e explicações sobre os parâmetros de inversão.	41
Tabela 7. Furos a serem realizados sugeridos após interpretação dos modelos 2D.	84
Tabela 8. Amostras coletadas nos testemunhos de sondagens dos furos FDBR0003, FDBR0038 e FDBR0062.	95
Tabela 9. Valores de resistividade aparente medidos em IC. Sondagem elétrica vertical 1 (SEV 1).	96
Tabela 10. Valores de resistividade aparente medidos em afloramento de xisto da Formação Morro Grande. SEV 2.	98
Tabela 11. Valores de resistividade aparente medidos em afloramento de gnaise do embasamento. SEV 3.	100
Tabela 12. Valores de resistividade aparente medidos em clorita xisto. SEV 4.	101
Tabela 13. Valores de resistividade aparente medidos em sericita xisto. SEV 5.	102
<i>Tabela 14. Valores de resistividade aparente medidos no Granito Peti. SEV 6.</i>	<i>103</i>
Tabela 15. Valores de resistividade aparente medidos em itabirito semi-friável. SEV 7.	104
Tabela 16. Valores de resistividade aparente medidos em quartzito ferruginoso da Formação Cercadinho. SEV 8.	106
Tabela 17. Valores de resistividade aparente medidos na canga ferrífera. SEV 9.	108
Tabela 18. Valores de resistividade aparente medidos sobre corpo e HC ou canga muito rica em HC. SEV 10.	110
Tabela 19. Valores de resistividade medido em IF saturado. SEV 11.	111
Tabela 20. Valores de resistividade medidos no filito prateado da Formação Cercadinho. SEV 12.	113
Tabela 21. Valores de resistividade medidos no mármore dolomítico da Formação Gandarela. SEV 13.	114

Tabela 22. Valores de resistividade medidos em rocha máfica intrusiva. SEV 14.	115
Tabela 23. Valores de resistividade medidos no IF. SEV 15.	116
Tabela 24. Valores de resistividade medidos em rocha máfica intrusiva. SEV 16.	117
Tabela 25. Valores de resistividade medidos em solo argiloso do Terciário. SEV 17.118	
Tabela 26. Valores de resistividade medidos perpendicularmente a foliação do IF. SEV 18.	120
Tabela 27. Valores de resistividade medidos paralelamente a foliação do IF. SEV 19.	120
Tabela 28. Amostras coletadas e sondagens elétricas verticais realizadas em diferentes litologias.	122

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação e objetivos.....	1
1.2. Localização e vias de acesso.....	1
1.3. Metodologia de trabalho.....	2
2. GEOLOGIA.....	7
2.1. Geologia Regional.....	7
2.1.1. Unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero.....	7
2.1.2. Arcabouço estrutural.....	13
2.1.3. Sinclinal Gandarela.....	13
2.2. Geologia local.....	15
2.2.1. Litoestratigrafia local – Mina de Ferro do Brucutu.....	15
2.2.2. Arcabouço estrutural.....	17
2.2.3. Modelo Geológico (Endo et al., 2004).....	18
3. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS DO MÉTODO.....	22
3.1. O método da Eletrorresistividade.....	22
3.2. Método IP - Polarização Induzida.....	24
3.3. Inversão 2D dos dados aparentes e geração de um modelo de resistividades e cargabilidades verdadeiras.....	27
3.4. Inversão 3D.....	30
4. RESULTADOS.....	32
4.1. Caracterização das propriedades físicas das rochas.....	32
4.2. Processamento dos dados de IP levantados em 2003 na Mina do Brucutu.....	41
4.2.1. Parâmetros das inversões 2D.....	41
4.2.2. Interpretação das seções 2D.....	44
4.2.3. Interpretação do modelo 3D de resistividade.....	75
5. Conclusões.....	81
6. Referências bibliográficas.....	87
7. Anexos (relatório de campo com fotos).....	91

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação e objetivos.

A geofísica aplicada à prospecção de minérios tem se desenvolvido muito nos últimos anos. No caso do método da Polarização Induzida (IP), além dos equipamentos com alta capacidade e armazenamento de informação com grande precisão, o processamento dos dados evoluiu bastante da década de 90 até hoje. Os dados de resistividade e cargabilidade aparentes medidos em campo, por exemplo, podem ser utilizados em softwares que realizam a inversão 2D e 3D, gerando modelos de resistividade e cargabilidade verdadeiras.

Na prospecção de minério de ferro, os métodos geofísicos mais utilizados são a gravimetria e a magnetometria. A aplicação do método IP, embora utilizado em menor escala, pode ser bastante útil na delimitação e definição das litologias e estruturas tectônicas de uma jazida.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliar o uso do método IP em áreas de ocorrência de minério de ferro.
- Caracterizar as propriedades físicas (resistividade elétrica, cargabilidade e susceptibilidade magnética) dos minérios e encaixantes da Mina do Brucutu.
- Avaliar diferentes formas de processamento das seções geofísicas.
- Correlacionar às seções geofísicas processadas com a geologia da mina, e se possível, sugerir novos alvos a serem perfurados.

1.2. Localização e vias de acesso.

A jazida de minério de ferro de Brucutu situa-se no NE do Quadrilátero Ferrífero, município de São Gonçalo do Rio Abaixo, MG, na extremidade oriental do Sinclinal Gandarela, aproximadamente, nas coordenadas geográficas 19° 52' de latitude S e 43° 23' de longitude W (Figura 1).

A área de estudo dista 101 km de Belo Horizonte e 17 km de Barão de Cocais. O acesso principal é feito por 78 km pela BR-262, de Belo Horizonte para João Molevade, até o entroncamento com a MG-436. Percorre-se 13 km de asfalto por essa rodovia estadual e, finalmente, após trafegar por 10 km de rodovia não pavimentada, chega-se à Mina de Brucutu.

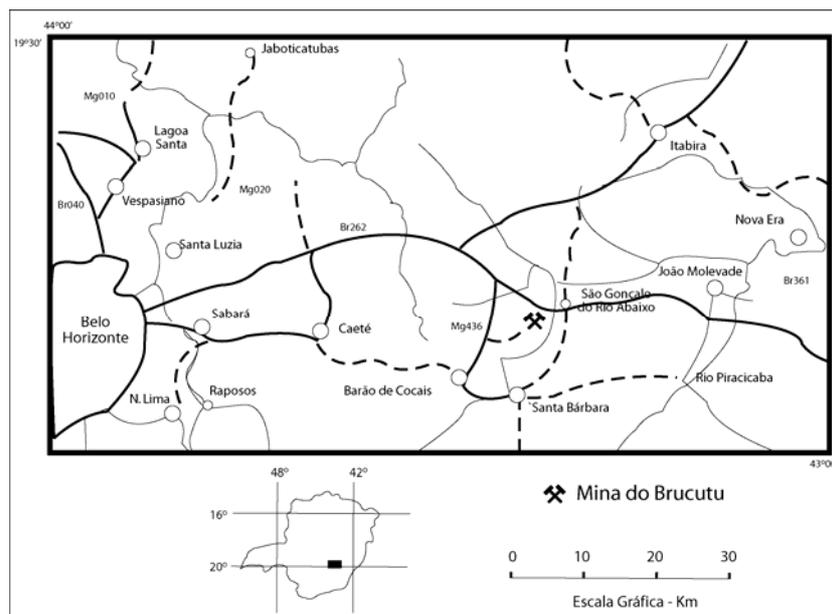


Figura 1. Localização e vias de acesso para a Mina do Brucutu.

1.3. Metodologia de trabalho

O trabalho compreendeu duas etapas distintas. A etapa 1 (etapa de campo) consistiu na caracterização das propriedades físicas dos minérios e encaixantes na área da Mina do Brucutu. Foram realizadas sondagens elétricas verticais (SEVs) e medições de susceptibilidade magnética em 19 afloramentos. Na realização das SEVs foi utilizado um transmissor manual alimentado por uma bateria de 12 Volts e um voltímetro. Nas medições de susceptibilidade magnética foi utilizado um susceptibilímetro modelo GMS-2, fabricado pela GEOINSTRUMENTS Inc. Além disso, foram coletadas amostras nestes afloramentos e em três furos de sondagens (FDBR0003, FDBR0038 e FDBR0062), para posterior medição de resistividade e cargabilidade em laboratório. Na Tabela 1 está apresentada a quantidade de amostras analisadas e SEVs realizadas em diferentes litologias.

Tabela 1. Amostras analisadas e sondagens elétricas verticais realizadas em diferentes litologias.

Litologia	Formação ou Grupo	Amostras analisadas dos furos	Amostras de campo analisadas	Total de amostras analisadas	Sondagens elétricas verticais
Solo Terciário	Cata Preta	-	1	1	1
Intrusiva Máfica	-	2	2	4	2
Granito	Peti	-	1	1	1

Quartzito Fé	Cercadinho	-	-	-	1
Filito prateado	Cercadinho	-	1	1	1
Mármore dolomítico	Gandarela	-	1	1	1
Canga	-	-	-	-	1
IC	Cauê	2	-	2	1
ISC	Cauê	1	1	2	1
IF	Cauê	-	-	-	4
I contaminado	Cauê	1	-	1	-
HC	Cauê	-	1	1	1
Xisto quartzoso	Morro Grande	2	-	2	-
Xisto	Morro Grande	-	1	1	1
Clorita xisto	Morro Grande	-	-	-	1
Sericita xisto	Morro Grande	-	1	1	1
Filito	Nova Lima	2	-	2	-
Gnaisse	Complexo Caeté	-	1	1	1
Total de amostras	-	-	-	21	-
Total de SEVs	-	-	-	-	19

A etapa 2 consistiu no processamento de seções geofísicas de IP, levantadas no ano de 2003, na Mina do Brucutu. Neste levantamento, as medições foram realizadas no domínio do tempo e os equipamentos utilizados foram um transmissor VIP4000 e um receptor ElrecPro, fabricados pela Íris Instruments Inc. O espaçamento dos eletrodos foi de 50 metros e os arranjos utilizados foram o dipolo-dipolo, para alcance em profundidade de cerca de 100 metros, e o arranjo gradiente, com parâmetros para atingir em torno de 400 metros de profundidade.

Foram executadas 12 linhas geofísicas, com diferentes extensões e profundidades (Tabela 2). Ao todo foram realizados 22.450 metros de perfis. A localização das linhas geofísicas é apresentada na Figura 2. São denominadas SV-01, SV-02, SV-03, SV-04, SV-06, SV-07, SV-08, SV-09, SV-10, SV-11, SV-14 e SV-15.

Tabela 2. Linhas de IP levantadas em 2003.

Seção geofísica	Profundidade média (m)	Comprimento da linha (Km)
SV01	170	0,85
SV02	250	1,3
SV03	260	1,7
SV04	350	2,0

SV06	370	2,2
SV07	400	2,3
SV08	390	2,3
SV09	340	2,3
SV10	260	2,3
SV11	200	2,2
SV14	160	1,6
SV15	140	1,4
Metragem total		22,45

No processamento das linhas foi utilizado o software Prosys (Iris instruments Inc), para visualização, organização e conversão dos dados de arquivo .BIN para .DAT, e os softwares RES2DINV e RES3DINV (Geotomo Inc.), para edição e inversão dos dados.

A Figura 3 apresenta o fluxograma de atividades realizadas no presente trabalho.

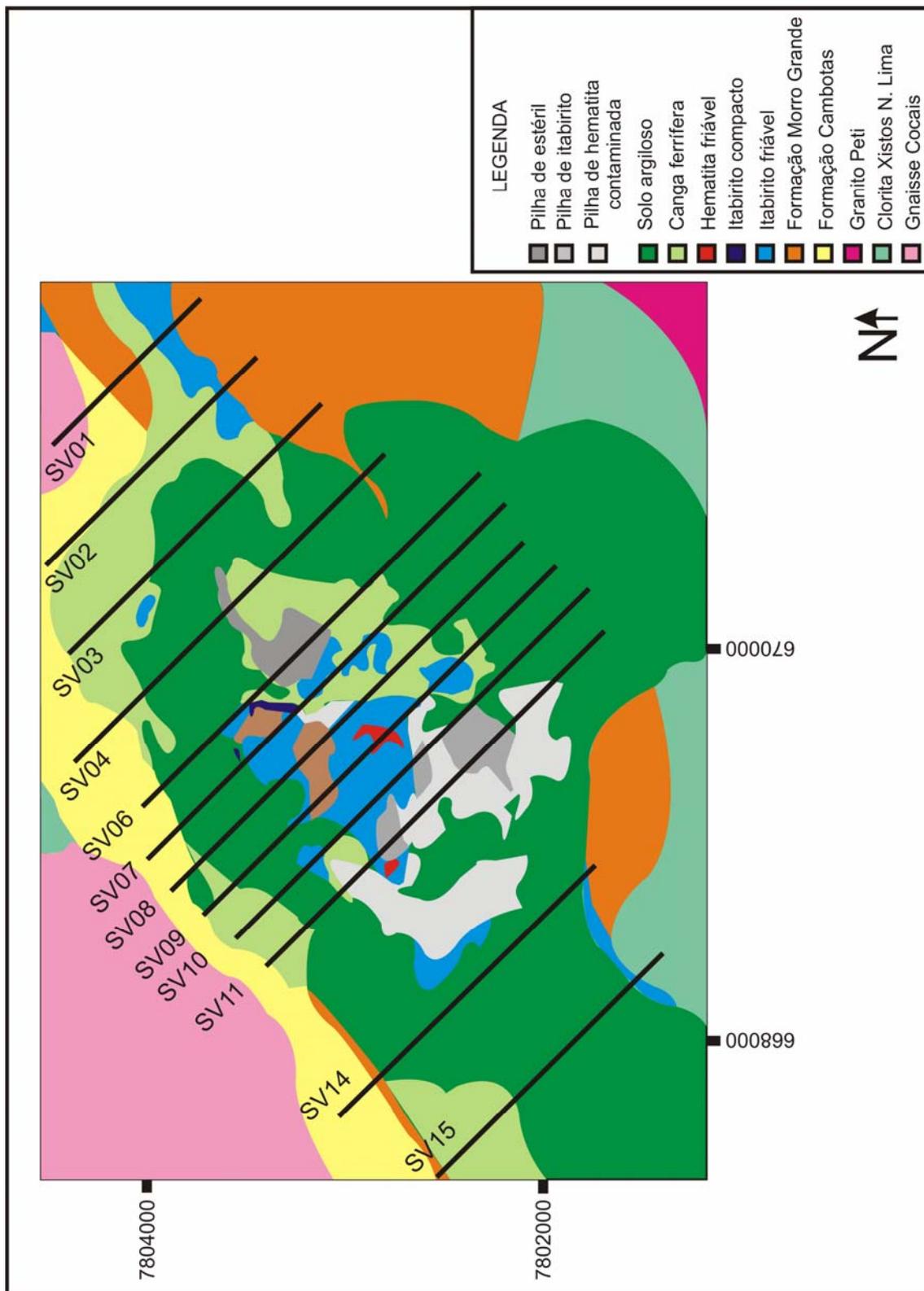


Figura 2. Mapa geológico da Mina do Brucutu com localização das seções geofísicas.

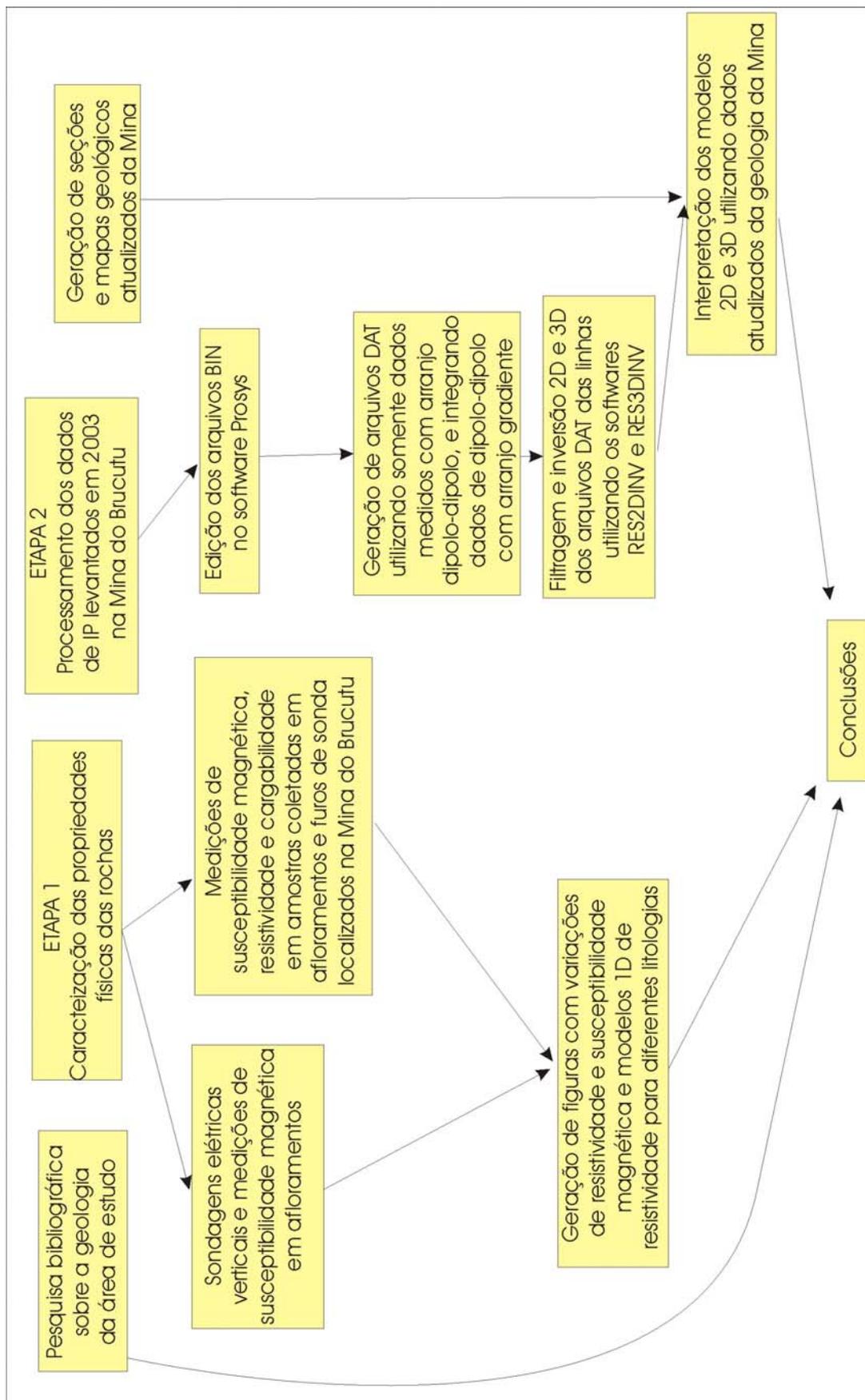


Figura 3. Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.

2. GEOLOGIA

Este capítulo é baseado no relatório do mapeamento geológico, estratigrafia e arcabouço estrutural do Projeto Brucutu-Dois Irmãos, realizado por Endo *et al* (2004), da mesma forma que o texto sobre o Sinclinal Gandarela e a litoestratigrafia local da Mina do Brucutu foi baseada na dissertação de mestrado de Hashizume (1998).

2.1. Geologia Regional

Em termos regionais a área de estudo situa-se no setor centro-norte do Quadrilátero Ferrífero (QFe) (Figura 4) e compreende, em linhas gerais, quatro grandes conjuntos de associações litológicas: a) Complexos Metamórficos Arqueanos; b) Supergrupo Rio das Velhas; c) Supergrupo Minas; d) Grupo Itacolomi (Endo *et al*, 2004).

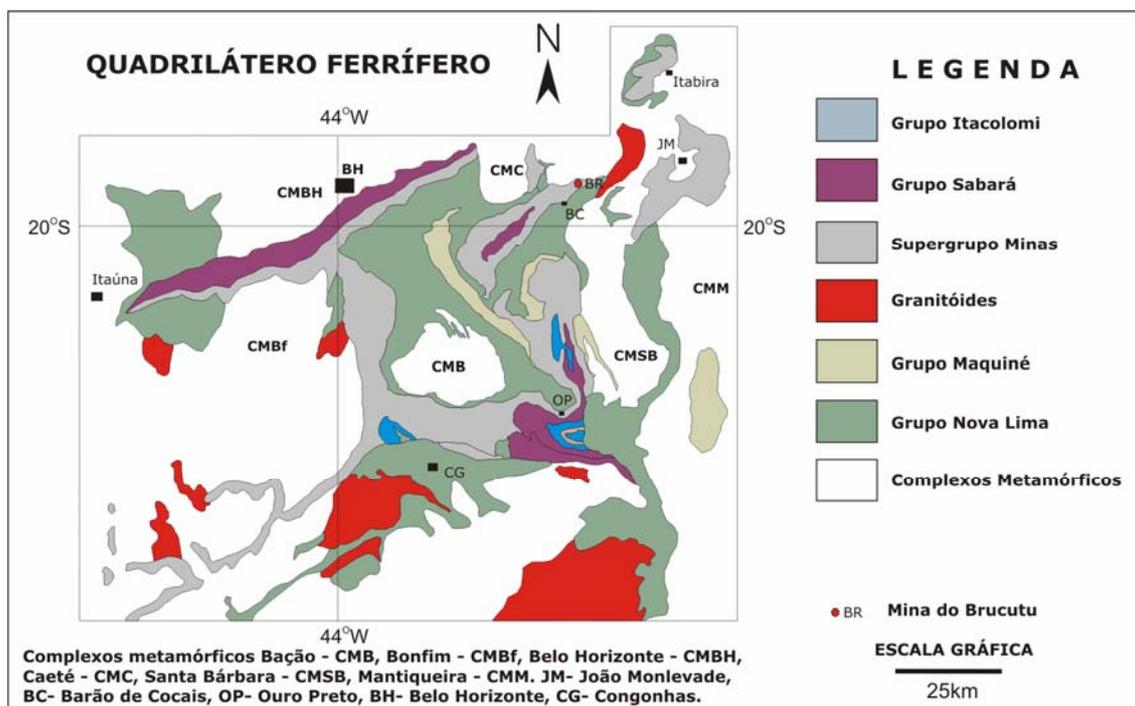


Figura 4. Mapa geológico regional.

2.1.1. Unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero

Complexos Metamórficos Arqueanos

As rochas dos complexos metamórficos do QFe apresentam ampla exposição na porção sul-sudoeste. São constituídas predominantemente por gnaisses bandados, migmatitos e granitos de composições variadas. O grau metamórfico varia desde fácies xisto verde a anfibolito médio a superior, sendo que as rochas destes complexos podem apresentar-se isótropas ou foliadas, como resultado da superposição de processos tectonometamórficos. Apresentam mergulhos elevados, com direções principais N-S, NE-SW e E-W e, subordinadamente, NW-SE. São comuns rochas básicas tardi a pós-tectônicas preenchendo descontinuidades produzidas por distensão crustal (Endo *et al.*, 2004).

Essas rochas apresentam em geral, contatos tectônicos com as unidades sobrejacentes, mostrando uma foliação de médio a alto ângulo (e.g. Gomes, 1985; 1986 e 1989, Endo & Chemale, 1991; Marshak *et al.*, 1992; Costa, 1992; Endo & Nalini, 1992; Hippertt *et al.*, 1992; Chemale *et al.*, 1994) ou ainda concordantes (e.g. Herz, 1970).

Gnaisses-migmatíticos, granitos, granodioritos e tonalitos de idade paleoproterozóica e fragmentos arqueanos retrabalhados, constituintes do Complexo Metamórfico Mantiqueira, ocorrem à leste e sudeste do QFe (Figueiredo & Teixeira, 1996).

Era Período	Superggrupo	Grupo	Formação	Litotipos	Ambiente Sedimentar	Espessura Máxima	Idade Ma	
				Canga				
<i>Evento Sul-Atlântico</i>								
Terciário			Cata Preta	Argila vermelha e fluxo de detritos	Continental	250 ⁸	28 ⁸	
			Fonseca	Arenito, siltito, argilito e linhito	Continental	87 ¹⁰	35 ⁸	
			Gandarela	Arenito, argilito, conglomerado e linhito	Continental	125 ⁹	35 ⁸	
<i>Discordância Erosiva e Angular</i>								
<i>Orogênese Brasileira 650 Ma a 560 Ma</i>								
<i>Orogênese Transamazônica – 2.250 Ma a 1.900 Ma</i>								
		Itacolomi		Quartzito, metaconglomerado e raramente filito	Molassa?	2.000		
<i>Discordância Erosiva e Angular</i>								
Paleoproterozóico	<i>Orogênese Transamazônica – 2.250 Ma a 1.900 Ma e intrusões de granitóides</i>							
	Sabará	Estrada Real		Metarenito, metaconglomerado, metadiamiccito e quartzito	Continental	200-750		
		Saramenha		Clorita xisto, filito, quartzito, metadiamiccito, itabirito, metagrauvaca e metaconglomerado,	Flysh	>985	2.650 U/Pb ⁴	
	<i>Discordância Erosiva Local</i>							
	Piracicaba	Barreiro		Filito e filito carbonático	Plataforma	150		
		Taboões		Ortoquartzito	Plataforma	125		
		Fecho do Funil		Filito, filito dolomítico, mármore e dolomito	Plataforma	410		
		Cercadinho		Quartzito ferruginoso, quartzito, filito prateado, filito ferruginoso, dolomito e metaconglomerado	Plataforma	600		
	<i>Discordância Erosiva Local</i>							
	Itabira	Gandarela		Dolomito, mármore, itabirito dolomítico, filito dolomítico	Plataforma	600	2.450 Pb/Pb ¹	
		Cauê		Itabirito (fácies óxido), itabirito dolomítico, hematitito e filito dolomítico	Plataforma	350	1.830 Pb/Pb ⁵	
	Caraça	Batatal		Filito	Plataforma	250		
		Moeda		Quartzito, metaconglomerado, filito	Plataforma	1.000	2.608 Pb/Pb ²	
	<i>Discordância Erosiva Local</i>							
	Tamanduá	⁷ Morro Grande		Sericita-clorita xisto com intercalações de filito ferruginoso, clorita xisto, quartzo-sericita xisto e filito coloração cinza	Plataforma			
		Cambotas		Quartzito com camadas de conglomerado com seixos de formação ferrífera e lentes de formação ferrífera no topo	Plataforma			
	<i>Discordância Erosiva e Angular</i>							
Arqueano	<i>Orogênese Rio das Velhas – 2.800 Ma a 2650 Ma com intrusões de granitóides</i>							
	Rio das Velhas	Maquiné	Casa Forte	Quartzito, metaconglomerado e filito	Molassa	>400		
			Palmital	Filito, quartzo xisto e metaconglomerado	Molassa	1.400		
	Nova Lima	Indiviso		Quartzo xisto, quartzito, metagrauvacas, metaconglomerados, xistos carbonáticos, metatufos, formações ferríferas, filitos, metabasaltos e talco xistos		3.700	2.772 a 2780 U/Pb ³	
			<i>Discordância Erosiva</i>					
	Embasamento		Gnaiss migmatítico de idade superior a 2.900 Ma ⁶					

Figura 5. Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Dorr 1969, Almeida et al. 2003). Idades Pb/Pb (mínima de deposição) de ¹Babinski et al. (1991); Pb/Pb (Fm. Moeda, mínima de deposição) ²Endo (1997); U/Pb (Gr. Nova Lima, metamorfismo) ³Carneiro (1992); U/Pb (Fm. Saramenha, máxima de deposição) ⁴Endo et al. (2002); Pb/Pb (Form. Cauê, metamorfismo) ⁵Olivo et al. (1996); ⁶Endo & Machado (2002). (⁷)A unidade sem nome do Grupo Tamanduá de Simmons & Maxwell (1961) é designada aqui, informalmente, de Formação Morro Grande. (⁸) Lipski (2002). (⁹) Maizatto (2001) (¹⁰) Maxwell (1972).

Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é composto, da base para o topo, pelos grupos Nova Lima e Maquiné (Dorr, 1969). No Grupo Nova Lima, ocorrem filitos, filitos grafitosos, clorita xistos, sericita xistos, quartzo xistos, metagrauvascas, rochas máficas e ultramáficas, metatufos, formações ferríferas do tipo algoma, metacherts e dolomitos. Apresentam contato com discordância erosional, com as rochas subjacentes do Grupo Maquine (Dorr, 1969; Maxwell, 1972), que na porção basal apresentam filitos, quartzo xistos e metaconglomerados da Formação Palmital, sotopostos a quartzitos metaconglomerados e filitos da Formação Casa Forte. As rochas ultramáficas, situadas na borda leste do QFe, inicialmente interpretadas como de idade pós-Minas (*e.g.* Dorr 1969) foram, posteriormente, designadas de Grupo Quebra Osso (*e.g.* Schorscher, 1978) e posicionado na base do Supergrupo Rio das Velhas.

O metamorfismo original das rochas do Supergrupo Rio das Velhas é discutível e não há indícios de ocorrência de metamorfismo retrógrado nos xistos e filitos do Grupo Nova Lima (Herz, 1978). As rochas desta unidade encontram-se em geral com grau metamórfico na fácies xisto-verde, ocorrendo fácies mais elevadas nas auréolas metamórficas dos complexos metamórficos Bação e Belo Horizonte.

Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é uma seqüência metassedimentar de idade paleoproterozóica (Babinski *et al.*, 1991; Machado *et al.*, 1989) cuja organização estratigráfica, em essência, permanece a mesma desde a definição original de Derby (1906) sendo constituído por xistos, quartzitos, dolomitos e formação ferrífera, assentada discordantemente sobre gnaisses e mica-xistos.

A proposição estratigráfica de Dorr (*op. cit.*) com a incorporação dos resultados alcançados pelos estudos de Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2002 e 2003) e Almeida (2003) resulta em quatro grandes grupos que totalizam mais de 4.000m de espessura de sedimentos para o Supergrupo Minas.

O Grupo Tamanduá, base do Supergrupo Minas, é constituído por quartzitos finos a médios com camadas de conglomerados com seixos de formação ferrífera (Formação Cambotas) sendo sucedida por xistos cloríticos e quartzosos e filitos com níveis ferruginosos.

O Grupo Caraça que repousa discordantemente sobre as unidades vulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, é constituído pela Formação Moeda, inferior, e Formação Batatal, superior. A Formação Moeda é constituída por metaconglomerados, filitos, quartzitos de grão fino a grosso com conteúdos variáveis de sericita e muscovita. A Formação Batatal é constituída, principalmente, de filito sericítico e, subordinadamente, por metachert, formação ferrífera e filito grafitoso.

O Grupo Itabira compreende duas formações: a Formação Cauê, inferior, e a Formação Gandarela, superior. A Formação Cauê compreende rochas como itabirito (usualmente com laminação de quartzo e hematita, às vezes de magnetita, dolomita e anfibólio), itabirito dolomítico, itabirito anfibolítico e pequenas lentes de xistos, filitos e margas. A Formação Gandarela consiste, essencialmente, de margas, filito dolomítico, dolomitos puros a ferruginosos e filito.

O Grupo Piracicaba é constituído pelas seguintes formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é composta de quartzitos, quartzitos ferruginosos, filitos ferruginosos, filitos prateados, filitos dolomíticos e dolomitos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros. A Formação Taboões consiste, essencialmente, de ortoquartzitos finos e equigranulares. E a Formação Barreiro é composta, predominantemente, de filitos e filitos grafitosos.

A unidade superior do Supergrupo Minas é constituída pelo Grupo Sabará (Barbosa, 1968) e (Renger *et al.*, 1994). Este grupo é constituído de clorita e biotita xistos, metagrauvas, quartzitos, quartzitos feldspáticos, formações ferríferas, itabiritos e metaconglomerados com matações e seixos de dolomito. Para Almeida *et al.* (2002), Almeida *et al.* (2003) e Almeida (2003) o Grupo Sabará é constituído pelas formações Saramenha, antiga Formação Sabará de Gair (1958), e Estrada Real.

Embora o Supergrupo Minas esteja separado do Supergrupo Rio das Velhas por discordância estrutural e estratigráfica, o grau metamórfico que afetou ambos os supergrupos são bastante parecidos, sendo caracterizados por metamorfismo da fácies xisto-verde atingindo a fácies anfibolito nas porções leste, sudeste e nordeste do QFe.

Rochas intrusivas pós-Minas

Veios de pegmatitos pouco espessos, que não foram datados, cortam as rochas do Supergrupo Minas (Herz, 1970). Pegmatitos muito semelhantes a estes que cortam as rochas do embasamento do Quadrilátero Ferrífero, apresentam idade de U-Pb em monazitas de 2,06 Ga (Noce, 1995). Alguns dos granitóides que cortam o embasamento podem ser pós-Minas em idade, mas em nenhum deles foram obtidas idades pós-Minas. Entretanto, no Granitóide Alto Maranhão, que aflora na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, foi obtida idade U-Pb de 2,08 Ga (Noce, 1995). À norte e noroeste diques máficos que cortam as rochas do Supergrupo Minas foram datados com idade de 1.714 Ga (Silva *et al.*, 1995).

Grupo Itacolomi

O Grupo Itacolomi definido por Dorr (1969) é constituído de uma fácies quartzítica, denominada de tipo Itacolomi, e outra filítica, designada de Santo Antônio. A fácies quartzítica é constituída predominantemente de quartzitos, quartzitos conglomeráticos, quartzitos ferruginosos de aspecto semelhante ao itabirito e filito. Os seixos são de quartzo, hematita, itabirito, quartzito, filito e granito. A hematita e martita são constituintes intersticiais freqüentemente encontrados na matriz. É comum a ocorrência de camada rica em ferro na porção basal da seqüência. A fácies filítica foi descrita por Barbosa (1949) na região de Congonhas do Campo. A unidade é composta de filitos, filitos quartzíticos, metaconglomerados, quartzitos e quartzitos ferruginosos muito similares ao itabirito. As relações de contato entre as duas fácies são incertas.

Depósitos sedimentares do Terciário

Dispõem-se no QFe diversos depósitos sedimentares continentais destacando-se bacias do Gandarela e do Fonseca (*e.g.* Maizatto 2001). Recobrimo estas bacias tem-se as argilas vermelhas da Formação Cata Preta que ocorrem em depósitos dispersos em todo o QFe (*e.g.* Lipski 2002). Os primeiros constituem-se de arenitos, siltitos e argilitos com linhito e a Formação Cata Preta de argilas avermelhadas e fluxo de detritos.

2.1.2. Arcabouço estrutural

O arcabouço estrutural do QFe é constituído, em sua essência, por dobras de várias gerações associadas às diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região (Dorr 1969, Endo 1997, Almeida *et al* 2001, Almeida *et al.* 2002, Almeida *et al.* 2003, Almeida 2003).

Modelos tectono-estrutural para o QF sugerem eventos deformacionais compressionais, transcorrentes e extensionais gerados principalmente no ciclos Transamazônico e Brasileiro (*e.g.* Marshak & Alkmim (1989), Chemale *et al.* (1992 e 1994) e Endo (1997). Trabalho recente de Endo *et al* (2004), hierarquiza as dobras de escala regional no QF como de primeira (ex.: nappes Ouro Preto e Ouro Branco), segunda (sinclinais Ouro Fino, Gandarela, Santa Rita, Curral, Itabira-Molevade) e terceira geração (sinclinais Moeda e Dom Bosco). Detalhamento do Sinclina Ganderal é apresentada a seguir visto que a Mina Brucutu encontra-se nesta estrutura regional.

2.1.3. Sinclinal Gandarela

O Sinclinal Gandarela posiciona-se na parte centro-leste do Quadrilátero Ferrífero, onde a tectônica é caracterizada por grandes cavalgamentos envolvendo estruturas sinclinais tais como o de Alegria, Conta História, Santa Rita e Ouro Fino. Este texto foi baseado, em parte, no trabalho “Projeto Sinclinal Gandarela” executado pela UFMG-IGC-CPMTC (FUNDEP 1991) e extraído da dissertação de Mestrado de Hashizume (1998).

O Sinclinal Gandarela é uma estrutura alóctone (Schorscher 1976, 1979; Rosière *et al.*, 1987, 1991) onde se encontra preservada toda a seqüência dos metassedimentos do Supergrupo Minas (Villaça, 1981), ainda que não se possa avaliar a extensão do deslocamento. Possui traço de superfície axial, em média, NE-SW com vergência para NW. O seu flanco sudeste apresenta-se invertido e cortado pela Falha do Fundão que empurra as rochas do Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) sobre a seqüência Minas ao longo da estrutura. O flanco NW representa a aba normal e tem direção entre NNW-SSE e ENE-WSW, acompanhando a curvatura do Sistema de Cavalgamento Fundão-Cambotas (SCFC). Chemale Jr *et al.* (1991) divide o sinclinal em três segmentos: Segmento Nordeste, Central e Sul.

O Segmento Nordeste, com eixo N60E, exibe no seu flanco normal NW a Falha das Cambotas, a qual cisalhou intensa e paralelamente a estratificação sedimentar. O flanco invertido SE também é cisalhado por uma das diverticulações da Falha do Fundão, disposta nessa seção quase paralela à Falha das Cambotas. Como resultado da ação dessas duas falhas do SCFC, este segmento foi comprimido contra o Complexo Granito-Gnáissico (CGG) de Caeté, resultando numa intensa milonitização das rochas do SGM e na rotação de 20° a 30°, no sentido horário, desta porção da megaestrutura em relação ao Segmento Central. É na extremidade NE deste segmento que está situada a Mina do Brucutu.

O Segmento Central, com eixo N40E, é o que está mais bem preservado, em especial na seqüência do Supergrupo Minas. Nas rochas deste segmento ocorrem estruturas sedimentares (estratificações plano-paralelas, cruzadas, flaser, etc) e algas (cianobactérias). Os estratos mostram-se cortados por zonas de cisalhamento descontínuas ou então apresentam uma xistosidade pouco desenvolvida. Neste segmento, a Falha do Fundão joga o flanco SE sobre o núcleo da estrutura dobrada e corta, em seguida, a megaestrutura longitudinalmente na região da charneira. Identificam-se também zonas de cisalhamento acompanhando o traçado desse sinclinal com cinemática de E para W. Apesar da baixa magnitude de deformação nesse segmento, a sua estruturação interna apresenta-se bem mais complexa que a do segmento NE. As estruturas mesoscópicas observadas (interferência de dobras, clivagens de orientação aleatória) não apresentam relação direta com a atitude N40E/20 do eixo dessa porção do sinclinal.

O Segmento Sul exibe uma forma alongada NS onde metaconglomerados, quartzitos, filitos e milonitos do Grupo Caraça constituem um homoclinal que se estende em direção NNE-SSW e mergulhos baixos a moderados (0-40°) para ESSE. A oeste e sul, os metassedimentos repousam, em contato tectônico, discordantemente por sobre as rochas xistosas do Grupo Nova Lima. A leste acha-se truncado pela Falha do Fundão, que provocou o cavalgamento das rochas do Grupo Nova Lima. Na sua extremidade NE, onde a falha inflete para NW, desenvolveu-se uma espessa zona de cisalhamento, resultando na quase total obliteração do acamamento por intensa milonitização e a formação de dobras isoclinais.

2.2. Geologia local

2.2.1. Litoestratigrafia local – Mina de Ferro do Brucutu

A Mina do Brucutu situa-se na extremidade oriental do segmento nordeste do Sinclinal Gandarela. O depósito está posicionado na Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas e repousa em contato tectônico com a seqüência de xistos vulcanossedimentares do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas. Ao norte a estrutura é bordejada pela falha das Cambotas que empurra o pacote de supracrustais por sobre o Complexo Granito-Gnáissico de Cocais.

Na área de estudo, três grandes unidades litoestratigráficas estão representadas: Complexo Granito-Gnáissico (CGG), Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) e Supergrupo Minas (SGM). Além destas unidades estratigráficas, ocorrem granitóides tipo “Borrachudo” (Granito Peti ou Santa Bárbara), alguns pequenos corpos de rochas máficas intrusivas e a Formação Cata Preta representando as coberturas de idade terciária.

O Complexo Granito-Gnáissico aflora ao norte da Mina do Brucutu e é constituído por gnaisses (Cocais), migmatitos e gnaisses milonitizados.

Os gnaisses milonitizados posicionados na zona de empurrão da Falha das Cambotas possuem coloração cinza esbranquiçada e granulação fina. A milonitização provocou a orientação das muscovitas, a recristalização parcial dos quartzos e a formação de bandas alongadas de quartzos.

Ao norte dessa faixa de gnaisses milonitizados, ocorrem os gnaisses e migmatitos. A composição mineral mais freqüente dessas rochas não milonitizadas é representada por quartzo, feldspato, biotita, granada e muscovita.

O Supergrupo Rio das Velhas está exposto em duas faixas com orientação ENE-WSW nas porções norte e sul da área estudada. Na Serra de Tamanduá, à norte, ocorre intensa deformação e alteração que se reflete em microestruturas típicas de milonitos, mascarando as texturas e estruturas primárias. Ocorrem clorita-quartzo xistos, sericita xistos, filitos e quartzitos milonitizados. Na parte sul, ocorrem sericita-clorita xistos, clorita xistos, talco xistos, quartzo-sericita xistos com intercalações de quartzitos micáceos (localmente silicificado), metamáficas e ultramáficas.

O Supergrupo Minas é representado pela Formação Batatal (Grupo Caraça), Formação Cauê (Grupo Itabira) e pela Formação Cercadinho (Grupo Piracicaba).

A Formação Batatal é constituída por filitos carbonosos prateados. O filito é composto essencialmente por sericita extremamente fina e, próximo às zonas de cisalhamento apresenta-se bastante crenulado.

A Formação Cauê é constituída por itabiritos e minérios de ferro de alto teor (corpos de hematita). Os contatos do itabirito Cauê com o filito Batatal ou com os xistos Nova Lima são de natureza tectônica.

Na Mina do Brucutu, a seqüência itabirítica apresenta uma variação composicional vertical e lateral (Hashizume, 1998). A porção basal é caracterizada por horizontes de itabiritos contaminados por níveis argilosos caulíníticos interdigitados com itabiritos pobres silicosos. Na porção mediana predominam itabiritos anfibolíticos e anfibólio xistos intercalados. No topo da seqüência ocorrem essencialmente itabiritos silicosos friáveis enriquecidos superficialmente, passando para minério rico friável (hematita pulverulenta), com intercalações de lentes e mullions de hematita compacta (Pohl *et al* 1996).

Na parte central da mina predomina o itabirito do tipo “chapinha”, denominação esta devido à facilidade de desagregar-se em placas de dimensões centi a decimétricas, ao longo das clivagens espaçadas bem desenvolvidas.

A base da seqüência superior (friável e enriquecida), com profundidade média de 70m, apresenta uma tendência em acompanhar a superfície topográfica. Nos bancos superiores da parte oeste da mina, ocorrem os minérios ricos friáveis hidratados, de aspecto maciço, formados por agregados de hematita porosa, magnetita martitizada, goethita e quartzo. Tanto o minério compacto quanto o friável a xistificação é pronunciada, com evidências de transposição podendo-se, entretanto, definir domínios parcialmente preservados da deformação e da recristalização onde se reconhece o bandamento dobrado, com flancos freqüentemente cisalhados.

A formação ferrífera, na área da mina, está capeada por solo e canga (detrítica ou estruturada) que chegam a atingir espessuras de até 50m (solo) e 20m (canga), em vários locais. As cangas detríticas são constituídas por blocos angulosos a subarredondados de hematita compacta e itabirito, parcialmente oxidados, cimentados por limonita e goethita e com uma matriz areno-argilosa subordinada. A canga estruturada preserva a estrutura da rocha original.

A Formação Cercadinho é composta por quartzitos, quartzitos micáceos e filitos (Hashizume, 1998). Os quartzitos apresentam coloração cinza esbranquiçada e granulometria fina. Os cristais de quartzo são quase equigranulares (0,05 a 0,2 mm), recristalizados e com contornos poligonais, entretanto, observa-se alguns grandes porfiroclastos com até 1,2mm. Raras sericitas e cianitas apresentam-se intercrescidas nos planos de foliação e opacos (hematita) ocorrem entre e inclusos nos cristais de quartzo

Os corpos ígneos de rochas básicas se distribuem ao norte da área, sob a forma de diques e pequenos *stocks*, truncando o Complexo Granito-Gnáissico. Cortando a seqüência itabirítica, na cava da mina, concordantemente ou não com a foliação/bandamento, ocorrem rochas intrusivas básicas bastante alteradas, apresentando-se xistificadas ou não (Hashizume, 1998).

Na área estudada, rochas graníticas intrusivas estão representadas pelo corpo plutônico de Peti (Granitóide tipo “Borrachudo”), do Proterozóico Médio, de composição essencialmente álcali-feldspática, constituído principalmente por mesopertita, quartzo, biotita e acessoriamente por muscovita, anfibólios e opacos. Petrograficamente variam entre granito e quartzo monzonito, apresentando textura porfirítica grosseiramente granular (Hashizume, 1998).

2.2.2. Arcabouço estrutural

Segundo Endo *et al.* (2004) o arcabouço tectônico da terminação do Sinclinal Gandarela é resultado da atuação de quatro eventos tectônicos distintos.

O evento E1 corresponde ao evento tectono-metamórfico Transamazônico ou à orogênese Minas responsável pela geração de toda a trama penetrativa do Supergrupo Minas, ou seja, uma xistosidade S1 paralela ao acamamento e uma segunda xistosidade S2 oblíqua à primeira. A polaridade tectônica e a vergência dos dobramentos da fase 2 deste evento rumam para SW (*e.g.* Endo 1997, Franco 2002, Almeida *et al.* 2002), contrária às proposições de Chemale *et al.* (1992, 1994), Marshak & Alkmim (1989) e Alkmim & Marshak (1998) que são para NW. Este evento é constituído de duas fases de deformação sucessivas D1 e D2. Na fase D1 foram geradas dobras recumbentes de escala regional e transportadas sobre uma superfície de

descolamento basal ao estilo de uma nappe. A fase seguinte D2 caracteriza-se pelo redobramento coaxial das dobras anteriormente nucleadas.

O evento Ex2 corresponde ao evento de caráter distensivo, associado ao evento Espinhaço, caracterizado pelo magmatismo máfico-ultramáfico e granítico. Os granitos são do tipo Borrachudos de natureza alcalina (*e.g.* Dussin 1994) designados de granitos Peti e Tamanduá.

O evento E3 corresponde à compressão E-W responsável pelo desenvolvimento de falhas de empurrão, dobras assimétricas subregionais, formação de clivagens de crenulação de direção NE-SW associadas às dobras de pequena amplitude e comprimento de onda vergêntes para W e amplos dobramentos com eixos apresentando caimentos para SE.

O quarto evento corresponde ao evento de caráter distensivo Ex4, caracterizado pela geração de um sistema de grabens E-W e N-S para a deposição de sedimentos argilosos avermelhados e fluxo de detritos. Exemplos desses grabens encontram-se expostos na mina de Brucutu.

2.2.3. Modelo Geológico (Endo et al., 2004)

A Serra de Tamanduá e áreas adjacentes constituem o segmento terminal do Sinclinal Gandarela cuja configuração estrutural é determinada pela superposição de quatro gerações de dobras com intensidades decrescentes do mais antigo para o mais novo. As duas primeiras são as mais significativas, pois, condiciona o desenvolvimento do arcabouço principal do Sinclinal Gandarela. As relações estruturais entre as duas primeiras fases de deformação não são evidentes na região. Entretanto, acompanhando a Serra do Tamanduá rumo a Serra do Piacó, a SW, sobre o flanco noroeste do Sinclinal Gandarela, observa-se um padrão de redobramento coaxial do tipo 3 com dobras “S” sobre “Z” (Figs. 6B e 6C) sendo bem caracterizado na mina de Gongo Soco. Esta seqüência de deformação é decorrência do redobramento de uma dobra recumbente de escala regional relativo ao flanco com dobras de 2ª ordem em padrão “Z” (Fig. 6A). Esta seqüência de dobramento corresponde às fases D1 e D2 de deformação Supergrupo Minas.

A terceira fase de deformação é caracterizada pela geração de falhas de empurrão e dobras de arraste associadas. Estas dobras, situadas na lapa da falha de

Brucutu, possuem direções axiais NNE-SSW com caimento suave para SW (Figs. 5B e 11). Esta falha-dobra promove um rearranjo na geometria original do sinclinal, durante o evento Brasileiro, com a constrição das camadas das formações Gandarela e Cercadinho e alçamento do flanco normal do sinclinal, a sul de Brucutu.

Após esta fase de falhamentos e dobramentos segue-se um período de intenso fraturamento crustal, provavelmente relacionado ao evento Sul-Atlântico, que proporcionou a sedimentação e deformação do sedimento da Formação Cata Preta.

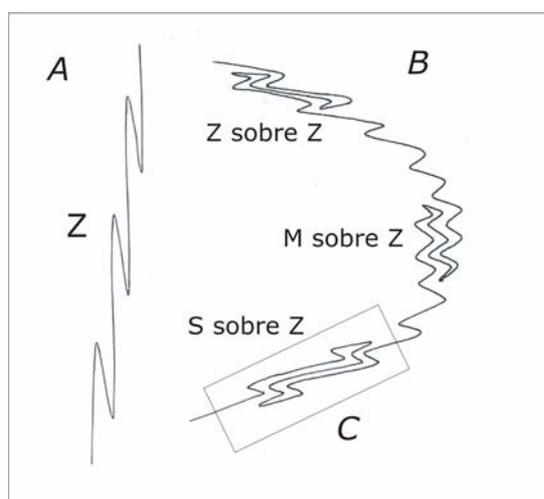


Figura 6. Padrão de redobramento coaxial. A: Flanco da dobra recumbente com dobras de 2ª ordem em padrão “Z”. B: Efeito do redobramento das dobras em padrão “Z” (A) com interferência do tipo 3. C: Posição estrutural do segmento do sinclinal entre Gralhos-Brucutu.

A figura 7 sintetiza o modelo geológico-estrutural do Sinclinal Gandarela com detalhe da extremidade oriental. O evento Transamazônico proporcionou a nucleação e desenvolvimento do sinclinal Gandarela em duas fases D1 e D2. Na fase D1 foi gerada uma dobra recumbente de escala regional com as unidades do Supergrupo Rio das Velhas situadas no núcleo da dobra. Na fase D2 é que ocorreu propriamente a formação do Sinclinal Gandarela a partir do redobramento do flanco inverso da proto dobra recumbente. A geometria resultante corresponde a uma dobra recumbente com as unidades do Supergrupo Minas situadas no núcleo da dobra. Portanto, a dobra Gandarela é um sinclinal antifórmico. O evento Brasileiro se manifesta através de uma dobra-falha com geometria cônica afetando, principalmente, o segmento oriental do sinclinal. Interposto a estes dois eventos compressivos ocorre o magmatismo máfico-ultramáfico e granítico relacionado ao evento extensional Espinhaço. Neste período, o

Período Era	Eventos Tectônicos		Fases	Processos e Produtos Tectônicos
Cenozóico	E _{x4}	Evento Sul-Atlântico	-	Fase de fraturamento crustal de caráter distensivo: Formação de bacias do tipo graben para deposição de sedimentos argilosos e fluxo de detrito.
Proterozóico Superior	E ₃	Evento Brasileiro	D ₄	Formação de amplos dobramentos de eixo NW -SE.
			D ₃	Formação de dobras -falha, falhas de Brucutu e Gralhos, crenulações NE-SW.
Proterozóico Médio	E _{x2}	Evento Espinhaço	-	Evento distensivo seguido de intrusão de corpos máfico - ultramáfico e magmatismo alcalino tipo Borrachudos.
Proterozóico Inferior	E ₁	Evento Minas: Transamazônico	D ₂	Formação de dobras G2 através do redobramento coaxial das dobras G1. Em escala regional, a dobra G2 corresponde ao sinclinal Gandarela. Ao final desta fase o sinclinal sofre um basculamento devido à formação de domos e calhas e as dobras de terceira geração no QFe (q.v. pág.12). O sinclinal torna-se uma dobra reclinada com eixo 100/30. Vergência para SW
			D ₁	Inversão da Bacia Minas: Evento tectono -metamórfico <i>progressivo</i> processado em duas fases. A primeira fase consistiu no desenvolvimento de dobras G1 recumbentes, ao estilo de <i>nappes</i> , e estruturas associadas: xistosidade S1 paralela ao acamamento.
Eventos tectono-estratigráficos pré-Minas				

Figura 8. Cronologia dos eventos tectônicos proposto por Endo *et al* (2004).

3. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS DO MÉTODO

3.1. O método da Eletroresistividade

O método da eletroresistividade caracteriza-se por medir a variação da resistividade elétrica das rochas em subsuperfície, usando um sistema de quatro eletrodos AMNB ligados ao terreno (Figura 9). Os eletrodos A e B constituem o denominado Circuito de Corrente, enquanto que os eletrodos M e N compõem o Circuito de Potencial. O primeiro transmite corrente elétrica I (miliamperímetro) para o interior da Terra, e o segundo mede a diferença de potencial elétrico ΔV (milivoltímetro) entre os outros dois eletrodos.

A resistividade elétrica é obtida através da relação $\rho = K \cdot \Delta V / I$, sendo :

- ρ resistividade elétrica do terreno;
- K constante geométrica que depende da geometria do arranjo entre os eletrodos e da distância entre os mesmos;
- ΔV diferença de potencial (voltagem) entre M e N medida no circuito de potencial
- I corrente elétrica transmitida para o interior da Terra, medida no circuito de corrente.

A resistividade elétrica depende basicamente da composição, granulometria, porosidade, grau de saturação e salinidade da água que preenche os vazios (poros e fraturas) das rochas.

Como o terreno não é homogêneo e isotrópico considera-se que o valor medido para cada posição dos eletrodos corresponde a uma resistividade elétrica aparente ρ_a , que reflete a contribuição de diferentes resistividades elétricas das rochas em profundidade, sob a zona central do arranjo dos eletrodos. A profundidade alcançada aumenta, à medida que o mesmo ocorre com a distância entre os eletrodos de corrente AB (Edwards, 1977).

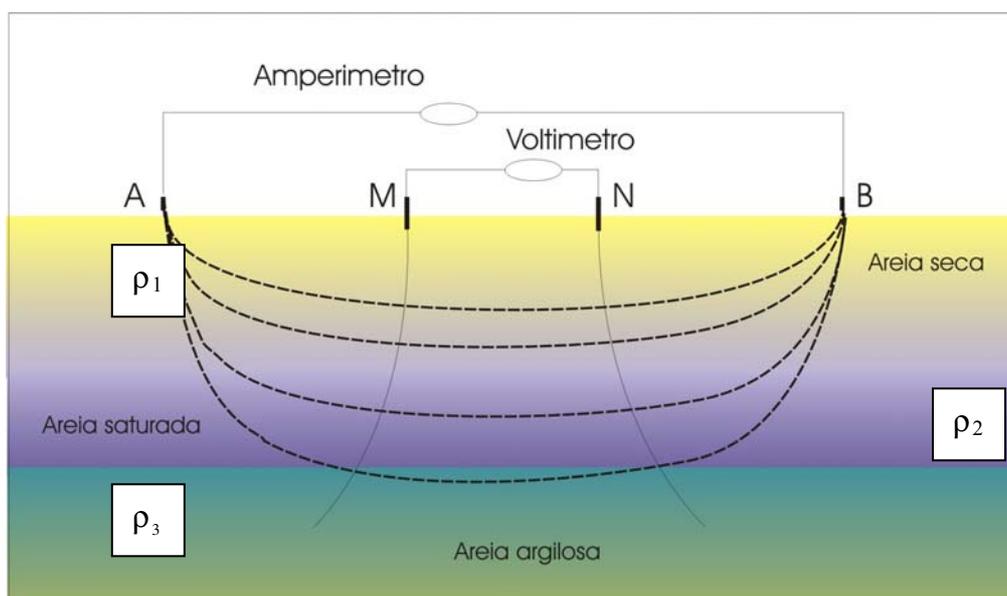


Figura 9. Esquema do método Eletrresistividade - quatro eletrodos AMNB.

A Figura 10 mostra variações de resistividade elétrica que ocorrem em diferentes tipos de rochas e solos.

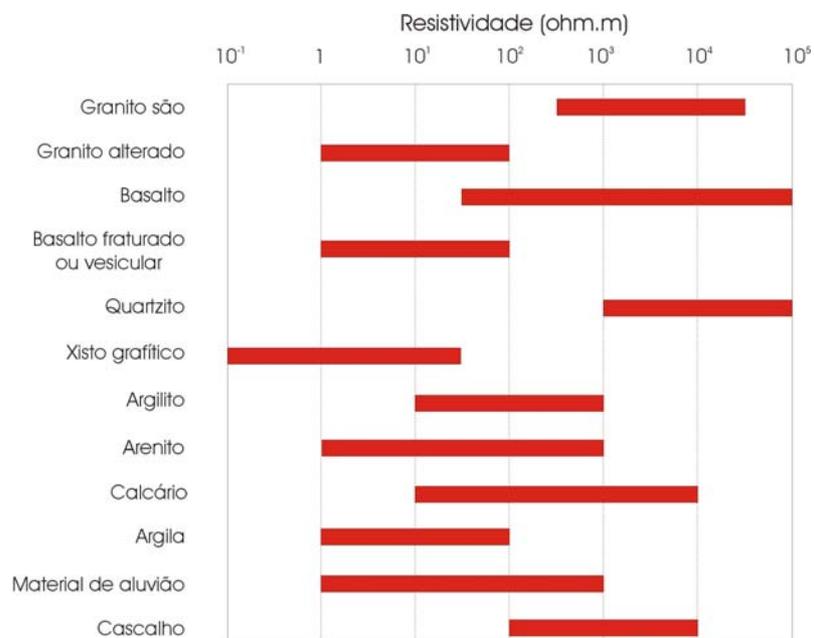


Figura 10. Variações de resistividade em rochas e solos. Modificado de Ward.(1990).

A Figura 11 mostra a influência dos processos geológicos na resistividade das rochas.

Argila de alteração	↓	Intemperismo	↓
Dissolução	↓	Precipitação de carbonatos	↑
Falhamento	↓	Silicificação	↑
Intrusão salina	↓	Metamorfismo	↕
Cisalhamento	↓		
↓ Diminuição		↑ Aumento	
↕ Diminuição ou aumento			

Figura 11. Influência dos processos geológicos na resistividade das rochas. Modificado de Ward (1990).

3.2. Método IP - Polarização Induzida

Assim como foi mencionado no método da Eletrorresistividade, quando dois eletrodos transmitem corrente elétrica em subsuperfície, é gerada uma voltagem entre outros dois eletrodos de potencial. Se após o desligamento da corrente, ocorrer um caimento da voltagem em um determinado tempo, tem-se o chamado efeito de polarização induzida ou efeito de IP, que foi primeiramente estudado por Schlumberger (Parasnis, 1973).

O efeito de IP pode ser medido de duas maneiras: no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

No domínio do tempo a corrente elétrica é periodicamente injetada e desligada através dos eletrodos AB. Após o desligamento da corrente a voltagem medida nos eletrodos MN sofre um caimento. A integral medida através da curva de caimento da voltagem resulta na cargabilidade (M) da rocha (Figura 12). A cargabilidade é definida como:

$$M = 1 / V_p * t_1 \int^{t_2} V_t dt$$

onde

V_p - potencial de pico na curva de descarga

V_t - potencial de descarga em função do tempo

t_1 e t_2 – definem um intervalo de tempo na curva de descarga que exclui transientes de voltagem mais intensos derivados de efeitos de acoplamentos eletromagnéticos

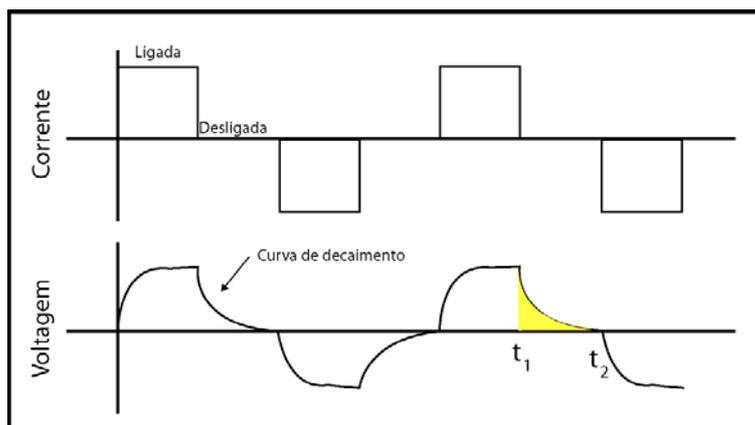


Figura 12. Exemplo de curvas de caimento da voltagem nas medições no domínio do tempo. Modificado de Ward.(1990).

Medições no domínio da frequência se baseiam no fato de que a resistência elétrica produzida durante a injeção da corrente diminui com o aumento da frequência da corrente. A diferença entre as resistividades medidas em alta e baixa frequência é expressa como o efeito de frequência (FE), que é definida como $FE = \rho_2 - \rho_1 / \rho_1$, ou percentual do efeito de frequência, definida como $PFE = \rho_2 - \rho_1 / \rho_1 * 100$. A diferença básica entre os parâmetros cargabilidade e efeito de frequência, é que o primeiro é um parâmetro total, enquanto que o segundo é um parâmetro diferencial (Zonge *et al*, 1972).

O efeito de IP no domínio da frequência pode também ser medido através da técnica denominada IP espectral (Pelton *et al*, 1978), que transmite corrente em um espectro de frequências variando entre 10^{-2} e 10^4 Hz e mede a variação da amplitude e fase do sinal recebido, relativamente ao sinal transmitido. Teoricamente, as curvas de variação da amplitude e fase em relação à frequência permitiriam definir o mineral causador das anomalias de IP, distinguindo minério de estéril. O efeito do IP espectral, embora apresente bons resultados em medidas feitas em amostras de laboratório, não repete o mesmo desempenho em trabalhos de campo (Apparao, 1991).

Ocorrem dois tipos de polarização nas rochas. A polarização do eletrodo (Figura 13 – A) e a polarização da membrana (Figura 13 – B).

Polarização do eletrodo

A corrente elétrica em subsuperfície é normalmente conduzida por íons nos eletrólitos presentes nos poros das rochas. Se a passagem destes íons é obstruída por

certas partículas minerais como os metais, que transportam a corrente através de elétrons, as cargas iônicas se acumulam na interface partícula (mineral metálico)-eletrólito. O acúmulo de cargas gera uma voltagem que tende a se opor ao fluxo de corrente elétrica, e assim pode-se dizer que a partícula está polarizada. Quando a corrente é interrompida uma voltagem residual continua a existir ao longo da partícula, devido à presença das cargas iônicas nas paredes do grão metálico, mas a voltagem diminui continuamente enquanto os íons voltam vagarosamente ao seu local de origem. Este tipo de polarização é chamada de polarização do eletrodo, e pode-se dizer resumidamente que ela ocorre quando, ao ser injetada uma corrente elétrica no terreno, os íons que situam-se nos poros das rochas entram em contato com as paredes de minerais metálicos. Bons exemplos de minerais minérios que apresentam alta polarização são: pirita, pirrotita, calcopirita, grafita, galena, bornita, magnetita e pirolusita.

Polarização da membrana

Este tipo de polarização ocorre em rochas que contenham partículas de argilas.

A superfície de partículas de argilas possui cargas negativas que atraem íons positivos dos eletrólitos presentes na zona capilar de agregados de argilas, causando um grande acúmulo de íons positivos próximos da parede do grão de argila. Estes íons, que se acumulam, mas ficam longe da zona capilar, são repelidos pelos íons positivos situados próximos da zona capilar, gerando uma membrana entre eles. Quando uma corrente é injetada, os íons positivos se deslocam (na verdade, o deslocamento faz parte da própria transmissão de corrente), e após ser interrompida a corrente, as cargas positivas tendem a se redistribuir voltando ao padrão de equilíbrio de antes. Este processo de redistribuição gera um caimento da voltagem entre dois eletrodos, e este efeito de IP é chamado de polarização da membrana.

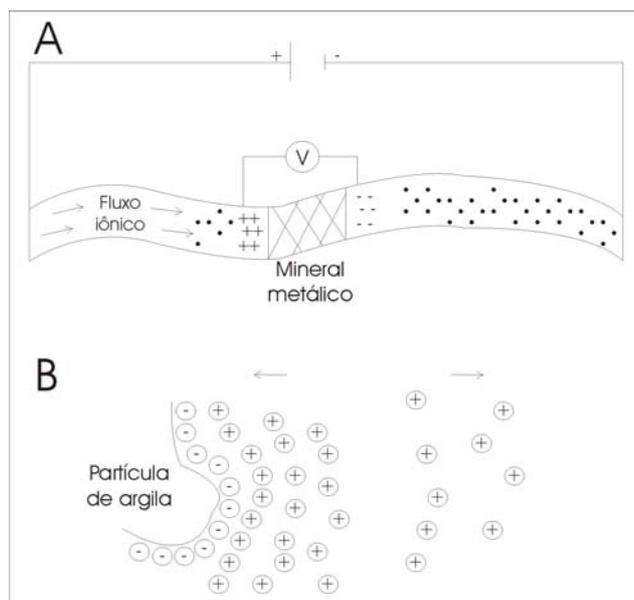


Figura 13. Tipos de polarização.

3.3. Inversão 2D dos dados aparentes e geração de um modelo de resistividades e cargabilidades verdadeiras.

No processamento dos dados foram utilizados os softwares RES2DINV e RES3DINV (Geotomo Inc). A inversão utilizada pelo programa é baseada no método dos mínimos quadrados com suavização forçada (deGroot-Hedlin & Constable 1990, Sasaki 1992). Uma nova implementação do método dos mínimos quadrados baseada na técnica de otimização quasi-Newton (Loke & Barker 1996a) também pode ser utilizada. Esta técnica pode ser até dez vezes mais rápida que o método dos mínimos quadrados para um grande conjunto de dados e requer menos memória. O método dos mínimos quadrados com suavização forçada se baseia na seguinte equação:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g$$

onde $F = F_x F_x^T + F_z F_z^T$

F_x = filtro de achatamento horizontal

F_z = filtro de achatamento vertical

J = matriz de derivadas parciais

λ = fator de amortecimento

d = vetor do modelo de perturbação

g = vetor de discrepância

As figuras 15 e 16 podem ser apresentadas como exemplos da importância da inversão dos dados. Ambas as figuras apresentam três seções: a primeira com valores de resistividade aparente medida, a segunda com valores de resistividade aparente calculada com base no modelo, e a terceira com valores de resistividade verdadeira (modelo responsável pela seção calculada, semelhante à medida).

Na figura 15 dois blocos retangulares (um com resistividade mais baixa e o outro com resistividade mais alta que o background), somente apresentam as suas formas retangulares de modo bastante próximo do real, através da realização da inversão e geração de um modelo de resistividade verdadeira.

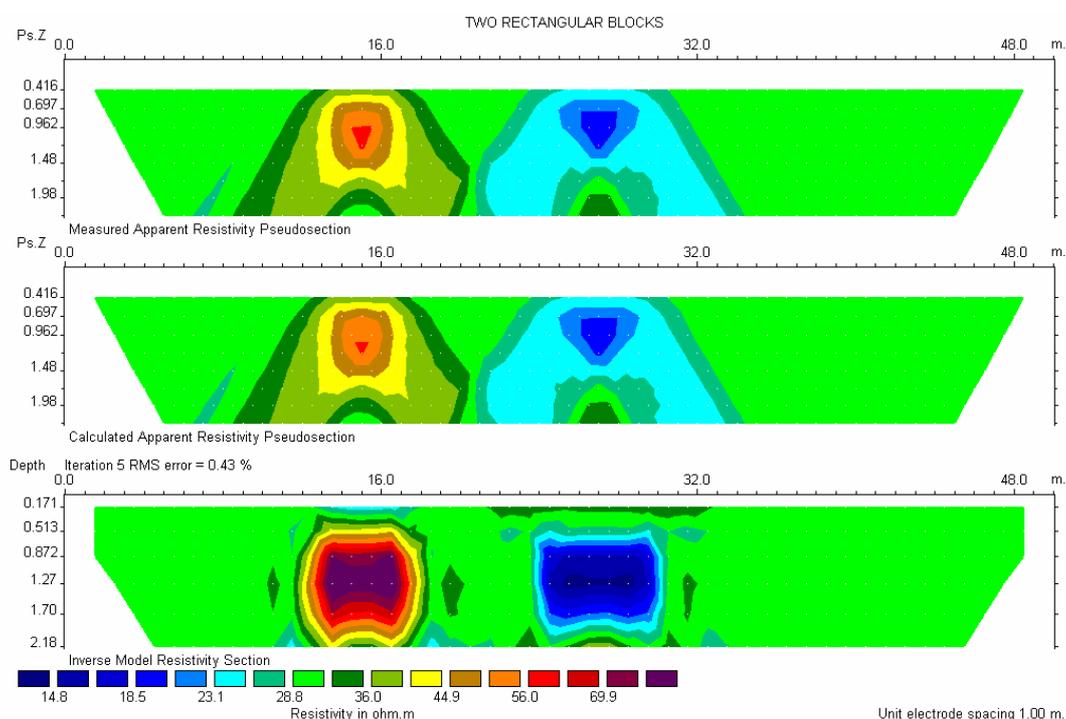


Figura 15. Exemplo de inversão 2D em local de ocorrência de dois blocos retangulares.

Na figura 16 é apresentado o exemplo clássico de uma zona de fratura verticalizada com resistividade baixa (anomalia em azul), situada abaixo da distância 25. Somente no modelo de resistividade verdadeira aparece a anomalia verticalizada na forma real da estrutura geológica. Na seção de resistividade aparente medida, a forma da anomalia obtida é a de um “V” invertido.

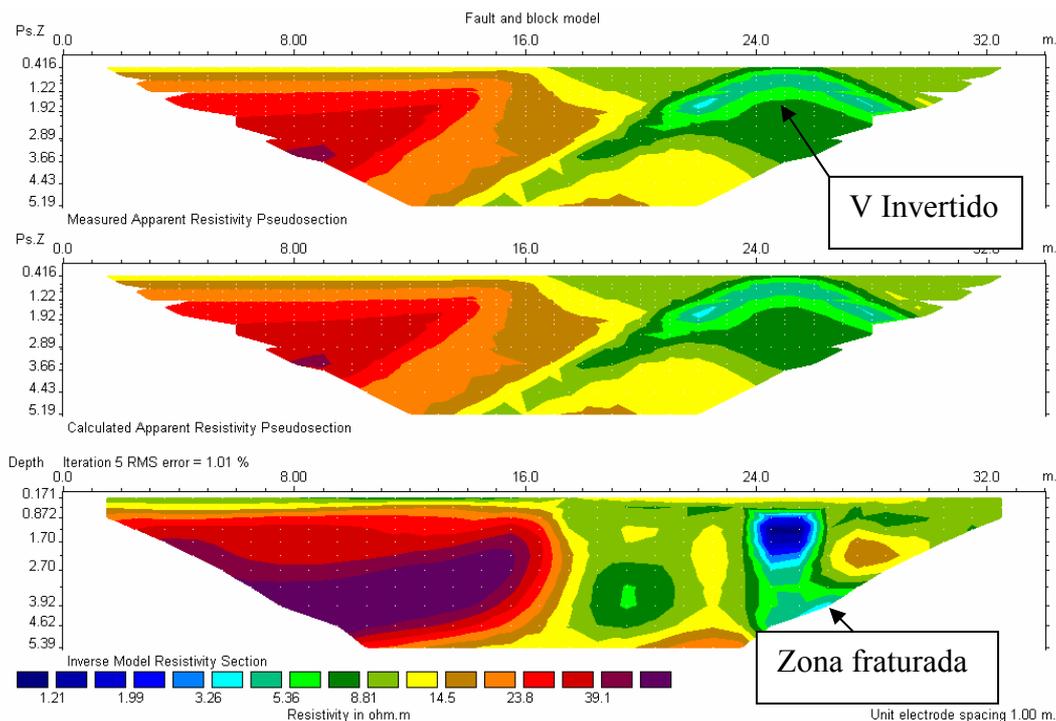


Figura 16. Exemplo de ocorrência de uma zona fraturada verticalizada.

3.4. Inversão 3D.

A inversão 3D é baseada nos mesmos princípios matemáticos da inversão 2D. A diferença é que na inversão 2D são utilizados dados de uma única seção geofísica (arquivos X, Y, Z), enquanto que na 3D são utilizados dados de diversas seções (aquisição 2D em cada seção, mas modelagem 3D do conjunto das seções) ou dados de um levantamento com aquisição 3D (arquivos X, Y, Z, W).

Na figura 17 está apresentado um exemplo de modelagem 3D de resistividade verdadeira, representada em camadas que correspondem a diferentes profundidades.

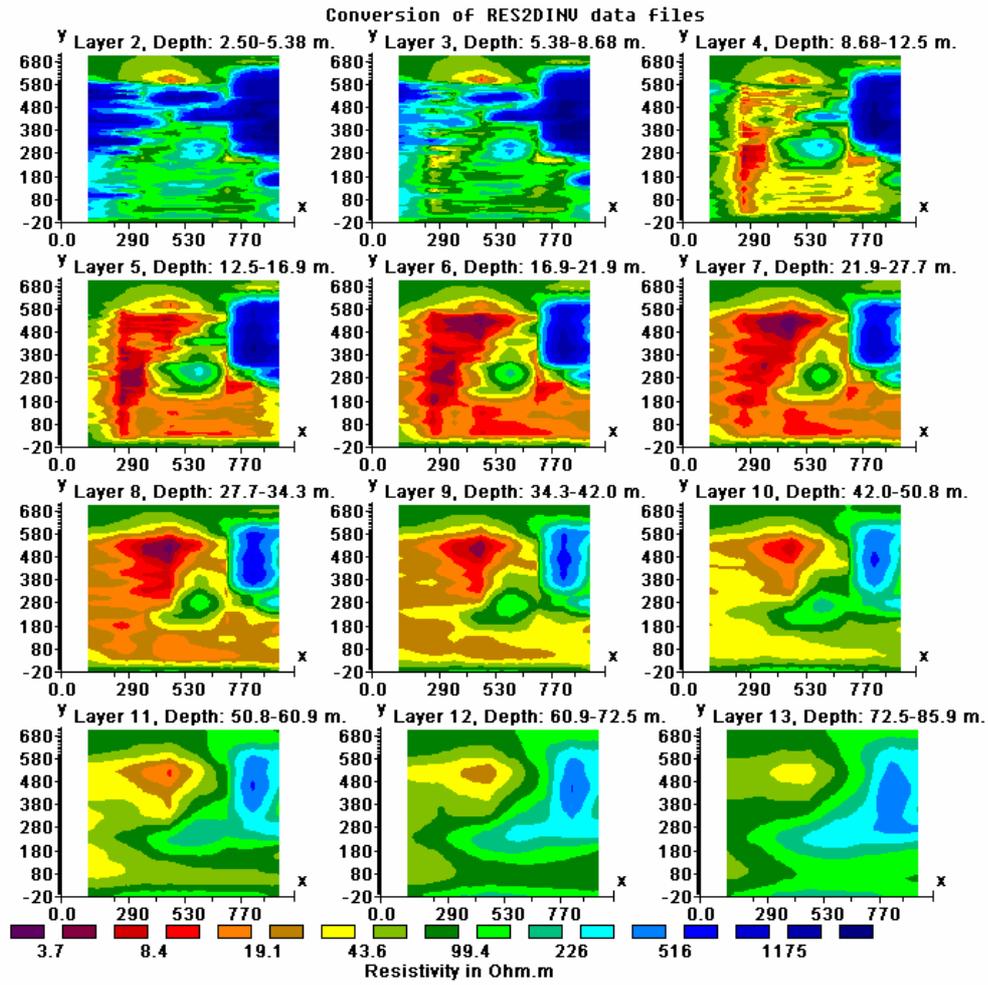


Figura 17. Exemplo de modelagem 3D apresentada em diferentes profundidades ("layers").

4. RESULTADOS

Os resultados estão divididos em duas partes: a caracterização das propriedades físicas das rochas e o processamento dos dados de polarização induzida levantados em 2003 na Mina do Brucutu.

4.1. Caracterização das propriedades físicas das rochas

Na caracterização das propriedades físicas das rochas foram utilizadas as medições de resistividade elétrica e susceptibilidade magnética realizadas nos afloramentos e nas amostras em laboratório. As medidas de cargabilidade realizadas em laboratório foram muito ruidosas. Por esse motivo, optamos por não utilizá-las no presente trabalho. A causa dos ruídos pode estar relacionada com a dificuldade de transmitir corrente alta nas amostras (foi possível mandar em média 1 ou 2 mA de corrente). As Tabelas 3 e 4 mostram os valores de resistividade e susceptibilidade medidos nas amostras coletadas nos furos de sonda e nas amostras coletadas nos afloramentos, respectivamente.

Tabela 3. Medições nas amostras coletadas nos furos de sonda.

Amostra	Litologia	Alteração intempérica	Resistividade média (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividade máxima (ohm.m)	Susceptibilidade magnética em CGS (*10 ⁻⁶)
1	Quartzito	Alta				20 - 30
2	Itabirito semi-compacto	Baixa				900 - 1700
3	Itabirito compacto	Não				3000 - 4000
4	Xisto quartzoso	Não	2938	2710	3080	0 - 10
5	Xisto quartzoso com magnetita	Não	4752	2544	8325	3000 - 30000
6	Filito	Não	951	489	1512	20 - 70
7	Filito com sulfetos	Não	1354	1084	1818	500 - 800
8	Itabirito compacto	Não	1669	1550	1708	2000 - 5000
9	Itabirito compacto com magnetita	Não	1696	411	3161	20000 - 80000
10	Hematita compacta	Não				200 - 300
11	Itabirito contaminado	Média	1036	729	1352	40000 - 60000

12	Intrusiva máfica	Não	281	267	290	4000 – 8000
13	Itabirito compacto	Baixa				10000 - 30000
14	Intrusiva máfica	Alta	102	91	105	3000 - 4000
15	Itabirito semi-compacto	Baixa	1156	1055	1218	10000 - 20000

Tabela 4. Medições nas amostras coletadas nos afloramentos.

Amostra de campo	Litologia	Alteração intempérica	Resistividade e média (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividade máxima (ohm.m)
1	Xisto (Morro Grande)		5185	2443	7123
2	Gnaisse Cocais	Não	7438	5017	9860
3	Sericita xisto	Alto	2555	2197	2875
4	Hematita compacta	Não	1300	995	1585
5	Granito Peti (paralela à foliação)	Médio	593	324	796
5	Granito Peti (perpendicular à foliação)	Médio	4693	4151	5201
6	Itabirito semi-friável (paralela à foliação)		291	265	321
6	Itabirito semi-friável (perpendicular à foliação)		963	780	1080
7	Filito prateado Cercadinho (paralela à foliação)		47	44	51
7	Filito prateado Cercadinho (perpendicular à foliação)		648	619	666
8	Mármore dolomítico (Gandarela)		806	535	939
9	Intrusiva máfica		2189	746	3076
10	Intrusiva máfica		801	716	933
11	Sedimento argiloso (Cata Preta)		744	642	904

Três das amostras coletadas nos afloramentos (amostras 5, 6 e 7), foram medidas paralelamente e perpendicularmente à foliação. A medição perpendicular à foliação realizada no Granito Peti apresentou uma resistividade média de 4693 ohm.m,

quase dez vezes maior que a medição realizada paralelamente que apresentou resistividade média de 593 ohm.m. Esta diferença resulta em um valor de anisotropia de 2,8. Para o cálculo da anisotropia foi utilizada a fórmula:

$$a = \sqrt{\rho_{\perp} / \rho_{\parallel}}$$

onde

a - anisotropia

ρ_{\perp} - resistividade elétrica perpendicular à foliação

ρ_{\parallel} - resistividade elétrica paralela à foliação

No itabirito semi-friável e no filito prateado da Formação Cercadinho os valores medidos perpendicularmente à foliação também foram superiores aos medidos paralelamente, resultando em valores de anisotropia de 1,8 e 3,7, respectivamente.

Os valores de anisotropia medidos no Granito Peti, no Filito Cercadinho e no itabirito mostram que a caracterização desses materiais através da resistividade elétrica varia em função do ângulo entre a direção dominante do fluxo de corrente elétrica e a direção da foliação.

A Tabela 5 apresenta a variação de resistividade aparente medida nas sondagens elétricas verticais e da susceptibilidade magnética medida nos afloramentos.

Tabela 5. Resultados das sondagens elétricas e das medições de susceptibilidade magnética medida nos afloramentos.

SEV	Litologia	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividade máxima (ohm.m)	Susceptibilidade magnética em CGS (*10 ⁻⁶)
1	Itabirito compacto	5377	15078	1000 - 60000
2	Xisto Morro Grande	10648	13359	30 - 1500
3	Gnaisse Cocais	1055	8161	0
4	Clorita xisto (Nova Lima)	106	1172	0 - 60
5	Sericita xisto (Nova Lima)	219	452	0
6	Granito Peti	12918	32691	0 - 30
7	Itabirito semi-friável	2602	25636	900 - 30000
8	Quartzito (Cercadinho)	58500	68614	0 - 50
9	Canga ferrífera	15308	27048	50 - 400
10	Hematita compacta	4865	6920	100 - 4000
11	Itabirito friável saturado	4923	15834	-
12	Filito prateado (Cercadinho)	2326	10678	0
13	Mármore dolomítico (Gandarela)	1250	2727	0 - 10
14	Intrusiva máfica alterada seca	2987	6672	0 - 5

15	Itabirito friável	58500	754000	100 – 800
16	Intrusiva máfica alterada úmida	1877	2302	10 – 20
17	Sedimento argiloso (Cata Preta)	439	527	60 – 100
18	Itabirito friável (perpendicular à foliação)	56550	166414	100 – 1000
19	Itabirito friável (paralelo à foliação)	62180	100847	100 – 1000

A figura 18 mostra um gráfico Litologia X Resistividade. As barras em vermelho representam as variações de resistividade medidas nas sondagens elétricas realizadas nos afloramentos. Os pontos azuis e amarelos representam os valores de resistividade média medidas nas amostras coletadas em campo e em furos de sonda, respectivamente.

A maioria das medidas realizadas em laboratório apresentou valores de resistividade menores que os valores medidos nas sondagens elétricas. Entretanto, o resultado mais comum esperado seria ocorrer o inverso, considerando a perda de umidade que ocorre com a amostra após ser retirada do afloramento. Considerando a anisotropia das rochas estudadas, torna-se um parâmetro importante na caracterização das mesmas o “volume” das litologias medidas. Por esse motivo, no presente trabalho, considera-se mais significativas às medições realizadas nas sondagens elétricas do que as realizadas nas amostras. Todas as sondagens elétricas foram realizadas nas paredes dos afloramentos, com exceção das realizadas no Granito Peti, Gnaiss Cocais e na hematita compacta, que foi realizada no terreno, sobre o afloramento.

Na figura 19 estão apresentadas algumas das curvas de resistividade obtidas com os dados medidos nas sondagens elétricas. Em um mesmo afloramento, o itabirito friável foi medido paralelo e perpendicular à foliação. O modelo 1D obtido com as medições realizadas paralelamente apresenta um valor de resistividade verdadeira em torno de 100.000 ohm.m, enquanto que na medição perpendicular o valor de resistividade verdadeira fica em torno de 200.000 ohm.m, resultando em um valor de anisotropia de 1,4. Zablocki (1966) obteve valores de resistividade semelhantes à esses em medições realizadas em amostras de minério de ferro da Formação Ironwood.

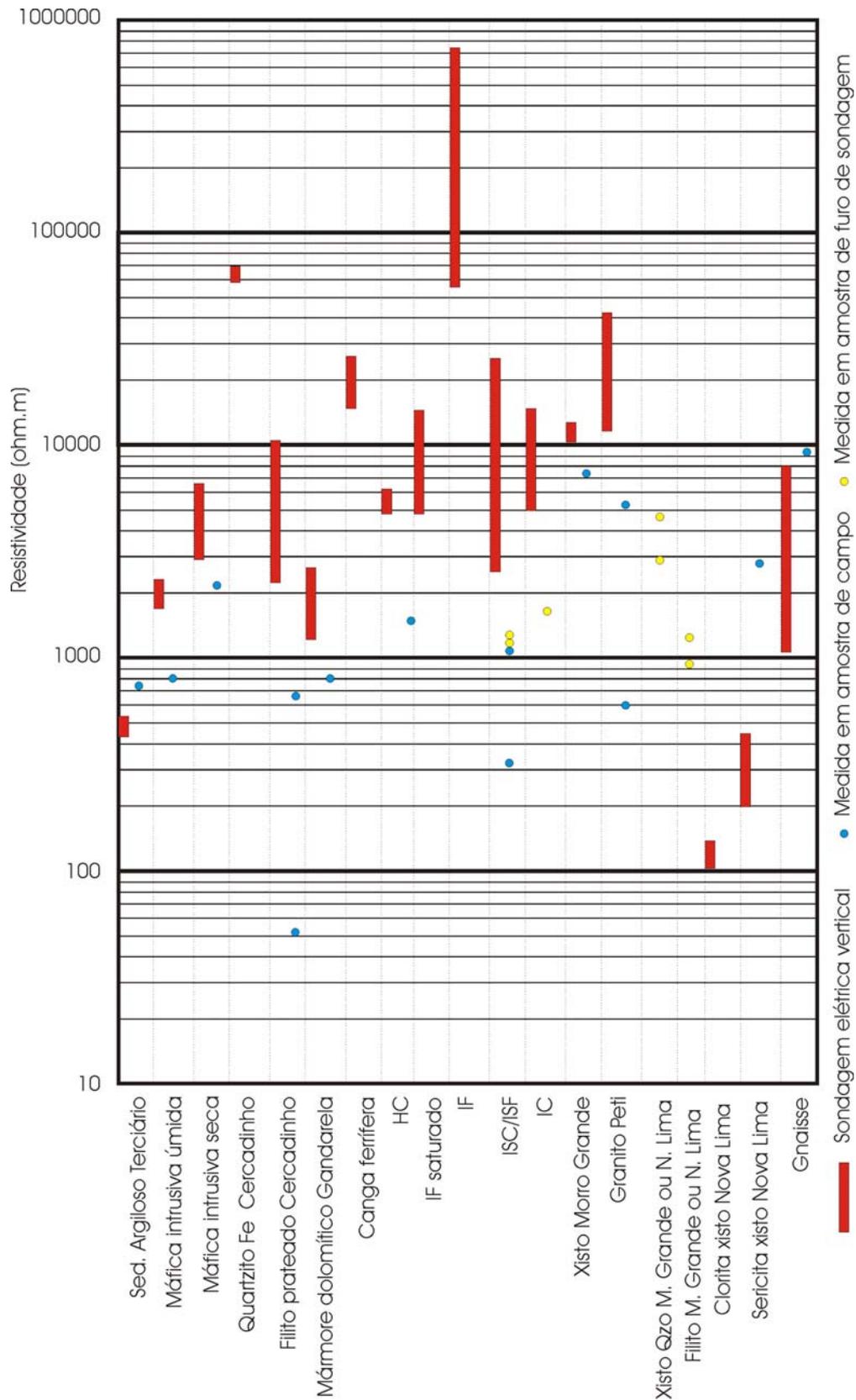


Figura 18. Gráfico Litologia X Resistividade.

O itabirito friável saturado, medido dentro da Mina do Brucutu, em um local onde aflora um lençol freático suspenso sobre rocha intrusiva máfica impermeável, apresentou valores de resistividade aparente variando entre 5.000 e 15.000 ohm.m, bem menores que os medidos no itabirito friável seco.

A sondagem elétrica realizada sobre um afloramento do Gnaisse Cocais, dentro da pedreira Itamix, apresentou valores aparentes variando entre 1.000 e 9.000 ohm.m. A curva de resistividade, no entanto, sugere um valor de resistividade verdadeira em torno de 14.000 ohm.m.

Na hematita compacta os valores de resistividade medidos foram bastante parecidos, em torno de 6.000 ohm.m, o que sugere que o material seja bem homogêneo. No Granito Peti, embora os valores aparentes tenham variado entre 12.000 e 32.000 ohm.m, o modelo da curva sugere um valor de resistividade verdadeira superior a 40.000 ohm.m.

No quartzito da Formação Cercadinho as medidas foram bastante homogêneas, em torno de 60.000 ohm.m. A rocha intrusiva máfica alterada úmida e os sedimentos argilosos da Formação Cata Preta do Terciário, apresentam modelos de resistividade verdadeira em torno de 2000 e 450 ohm.m, respectivamente. O clorita xisto do Nova Lima apresentou valores de resistividade verdadeira menores que 150 ohm.m.

Considerando os resultados obtidos nas sondagens elétricas, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- O itabirito friável seco apresenta resistividade maior que as demais litologias estudadas. Em geral, os valores são superiores a 100.000 ohm.m, com elevada anisotropia;
- O itabirito friável saturado apresenta resistividade bem menor que o itabirito friável seco, os valores variam entre 5.000 e 15.000 ohm.m. Considerando a alta porosidade do itabirito friável pode-se concluir que o valor de resistividade medida para o mesmo, quando saturado, representa o valor da água que se encontra preenchendo os poros da rocha;
- O quartzito da formação Cercadinho apresenta resistividade em torno de 60.000 ohm.m;
- A hematita compacta apresenta resistividade entre 5.000 e 6.000 ohm.m, valores bem menores que os apresentados pelo itabirito friável;

- Os clorita e sericita xistos do Grupo Nova Lima e da Formação Morro Grande, os mármore dolomíticos da Formação Gandarela, as intrusivas máficas e os sedimentos argilosos da Formação Cata Preta apresentam valores de resistividade em geral menores que o minério de ferro, principalmente em se tratando do itabirito friável;
- Sedimentos argilosos da Formação Cata Preta e os clorita e sericita xistos do Grupo Nova Lima e da Formação Morro Grande apresentam os menores valores de resistividade, inferiores a 500 ohm.m;
- Nas medidas realizadas no Granito Peti, itabirito semi-friável e na canga ferrífera, chegaram a ocorrer valores maiores que 20.000 ohm.m. O modelo 1D da curva de resistividade do Granito Peti sugere para o mesmo um valor de resistividade verdadeiro superior a 40.000 ohm.m.

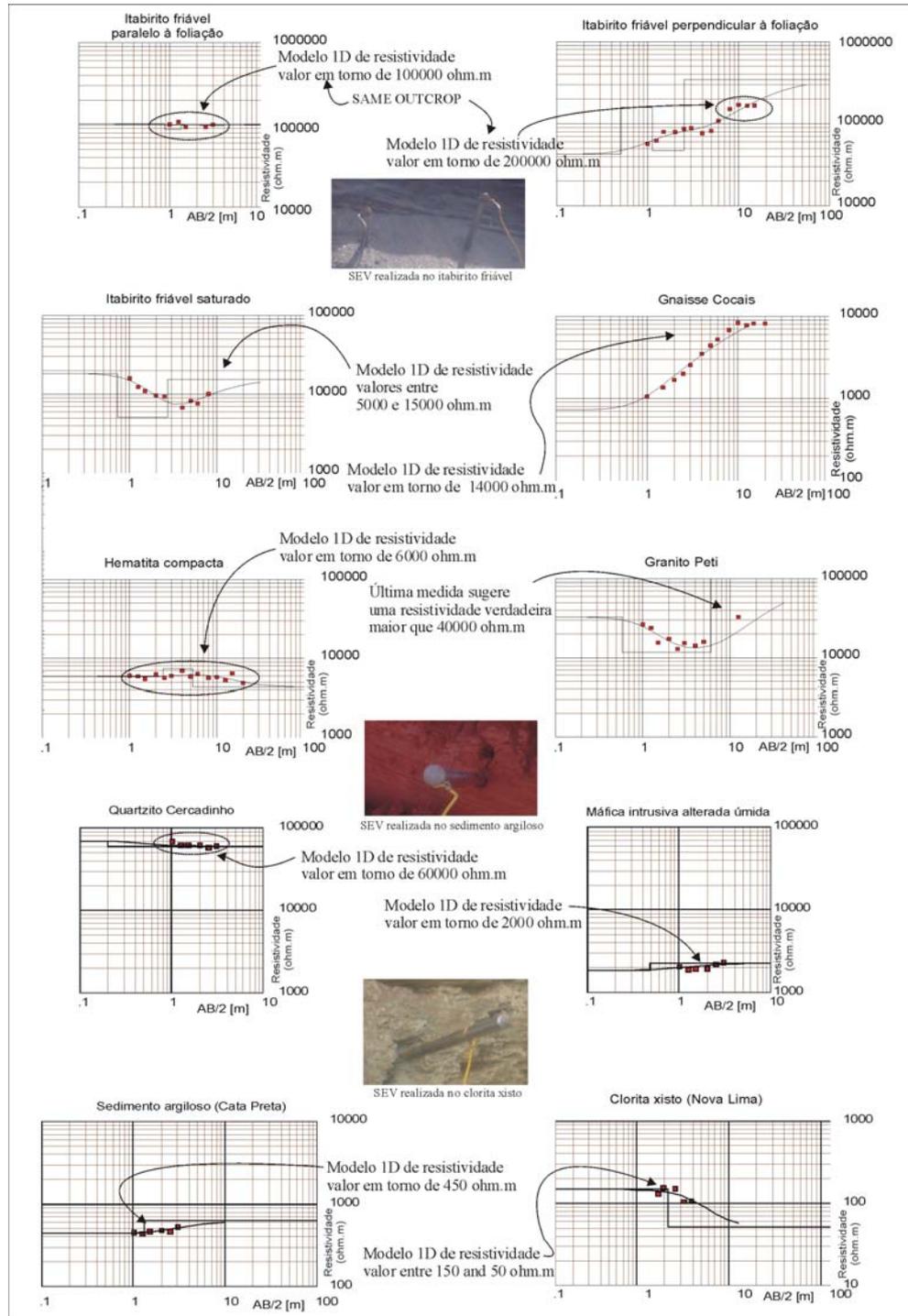


Figura 19. Curvas de resistividade obtidas com os dados medidos nas sondagens elétricas.

A figura 20 mostra um gráfico Litologia X Susceptibilidade magnética. As barras, em vermelho, representam a variação de susceptibilidade magnética medida nos afloramentos e nas amostras de três furos situados dentro da Mina do Brucutu.

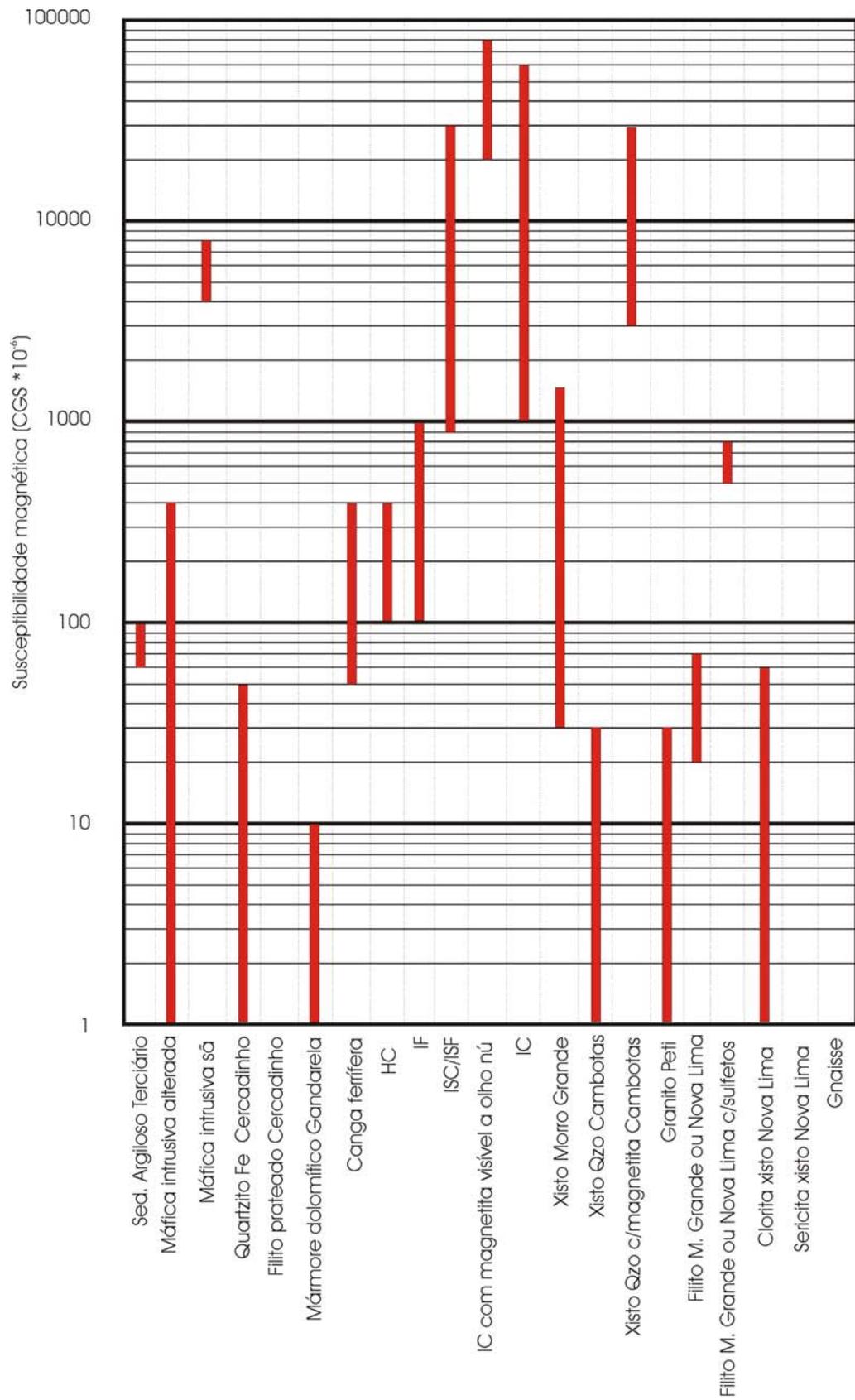


Figura 20. Gráfico Litologia X Susceptibilidade magnética.

Considerando os resultados das medições de susceptibilidade magnética pode-se afirmar que:

- O minério de ferro apresenta em geral valores de susceptibilidade magnética maiores que as demais litologias;
- Itabirito compacto e semi-compacto apresentam susceptibilidade magnética maior que itabirito friável, hematita compacta e canga ferrífera;
- As rochas máficas intrusivas podem apresentar altos valores de susceptibilidade magnética. A provável causa é a comum ocorrência de magnetita nestas rochas;
- Considerando as medições realizadas nas amostras dos furos de sonda em itabirito compacto e filito, pode-se dizer que a ocorrência de magnetita e de sulfetos aumenta fortemente a susceptibilidade magnética das rochas;
- Os xistos do Grupo Nova Lima e das Formações Morro Grande e Cambotas, assim como o mármore dolomítico da Formação Gandarela apresentam baixa susceptibilidade magnética;
- O Gnaiss Cocais, o sericita xisto do Nova Lima e o filito prateado da Formação Cercadinho apresentam susceptibilidade magnética praticamente igual a zero.

4.2. Processamento dos dados de IP levantados em 2003 na Mina do Brucutu

4.2.1. Parâmetros das inversões 2D

Com o objetivo de se obter os modelos geofísicos mais coerentes possíveis com suas respectivas seções geológicas, muitas inversões foram realizadas com diferentes parâmetros de processamento para uma mesma linha geofísica (SV07). Na Tabela 6 estão apresentados alguns destes parâmetros, com a explicação e comentários sobre cada um, relacionados ao seu uso no processamento da seção geofísica realizada na área de estudo.

Tabela 6. Comentários e explicações sobre os parâmetros de inversão.

Parâmetros de inversão	Explicação	Comentários
Optimise Damping	Utilizando este parâmetro, o número de iterações pode ser significativamente reduzido. Entretanto, o tempo de cada	Esta opção não influenciou muito no

Factor	<p>iteração aumenta. Para seções com pequena a média quantidade de dados, a utilização do damping factor pode reduzir bastante o tempo de inversão. Para seções com grande quantidade de dados, mais de 1000 medições, o tempo de cada iteração pode aumentar significativamente.</p>	<p>resultado das inversões.</p>
Mesh Refinement	<p>Esta opção permite que se use uma “malha” fina (finer mesh) ou muito fina (finest mesh) para os métodos dos elementos finitos e das diferenças finitas. Se o contraste de resistividade é menor que 50 para 1, é melhor usar uma “malha” normal (normal mesh). É recomendado usar o finer mesh para contrastes de até 500 para 1 e o finest mesh para contrastes maiores que 500 para 1.</p>	<p>Nas inversões os melhores resultados foram utilizando o finest mesh. De fato, o contraste de resistividade na área de estudo é maior que 500 para 1.</p>
Vertical to horizontal flatness filter ratio	<p>Se na geologia predominam estruturas verticais ou horizontais, é possível forçar o programa a realizar modelagens mais verticalizadas, selecionando um maior valor para a razão entre o filtro de achatamento vertical e o horizontal, como 2.0 por exemplo, assim como realizar modelos mais horizontalizados utilizando um valor de 0.5, por exemplo.</p>	<p>No caso da área de estudo não existe uma direção preferencial das estruturas, as rochas estão bastante dobradas. A melhor alternativa foi utilizar a razão igual a 1.0.</p>
Reduce effect of side blocks	<p>No modelo, os blocos laterais e da base se estendem até os limites da malha de diferenças finitas e elementos finitos usada. Deste modo, estes blocos tem um efeito relativamente grande no processo de inversão, quando comparado aos blocos no interior da malha. Em alguns casos, principalmente em dados muito ruidosos, isto pode ocasionar valores muito baixos ou muito altos irrealistas nas bordas da seção.</p>	<p>Nas inversões os melhores resultados ocorreram ao não utilizar para reduzir o efeito nos blocos das extremidades. Desta forma, o itabirito friável localizado na extremidade da seção apresentou os valores de resistividade mais compatíveis com o que foi obtido nas sondagens elétricas realizadas nos afloramentos.</p>
Robust inversion	<p>Com a utilização do robust, o programa tenta minimizar as mudanças absolutas nos valores de resistividade. O uso do robust produz modelos com contatos abruptos de valores entre as anomalias, mas dentro de cada anomalia, os valores de resistividade são quase constantes. Pode ser indicado para áreas onde este tipo de situação geológica existe, como um contato entre solo e topo de rocha sã, por exemplo.</p>	<p>A utilização do robust resultou em uma perda da sinuosidade das anomalias, os contatos entre as anomalias ficaram em geral retilíneos. Este tipo de modelo não coincide com a real geologia estrutural da área de estudo.</p>
Combined	<p>Esta opção é útil para se utilizar em situações onde os</p>	<p>Utilizando a</p>

inversion	valores de sensibilidade dos blocos do modelo são significativamente distorcidos por grandes variações de resistividade. Em algumas situações, como um levantamento realizado sobre uma rocha com resistividade muito baixa, as trajetórias da corrente podem ser distorcidas de tal modo que faixas em subsuperfície não consigam ser bem definidas pela baixa sensibilidade destes blocos no modelo. O uso da combined inversion apresenta melhores resultados na definição de estruturas compactas onde a espessura e largura são suavemente menores que a profundidade, como uma caverna ou um corpo mineralizado em que o tamanho são suavemente menores que a profundidade.	combined inversion o contato entre a anomalia causada pelo solo argiloso e canga, com a anomalia provocada por itabirito friável ficou muito ondulado. Isto não acontece na geologia de subsuperfície.
Smoothing of model resistivity	Este parâmetro produz modelos com os valores de resistividade mais suavizados. Em alguns casos, principalmente para dados com bastante ruído, melhores resultados podem ocorrer utilizando este parâmetro.	Utilizando este parâmetro o contato entre a anomalia causada pelo solo argiloso e canga, com a anomalia provocada por itabirito friável ficou um pouco ondulada.
Use of logarithm of apparent resistivity or apparent resistivity values	É possível utilizar para o cálculo da inversão o logaritmo da resistividade ou diretamente o valor de resistividade medido. Na maioria dos casos, o uso do logaritmo fornece melhores resultados. Em alguns casos, por exemplo, onde ocorrem valores de resistividade negativa ou igual a zero, utilizar o logaritmo não é possível. Neste caso pode-se utilizar o valor direto da resistividade.	Utilizando os valores de resistividade o modelo ficou muito ruidoso se comparado com os modelos gerados com o logaritmo da resistividade.
Use model refinement using model cells with widths of half the unit spacing	RES2DINV usa como padrão o tamanho da célula do modelo de blocos, igual ao tamanho do espaçamento de eletrodos. Na maioria dos casos este tipo de inversão gera o melhor modelo. Entretanto, em locais onde ocorrem grandes variações superficiais de resistividade é aconselhável que se utilize o tamanho da célula como a metade do espaçamento de eletrodos.	Utilizando o tamanho da célula, como metade do tamanho do espaçamento de eletrodos gerou modelos mais reais e suavizados.

Comparando os modelos realizados com a seção geológica da Linha SV07, a combinação de parâmetros que mostrou um resultado mais coerente foi o uso de “logaritmo da resistividade”, “optimise damping factor” (embora com pouca influência), “finest mesh” e “model refinement using the model cells with widths of half the unit spacing”. Embora esta combinação de parâmetros tenha sido a melhor, com exceção do uso da resistividade aparente para o cálculo ao invés do logaritmo da resistividade, todos os outros parâmetros geraram modelos com as mesmas anomalias, embora a forma das mesmas tenha sido um pouco modificada de um para outro. O

modelo gerado utilizando os dados de resistividade aparente foi o único em que diferentes anomalias aparecem.

Na figura 21 estão apresentados vários modelos de resistividade utilizando diferentes parâmetros de inversão, o “modelo 1” foi considerado o melhor de todos, a partir da correlação com as informações de geologia.

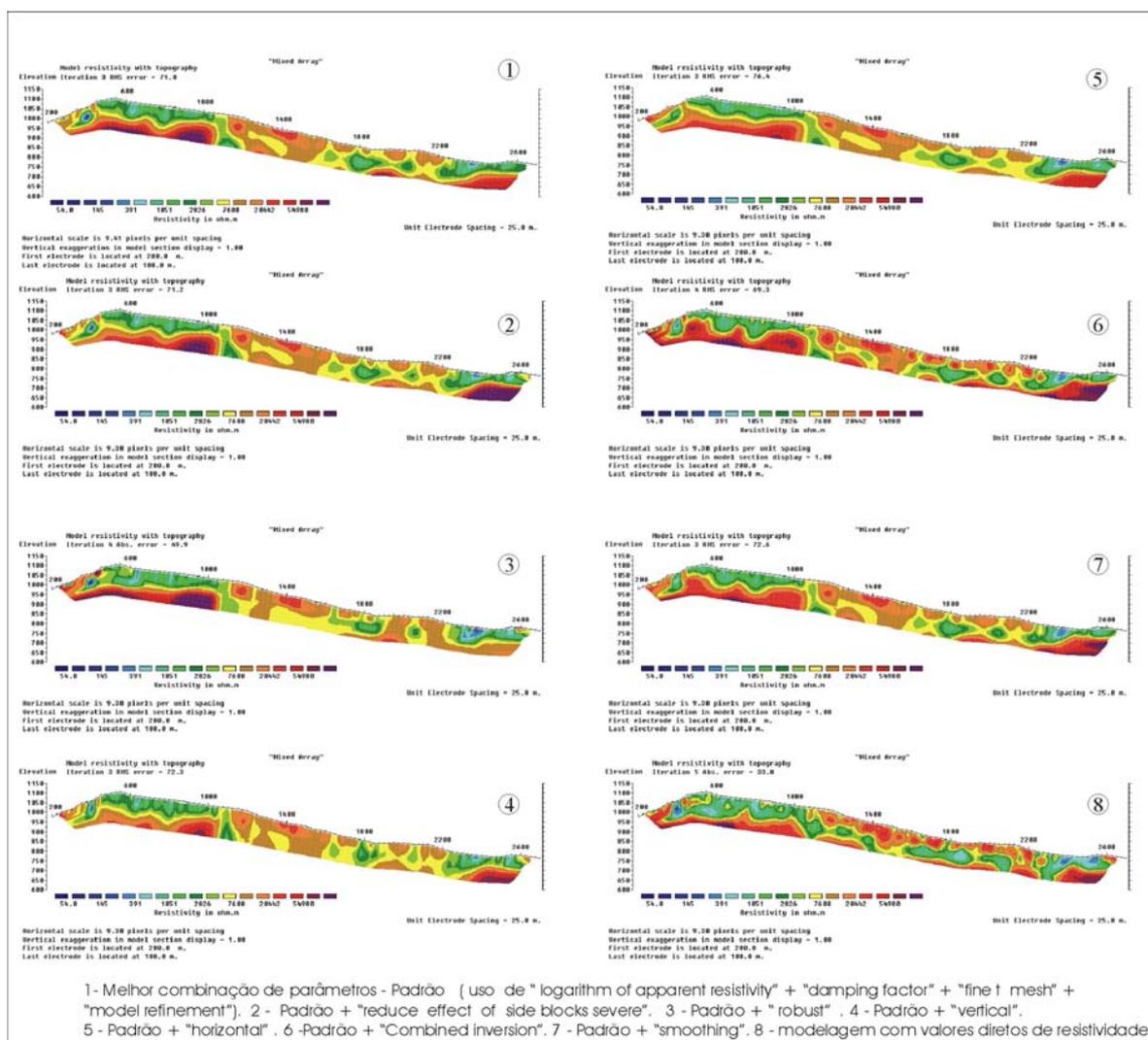


Figura 21. modelos de resistividade utilizando diferentes parâmetros de inversão.

4.2.2. Interpretação das seções 2D

Analisando o conjunto de dados de IP da Mina do Brucutu, levantamento de 2003, observa-se que os valores medidos de cargabilidade estão com baixa qualidade e bastante ruidosos. A provável razão é a alta resistência de contato do minério e canga

aflorantes, dificultando a transmissão de correntes elevadas, mesmo quando são utilizados muitos eletrodos e água com sal. Para se obter boa qualidade em dados de cargabilidade, é indispensável a transmissão de correntes elevadas. No trabalho realizado em 2003, em geral as correntes foram baixas e variaram entre 50 e 200 mA. Por este motivo, os dados de cargabilidade não foram utilizados neste estudo.

A figura 22 apresenta a seção de cargabilidade aparente da Linha SV07, mostrando que os dados estão bastante ruidosos com os valores variando entre -200 e 200 mV / V. Na mesma figura pode-se observar o exemplo de um levantamento de IP realizado em 2006, em área de prospecção de cobre, que apresenta excelente qualidade nos dados. Neste levantamento as condições geológicas são favoráveis à superfície, permitindo a transmissão de correntes bem maiores que em Brucutu, entre 1000 e 2500 mA.

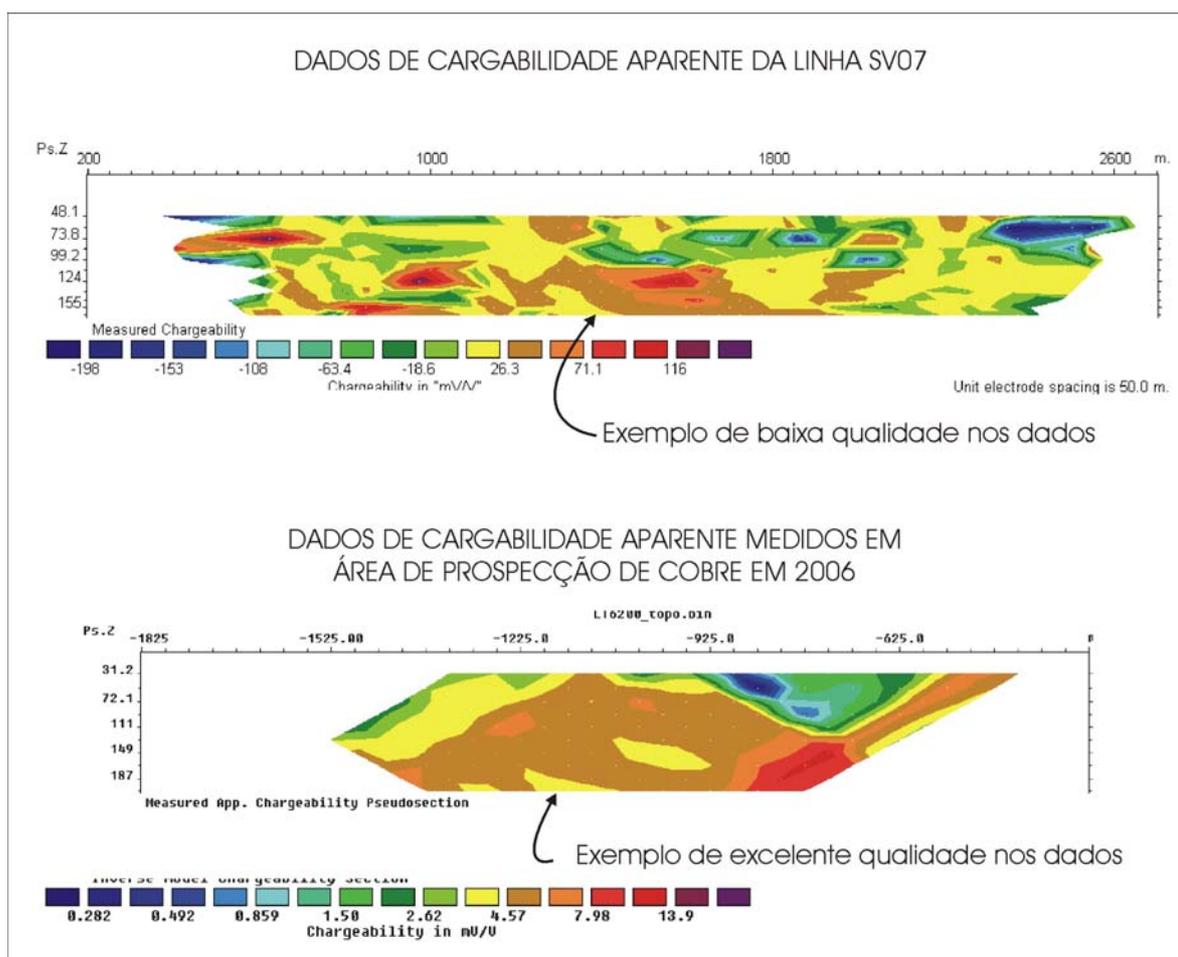


Figura 22. Exemplos de diferentes qualidades nos dados de IP.

Nas Figuras 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44 e 46 estão apresentadas as seções 2D das linhas geofísicas SV01, SV02, SV03, SV04, SV06, SV07, SV08, SV09, SV10, SV11, SV14 e SV15, respectivamente. Em cada figura, está apresentada a seção geológica atualizada da Mina do Brucutu, e os modelos 2D de resistividade verdadeira.. Os modelos foram obtidos a partir da inversão dos dados medidos com o arranjo dipolo-dipolo, bem como a partir da inversão dos dados combinados medidos com os dois arranjos empregados: dipolo-dipolo e gradiente.

Nestas figuras estão assinaladas as possíveis causas das anomalias, tais como a ocorrência de solo e canga, de itabirito friável, de possíveis zonas de cisalhamento relacionadas à presença de IC e IN, do gnaiss do embasamento, dos xistos da Formação Cambotas ou do Grupo Nova Lima e da intrusão do Granito Peti. Estão também assinalados os possíveis mergulhos das camadas mostrando em alguns casos, sugestões de diferentes modelos estruturais para uma mesma seção geofísica.

Na figura 23 está apresentada a legenda das litologias que ocorrem nas seções geológicas da mina.



Figura 23. Legenda das litologias das seções geológicas da Mina do Brucutu.

Nas figuras 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45 e 47 estão apresentadas diferentes sugestões de modelos geológicos gerados através da interpretação das seções 2D das linhas SV01, SV02, SV03, SV04, SV06, SV07, SV08, SV09, SV10, SV11, SV14 e SV15, respectivamente.

4.2.2.1. Interpretação da Linha SV01

Na Linha SV01 há um furo com IF, na distância 725, coincidindo com uma anomalia de alta resistividade com valores maiores que 50.000 ohm.m. Para NW ocorrem mais duas anomalias com essas características. Se considerarmos a existência de minério nestas anomalias, é possível que exista um anticlinal com eixo na distância 600 m, seguido de um sinclinal para NW com eixo na distância 350. A anomalia de baixa resistividade que ocorre em profundidade na distância 600 pode estar sendo provocada pelos xistos do Nova Lima ou da Formação Morro Grande.

A realização dos furos F1 e F2, locados na seção geofísica (Figura 24), serviria para que se possa definir uma resposta a estas sugestões apontadas na seção.

4.2.2.2. Interpretação da Linha SV02

Na Linha SV02, ocorre entre as distâncias 800 e 1200, a mesma anomalia que apresenta minério na Linha SV01. Na porção NW da seção ocorrem altos valores de resistividade que podem estar relacionados à presença de minério, caso se confirme a ocorrência de minério no furo F1, sugerido para ser realizado na linha SV01. São sugeridos os furos F3 e F4 (Figura 26).

4.2.2.3. Interpretação da Linha SV03

Na Linha SV03 ao longo de toda a seção ocorre um alto padrão de resistividade característico de IF. A seção geológica mostra a presença de xistos da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima na extremidade SE da seção, embora não exista furo neste local. A resposta da geofísica, entretanto, sugere a existência de uma litologia que apresente alta resistividade, como por exemplo, IF ou quartzitos da Formação Cambotas. O furo F5 é necessário para que se possa esclarecer esta dúvida.

O furo que aparece na seção geológica (distância 630) apresenta IN. Esta litologia parece estar relacionadas a uma zona de cisalhamento, identificada na seção geofísica, embora a anomalia pareça estar um pouco deslocada.

4.2.2.4. Interpretação da Linha SV04

Na Linha SV04 é possível sugerir uma seqüência de dobramentos em profundidade, que pode estar delimitando a base da camada mineralizada em contato com os xistos de baixa resistividade da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima.

Na porção NW da seção ocorrem altos valores de resistividade que podem estar sendo provocados pela presença de gnaiss do embasamento, quartzito da Formação Cambotas ou IF. O furo F7 é sugerido para que se possa esclarecer essa dúvida.

Na distância 1150 ocorre uma zona verticalizada de baixa resistividade que coincide com ocorrência de IN. Esta anomalia está marcada na modelagem 3D (Figura 50) como uma provável zona de cisalhamento.

4.2.2.5. Interpretação das linhas SV06 e SV07

Para as linhas SV06 e SV07 é possível sugerir dois modelos estruturais diferentes:

O modelo 1 considera que a anomalia de alta resistividade que ocorre em profundidade na porção SE das seções, esteja sendo provocada pela ocorrência de quartzitos da Formação Cambotas ou por uma intrusão do Granito Peti. O arcabouço estrutural seria formado por uma dobra anticlinal aberta com eixo com caimento para SE.

O modelo 2 considera a ocorrência de IF no local onde ocorre a anomalia de alta resistividade. O dobramento seria bastante fechado com a charneira para NW e eixo horizontalizado. A baixa resistividade que aparece em profundidade na seção com arranjo gradiente reforça o modelo 2, se considerarmos que esta anomalia esteja sendo provocada pelos xistos do Grupo Nova Lima ou da Formação Morro Grande. Outra possibilidade seria a rocha descrita como xisto Nova Lima, nos furos situados na porção SE das seções, ser de fato uma rocha intrusiva máfica. A realização do furo F8 ou do F9 é sugerida para que se possa definir estas questões.

Na Linha SV07 há um furo, em torno da distância 1050 da seção, que apresenta IN, IGO, IC e HGO, e que está posicionado sobre uma das zonas de cisalhamento NE-SW marcada na modelagem 3D (Figura 50).

4.2.2.6. Interpretação das Linhas SV08 e SV09

A resposta das linhas SV08 e SV09 não estão tão boas como às outras, em termos de correlação entre os altos valores de resistividade esperados para a zona do IF. Na porção SE de ambas as linhas, no local onde estão situados os furos rasos que delimitam a base das camadas mineralizadas em contato com os xistos da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima, não ocorre resistividade tão alta, característica do IF. No caso da linha SV09 isso poderia ser explicado pela ocorrência de IGO, HF e IN que ocorrem no local.

Na linha SV08 ocorre uma forte anomalia com alta resistividade que deveria ser investigada, onde não está indicada a presença de minério na seção geológica (furo F10 sugerido). Caso haja confirmação de minério neste local, a possibilidade de ocorrer um modelo estrutural parecido com o modelo 2 mostrado nas linhas SV06 e SV07 é grande. Se nesta anomalia forem encontrados quartzitos da Formação Cambotas ou uma intrusão do Granito Peti, a tendência é de que ocorra um modelo semelhante ao modelo 1, comentado nas linhas SV06 e SV07. Nestas linhas também existe a possibilidade da rocha descrita como xisto Nova Lima, situada nos furos situados na porção SE das seções, ser de fato uma rocha intrusiva.

4.2.2.7. Interpretação das linhas SV10 e SV11

Nas linhas SV10 e SV11 ocorre uma grande anomalia de alta resistividade entre as distâncias 1650 e 2200. A seção geológica mostra que não ocorre IF neste local a esta profundidade. Entretanto, a alta resistividade sugere que existe a possibilidade de ocorrência de minério. A realização de um furo, ou F13 (SV10) ou F14 (SV11), seria fundamental para definir a existência ou não de minério. Caso haja a confirmação de minério neste local, abaixo dos xistos da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima, é provável a ocorrência de um dobramento bastante fechado, quase gerando uma duplicação das camadas mineralizadas. Outra possibilidade seria o fato das rochas descritas nos furos não serem de fato xistos da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima, mas rochas intrusivas básicas pós-Minas, assim como foi mencionado na interpretação das linhas SV06, SV07, SV08 e SV09.

Esta anomalia de alta resistividade pode também estar sendo provocada por quartzitos da Formação Cambotas, ou mesmo por uma intrusão granítica.

4.2.2.8. Interpretação das linhas SV14 e SV15

Nas linhas SV14 e SV15 ocorrem em profundidade altos valores de resistividade, que sugerem a ocorrência de IF ao longo de ambas as seções, de um modo geral, coincidindo com as seções geológicas.

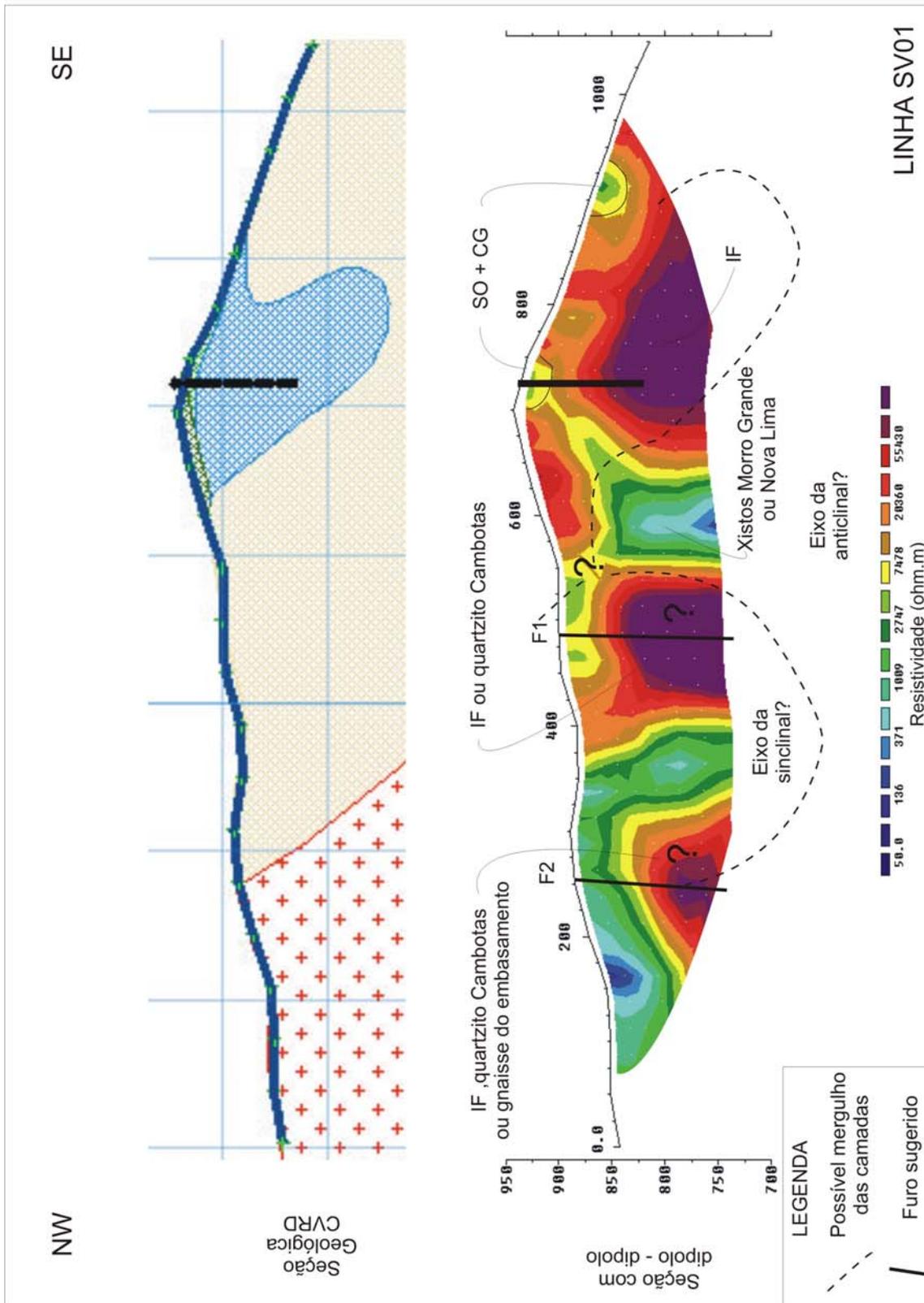


Figura 24. Linha SV01.

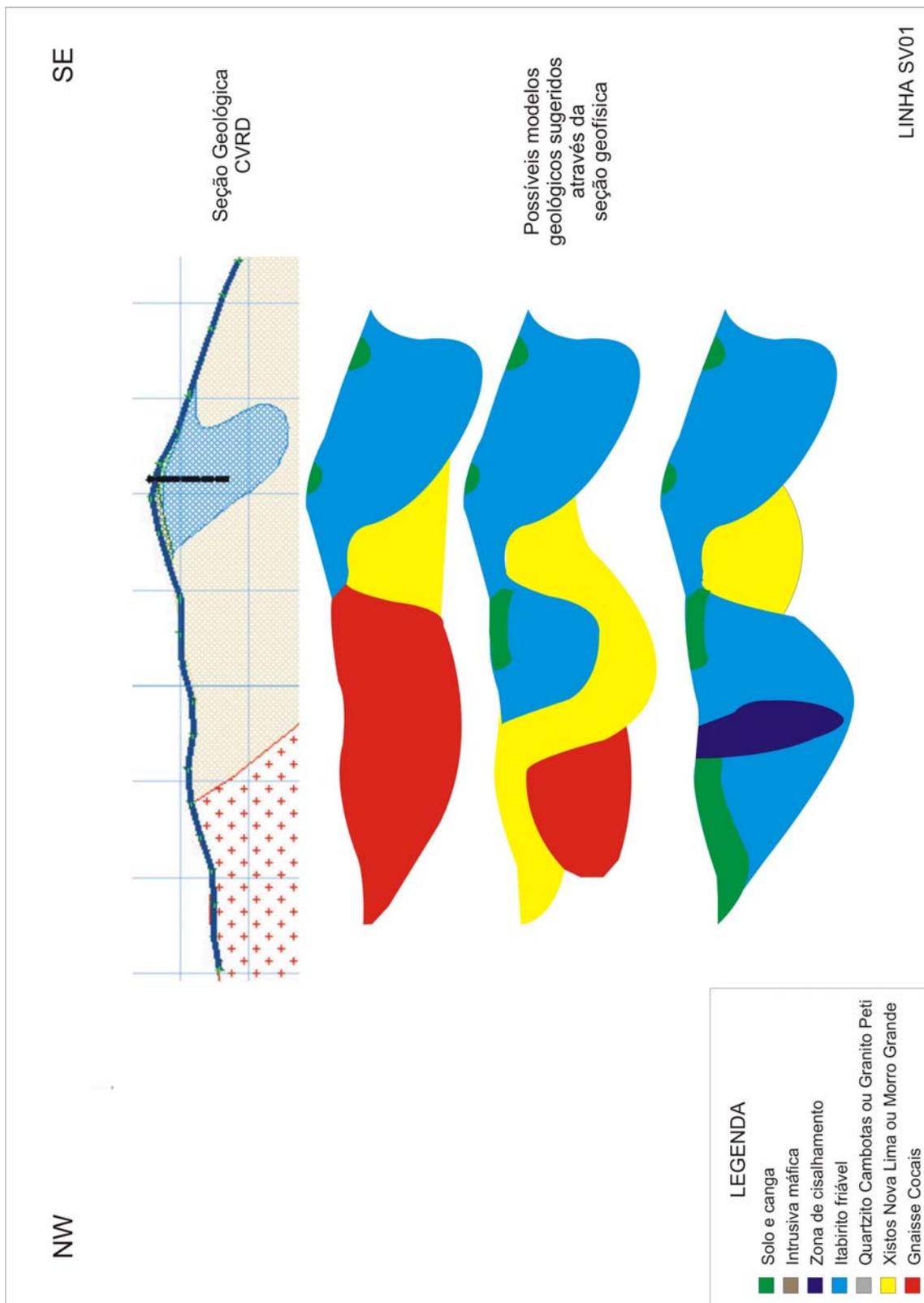


Figura 25. Modelos geológicos propostos para a Linha SV01.

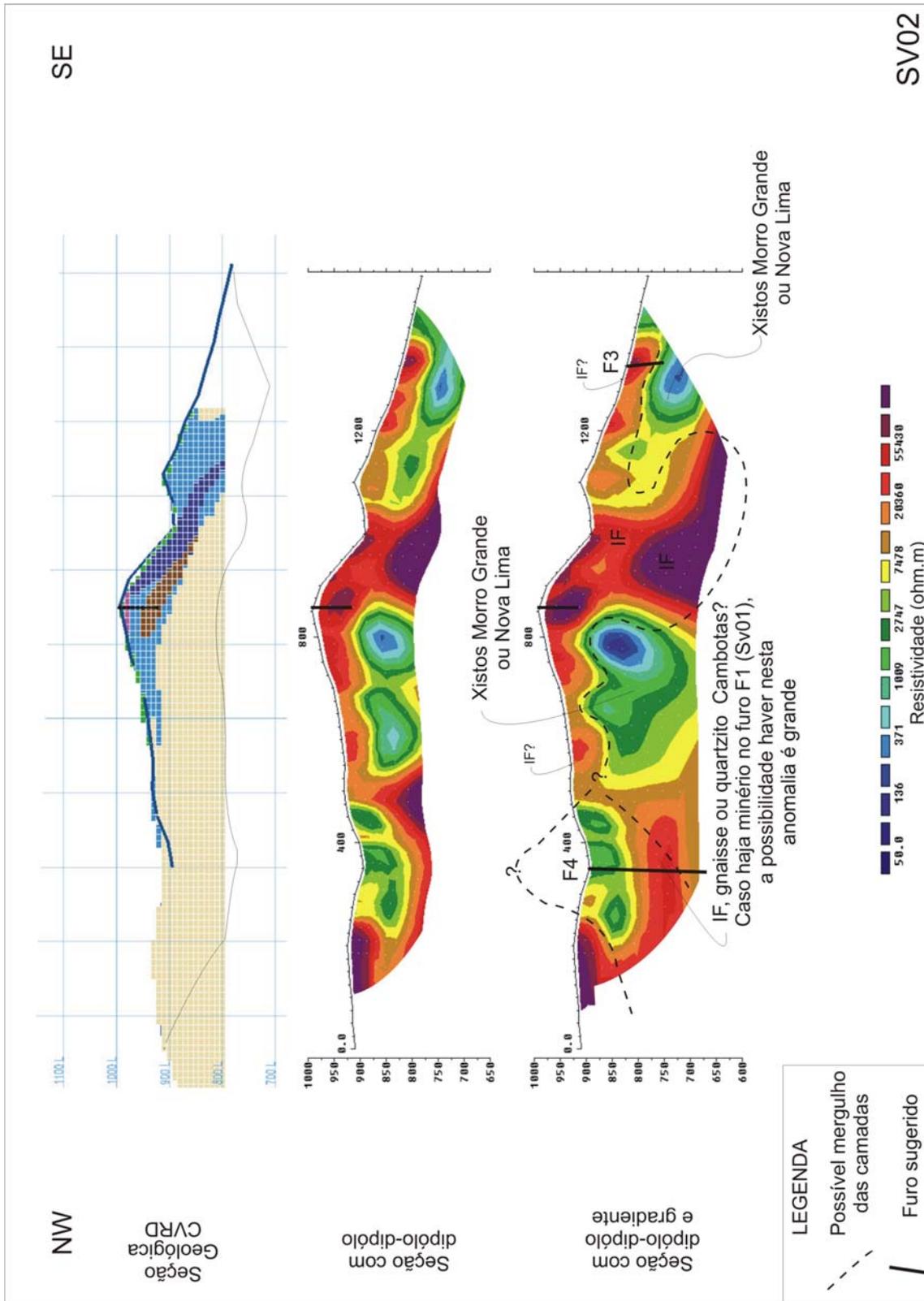


Figura 26. Linha SV02.

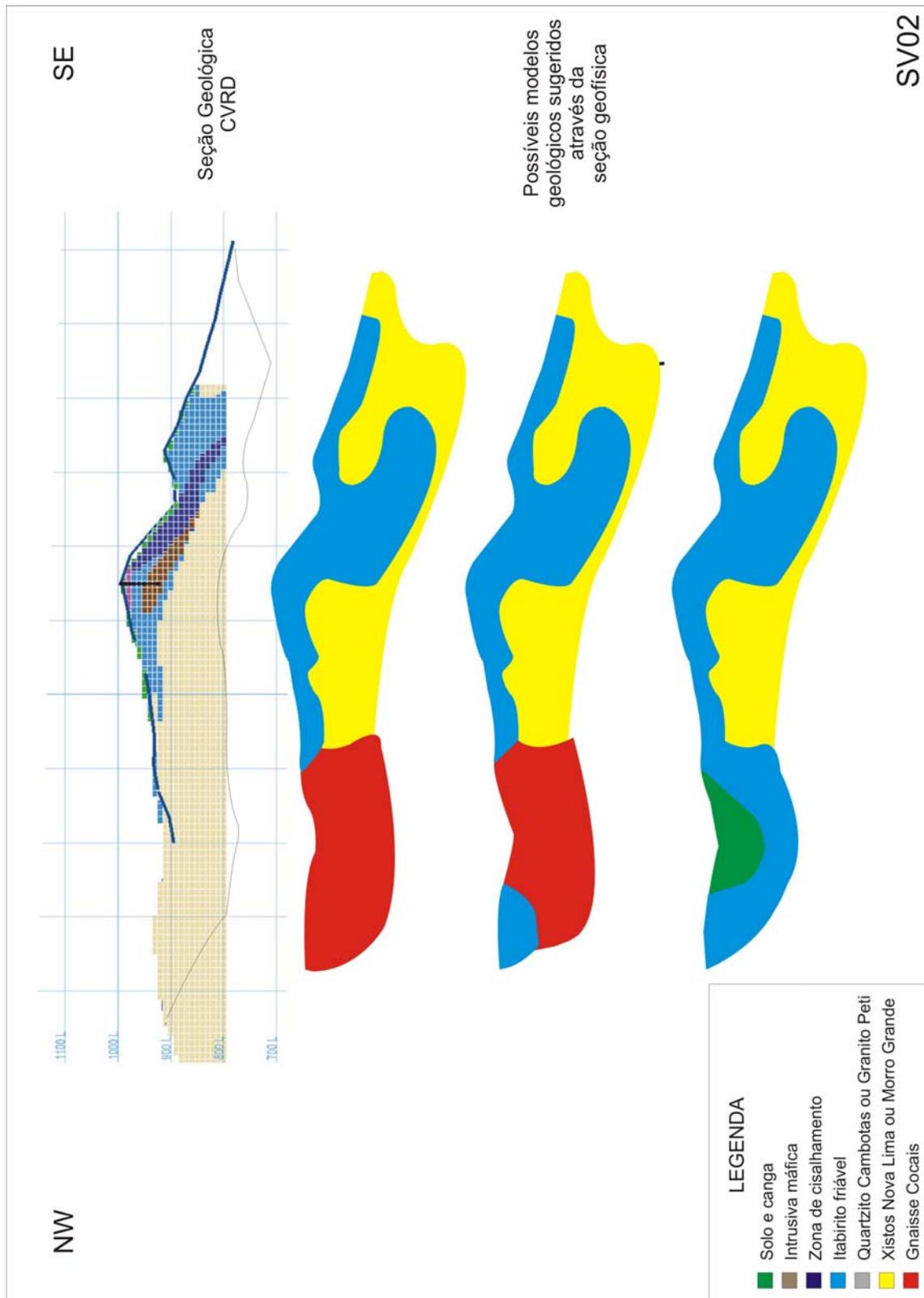


Figura 27. Modelos geológicos propostos para a Linha SV02.

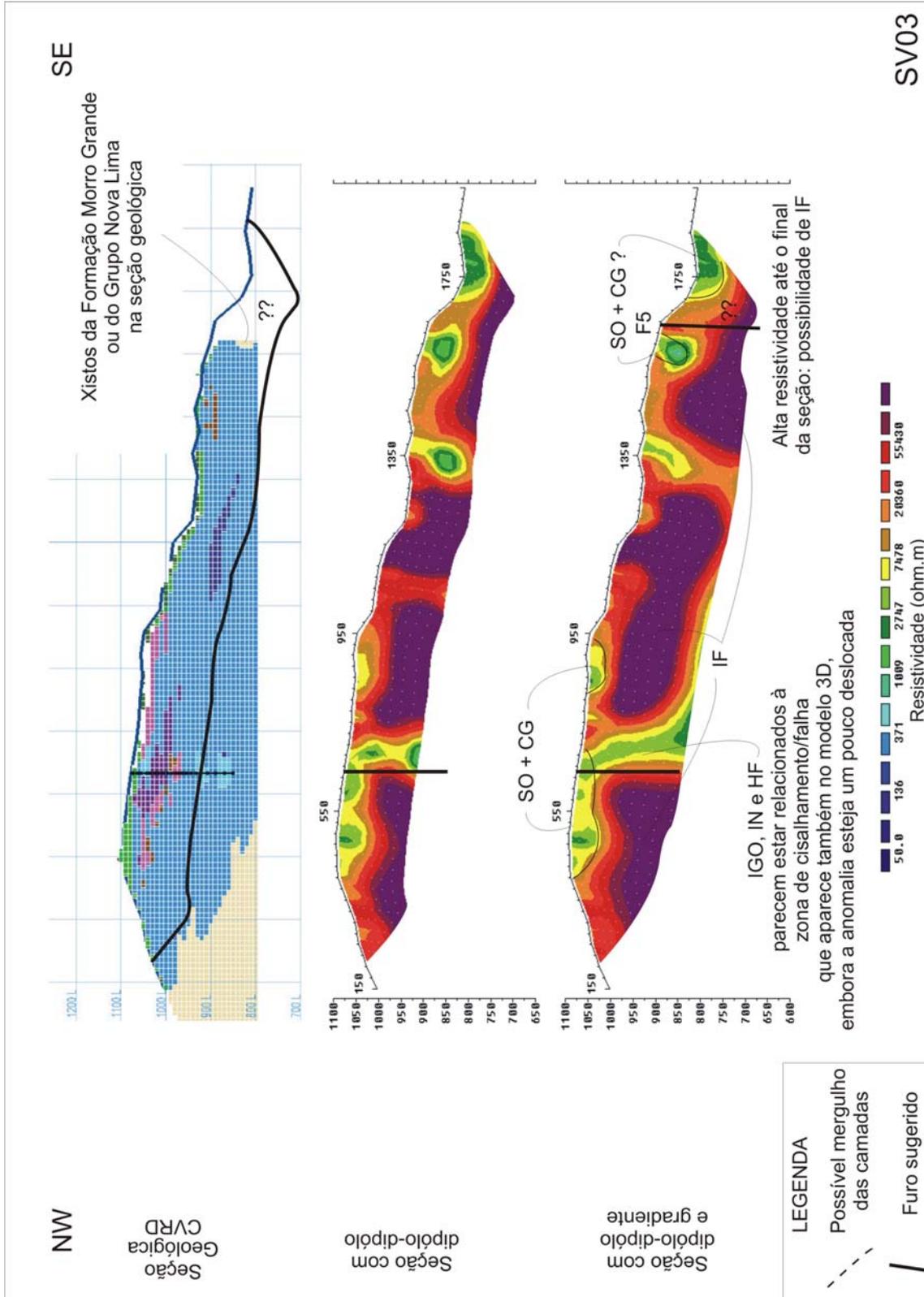


Figura 28. Linha SV03.

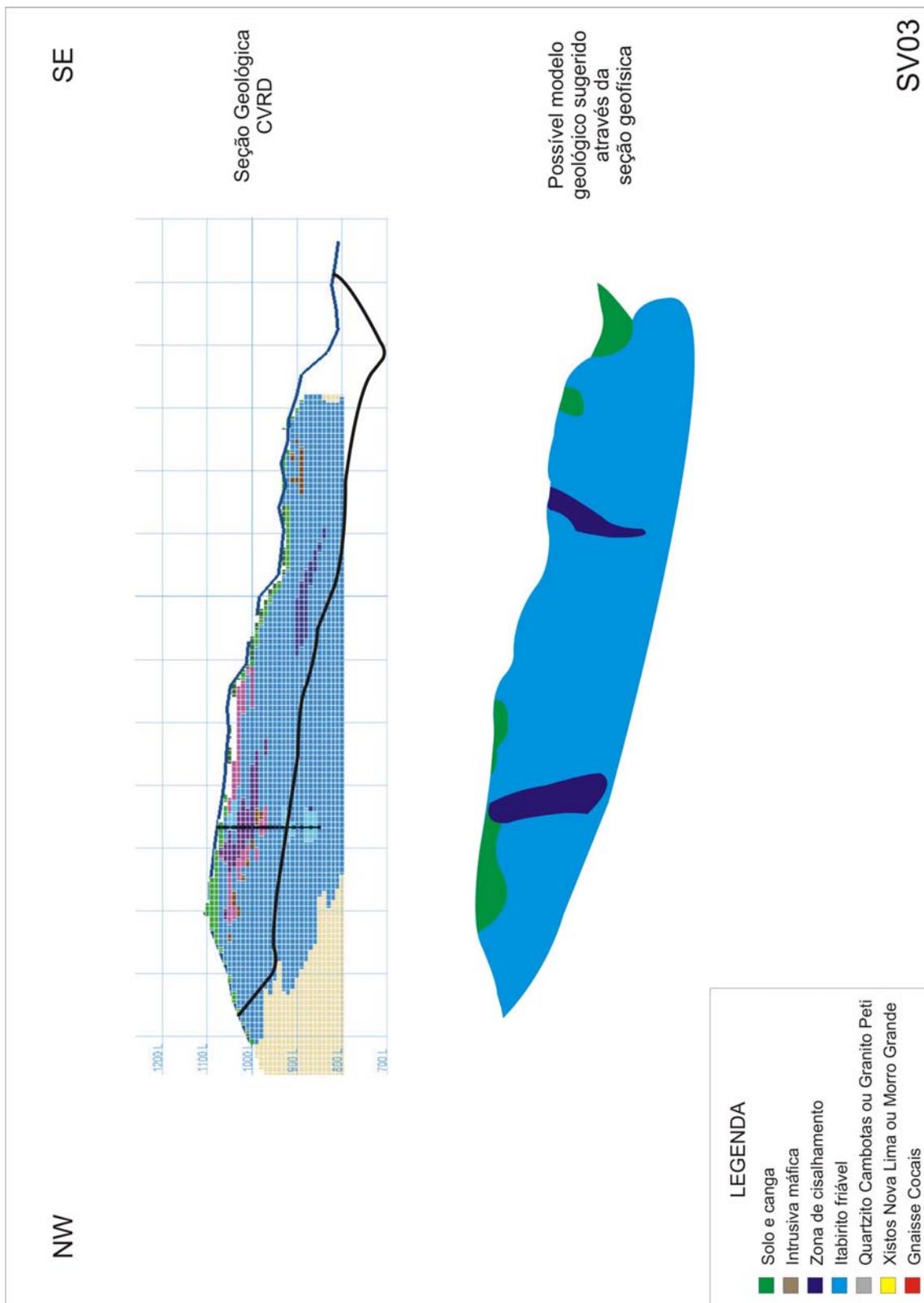


Figura 29. Modelos geológicos propostos para a Linha SV03.

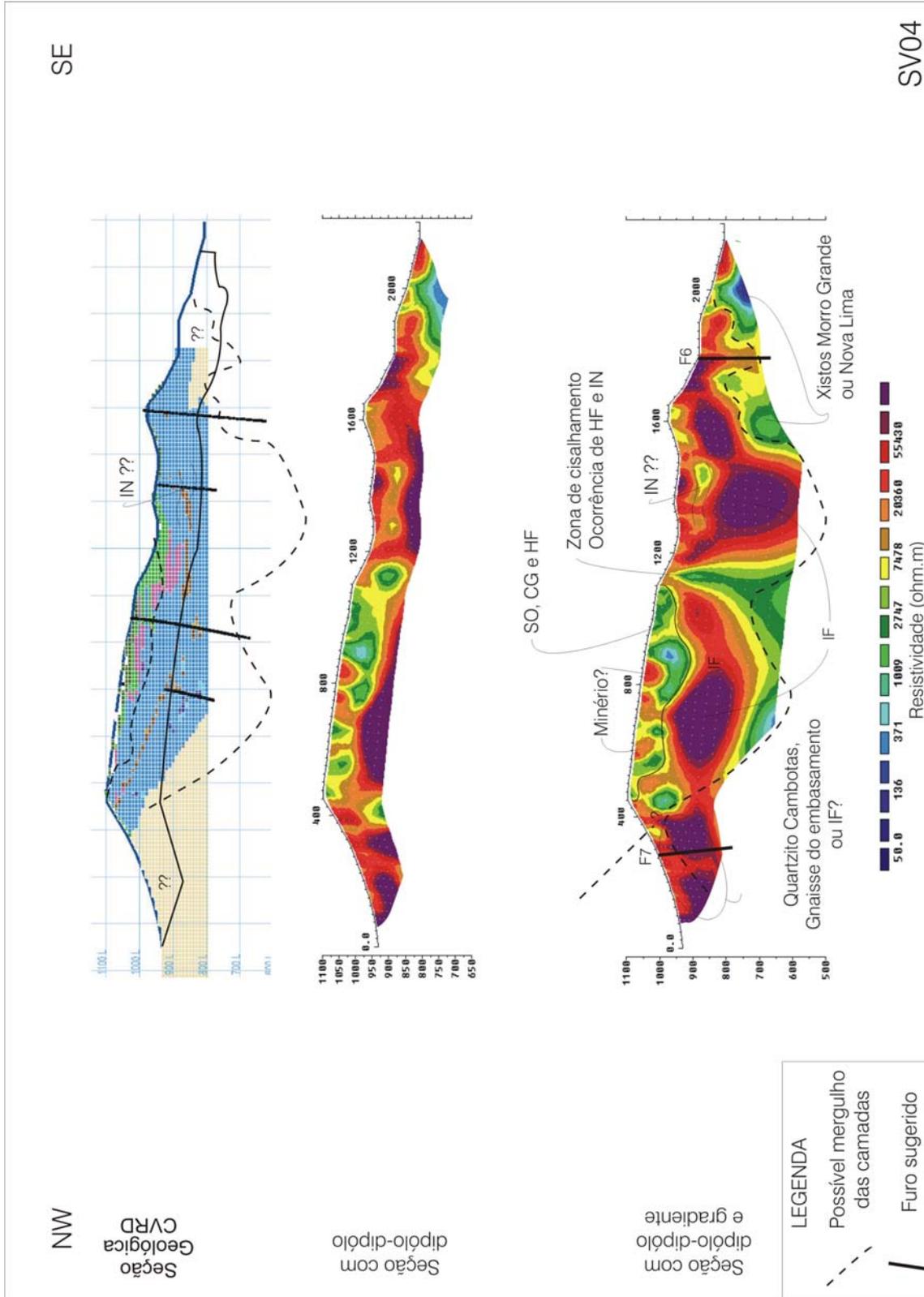


Figura 30. Linha SV04.

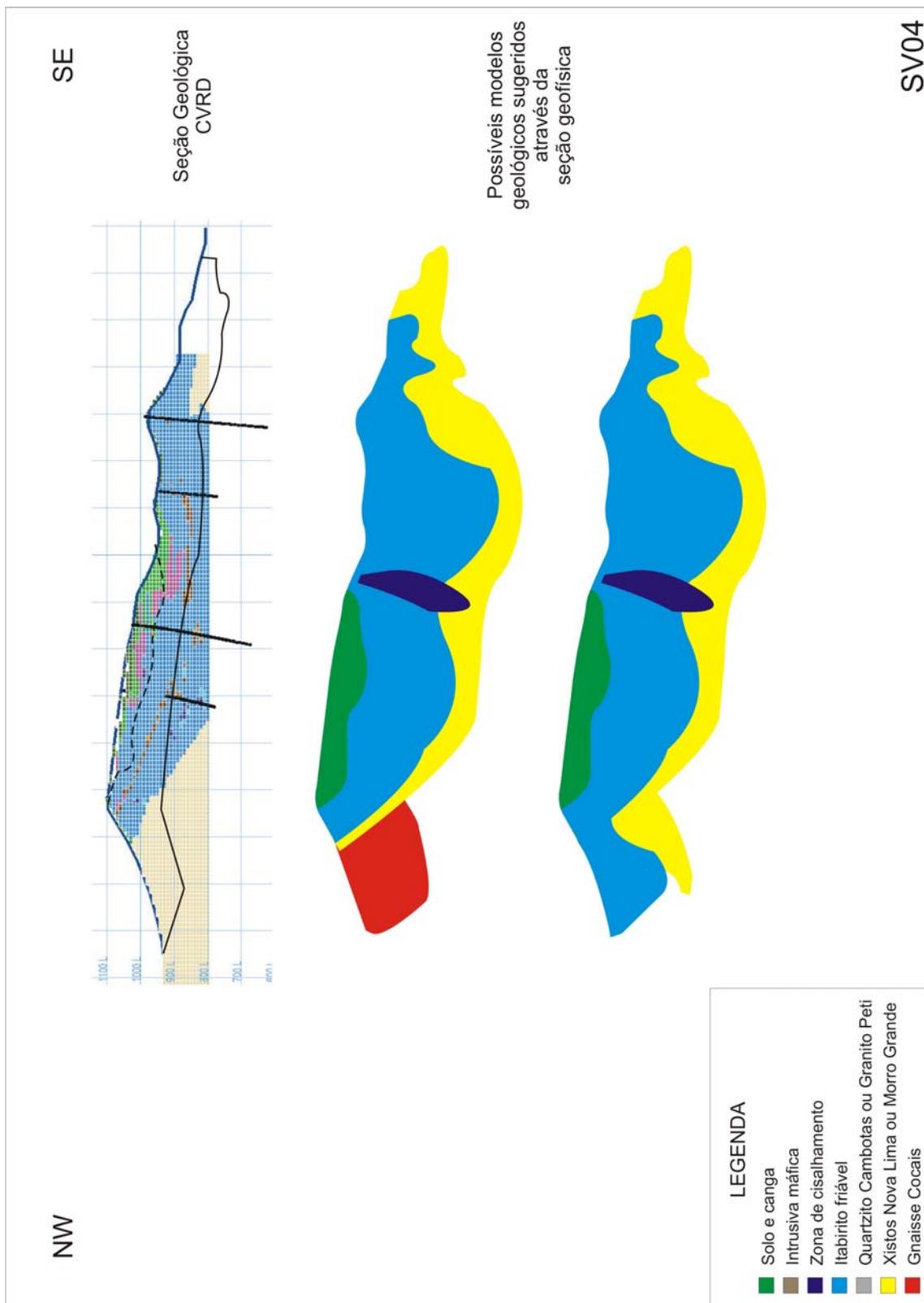


Figura 31. Modelos geológicos propostos para a Linha SV04.

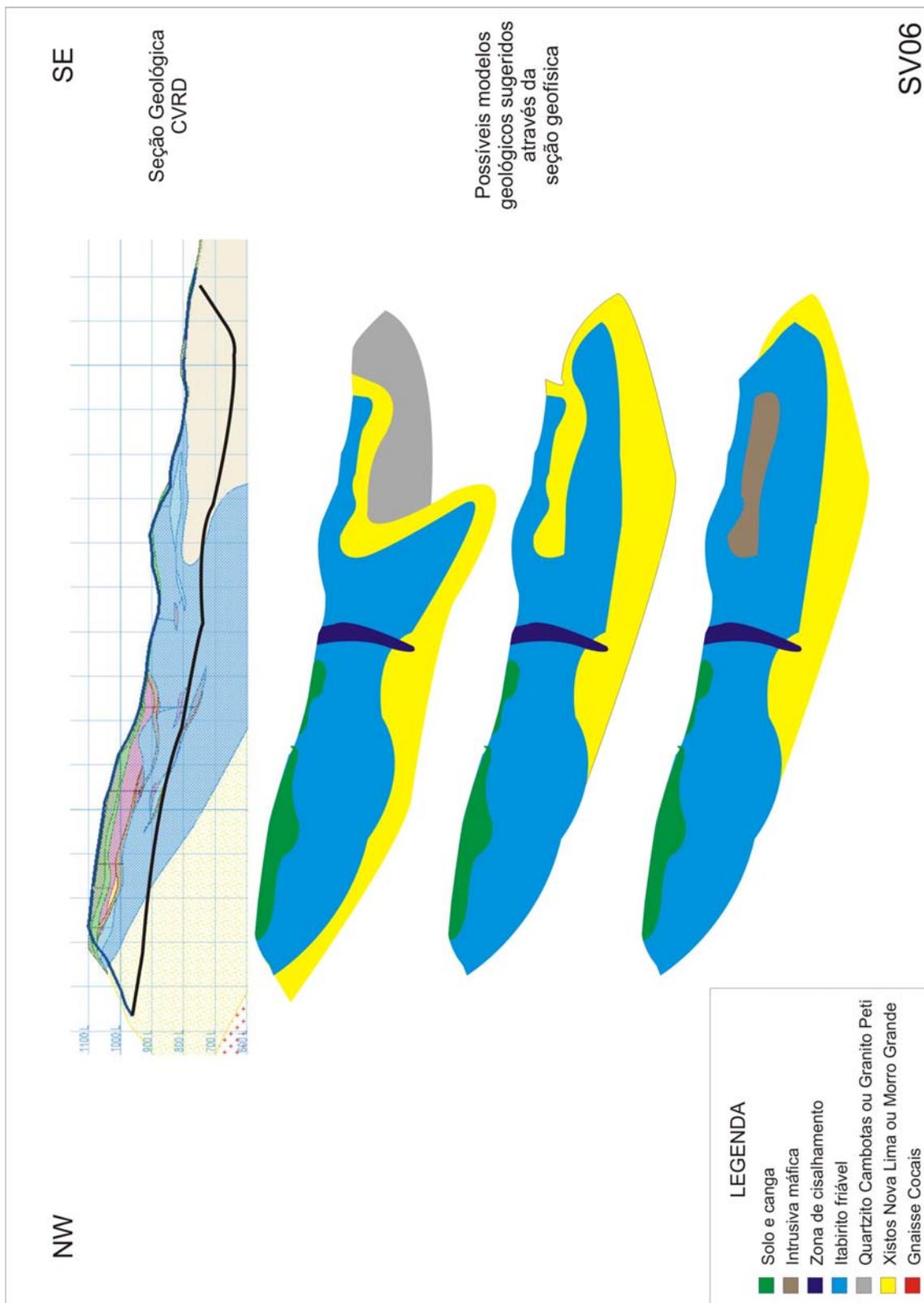


Figura 33. Modelos geológicos propostos para a Linha SV06.

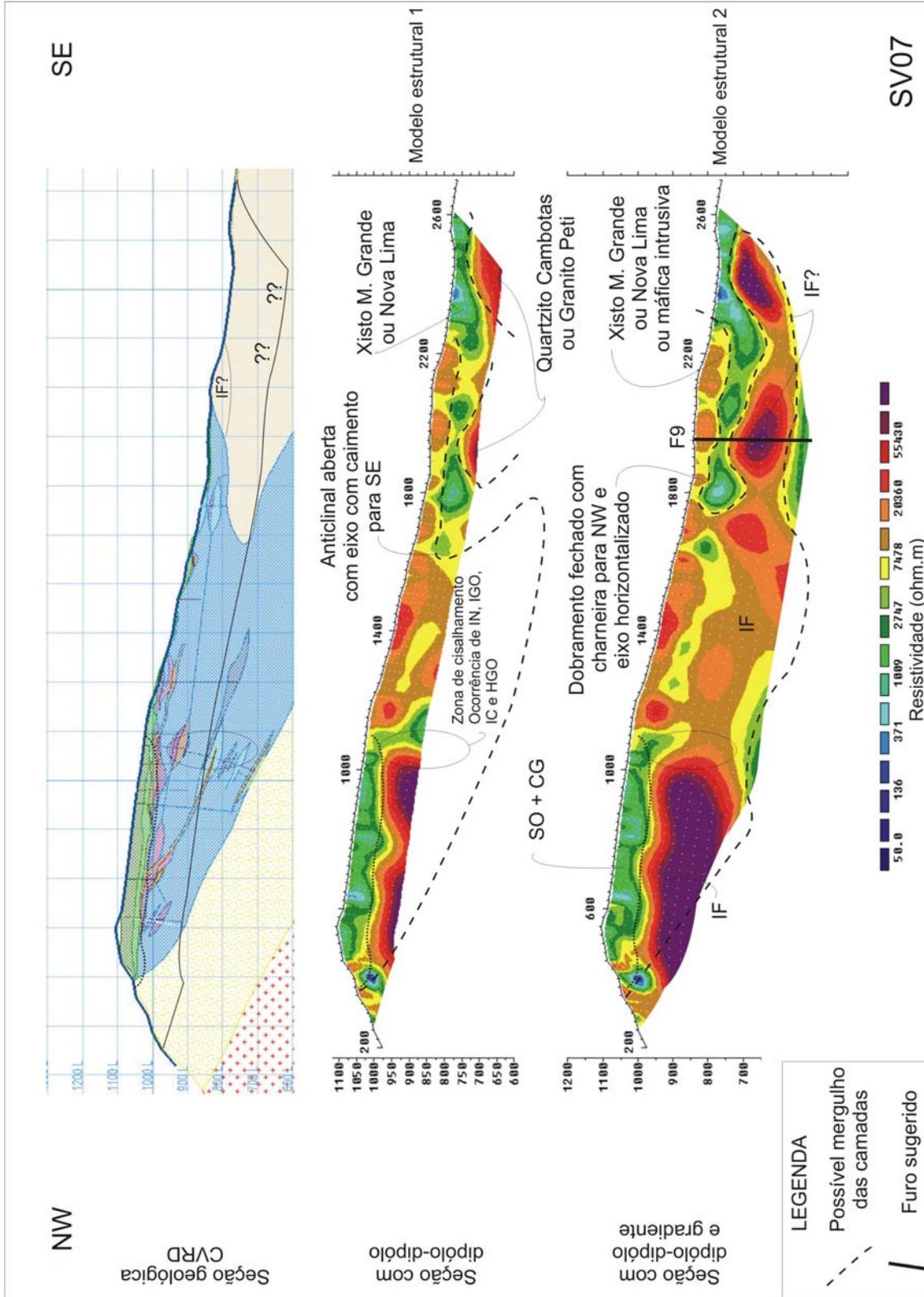


Figura 34. Linha SV07.

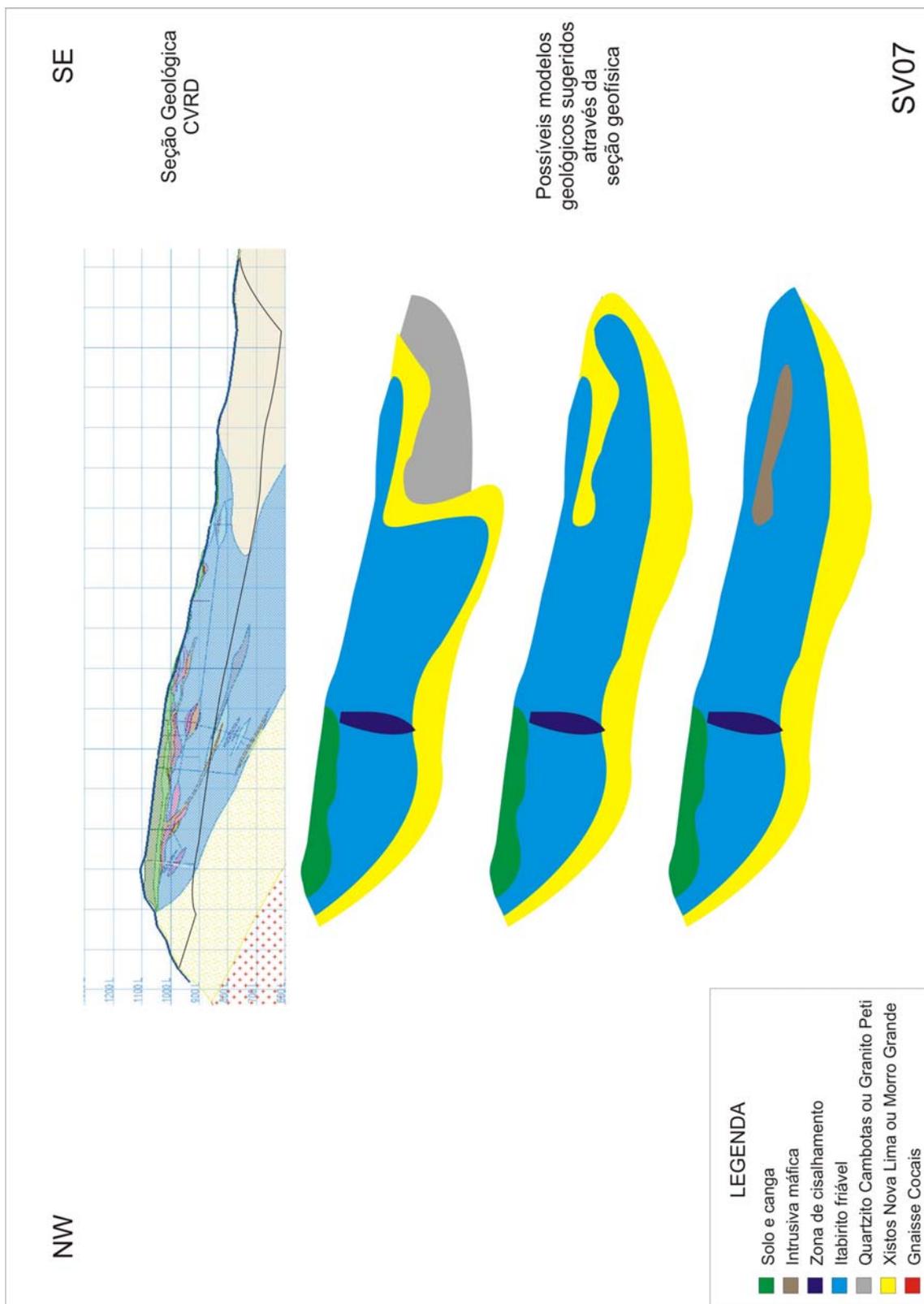


Figura 35. Modelos geológicos propostos para a Linha SV07.

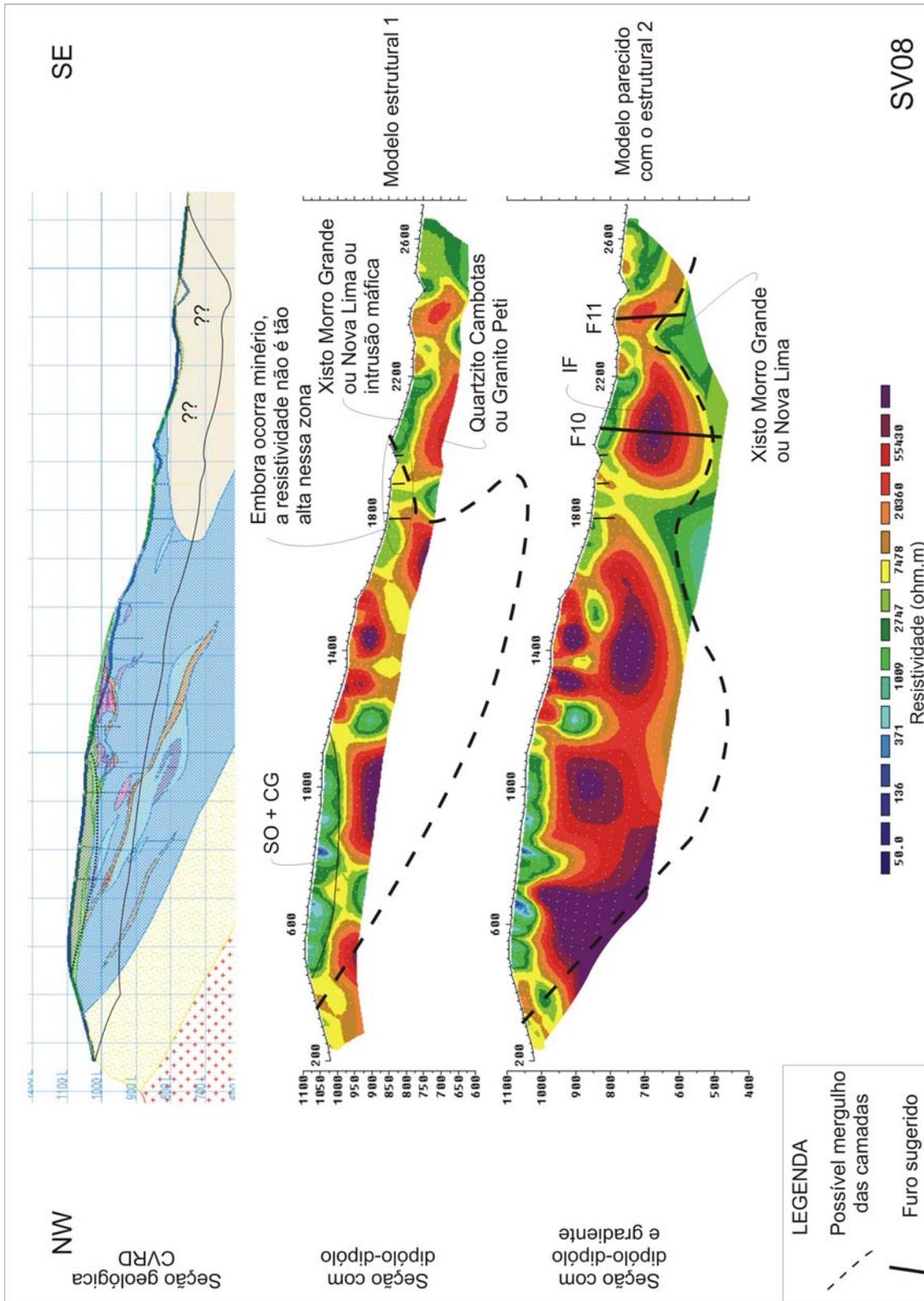


Figura 36. Linha SV08.

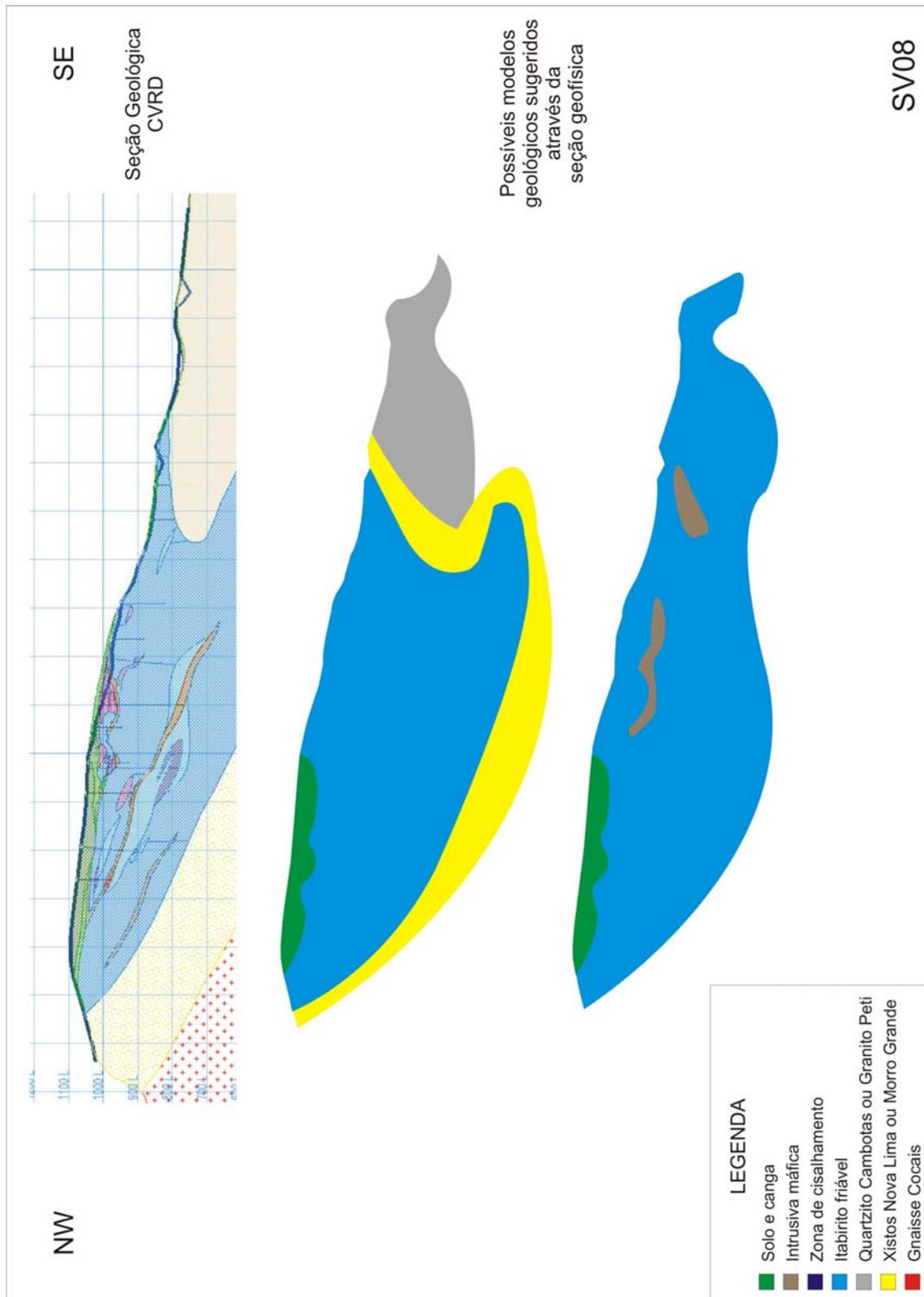


Figura 37. Modelos geológicos propostos para a Linha SV08.

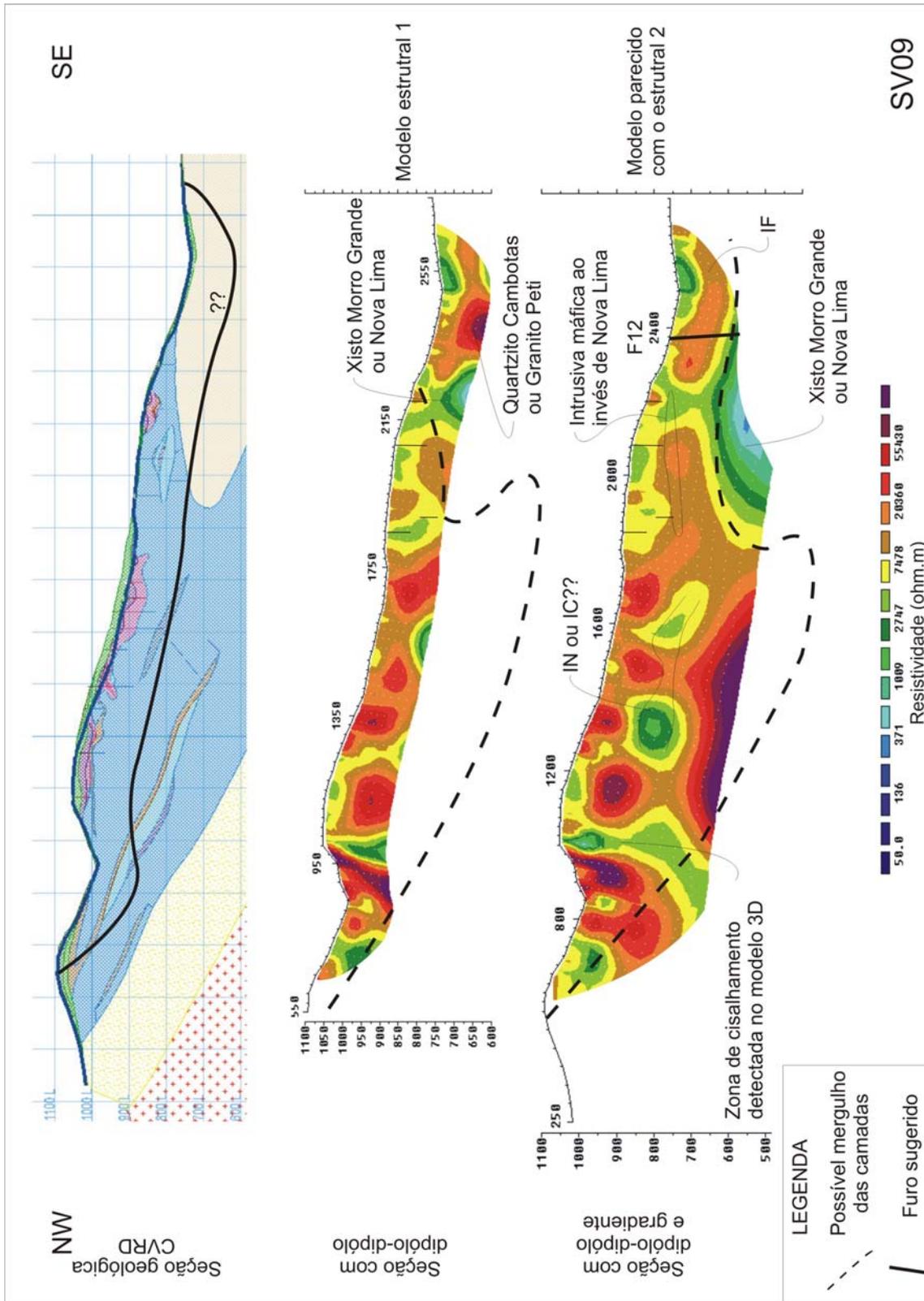


Figura 38. Linha SV09.

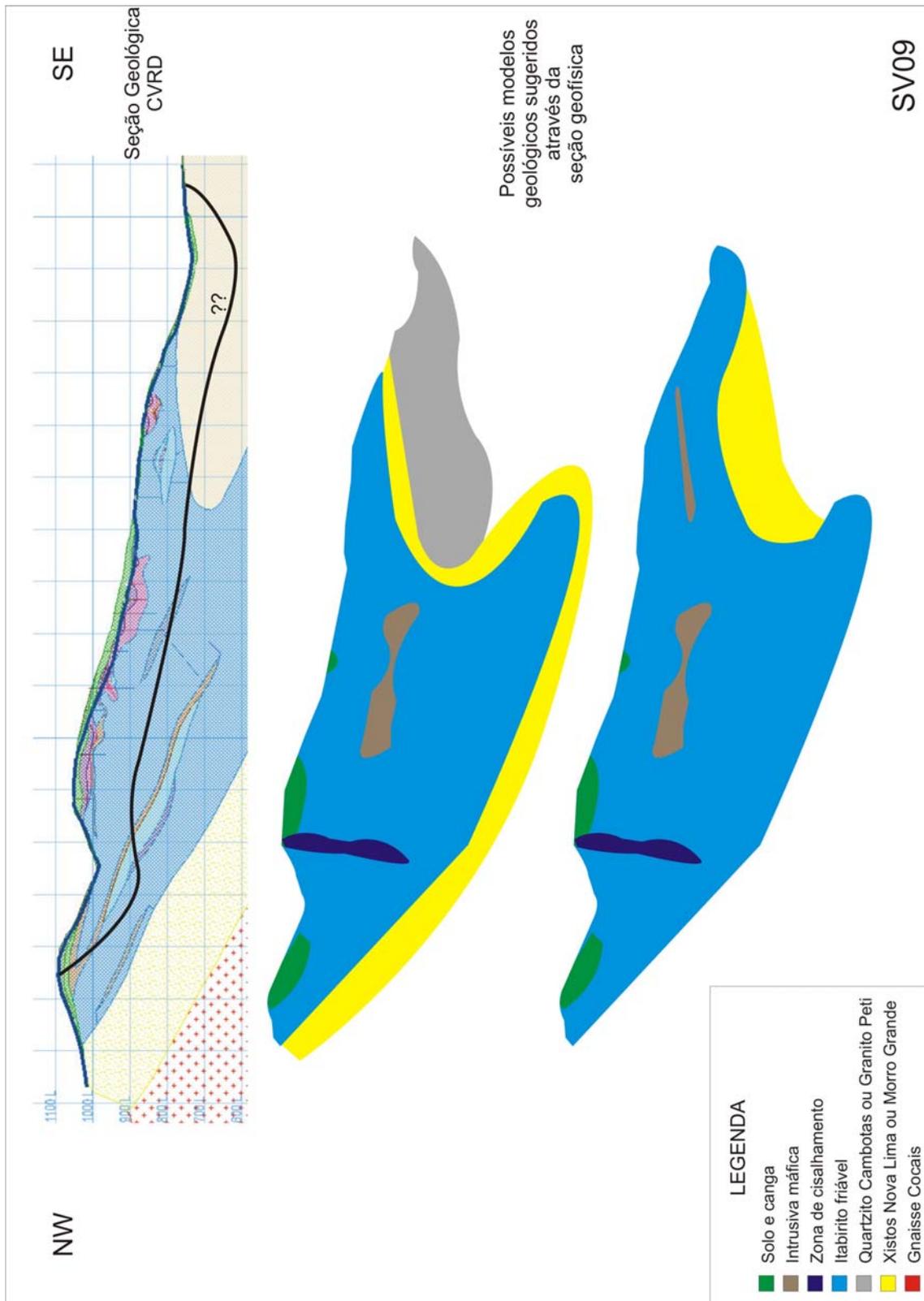


Figura 39. Modelos geológicos propostos para a Linha SV09.

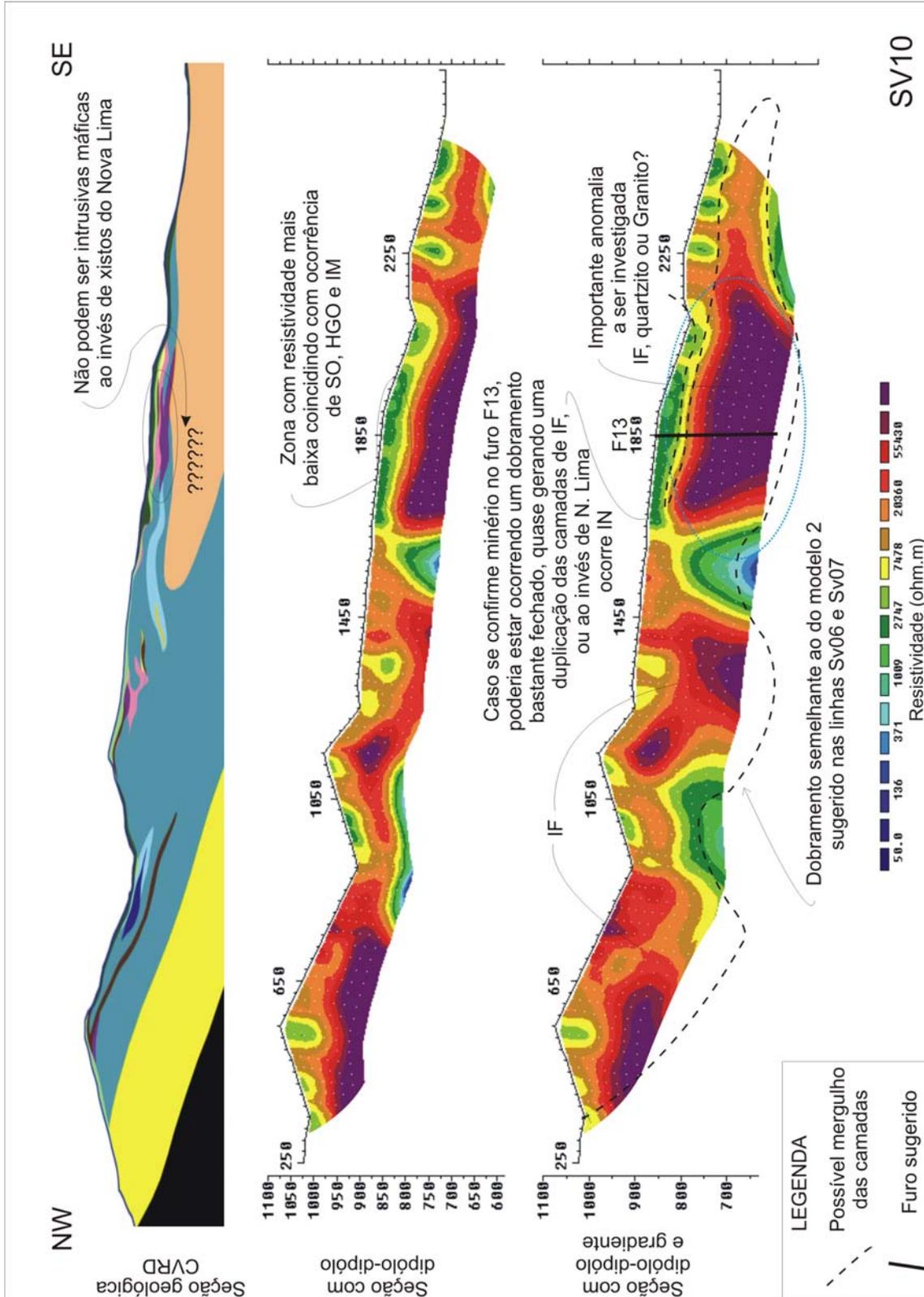


Figura 40. Linha SV10.

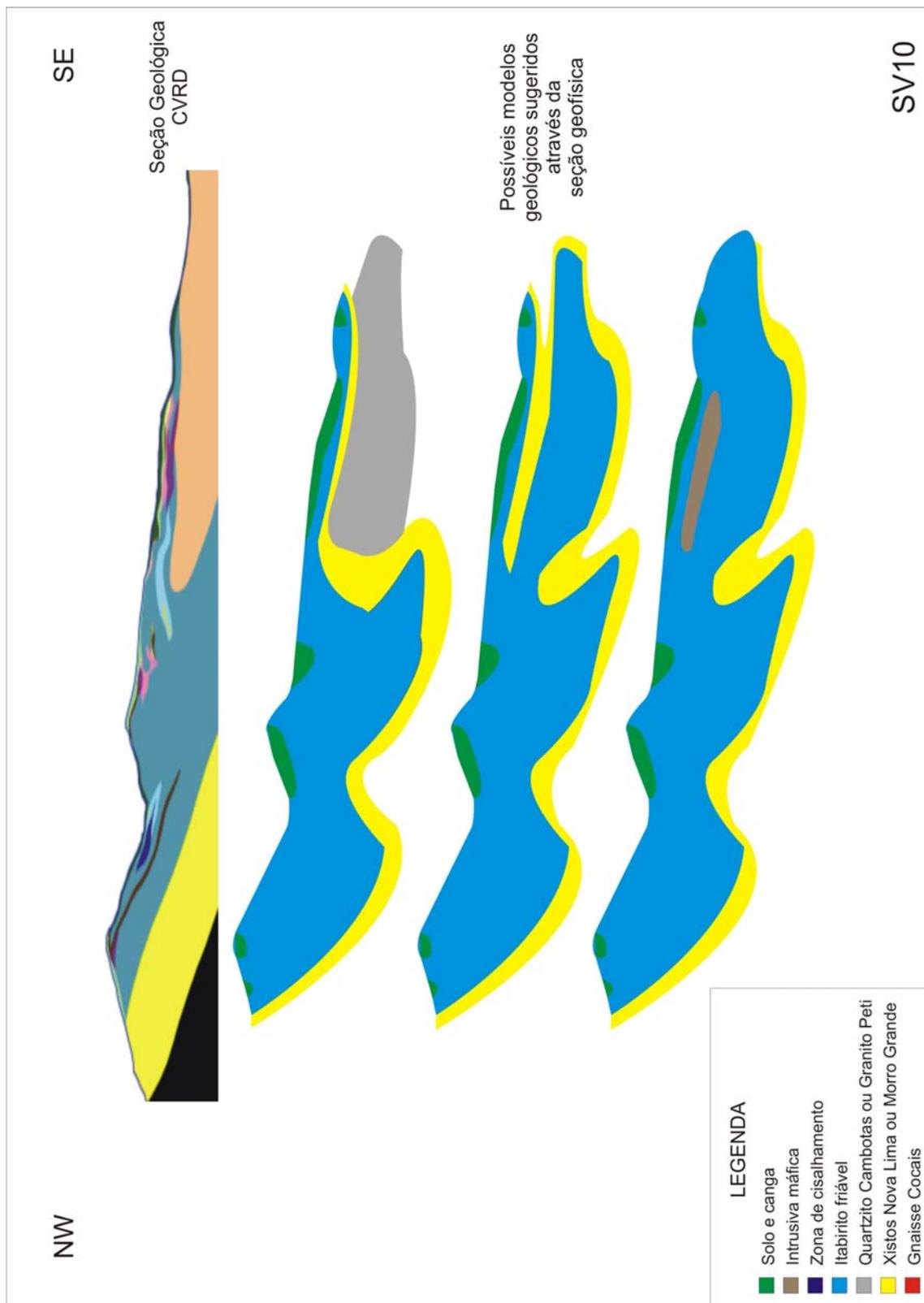


Figura 41. Modelos geológicos propostos para a Linha SV10.

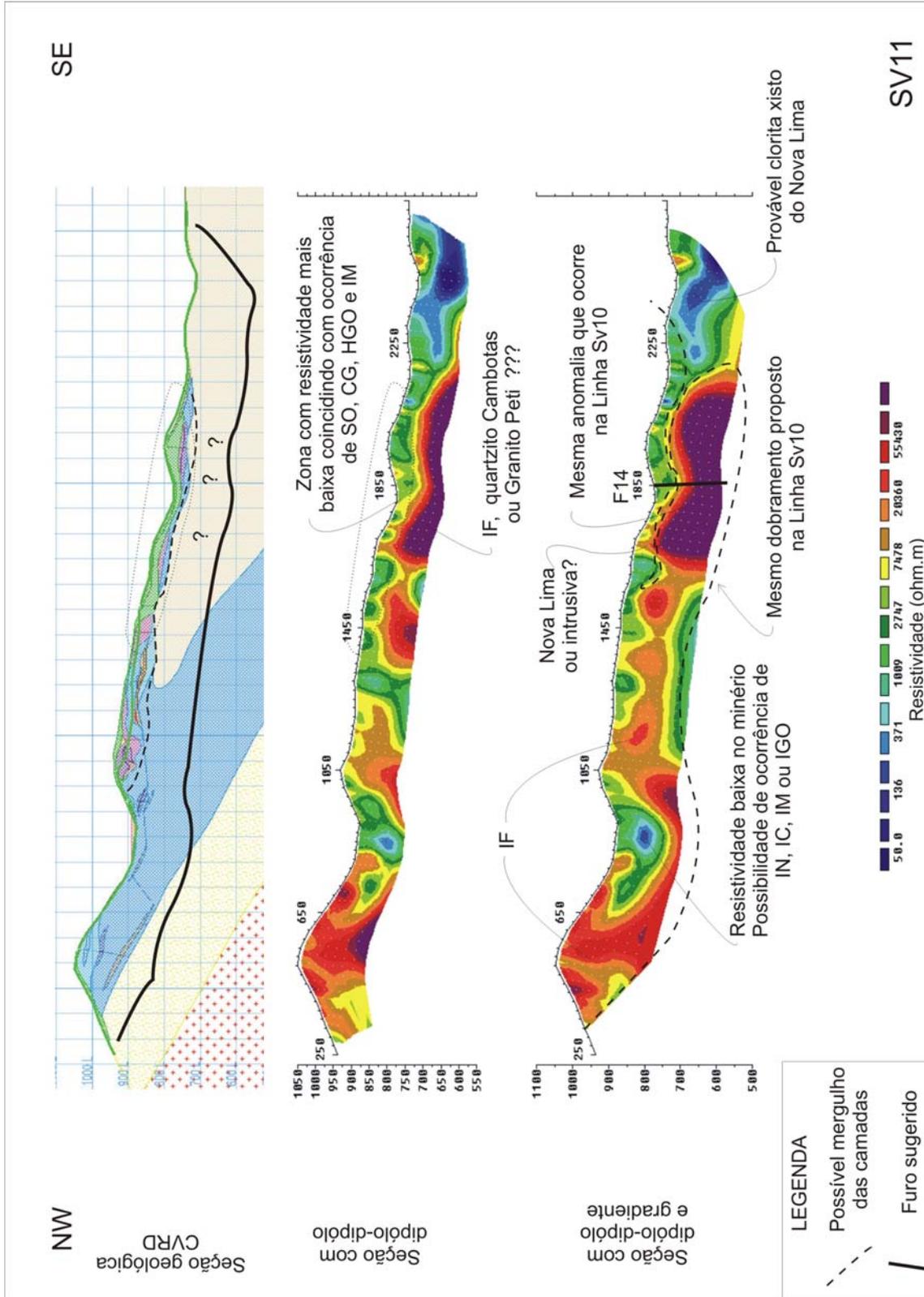


Figura 42. Linha SV11.

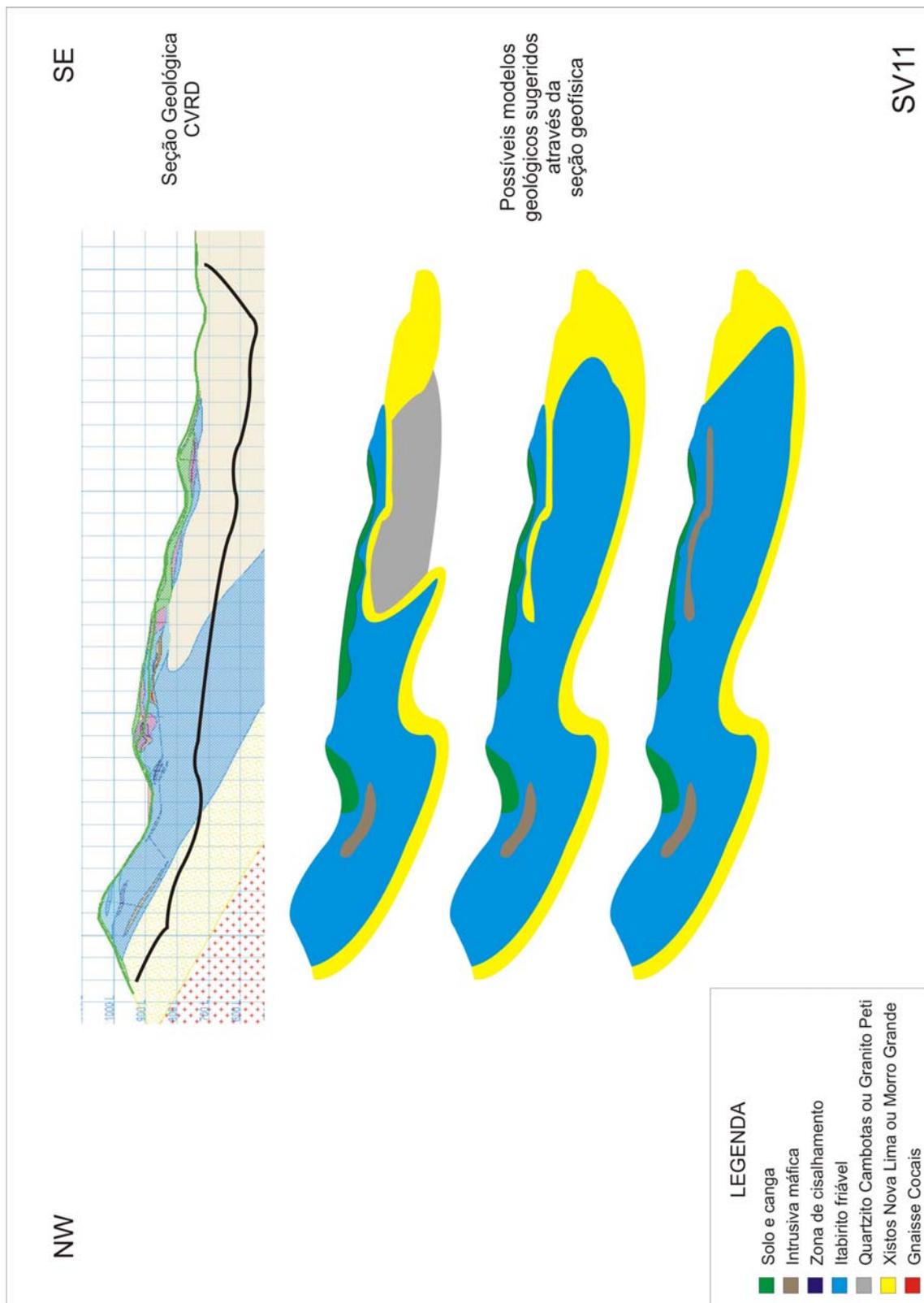


Figura 43. Modelos geológicos propostos para a Linha SV11.

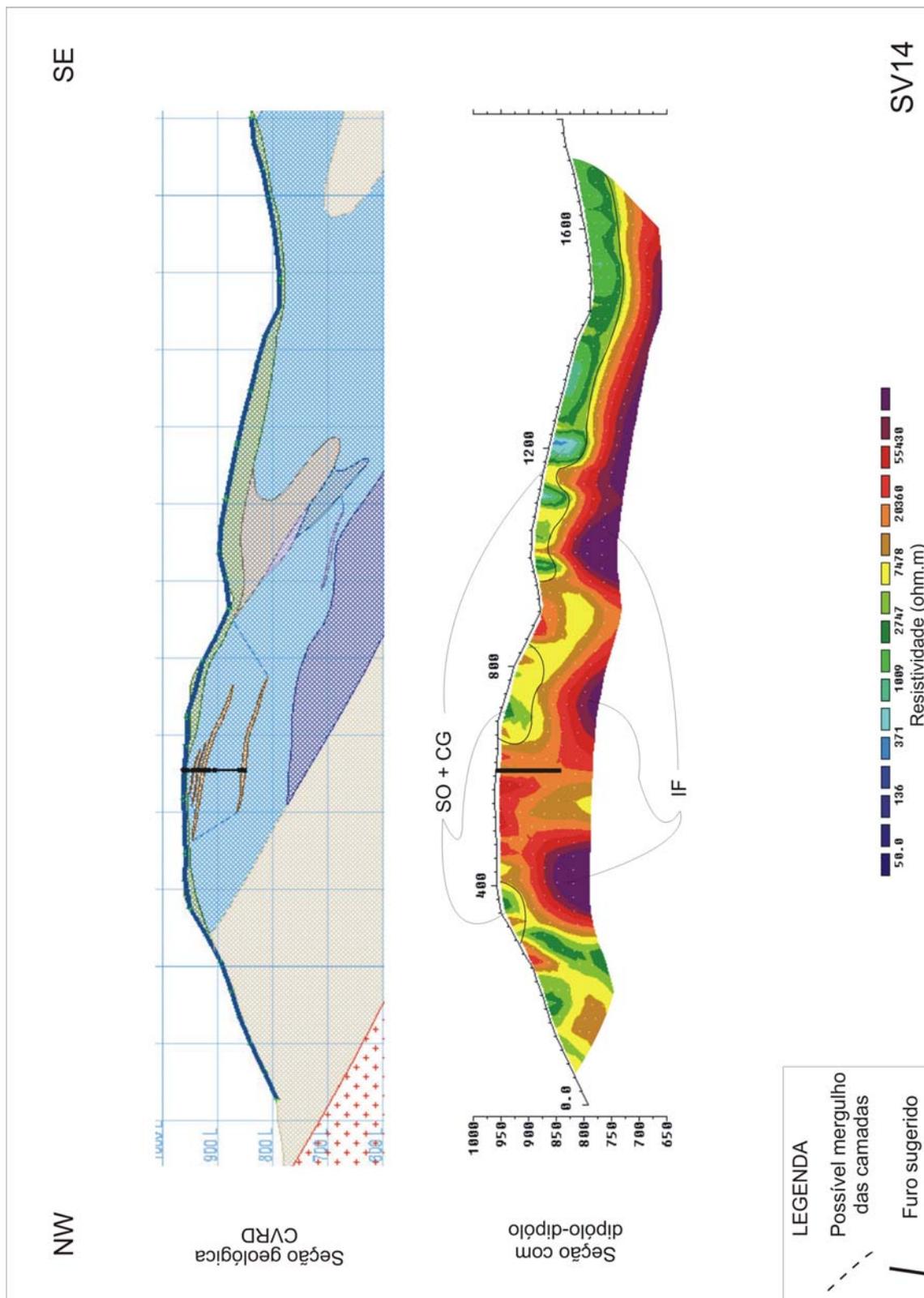


Figura 44. Linha SV14.

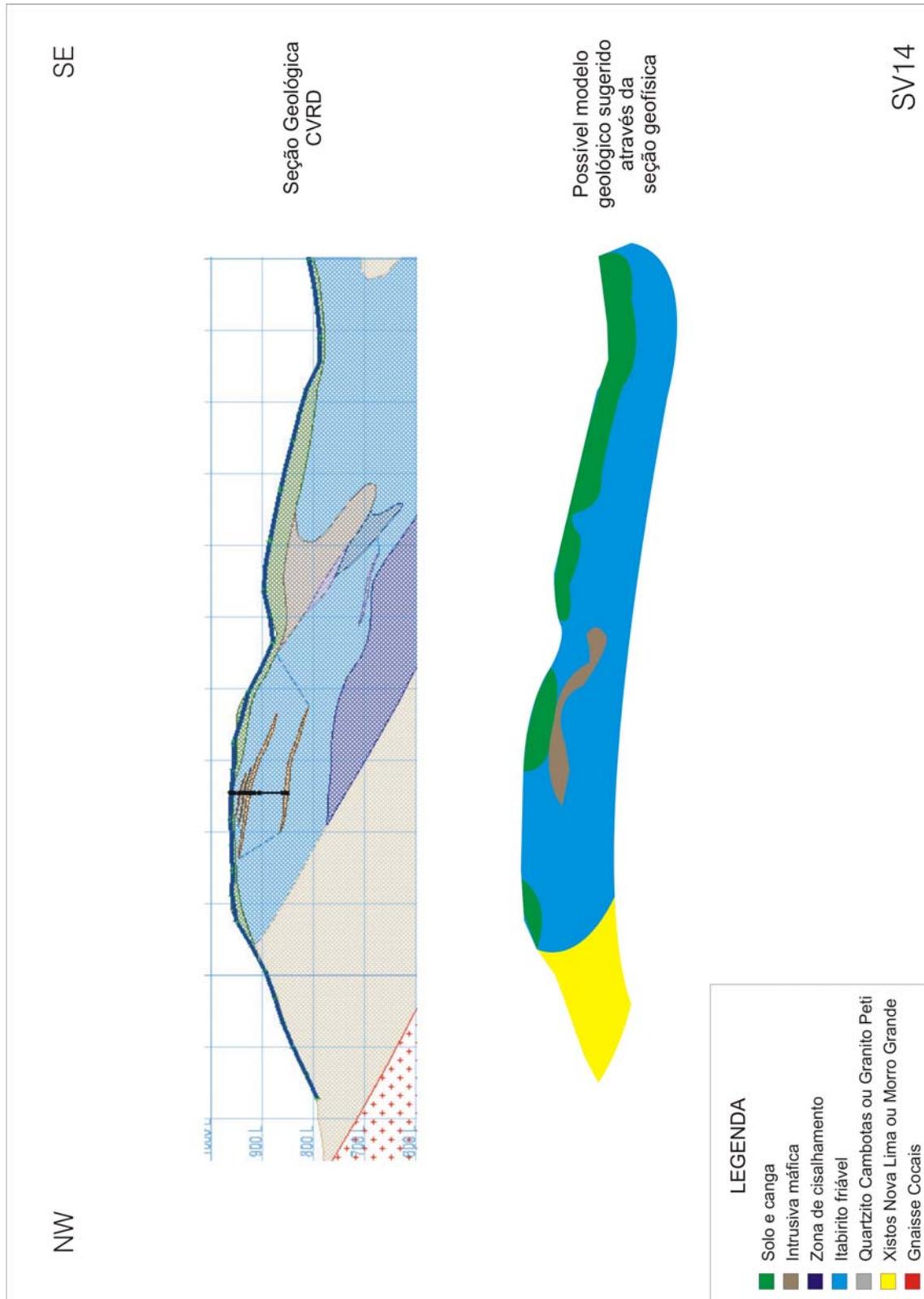


Figura 45. Modelos geológicos propostos para a Linha SV14.

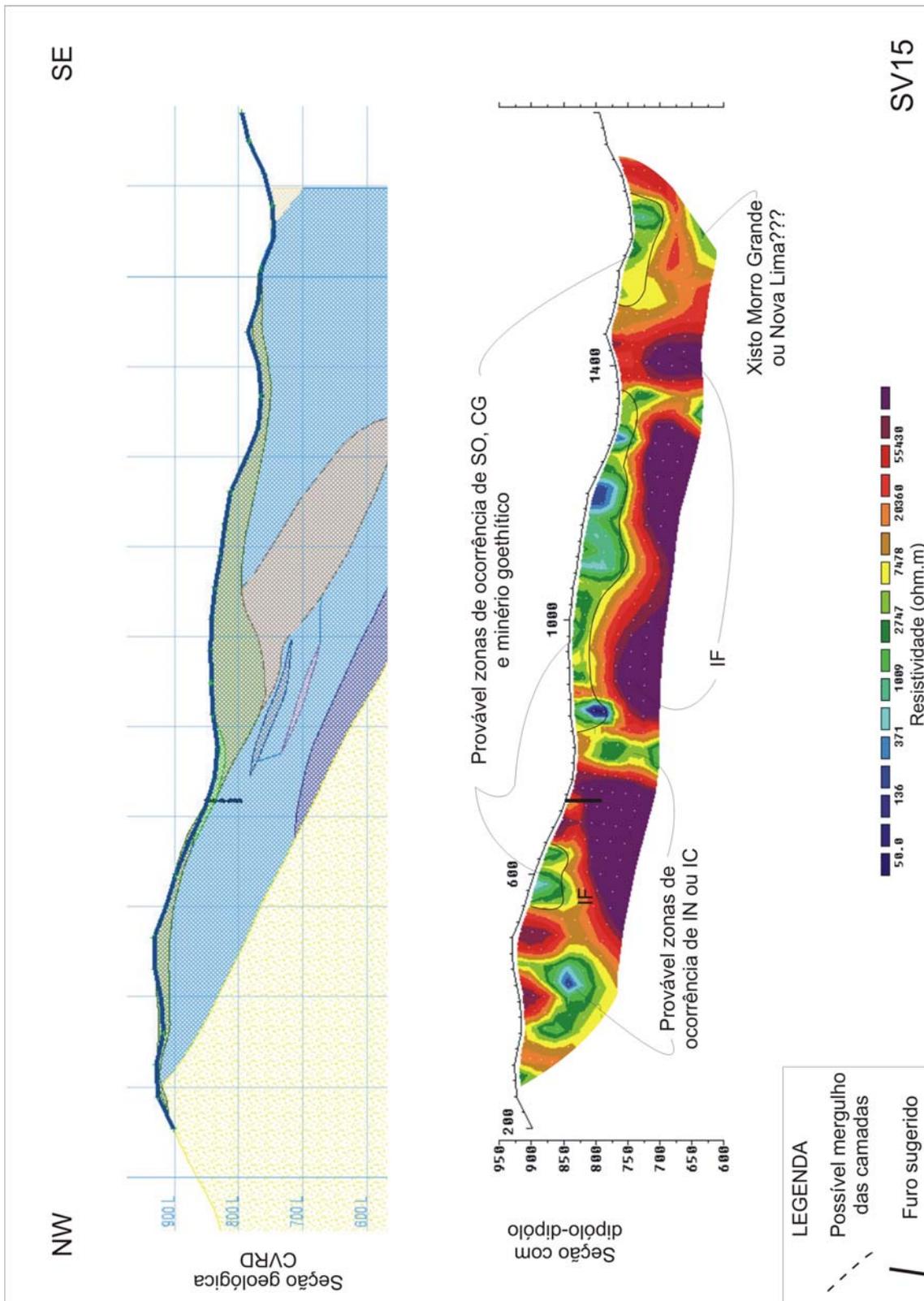


Figura 46. Linha SV15.

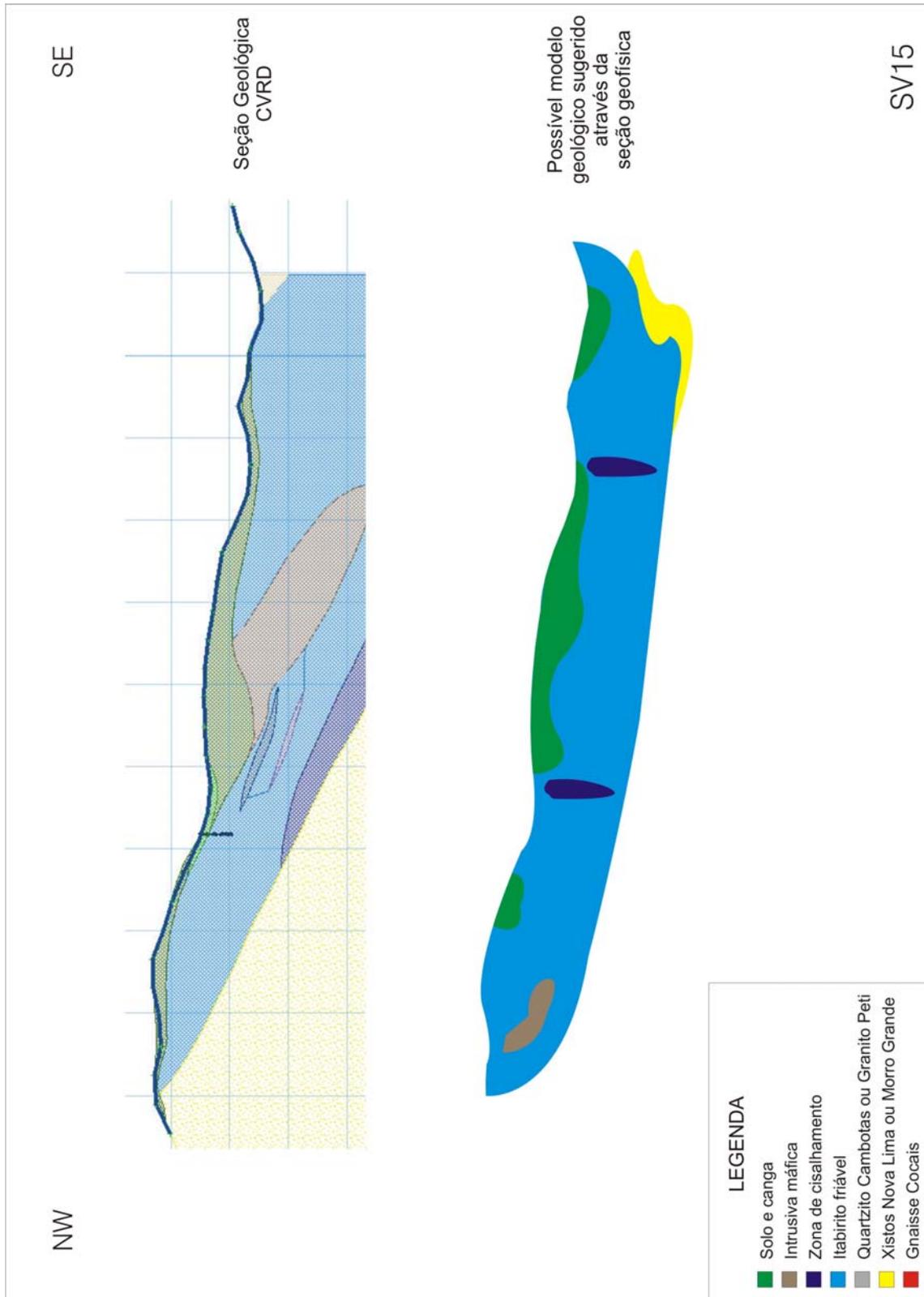


Figura 47. Modelos geológicos propostos para a Linha SV15.

4.2.3. Interpretação do modelo 3D de resistividade

Teoricamente, para se gerar um modelo 3D de subsuperfície, o ideal seria utilizar dados obtidos em uma aquisição de dados em 3D. Entretanto, na prática, isso geralmente não é possível e o que se faz é a inversão 3D de um conjunto de dados de linhas levantadas individualmente através da técnica de aquisição 2D.

No caso do presente trabalho, foram utilizados no processamento 3D os dados das 12 linhas geofísicas levantadas em 2003 (Linhas SV01, SV02, SV03, SV04, SV06, SV07, SV08, SV09, SV10, SV11, SV14 e SV15).

A figura 48 mostra o resultado do modelo 3D para diferentes profundidades de investigação (10, 30, 50, 70 e 90 metros). No geral, as anomalias estão alinhadas com orientação NE-SW, a mesma do Sinclinal Gandarela

Com o objetivo de analisar os resultados do modelo 3D foram gerados mapas geológicos da mina para diferentes profundidades. Nas figuras 48 e 49 estão apresentados dois destes mapas e os modelos 3D em camadas de profundidade.

Na figura 49 está apresentado o modelo 3D de resistividade para uma profundidade de 30 metros, assim como o mapa geológico da mina para esta mesma profundidade. A zona de ocorrência de solo argiloso da Formação Cata Preta e canga, delimitada em tracejado preto, coincide perfeitamente com uma anomalia com valores de resistividade entre 1000 e 5000 ohm.m.

Na figura 50, está apresentado o modelo 3D de resistividade para uma profundidade de 70 metros, assim como o mapa geológico da mina para uma profundidade de 40 metros. Além disso, alguns furos situados dentro da Mina do Brucutu também estão apresentados. Os pontos em preto, correspondem a sondagens que não ultrapassaram o limite do minério de ferro em profundidade, e os pontos em preto e branco, representam as sondagens que chegaram a ultrapassar o minério e entraram nos xistos da Formação Morro Grande ou do Grupo Nova Lima.

No modelo 3D aparecem muitas anomalias de baixa resistividade (valores menores que 3000 ohm.m) com orientação NE-SW que são provavelmente zonas de cisalhamento com ocorrência de corpos máficos intrusivos e de minério compacto. Além disso, está marcado no modelo, um grande lineamento NW-SW, que coincide com uma zona de rochas máficas intrusivas, às quais aparecem delimitadas no mapa geológico desta figura.

A zona de alta resistividade do modelo 3D, assim como ocorre nas seções 2D, ultrapassa os limites do minério estabelecidos nas seções e no mapa geológico. Principalmente na parte sul da mina, onde inclusive existem furos que apresentam minério raso, ocorrem grandes anomalias que podem estar relacionados à presença de itabirito friável. Por outro lado, caso não ocorra minério fora dos limites estabelecidos pela geologia da mina, para norte, a ocorrência de gnaiss do embasamento ou quartzito da Formação Cambotas e para sul, o Granito Peti ou ocorrência de quartzito da Formação Cambotas, poderiam explicar as anomalias de alta resistividade.

A figura 51 mostra os lineamentos que coincidem com anomalias de baixa resistividade, prováveis zonas de cisalhamento, sobre o mapa geológico da Mina do Brucutu. Os lineamentos marcados fora da mina, coincidem com zonas de contato tectônico entre diferentes litologias. Os lineamentos marcados na parte central da mina não podem ser considerados para correlação com possíveis contatos tectônicos, pois em grande parte desta área aflora solo e as pilhas de estéril, itabirito e hematita contaminada.

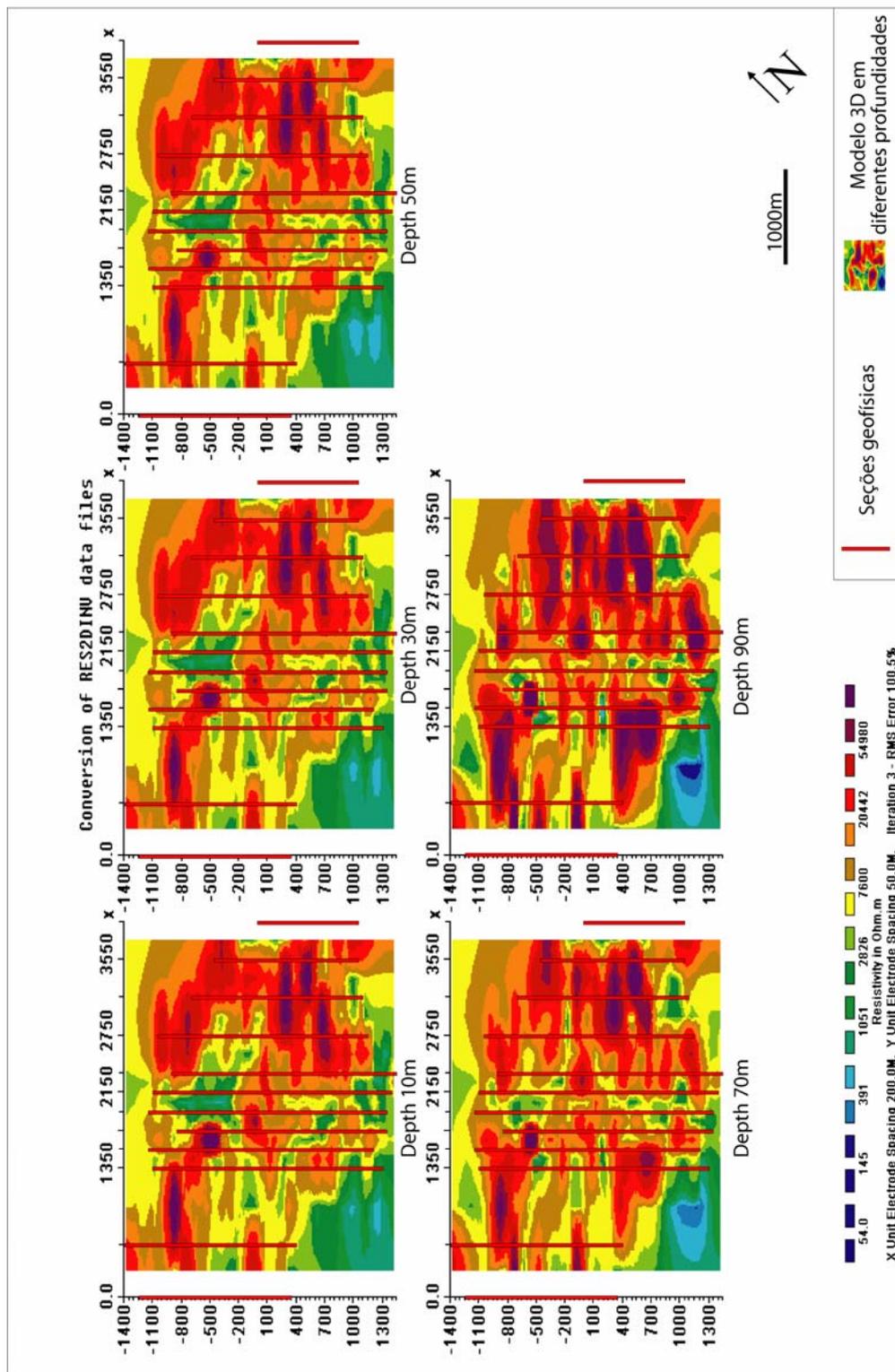


Figura 48. Resultado do modelo 3D para diferentes profundidades de investigação (10, 30, 50, 70 e 90 metros).

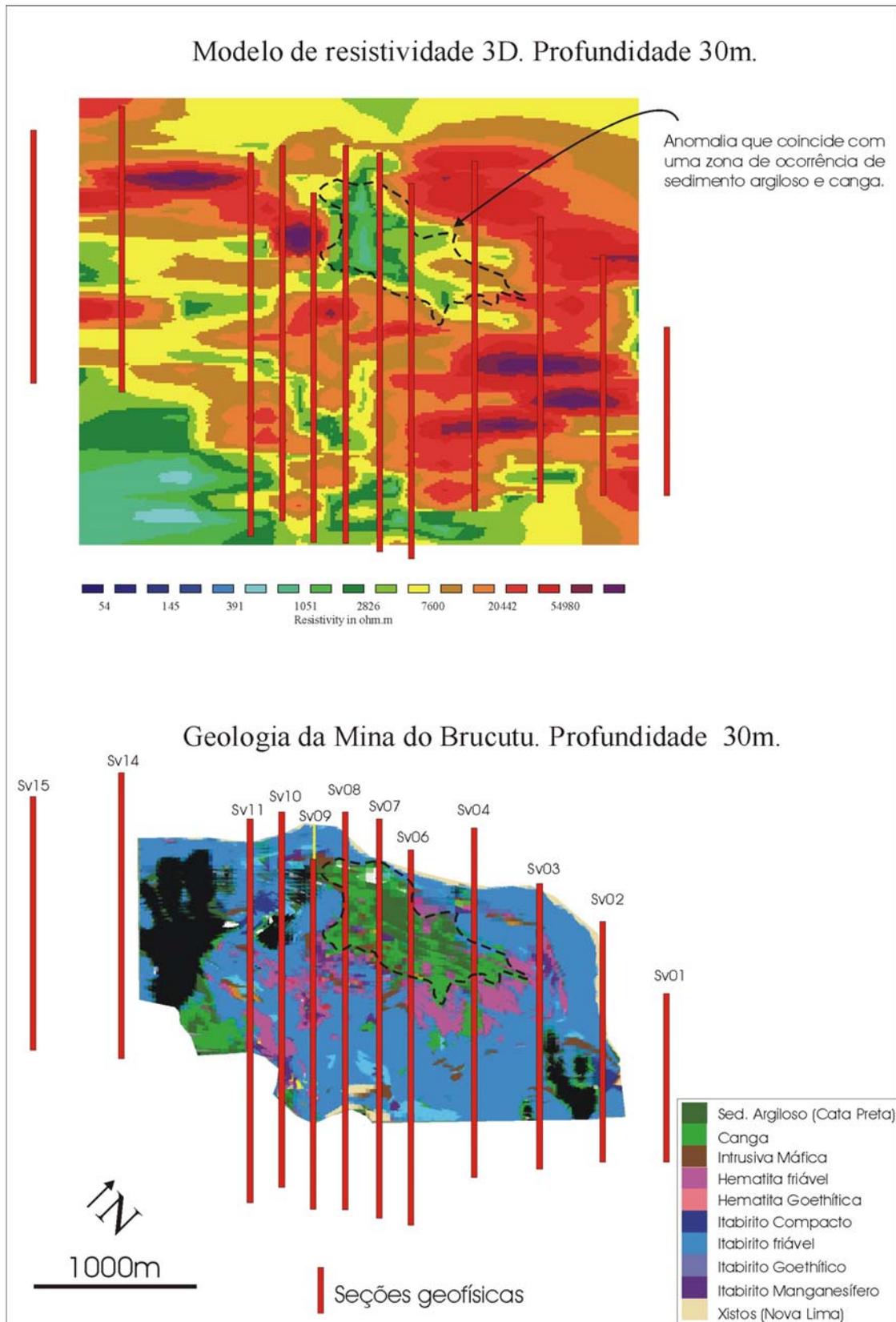


Figura 49. Modelo 3D de resistividade e mapa geológico da mina para uma profundidade de 30 metros.

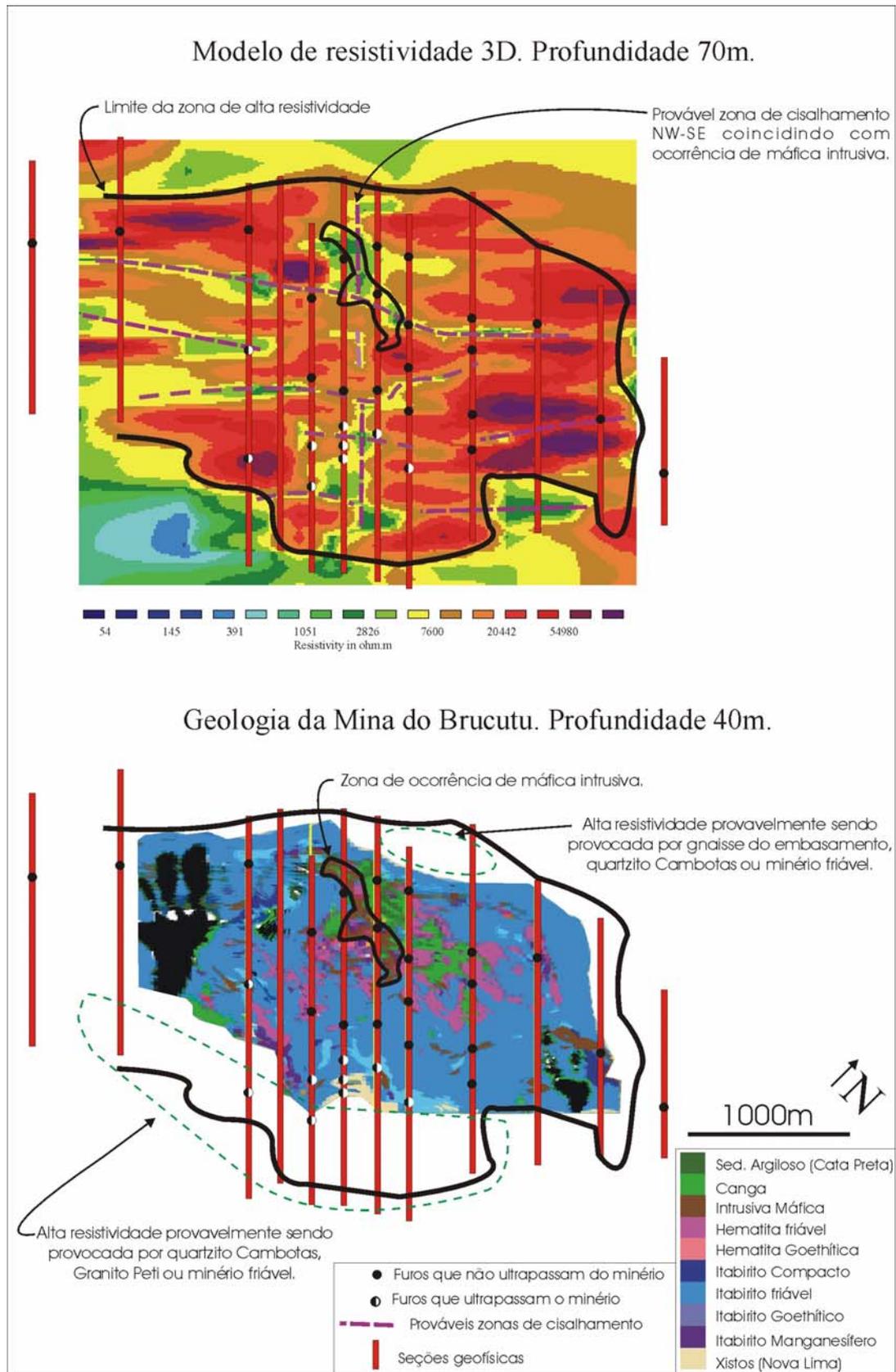


Figura 50. Modelo 3D de resistividade (profundidade 70 metros) e mapa geológico da mina (profundidade 40 metros).

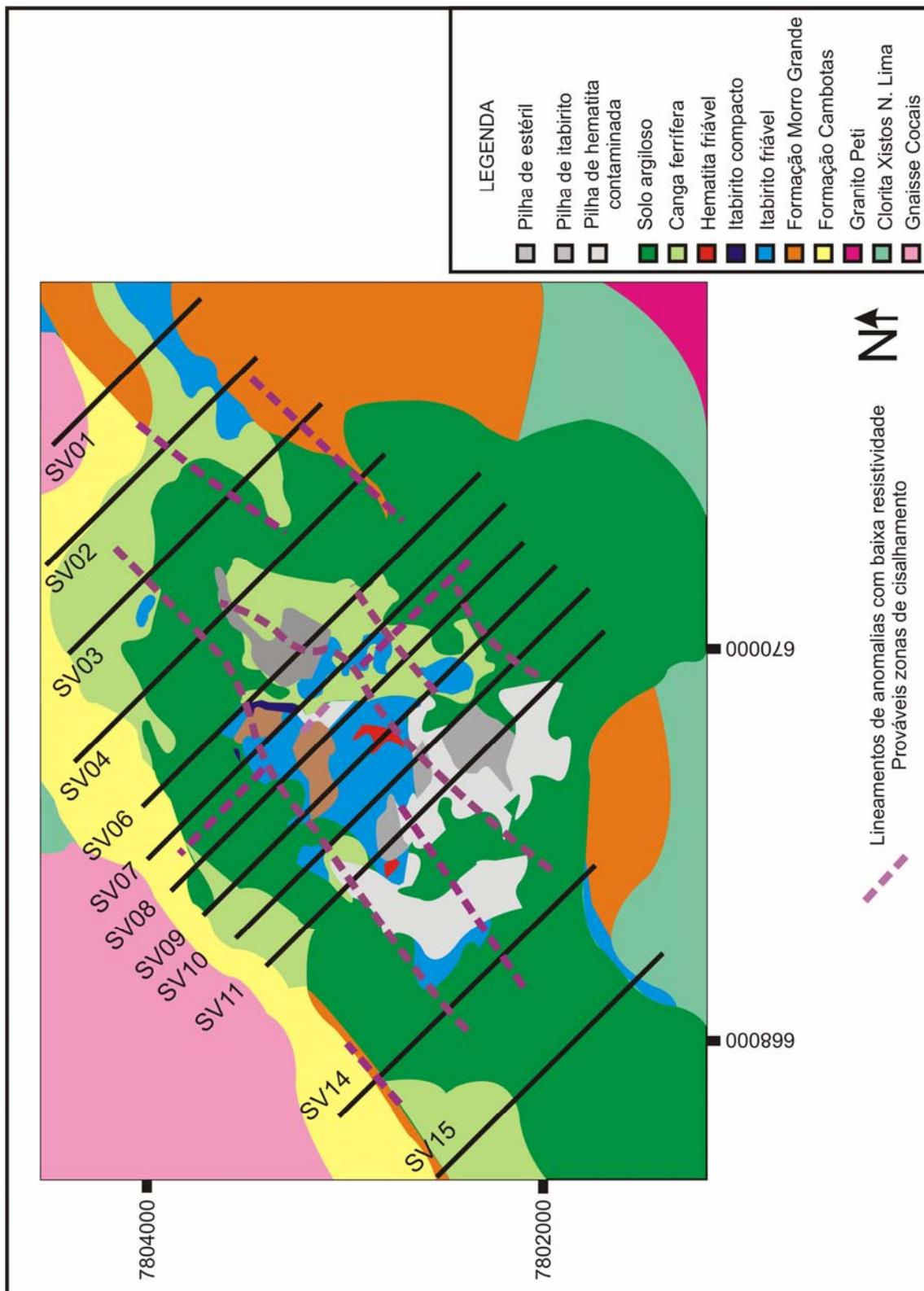


Figura 51. Mapa geológico da Mina do Brucutu com lineamentos marcados pela geofísica.

5. Conclusões

A partir da análise dos resultados foi possível fazer conclusões relacionadas às propriedades físicas das rochas, às modelagens 2D e 3D realizadas, às diferentes formas de processamento dos dados, à investigação de novos alvos e à avaliação do uso do método IP em áreas de ocorrência de minério de ferro.

Com relação às propriedades físicas das rochas existentes na Mina do Brucutu e arredores:

- O minério de ferro apresenta em geral resistividade e susceptibilidade magnética maior que as encaixantes.
- Itabirito friável apresenta resistividade bem maior que as demais litologias, inclusive que as apresentadas pelo itabirito compacto e semi-compacto. Os valores são normalmente maiores que 100.000 ohm.
- Embora o lençol freático não tenha sido alcançado no levantamento de IP de 2003, a sondagem elétrica realizada no itabirito friável saturado, onde aflora um lençol freático suspenso sobre rocha intrusiva máfica impermeável, permite que se considere o valor de resistividade para o mesmo bem inferior ao do itabirito seco. Os valores situam-se entre 5.000 e 15.000 ohm.m.
- Hematita compacta apresenta resistividade entre 5.000 e 6.000 ohm.m.
- Os xistos do Grupo Nova Lima e da Formação Morro Grande, o mármore dolomítico da Formação Gandarela, as rochas máficas intrusivas e os sedimentos argilosos da Formação Cata Preta apresentam resistividade mais baixa que o minério de ferro, principalmente se comparados ao itabirito friável seco.
- Quartzito da Formação Cercadinho apresenta alta resistividade, em torno de 60.000 ohm.m, que pode ser confundida com a resistividade do itabirito friável. Por outro lado, a susceptibilidade magnética do quartzito é muito menor.
- As rochas máficas intrusivas podem apresentar alta susceptibilidade magnética, devido a ocorrência de magnetita nessas rochas.

- Os xistos do Grupo Nova Lima ou da Formação Morro Grande e Cambotas, e o mármore dolomítico da Formação Gandarela apresentam baixa susceptibilidade magnética.
- O Gnaisse Cocais, o sericita xisto do Nova Lima e o filito prateado da Formação Cercadinho apresentam susceptibilidade magnética próxima de zero.
- Não foi possível caracterizar a cargabilidade das rochas devido à baixa qualidade dos dados do levantamento de IP e das medições em laboratório. A provável causa da baixa qualidade é a dificuldade de transmitir corrente tanto em campo, na área da mina, como nas amostras coletadas.

Com relação às modelagens 2D:

- Valores de resistividade e cargabilidade aparentes medidos no campo, não representam a real geologia de subsuperfície. A geração de um modelo 2D de valores verdadeiros pode ser a única forma de delimitar e determinar litologias e estruturas tectônicas de um depósito mineral.
- Com a interpretação dos modelos 2D foi possível delimitar as camadas de solo argiloso e canga, que normalmente ocorrem sobre o minério de ferro, e que apresentam resistividade menor que 2.500 ohm.m. Além disso, as camadas de itabirito friável normalmente apresentaram valores maiores que 50.000 ohm.m nas seções, valores que coincidem com o resultado das sondagens elétricas realizadas dentro da mina. Também foi possível identificar, principalmente nas linhas SV06 e SV07, as anomalias com valores de resistividade menores que 7.000 ohm.m, provocadas pelos xistos do Grupo Nova Lima ou da Formação Morro Grande, assim como zonas verticalizadas com resistividade menor que 7.000 ohm.m, que podem estar relacionadas a zonas de cisalhamento localizadas dentro da faixa mineralizada, que geralmente coincidem com a ocorrência de máfica intrusiva e itabirito compacto.

Com relação à modelagem 3D:

- O modelo 3D é importante na determinação das principais estruturas tectônicas e delimitação das diferentes litologias de uma jazida mineral.
- Na interpretação do modelo 3D foi possível identificar muitas anomalias alongadas com baixa resistividade, prováveis zonas de cisalhamento com direção NE-SW, e uma outra com orientação NW-SE.
- Foi possível correlacionar a zona de cisalhamento NW-SE com a ocorrência de rochas máficas intrusivas, além de delimitar uma zona de ocorrência de solo argiloso e canga situada na parte NW da mina.

Com relação ao uso de diferentes parâmetros de processamento:

- Para a escolha dos parâmetros é importante se ter uma noção da forma e tamanho dos alvos a serem investigados (orientação, espessura, etc), assim como fazer uma análise da qualidade dos dados de campo. Além disso, a informação de sondagens é muito importante para definição dos parâmetros. Neste trabalho, o uso das seções geológicas foi fundamental para definir a melhor combinação de parâmetros a serem utilizados nas inversões.
- Embora se tenha escolhido uma combinação de parâmetros como sendo a melhor de todas, com exceção da escolha de modelar os dados utilizando o valor direto da resistividade elétrica, utilizando o logaritmo da resistividade, todas as combinações geraram modelos semelhantes, com as mesmas anomalias, com pequenas diferenças. Utilizando o valor direto da resistividade na modelagem, a seção torna-se mais ruidosa, com falsas anomalias no modelo final.

Com relação à investigação de novos alvos:

- Tanto na análise das seções 2D, como na análise do modelo 3D, foi possível identificar que a zona de alta resistividade ultrapassa os limites do minério estabelecidos nas seções e no mapa geológico fornecidos pela CVRD. Existe, portanto, a possibilidade de ocorrência de minério nestes locais. Por outro lado, para norte, a anomalia poderia ter como fonte a presença de gnaisses do

embasamento ou do quartzito da Formação Cambotas, e para sul, as anomalias poderiam estar sendo provocadas por uma intrusão do Granito Peti ou pela presença de quartzito da Formação Cambotas.

- Foram sugeridos 14 furos a serem realizados, os quais estão marcados nas seções 2D (Figuras 23 a 34), que podem ajudar a esclarecer os questionamentos levantados no presente trabalho. As coordenadas destes furos, assim como a cota a ser atingidas nas perfurações, estão detalhadas na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7. Furos a serem realizados sugeridos após interpretação dos modelos 2D.

Furos	Linha	Coordenadas	Cota a ser perfurada (m)	Provável litologia
F1	SV01	671320/7804115	760	IF ou quartzito
F2	SV01	671152/7804283	760	IF, quartzito ou gnaisse
F3	SV02	671328/7803541	750	IF, ou quartzito
F4	SV02	670621/7804248	670	IF, quartzito ou gnaisse
F5	SV03	670978/7803325	660	IF ou quartzito
F6	SV04	670582/7803157	670	IF ou quartzito
F7	SV04	669582/7804155	770	IF, quartzito ou gnaisse
F8	SV06	670419/7802753	540	IF, quartzito ou granito
F9	SV07	670169/7802720	530	IF, quartzito ou granito
F10	SV08	670044/7802564	500	IF, quartzito ou granito
F11	SV08	670274/7802333	580	IF, quartzito ou granito
F12	SV09	670118/7802207	580	IF, quartzito ou granito
F13	SV10	-	580	IF, quartzito ou granito
F14	SV11	669490/7802267	580	IF, quartzito ou granito

Com relação à aplicação do método IP em áreas de prospecção de ferro:

- Considerando que a qualidade dos dados de cargabilidade na área estudada é muito baixa, devido, sobretudo, as dificuldades de transmitir corrente sobre altíssima resistência de contato, onde aflora o minério de ferro friável; e, considerando que ao final os dados que de fato são utilizados na delimitação do minério e das estruturas, com bons resultados são os valores de resistividade elétrica, é possível concluir que para investigação em áreas de minério de ferro, como a da Mina do Brucutu, a técnica de Imageamento Elétrico 2D seria a melhor solução. No Imageamento Elétrico 2D, são utilizados equipamentos com aquisição automática de dados, o que possibilita que se faça uma quantidade muito maior de leituras do que se consegue fazer nos levantamentos tradicionais de IP. Embora nos levantamentos de Imageamento Elétrico seja medida somente a resistividade elétrica das rochas, ela pode ser muito prática e útil em áreas como a da Mina do Brucutu, pois o minério de ferro apresenta em geral resistividade maior que as encaixantes, principalmente se compararmos as altíssimas resistividades do itabirito friável (valores maiores que 100.000 ohm) com as baixas resistividades dos xistos (clorita xistos, sericita xistos) do Grupo Nova Lima e da Formação Morro grande (valores menores que 3.000 ohm.m). Na Figura 52, estão apresentadas as medidas realizadas em um levantamento de IP tradicional, utilizando arranjo dipólo-dipólo, com seis níveis e espaçamento entre eletrodos de 60 metros, assim como as medições realizadas com a técnica do imageamento elétrico com espaçamento entre eletrodos de 10 metros. O tempo que se leva para fazer os dois levantamentos é bastante parecido, mas a quantidade de medidas no imageamento elétrico é bem maior. Com a utilização desta técnica os modelos 2D e 3D seriam bem mais precisos que os mesmos modelos gerados com dados adquiridos em levantamento de IP tradicional.
- A aplicação da magnetometria e da gravimetria associada ao Imageamento Elétrico 2D ajudaria na definição das diferentes litologias e estruturas associadas. A magnetometria permitiria diferenciar o minério do gnaissé Cocais, do quartzito Cambotas e do granito Peti. A gravimetria permitiria

identificar corpos de minério compacto dentro das camadas de minério friável, bem como provavelmente, diferenciar o minério das encaixantes.

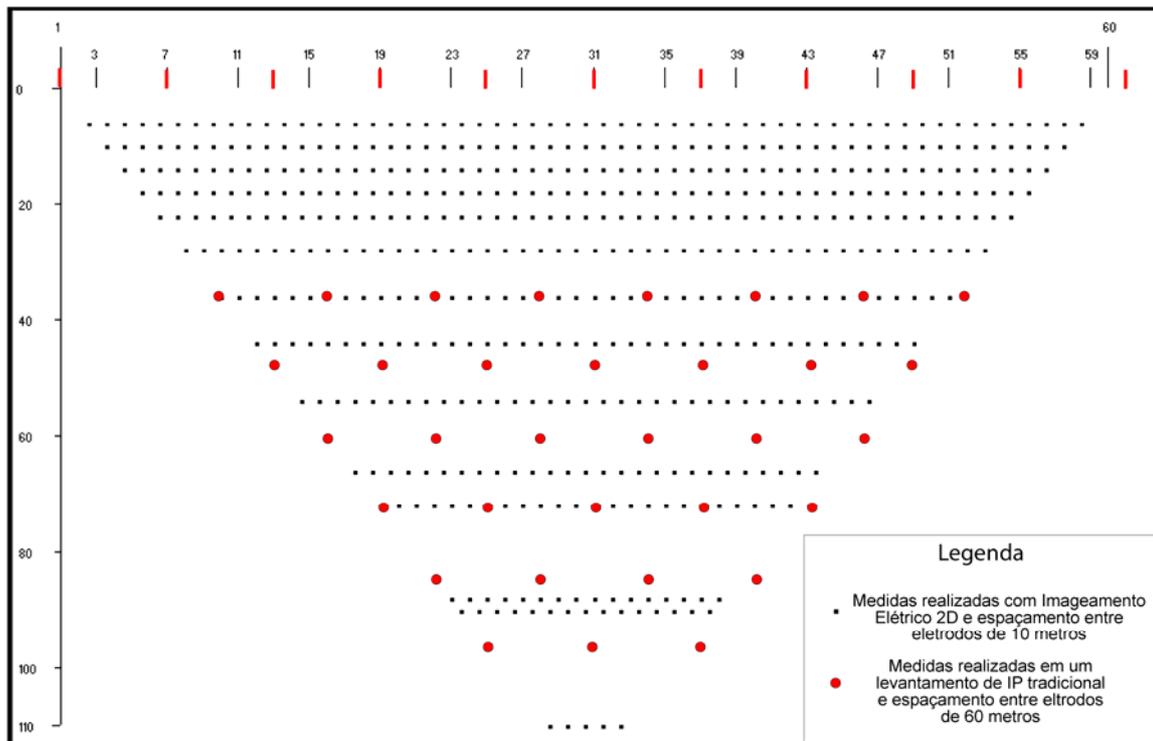


Figura 52. Comparação entre a quantidade de medidas realizadas através de levantamento de IP tradicional e da técnica de imageamento elétrico 2D.

6. Referências bibliográficas

ALMEIDA L. G., ENDO I., FONSECA M. A. 2002. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, p.615;

ALMEIDA L. G.; CASTRO P. T.; ENDO I.; FONSECA M. A. 2003. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica. Rev. Bras. Geoc. (Submetido).

APPARAO, A. 1991. Geoelectric profiling. *Geoexploration*. 27 : 351-389.

BABINSKI M.; CHEMALE F. Jr.; SCHUMUS W. R. 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3. São Paulo, 1991. Anais ... São Paulo, SBGq. 2, p.628-630;

CARNEIRO M. A. 1992. O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano. São Paulo. 233p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo);

CHEMALE Jr, F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Um modelo. *Pesquisas UFRGS, Porto Alegre*, 18(2) : 104-127

CHEMALE F. Jr.; ROSIÈRE C. A.; ENDO I. 1992. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: um modelo. *Pesquisas*, 18(2): 104-127;

CHEMALE F. Jr.; ROSIÈRE C. A.; ENDO, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Prec. Res.*, 65:25-54;

COSTA A. F. da. 1992. Feições microestruturais das rochas do Complexo Granito-Gnássico Caeté no contato com o Grupo Nova Lima na região de Caeté, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Rev. Esc. Minas*, 45(1/2): 35-37;

DEGROOT-HEDLIN, C., CONSTABLE, S.C., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55 : 1613-1624.

DORR J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil . USGS/DNPM. Professional Paper 641-A. 110p;

DUSSIN, I. A. 1994. Evolution structurale de la region de l'Espinhaço meridional, bordure sud-est du craton São Francisco, Brésil. 250p. (Tese de Doutorado, Universite D'Orleans).

EDWARDS, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42 : 1020-1036.

ENDO I. & CHEMALE . F. Jr. 1991. Implicações tectônicas das estruturas extensionais no Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS., 3. Rio Claro, 1991. Anais Rio Claro, SBG/Núcleo São Paulo. p.51-53;

ENDO I. & NALINI H. A. Jr. 1992. Geometria e cinemática das estruturas extensionais e compressionais na borda oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero. *Rev. Esc. Minas*, 45(1/2): 15-17;

ENDO I. 1997. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais. São Paulo. 243p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).

ENDO I. & MACHADO R. 2002. Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da região do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. *Rev. do Inst. de Geoc. – USP, Geol. USP Sér. Cient.*, São Paulo, v.2, p23-40.

ENDO I., SILVA L. G., ZAVAGLIA, G. 2004. Mapeamento Geológico, Estratigrafia e arcabouço estrutural. Projeto Brucutu – Dois Irmãos. Relatório interno – CVRD–UFOP.

FIGUEIREDO M. C. H. & TEIXEIRA W. 1996. The Mantiqueira Metamorphic Complex, eastern Minas Gerais state: preliminary geochronological and geochemical results. *An. Acad. Bras. Cien.*, 68(2): 223-246;

GOMES C. J. S. 1985. Strukturelle und textuelle untersuchungen im Bação Komplex und seinen rahmengesteine, Eisernes Viereck. Clausthal. 190p. (Tese de Doutorado, Technischen Universität Clausthal);

GOMES C. J. S. 1986. Estudos estruturais e texturais no Complexo de Bação e nos metassedimentos adjacentes, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Goiânia, 1986. Anais. Goiânia, SBG. 3, p.1232-1245;

GOMES C. J. S. 1989. Estudos microtexturais nos xistos Nova Lima, na borda do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas gerais. *Rev. Esc. Minas*, 42:3-6;

GRIFFITHS, D.H. and BARKER, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29 : 211-226.

HASHIZUME, B. K., 1998. Texturas e microestruturas do minério de ferro da Mina do Brucutu, NE do Sinclinal de Gandarela (MG). Dissertação de mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Minas Gerais.

HERZ N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil . USGS/DNPM. Professional Paper 641-B. 57p;

LIPSKI M. 2002. Tectonismo Cenozóico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Ouro Preto-MG. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 171p;

LOKE, M.H. & BARKER, R.D.,1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44 : 131-152.

LOKE, M.H. & BARKER, R.D.,1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44 : 499-523.

LOKE, M.H., 1999. Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Eml.

LOKE, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.

LOKE, M.H., 2002. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.

LOKE, M.H. & DAHLIN, T., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49 : 149- 162.

MAIZATTO J.R. 2001. Análise bioestratigráfica, paleoecológica e sedimentológica das bacias terciárias do Gandarela e Fonseca - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, com base nos aspectos palinológicos e sedimentares. 333p. (Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto);

MARSHAK S.; ALKMIM F. F.; EVANGELISTA H. J. 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome and keel structure in an granite-greenstone terrane. *Nature*, 357:491-493;

MAXWELL C. H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria district, Brazil. Washington, USGS/DNPM. Professional Paper 341J. 72p;

OLIVO G. R.; GAUTHIER M.; GARIÉPY C.; CARIGNAN J. 1996. Transamazonian tectonism and Au-Pd mineralization at the Cauê Mine, Itabira District, Brazil: Pb isotopic evidence. *Jour. South Am. Earth Sci.*, 9(3/4): 273-279.

ORELLANA, E., 1972. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Paraninfo, Madrid. Espana.

PARASNIS, D. S., 1973. *Mining Geophysics.*, 160-224.

PELTON, W. H., WARD, S. H. HALLOF, P. G., GILL, W. R. and NELSON, P. H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP. *Geophysics*, 43 : 588-609.

RENGER F. E.; NOCE C. M.; ROMANO A. W.; MACHADO, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1): 1-11;

SCHORSCHER H. D. 1978. Komatiitos na estrutura greenstone belt da Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Recife, 1978. Anais Recife, SBG. 1, p.292-293;

SIMMONS G. C. & MAXWELL C. H. 1961. Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas. Rio de Janeiro, DNPM/DGM. Boletim. 211. 30p.

WARD, S. H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. Investigations investigations in geophysics num 5, Geotechnical and Environmental Geophysics. SEG, 1990.

ZABLOCKI, C. J. Electrical properties of some iron formations and adjacent rocks in the Lake Superior Region. *Mining Geophysics*. SEG 1966.

ZONGE, K. L.; SAUCK, W. A. and SUMMER, J. S. 1972. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization. *Geophysical Prospecting* 20 : 626-648.

7. Anexos (relatório de campo com fotos)

Convênio CVRD - UFRGS

Relatório de Campo do Mestrado – SEMESTRE I

Aluno Rodrigo Tusi Costa

Orientadores Farid Chemale e Issamu Endo

Julho de 2005

Introdução

Entre os dias 13 e 27 de julho de 2005 foi realizado o trabalho de campo do mestrado, na área da Mina do Brucutu e arredores, no município de Barão de Cocais, MG.

Objetivos do trabalho de campo

O trabalho teve como objetivos:

- 1 – Reconhecimento das principais unidades geológicas.
- 2 – Coleta de amostras em testemunho de sondagens, e em campo, para medições em laboratório de resistividade elétrica, cargabilidade e susceptibilidade magnética.
- 3 – Realização de medições em campo de resistividade elétrica e susceptibilidade magnética.
- 4 – Aquisição de informações atualizadas sobre a geologia da Mina do Brucutu (descrição de furos de sondagens, seções geológicas, mapas, etc) para correlacioná-las com as seções reprocessadas de resistividade e cargabilidade levantadas pela empresa AFC Geofísica Ltda no ano de 2003.

Metodologia

Após o reconhecimento em campo das principais unidades geológicas, foram escolhidos os melhores afloramentos para a realização de medições de resistividade elétrica e susceptibilidade magnética, e coleta de amostras para posterior análise em laboratório.

As medições de resistividade elétrica foram realizadas com um equipamento manual (transmissor e receptor), através da técnica da sondagem elétrica vertical, arranjo schlumberger; e as medições de susceptibilidade magnética, foram realizadas em unidade CGS, com um equipamento modelo GMS-2, fabricado pela GEOINSTRUMENTS, fornecido pela Companhia Vale do Rio Doce.

A coleta de amostras em testemunhos de sondagens foi realizada em três furos localizados na Mina do Brucutu. O primeiro, situado na porção oeste

(FDBR0062), o segundo na porção central (FDBR0038) e o terceiro na porção leste da mina conhecida como gralhos (FDBR0003).

Cronograma de campo e atividades realizadas

Dias 13 e 14 de julho – Reconhecimento das principais unidades geológicas acompanhado dos professores orientadores Farid Chemale e Issamu Endo.

Dia 15 de julho – Descrição dos furos FDBR0003, FDBR0038 e FDBR0062 acompanhado dos professores orientadores.

Dia 18 de julho – Coleta de amostras nos furos de sondagem FDBR0003, FDBR0038 e FDBR0062, para posterior análise em laboratório de resistividade elétrica, cargabilidade e susceptibilidade magnética. Na tabela 1 estão apresentadas as amostras coletadas.

Amostra	Furo	Profundidade	Litologia	Grau de Alteração	Susceptibilidade Magnética (CGS)
1	FDBR0003	326,6 a 326,9	Quartzito	alto	20-30 (*10 ⁻⁶)
2	FDBR0003	287,6 a 287,8	ISC	baixo	900-1700 (*10 ⁻⁶)
3	FDBR0003	261 a 261,35	IC	não	3000-6000 (*10 ⁻⁵)
4	FDBR0003	250 a 250,35	IC	não	3000-4000 (*10 ⁻⁶)
5	FDBR0038	393,5 a 393,7	Xisto quartzoso	não	0-10 (*10 ⁻⁶)
6	FDBR0038	388,9 a 389,1	Xisto quartzoso c/ magnetita	não	3000 (*10 ⁻⁶) – 3000 (*10 ⁻⁵)
6a	FDBR0038	378,8 a 379	Xisto quartzoso	médio	≅ 40 (*10 ⁻⁶)
7	FDBR0038	360 a 360,2	Xisto quartzoso	alto	≅ 30 (*10 ⁻⁶)
8	FDBR0038	337,4 a 337,6	ISC	baixo	100-500 (*10 ⁻⁶)
9	FDBR0038	303 a 303,3	IF	não	-
10	FDBR0062	325 a 325,2	Filito	não	20-70 (*10 ⁻⁶)
11	FDBR0062	320,6 a 320,8	Filito c/sulfetos	não	≅ 350 (*10 ⁻⁶)
12	FDBR0062	322,8 a 323	Filito c/sulfetos	não	500-800 (*10 ⁻⁶)
13	FDBR0062	312,2 a 312,4	IC c/magnetita	não	4000-8000 (*10 ⁻⁵)
14	FDBR0062	306,8 a 307	IC	não	2000-5000 (*10 ⁻⁶)

15	FDBR006 2	305,1 a 305,3	Veio de quartzo no IC	não	$\cong 50 (*10^{-6})$
16	FDBR006 2	289,8 a 290,1	IC c/magnetita	não	2000-8000 ($*10^{-5}$)
16a	FDBR006 2	302,7 a 302,4	IC	não	-
17	FDBR006 2	283,2 a 283,4	HC	não	$\cong 250 (*10^{-6})$
18	FDBR006 2	276 a 276,1	I contaminado	médio	$\cong 5000 (*10^{-5})$
19	FDBR006 2	263,7 a 263,9	Intrusiva máfica	Não	4000-8000 ($*10^{-6}$)
20	FDBR006 2	247,4 a 247,5	IC c/boxworks	Baixo	1000-3000 ($*10^{-5}$)
21	FDBR006 2	246,7 a 246,8	Intrusiva máfica	Médio	800-1200 ($*10^{-6}$)
22	FDBR006 2	244,5 a 244,6	Intrusiva máfica	Alto	300-400 ($*10^{-6}$)
23	FDBR006 2	223,1 a 223,2	ISC	Baixo	$\cong 1500 (*10^{-5})$

Tabela 8. Amostras coletadas nos testemunhos de sondagens dos furos FDBR0003, FDBR0038 e FDBR0062.



Foto 1. Coleta de amostras para análise em laboratório.

Dia 19 de julho – Foram visitados três locais distintos. O primeiro situado em Barão de Cocais, é um grande afloramento de IC em contato com os xistos da Formação Morro Grande. O segundo, na pedreira Itamix, afloram os gnaisses do embasamento. O terceiro e último do dia, é um afloramento em corte de estrada próximo à pedreira, onde ocorrem em um mesmo afloramento, clorita xistos, sericita xistos e formação ferrífera (todos provavelmente do Grupo Tamanduá ou Nova Lima) em contato com os itabiritos da Formação Cauê.

Afloramento de IC em Barão de Cocais (7796540/658011) – Fotos 2 e 3

Amostra - AC1

Susceptibilidade magnética – Ocorrem em média valores entre 1000 e 3000 ($*10^{-5}$), mas ocorrem localmente valores menores (em torno de $1000 *10^{-6}$) e maiores (em torno de $6000 *10^{-5}$).

Resistividade elétrica – A medição foi feita na parede do afloramento, e os eletrodos colocados quase paralelamente à foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	800	0,5	1600	12064
1,25	0,2	450	1,0	450	5377
1,5	0,2	650	2,0	325	5638
2	0,2	97	0,2	485	15078

Tabela 9. Valores de resistividade aparente medidos em IC. Sondagem elétrica vertical 1 (SEV 1).



Foto 2



*Foto 3***Afloramento de xisto alterado da Formação Morro Grande, em Barão de Cocais (7796540/658011) – Foto 4**

Amostra – AC2

Susceptibilidade magnética – Predominam valores entre 30 e 200 ($\cdot 10^{-6}$), mas ocorrem localmente zonas com valores mais altos, entre 800 e 1500 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita na parede do afloramento, e os eletrodos colocados quase perpendicularmente à foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	6200	4	1550	11687
1,25	0,2	3970	4	992	11860
1,5	0,2	2310	3	770	13359
2	0,2	1370	4	342	10648

Tabela 10. Valores de resistividade aparente medidos em afloramento de xisto da Formação Morro Grande. SEV 2.



Foto 4

Afloramento de gnaiss do embasamento situado na Pedreira Itamix – Fotos 5 e 6

Amostra – AC3

Susceptibilidade magnética – O valor medido é zero.

Resistividade elétrica - A medição foi feita em uma bancada com solo arenoso e cascalhoso com espessura em torno de meio metro, sobre o gnaiss aparentemente são.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	2100	15,0	140,0	1055
1,5	0,2	900	11,5	78,3	1357
2	0,2	730	13,5	54,1	1681
2,5	0,2	880	21,5	40,9	1995
3	0,2	580	16,0	36,3	2549
4	0,2	275	9,8	28,1	3515
5	0,2	180	8,0	22,5	4408

6	0,2	130	7,0	18,6	5242
8	0,2	95	7,0	13,6	6814
10	0,2	53	5,0	10,6	8317
12,5	0,2	51	8,0	6,4	7817
15	0,2	37	8,0	4,6	8163
20	0,2	13	5,0	2,6	8161

Tabela 11. Valores de resistividade aparente medidos em afloramento de gnaiss do embasamento. SEV 3.



Foto 5. Pedreira Itamix.



Foto 6. Detalhe da bancada onde foi realizada a SEV 3.

Afloramento de clorita xisto em corte de estrada próxima da entrada da Pedreira Itamix (7801008/662394) – Foto 7

Amostra – AC4

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam entre 0 e 60 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita na parede da rocha. A foliação varia muito, mas predomina a orientação paralela com relação aos eletrodos colocados.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	1400	9	155	1172
1,25	0,2	66	6	11	131
1,5	0,2	36	4	9	156
2	0,2	74	15	4,93	153
2,5	0,2	61	28	2,18	106
3	0,2	90	58	1,55	109

Tabela 12. Valores de resistividade aparente medidos em clorita xisto. SEV 4.



Foto 7. Detalhe da medição de resistividade no afloramento de clorita xisto.

Afloramento de sericita xisto em corte de estrada próxima da entrada da Pedreira Itamix (7801008/662394)

Amostra – AC5

Susceptibilidade magnética – O valor medido é zero.

Resistividade elétrica - A medição foi feita na parede da rocha.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	240	4,0	60,0	452
1,25	0,2	130	3,5	37,1	444
1,5	0,2	52	2,0	26,0	451
2	0,2	11,5	1,0	12,8	357
2,5	0,2	16	2,0	8,0	390
3	0,2	2,8	0,9	3,1	219

Tabela 13. Valores de resistividade aparente medidos em sericita xisto. SEV 5.

⇒Foi coletada nesse mesmo afloramento uma amostra de HC da Formação Cauê.

Dia 20 de julho – Foram visitados três locais distintos. O primeiro foi um grande afloramento do Granito Peti, o segundo, um afloramento de itabirito semi-friável contaminado, e o terceiro, blocos de quartzito ferruginoso do Grupo Piracicaba, Formação Cercadinho.

Afloramento do Granito Peti (7801050/671740) – Foto 8

Amostra – AC7

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam entre 0 e 30 ($*10^{-6}$), embora ocorram localmente valores de até 200 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em cima de um grande bloco de granito (em torno de 8 metros de altura). Sobre a rocha sã, onde foram cravados os eletrodos, ocorre alguns centímetros de um solo arenoso seco, produto da alteração do granito. Nas distâncias de AB/2 iguais a 6,0 e 8,0 metros não foi possível cravar os eletrodos para fazer a leitura.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	2800	0,8	3500	26390
1,25	0,2	2000	1,0	2000	23900
1,5	0,2	1700	1,9	894	15523
2	0,2	1110	2,0	555	17254
2,5	0,2	530	2,0	265	12918
3	0,2	435	2,0	217	15298
4	0,2	340	3,0	113	14195
5	0,2	170	2,1	81	15861
10	0,2	44	5,0	8,87	6905
12,5	0,2	160	6,0	26,7	32691

Tabela 14. Valores de resistividade aparente medidos no Granito Peti. SEV 6.



Foto 8. SEV 6 realizada sobre um bloco do granito Peti.

Afloramento de itabirito semi-friável (7804178/6726027) – Foto 9

Amostra – AC8

Susceptibilidade magnética – Predominam valores medidos na escala 10^{-5} , mas variam de 9000 ($*10^{-6}$) a 3000 ($*10^{-5}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte de estrada, na parede da rocha, e perpendicular à foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	3400	1,0	3400	25636
1,25	0,2	1800	1,0	1800	21510
1,5	0,2	1100	1,9	578	10044
2	0,2	490	2,0	245	7617
2,5	0,2	162	1,5	108	5265
3	0,2	100	2,0	50	3517
4	0,2	27	1,3	20,8	2602

Tabela 15. Valores de resistividade aparente medidos em itabirito semi-friável. SEV 7.



Foto 9. Detalhe do afloramento de itabirito semi-friável. SEV 7.

**Afloramento de quartzito ferruginoso da Formação Cercadinho (7801329/666599)
– Fotos 10 e 11**

Amostra – AC9 – Amostra coletada em blocos moderadamente alterados situados na subida do morro a uns 30 metros da estrada.

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam entre 0 e 50 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte de estrada A rocha apresenta-se bastante alterada, formando um solo quartzoso.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	9100	1,0	9100	68614
1,25	0,2	10500	2,0	5250	62737

1,5	0,2	7200	2,0	3600	62460
2	0,2	2800	1,4	2000	62180
2,5	0,2	1800	1,5	1200	58500
3	0,2	1300	1,5	866	60961

Tabela 16. Valores de resistividade aparente medidos em quartzito ferruginoso da Formação Cercadinho. SEV 8.



Foto 10. Afloramento de quartzito ferruginoso. SEV 8.



Foto 11. Detalhe do afloramento de quartzito ferruginoso.

Dia 21 de julho – Foram visitados três locais distintos. O primeiro situado na região de gralhos onde ocorre camadas de canga e um grande afloramento de HC (não foi possível medir por causa de abelhas, só coletar amostra). O segundo afloramento, também na região de gralhos, é um extenso lajeado de HC ou uma canga muito rica em HC. O último ponto medido foi dentro da mina: IF saturado próximo ao banco 880 (o nível d'água aflora pela ocorrência de corpos horizontalizados de máfica intrusiva que atuam como impermeabilizantes, o nível d'água verdadeiro ocorre a 300 metros de profundidade).

Afloramento de canga muito próximo de um bloco de HC que não pôde ser medido (7804244/670976) – Fotos 12, 13 e 14

Amostra – AC11

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam na média entre 50 e 100 ($*10^{-6}$), mas os blocos de HC que ocorrem dentro da canga chegam a atingir 400 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte de estrada, na parede da canga, que apresenta-se seca e preenchida por centimétricos blocos de HC.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	4000	1,5	2666	20106
1,25	0,2	2600	1,5	1733	20713
1,5	0,2	1500	1,7	882	15308
2	0,2	870	1,0	870	27048
2,5	0,2	470	0,9	522	25458
3	0,2	240	1,0	240	16881

Tabela 17. Valores de resistividade aparente medidos na canga ferrífera. SEV 9.



Foto 12. Afloramento de canga em corte de estrada. SEV 9.



Foto 13. Detalhe do afloramento. Ocorrência de blocos centimétricos de HC. SEV 9.

⇒ No corpo de HC (Foto 14) que não pôde ser realizada a sondagem elétrica, foi coletada uma amostra (AC10) e os valores de susceptibilidade magnética medidos na parede do corpo variaram entre 30 e 100 (10^{-6}).



Foto 14. Corpo de HC que não pôde ser medido pela presença de abelhas.

Afloramento de HC ou canga muito rica em HC (7804231/670205) – Foto 15

Amostras – AC12 ($\cong 400 \cdot 10^{-6}$) e AC13 ($\cong 3000 \cdot 10^{-6}$)

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam na média entre 100 e 600 ($\cdot 10^{-6}$), mas ocorrem zonas com valores mais altos de até 4000 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita sobre vegetação rasteira em um lajeado de HC ou canga muito rica em HC.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	3200	4,0	800	6032
1,25	0,2	3200	6,5	492	5883
1,5	0,2	2200	7,0	314	5452
2	0,2	420	2,0	210	6528
2,5	0,2	580	5,0	116	5655
3	0,2	510	6,0	85	5978
4	0,2	116	2,1	55	6920
5	0,2	105	3,5	30	5878
6	0,2	90	4,0	22,5	6351
8	0,2	65	5,8	11,2	5626
10	0,2	44	6,0	7,3	5754
12,5	0,2	15	3,5	4,3	5255
15	0,2	7,3	2,0	3,7	6442
20	0,2	6,2	4,0	1,6	4865

Tabela 18. Valores de resistividade aparente medidos sobre corpo e HC ou canga muito rica em HC. SEV 10.



Foto 15. Detalhe da HC ou canga rica. SEV 10.

Afloramento de IF saturado (na mina, próximo ao banco 880) – Foto 16

Resistividade elétrica - A medição foi feita em uma cava da mina onde ocorre IF e aflora o lençol freático.

Tabela 19. Valores de resistividade medido em IF saturado. SEV 11.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	4200	2,0	2100	15834
1,25	0,2	3100	3,0	1033	12348
1,5	0,2	1900	3,0	633	10988
2	0,2	620	2,0	310	9637
2,5	0,2	380	2,0	190	9262
3	0,2	140	2,0	70	4923
4	0,2	102	1,9	54	6726
5	0,2	84	2,0	42	8229
6	0,2	54	2,0	27	7621
8	0,2	40	2,0	20	10041



Foto 16. IF saturado. SEV 11.

Dia 22 de julho – Foram realizadas medições em dois afloramentos em corte de estrada próximos da Fazenda Gandarela (porção ocidental do sinclinal Gandarela). No primeiro, aflora o filito prateado da Formação Cercadinho, e no segundo, o mármore dolomítico da Formação Gandarela.

Afloramento de filito prateado da Formação Cercadinho (643990/7788167) – Foto 17

Amostra – AC14

Susceptibilidade magnética – O valor medido é zero.

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte de estrada na parede do filito e a medição realizada paralelamente ao plano de foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	4000	6,0	666	5026
1,25	0,2	2800	5,8	482	5768
1,5	0,2	1400	4,0	350	6072
2	0,2	1100	4,0	275	8549
2,5	0,2	920	4,2	219	10678
3	0,2	410	4,0	102	7209
4	0,2	160	8,0	20	2505
5	0,2	190	16,0	11,9	2326
6	0,2	360	26,0	13,8	3908

Tabela 20. Valores de resistividade medidos no filito prateado da Formação Cercadinho. SEV 12.



Foto 17. Afloramento de filito prateado da Formação Cercadinho. SEV 12.

Afloramento de mármore dolomítico da Formação Gandarela – Foto 18

Amostra – AC15

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos são muito baixos e variam de 0 a 10 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte de estrada na parede do mármore e a medição realizada paralelamente ao plano de foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	4400	13,0	338	2552
1,25	0,2	2100	9,2	228	2727
1,5	0,2	2300	18,0	127	2216
2	0,2	670	10,0	67	2083
2,5	0,2	450	12,0	37	1828
3	0,2	330	13,2	25	1758
4	0,2	140	14,0	10	1250

Tabela 21. Valores de resistividade medidos no mármore dolomítico da Formação Gandarela. SEV 13.



Foto 18. Afloramento de mármore dolomítico da Formação Gandarela. SEV 13.

Dia 25 de julho – Foram realizadas medições de resistividade elétrica dentro da Mina do Brucutu em dois afloramentos de IF, sendo que em um deles mediu-se em duas direções (paralelo e perpendicular a foliação), dois afloramentos de máfica intrusiva e um afloramento de sedimento argiloso do Terciário.

Afloramento de máfica intrusiva (7803073/669495) – Foto 18

Amostra – AC16 e AC17

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos são muito baixos e variam entre 0 e 5 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte da bancada da mina.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	1600	4,0	400	3016
1,25	0,2	1200	4,8	250	2987
1,5	0,2	950	5,5	172	2996
2	0,2	430	4,0	107	3342
2,5	0,2	280	4,0	70	3412
3	0,2	110	2,0	55	3868
4	0,2	85	2,2	38,6	4840
5	0,2	47	2,0	23,5	4604
6	0,2	26	1,1	23,6	6672

Tabela 22. Valores de resistividade medidos em rocha máfica intrusiva. SEV 14.

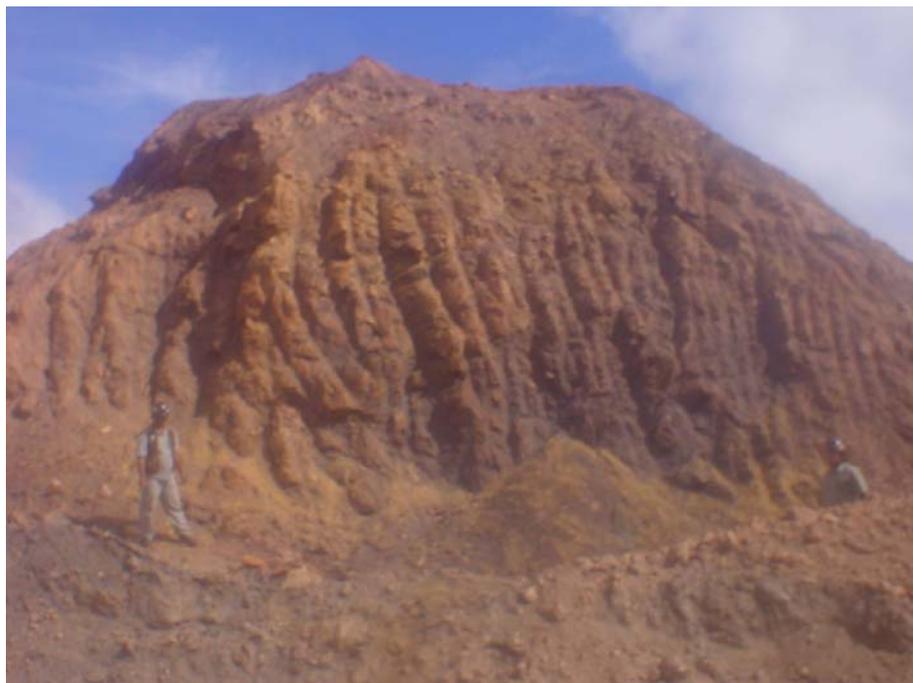


Foto 18. Afloramento de máfica intrusiva.

Afloramento de IF (7803023/669565) – Foto 19

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos no IF especularítico variam em média entre 600 e 800 ($*10^{-6}$), enquanto que no IF goethítico variam entre 100 e 200 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte da bancada, paralela a foliação.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	10000	0,1	100000	754000
1,25	0,2	7800	0,3	26000	310700
1,5	0,2	5190	0,4	12750	221212
2	0,2	3400	0,9	3777	117451
2,5	0,2	1200	1,0	1200	58500
3	0,2	700	0,1	7000	492380

Tabela 23. Valores de resistividade medidos no IF. SEV 15.



Foto 19. Afloramento de IF. SEV 15.

Afloramento de máfica intrusiva (7803073/669495) – Foto 20

Amostra – AC18

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos são muito baixos e variam entre 10 e 20 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte da bancada da mina. A rocha apresenta-se bastante alterada e um pouco úmida.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	3300	12	275	2073
1,25	0,2	2200	14	157	1877
1,5	0,2	1700	15,1	112	1953
2	0,2	810	13	62	1937
2,5	0,2	540	12	45	2193
3	0,2	360	11	33	2302

Tabela 24. Valores de resistividade medidos em rocha máfica intrusiva. SEV 16.

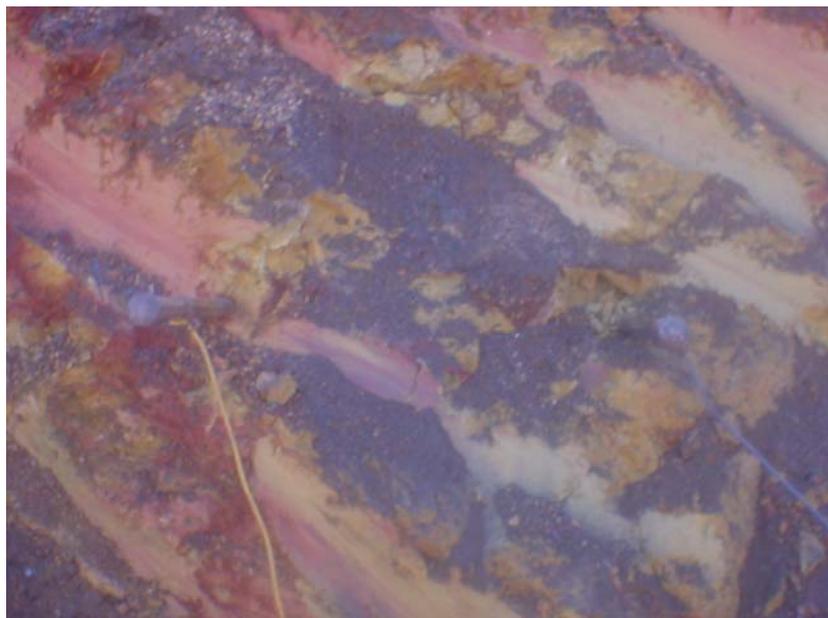


Foto 20. Detalhe do afloramento de máfica intrusiva. SEV 16.

Afloramento de sedimento argiloso do Terciário (7803272/669180) – Foto 21

Amostra – AC19

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos variam entre 60 e 100 ($*10^{-6}$).

Resistividade elétrica - A medição foi feita em um afloramento em corte da bancada da mina. O solo está úmido e apresenta um aspecto pastoso.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	1450	24	60,4	455
1,25	0,2	1030	28	36,7	439
1,5	0,2	700	26	26,9	467
2	0,2	390	25	15,6	485
2,5	0,2	250	26	9,6	469
3	0,2	210	28	7,5	527

Tabela 25. Valores de resistividade medidos em solo argiloso do Terciário. SEV 17.



Foto 21. Detalhe do afloramento de sedimento argiloso do Terciário. SEV 17.

Afloramento de IF (7802717/669174) – Fotos 22 e 23

Amostra – AC20

Susceptibilidade magnética – Os valores medidos no IF, quando se mede na foliação, variam entre 100 e 300 ($\cdot 10^{-6}$), enquanto que quando se mede no pó ferrífero que se deposita sobre o afloramento, variam em média entre 600 e 800 ($\cdot 10^{-6}$), chegando a ocorrer altos magnéticos de até 4000 ($\cdot 10^{-6}$).

Resistividade elétrica – Foi realizada uma sondagem elétrica em cima do banco de IF, perpendicular a foliação (SEV 18) e, outra, na parede do banco paralela a foliação (SEV 19).

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	15000	2,0	7500	56550
1,25	0,2	10400	2,0	5200	62140
1,5	0,2	9200	2,0	4600	79810
2	0,2	5100	2,0	2550	79279
2,5	0,2	1600	0,9	1777	86666
3	0,2	2500	2,0	1250	87925
4	0,2	1100	1,8	611	76566
5	0,2	750	1,8	416	81641
6	0,2	770	2,0	385	108681

8	0,2	660	2,2	300	150627
10	0,2	430	2,0	215	168708
12,5	0,2	270	2,0	135	165543
15	0,2	330	3,5	94	166414

Tabela 26. Valores de resistividade medidos perpendicularmente a foliação do IF. SEV

18.

AB/2	MN/2	Voltagem (V em mV)	Corrente elétrica (I em mA)	V/I	Resistividade Aparente (ohm.m)
1	0,2	10700	0,8	13375	100847
1,25	0,2	9100	1,0	9100	108745
1,5	0,2	5400	1,0	5400	93690
2	0,2	4000	2,0	2000	62180
2,5	0,2	770	0,4	1925	93843
3	0,2	570	0,4	1425	100234

Tabela 27. Valores de resistividade medidos paralelamente a foliação do IF. SEV 19.



Foto 22. SEV 18 realizada em cima do banco de IF.



Foto 23. Detalhe da SEV 18, realizada em cima do banco de IF.

Comentários Finais

Os objetivos do trabalho foram alcançados. No período de campo foram coletadas 44 amostras (de campo e de furos de sondagens), para posterior análise de resistividade, cargabilidade e susceptibilidade magnética; e foram realizadas 19 sondagens elétricas verticais. Pode-se dizer que foi grande a diversidade de litologias amostradas e medidas (ver Tabela 21).

Litologia	Formação ou Grupo	Amostras coletadas nos furos	Amostras coletadas em campo	Total de amostras coletadas	Sondagens elétricas verticais
Solo Terciário	-	-	1	1	1
Intrusiva Máfica	-	3	3	6	2
Granito	Peti	-	1	1	1
Quartzito Fe	Cercadinho	-	1	1	1
Filito prateado	Cercadinho	-	1	1	1
Mármore dolomítico	Gandarela	-	1	1	1
Canga	Cauê	-	2	2	1
IC	Cauê	6	1	7	1
ISC	Cauê	3	1	4	1

IF	Cauê	1	1	2	4
I contaminado	Cauê	1	-	1	-
HC	Cauê	1	3	4	1
Veio de quartzo	-	1	-	1	-
Xisto quartzoso	Morro Grande	4	-	4	-
Xisto	Morro Grande	-	1	1	1
Clorita xisto	Morro Grande	-	1	1	1
Sericita xisto	Morro Grande	-	1	1	1
Quartzito	Cambotas	1	-	1	-
Filito	Nova Lima	3	-	3	-
Gnaisse	-	-	1	1	1
Total de amostras	-	-	-	44	-
Total de SEVs	-	-	-	-	19

Tabela 28. Amostras coletadas e sondagens elétricas verticais realizadas em diferentes litologias.

Foram levados para Porto Alegre em meio digital um mapa geológico atualizado da Mina e a descrição de furos, tanto de curto quanto de longo prazo. As seções geológicas da Mina estão em fase de processamento e após ficarem prontas serão enviadas pelo geólogo Jordão Ramos, em meio digital para Porto Alegre, para serem utilizadas na correlação com as seções geofísicas reprocessadas.

O plano de trabalho para o mestrado no próximo semestre será:

Analisar os dados medidos em campo como a resistividade elétrica e a susceptibilidade magnética.

Realizar medições em laboratório de resistividade elétrica, cargabilidade e se possível susceptibilidade magnética.

Trabalhar com as seções geofísicas (filtragens, processamento, modelagem, etc) e correlacioná-las com os dados de geologia atualizados da Mina do Brucutu.