

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

TESE DE MESTRADO

**INVESTIGAÇÃO POR ELETRORESISTIVIDADE DE
AMBIENTES CÁRSTICOS NO MUNICÍPIO DE SÃO
JOÃO DE PIRABAS - PA**

ALUNO : EDUARDO SALGADO LOPES

ORIENTADOR : Prof. Dr. LUIS RIJO

BELÉM

1995

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
-CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

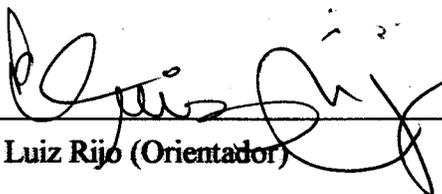
INVESTIGAÇÃO POR ELETRORESISTIVIDADE
DE AMBIENTES CÁRSTICOS NO MUNICÍPIO
DE SÃO JOÃO DE PIRABAS-PA

TESE APRESENTADA POR
EDUARDO SALGADO LOPES

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 25.04.1996

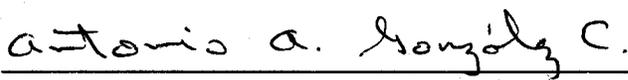
COMITÊ DE TESE:



Dr. Luiz Rijo (Orientador)



Dr. Om Prakash Verma



Dr. Antonio Abel Gonzalez Carrasquilla

BELÉM

1996

LOPES, Eduardo Salgado. Investigação por eletroresistividade de ambientes cársticos no Município de São João de Pirabas-PA. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1996. 88p.

Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.

1. ÁGUA SUBTERRÂNEA. 2. AMBIENTES CÁRSTICOS. 3. MÉTODOS ELETRORESISTIVOS. 4. MODELAGEM NUMÉRICA.
I. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Luis Rijo pela dedicação e aos demais membros da banca examinadora pelas correções e contribuições dadas.

Aos meus pais Orlando Sérgio da Silva Lopes e Maria de Lourdes Salgado Lopes, pelo imprescindível apoio, desde o início deste trabalho.

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP, pelo suporte financeiro a este programa de pós-graduação.

À Fundação Nacional de Saúde, no nome do geólogo Manfredo Ximenes, pelos dados fornecidos e no auxílio de campo.

A todos os professores do Departamento de Geofísica, assim como a todos os funcionários do Núcleo de Pesquisas em Geofísica que, de forma direta ou indireta, propiciaram condições favoráveis para o cumprimento desta tarefa.

Ao Prof. José Gouveia Luis, pela importante ajuda dada nos momentos conclusivos deste trabalho.

Ao técnico Afonso Quaresma de Lima, pela ajuda incansável nos trabalhos de campo.

Ao Prof. Evaldo Alencar Reis, pela correção gramatical deste trabalho.

A Prefeitura do Município de São João de Pirabas.

A todos os meus colegas de turma, em especial José Marques Júnior, grande companheiro e amigo de todas as horas.

Aos amigos e colegas dos cursos de Mestrado e Doutorado desse Núcleo, em especial para Jadir da Conceição, João Protázio, Klaus Cozzolino, Carlos Eduardo Guerra e Valéria Cristina.

A Sr. Rezek Nelson Resegue e família, pela infinita e inesquecível amizade com que me honraram, em Belém.

A todos os amigos que, com prazer conquistei nessa cidade, pelas palavras de força e estímulo que nunca me faltaram, durante o desenvolvimento desta tese.

*À minha mãe Maria de Lourdes,
Ao meu pai Orlando Sérgio,
a minhas ávos Luíza e Maria (†),
e minha sobrinha Marcelly.*

SUMÁRIO

	p.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
2 - ASPECTOS DA GEOLOGIA LOCAL E TRABALHOS ANTERIORES DE GEOFÍSICA	6
2.1 ASPECTOS DA GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DE PIRABAS	6
2.1.1 Pré-Cambriano	6
2.1.2 Terciário	6
2.1.2.1 Formação Pirabas	6
2.1.2.2 Grupo Barreiras	7
2.1.3 Quaternário	10
2.2 TRABALHOS ANTERIORES EM GEOFÍSICA	10
3 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS E METODOLOGIA	22
3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO MÉTODO ELETRORESISTIVO	22
3.2 METODOLOGIA	24
3.2.1 Métodos de Interpretação Unidimensional	25
3.2.2 Método de interpretação bidimensional	26
4 - MODELOS SINTÉTICOS	31
4.1 MODELO I	31
4.2 MODELO II	34
4.3 MODELO III	37

5 - INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	40
5.1 FEIÇÕES GERAIS DAS CURVAS DE CAMPO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	40
5.2 MODELAGEM E INTERPRETAÇÃO DAS SONDAJENS USANDO MÓDELOS BIDIMENSIONAIS	51
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
I - ANEXO - INTERPRETAÇÃO DAS CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE.	73

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1.1	Localização e acesso ao município de São João de Pirabas.	4
Figura 2.1	Coluna estratigráfica da área estudada proposta por SILVA JUNIOR & SOARES (1992).	8
Figura 2.2	Detalhe mostrando a porção inferior de um afloramento de calcário, segundo SILVA JUNIOR & SOARES (1992).	9
Figura 2.3	Subgrupo I-1 de SEVs do GRUPO I, segundo FERREIRA (1979). . .	12
Figura 2.4	Subgrupo I-2 de SEVs do GRUPO I, segundo FERREIRA (1979). . .	13
Figura 2.5	Subgrupo II-1 de SEVs do GRUPO II, segundo FERREIRA (1979). .	14
Figura 2.6	Subgrupo II-2 de SEVs do GRUPO II, segundo FERREIRA (1979). .	15
Figura 2.7	Modelo de sedimentação para explicar as diferentes resistividades no calcário da Formação Pirabas, segundo FERREIRA (1979).	16
Figura 2.8	Modelo de sedimentação para explicar as diferentes resistividades no calcário da Formação Pirabas, segundo FERREIRA (1979).	17
Figura 2.9	SEVs do GRUPO III, segundo FERREIRA (1979).	19
Figura 2.10	SEVs do GRUPO IV, segundo FERREIRA (1979).	20
Figura 2.11	Perfis de Resistência, Raios Gama e Potencial Espontâneo, no Município de São João de Pirabas, segundo LUIZ (1991).	21
Figura 3.1	Circuito elétrico para determinação de resistividade e campo elétrico de uma formação homogênea subsuperficial.	23
Figura 3.2	Configuração geral para quatro eletrodos.	23
Figura 3.3	Esquema das condições de contorno do Problema 2D-2D, do método de resistividade.	28
Figura 3.4	Modelo de malha para elementos finitos, em destaque o corpo investigado.	28

Figura 4.1	Modelos sintéticos para representar um semi-espaco com $\rho_1 = 10 \Omega.m$ e uma caverna com $\rho_2 = 1000 \Omega.m$. A) Modelo I, caverna simétrica em relação ao centro da SEV com comprimento L variável. B) Modelo II, caverna assimétrica em relação ao centro da SEV com comprimento L e distância X variável. C) Modelo III, Caverna simétrica em relação ao centro da SEV com espessura h variável.	32
Figura 4.2	Curvas de resistividade das cavernas simétricas do centro da SEV (Modelo I). A) Caverna a profundidade $H = 5 m$ da superfície e comprimentos $L = 50 m, 100 m$ e $200 m$. B) Caverna a profundidade $H = 20 m$ da superfície e comprimentos $L = 50 m, 100 m$ e $200 m$. .	33
Figura 4.3	Curvas de resistividade das cavernas deslocadas do centro da SEV (Modelo II), com $H = 5 m$. A) Borda da caverna abaixo do centro da SEV. B) Caverna a $25 m$ do centro da SEV. C) Caverna a $50 m$ do centro da SEV. D) Caverna a $75 m$ do centro da SEV.	35
Figura 4.4	Curvas de resistividade das cavernas deslocadas do centro da SEV (Modelo II), com $H = 20 m$. A) Borda da caverna abaixo do centro da SEV. B) Caverna a $25 m$ do centro da SEV. C) Caverna a $50 m$ do centro da SEV. D) Caverna a $75 m$ do centro da SEV.	36
Figura 4.5	Curvas de resistividade das cavernas transversais a SEV (Modelo III), com $H = 5 m$. A) Cavernas com espessuras $h = 2 m, h = 4 m, h = 8 m$. B) Cavernas com espessuras $h = 15 m, h = 30 m, h = 45 m$. .	38
Figura 4.6	Curvas de resistividade das cavernas transversais a SEV (Modelo III), com $H = 20 m$. A) Cavernas com espessuras $h = 2 m, h = 4 m, h = 8 m$. B) Cavernas com espessuras $h = 15 m, h = 30 m, h = 45 m$. .	39
Figura 5.1	Mapa de localização das sondagens.	41
Figura 5.2	Curvas de SEVs do Grupo I, tipo KH	42
Figura 5.3	Curvas de SEVs do Grupo II.	45
Figura 5.4	Curvas de SEVs do Grupo III.	46
Figura 5.5	Perfil geológico e perfis geofísicos do poço PT-1/91-SJP e dados geoeletricos interpretados das SJP-1 e SJP-8.	47
Figura 5.6	Perfil geoeletrico na direção NE-SW baseado nas sondagens SJP-3, SJP-9, SJP-13, SJP-14.	48
Figura 5.7	Perfil geoeletrico na direção NE-SW baseados nas sondagens SJP-6, SJP-9, SJP-10.	49
Figura 5.8	Perfil geoeletrico na direção NE-SW baseados nas sondagens SJP-7, SJP-8, SJP-10.	50

Figura 5.9	Caverna no topo da Formação Pirabas, simétrica em relação ao centro da SEV, com largura $L = 10 m$ e espessura variando para $h = 2 m, 4 m, 8 m, 15 m, 30 m$ e $45 m$	52
Figura 5.10	Curvas de resistividade aparente para uma caverna simétrica na profundidade de $26 m$, situada no topo da Formação Pirabas, sob 3 camadas. A) espessura variando $h = 2 m, 4 m, 8 m$ e B) espessura variando $h = 15 m, 30 m, 45 m$	53
Figura 5.11	Caverna no topo da Formação Pirabas, com centro da SEV deslocado 11 metros da caverna, com largura $L = 10 m$ e espessura variando para $h = 2 m, 4 m, 8 m, 15 m, 30 m$ e $45 m$	54
Figura 5.12	Curvas de resistividade aparente para uma caverna assimétrica na profundidade de $26 m$ e situada no topo da Formação Pirabas, sob 3 camadas. Centro da SEV deslocada 11 metros da caverna. A) espessura variando $h = 2 m, 4 m, 8 m$ e B) espessura variando $h = 15 m, 30 m, 45 m$	55
Figura 5.13	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo sem a presença de cavernas.	57
Figura 5.14	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 2 m$	58
Figura 5.15	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 4 m$	59
Figura 5.16	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 8 m$	60
Figura 5.17	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 15 m$	61
Figura 5.18	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 30 m$	62
Figura 5.19	Caverna no topo da Formação Pirabas, simétrica em relação ao centro da SEV, com larguras e espessuras variáveis.	65
Figura 5.20	Curvas de resistividade aparente para uma caverna no topo da Formação Pirabas. A) $8 m$ e $h_4 = 50 m$, B) $15 m$ e $h_4 = 50 m$, C) $25 m$ e $h_4 = 50 m$ e D) $25 m$ e $h_4 = 60 m$	66
Figura 5.21	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 100 m$ e espessura $h = 8 m$	67
Figura 5.22	Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 100 m$ e espessura $h = 25 m$	68

TABELAS

Tabela 5.1	Valores máximos e mínimos de resistividade e espessura para as sondagens do Grupo I.	40
------------	--	----

RESUMO

A presente tese procura investigar ambientes cársticos, usando os métodos eletroresistivos de sondagem elétrica vertical e caminhamento dipolo-dipolo.

A área piloto para essa investigação está localizada na porção nordeste do Estado do Pará, no Município de São João de Pirabas. Nessa localidade, durante a perfuração de um poço para abastecimento de água para a cidade, a equipe de prospecção da Fundação Nacional de Saúde encontrou problemas devido a presença de cavidades nos calcários da Formação Pirabas.

Para analisar esse problema foram realizadas 15 sondagens elétricas verticais, usando o arranjo Schlumberger, em diversos pontos da cidade. A abertura máxima dos eletrodos de corrente, para a realização das sondagens, foi em torno de 600 metros. As curvas de resistividade aparente das sondagens foram, inicialmente, interpretadas usando programas computacionais que calculam as resistividade do meio investigado com modelos unidimensionais, sem variações laterais de resistividade. Porém, as sondagens realizadas próximas ao poço, onde ocorrem cavernas, foram interpretadas usando modelos bidimensionais para representar as variações laterais de resistividade devido às cavernas. O algoritmo usado para essa interpretação se baseia na técnica dos elementos finitos.

Os resultados das interpretações das sondagens elétricas, para os vários modelos de cavernas estudados, mostraram que as anomalias de resistividade devido a presença de cavernas são muito pequenas. Devido a este fato, o método de sondagem elétrica vertical não apresentou boa resolução para identificar com precisão a presença deste tipo de caverna em subsuperfície. Por outro lado, os resultados numéricos obtidos pelo caminhamento dipolo-dipolo mostraram que esse método é mais eficiente e menos ambíguo, para estudar cavernas, que o método de sondagem elétrica vertical. Contudo o método de caminhamento dipolo-dipolo é muito mais dispendioso do que o de sondagem elétrica verticais, tanto do ponto de vista de trabalho de campo como no processamento e interpretação de dados.

ABSTRACT

This Thesis discusses the investigation of karst regions using vertical electrical soundings and dipole-dipole resistivity surveys.

The studied area is localized in the northeast of state of Pará, in the district of São João de Pirabas. In this place, during the drilling of water well, the exploration crew from Fundação Nacional de Saúde, faced some problems due to the presence of cavities in the limestone of the Pirabas Formation.

In order to analyse this problem, we carried out vertical electrical soundings using the Schlumberger array. The maximum length of $AB/2$ used was 600 meters. The apparent resistivity sounding curves were initially interpreted with a 1D model computer program. The electrical soundings located near the well in which karst cavities detected, were interpreted with a 2D model computer program. The algorithm used in the 2D program was the finite element method.

The results of the interpretation of electrical soundings of many models show that the anomalies of resistivities due the presence of karst cavities are very small. Therefore, the method of Schlumberger electrical soundings does not have enough resolution to identify precisely the presence of karst cavities at the subsurface. On the other hand, the numerical results for the dipole-dipole surveys show that the technique is by far more efficient than Schlumberger soundings for detection of karst cavities.

However, the dipole-dipole method is much more difficult and expensive to be carried out in the field than the Schlumberger sounding method. Also, its interpretation is much more elaborated than the Schlumberger soundings.

1 - INTRODUÇÃO

A Fundação Nacional de Saúde (FNS) vem realizando, há vários anos, um programa de perfuração de poços na região nordeste do Estado do Pará, com a finalidade de abastecer de água potável os municípios dessa região. Um desses levantamentos foi realizado no município de São João de Pirabas, onde, no verão, a água distribuída à população fica salgada, causando problemas intestinais, entre outros. A modificação físico-química e de sabor, (IDESP, 1990), se dá em decorrência da infiltração nos poços de captação de água pela maré por ocasião da maior preamar. Isto mostrou, o interesse da FNS em explorar a água em poços mais profundos, que não estejam sujeitos a esse problema.

O Município de São João de Pirabas situa-se à margem direita da foz do rio Xindeua e à esquerda da foz do rio Pirabas. A sede do Município está localizada nas coordenadas geográficas 00°46'18" latitude sul e 47°10'35" longitude W Gr, Figura 1.1. A geologia local é constituída de rochas sedimentares do Grupo Barreiras (areias e argilas) e da Formação Pirabas (calcários), ambas de idade terciária, sobrepostas a rochas cristalinas de idade Pré-Cambriana da Bacia de Bragança-Viseu, (SILVA JUNIOR & SOARES, 1992). Durante a perfuração de um poço, em São João de Pirabas, a equipe de perfuração da FNS enfrentou problemas técnicos devido a presença de cavidades no calcário (comunicação verbal do geólogo Manoel Ximenes). Cavidades cársticas, comuns em regiões de calcário, representam um grande problema na perfuração de poços, ocasionando até mesmo na perda de ferramentas de perfuração. Portanto, o objetivo principal desse trabalho foi o de analisar quais os efeitos que tais cavidades poderiam apresentar em dados de eletroresistividade, comumente utilizados na prospecção hidrogeológica.

Com efeito, esse tipo de investigação por eletroresistividade, em ambientes cársticos, foi utilizado para detetar cavernas e canais em áreas de calcários no Estado do Paraná, com o objetivo de prevenir a contaminação de água subterrânea, (GIUSTI & CLOVIS, 1994). Para essa análise, os autores realizaram levantamentos através de caminhamento elétrico que, segundo eles, não puderam indicar com precisão zonas de maior ou menor probabilidade da presença de cavernas e canais nas zonas de calcários.

No presente trabalho, a configuração do método eletroresistivo utilizada no campo foi a de sondagens elétricas verticais (SEV). A partir dessas sondagens, pretende-se revelar a presença

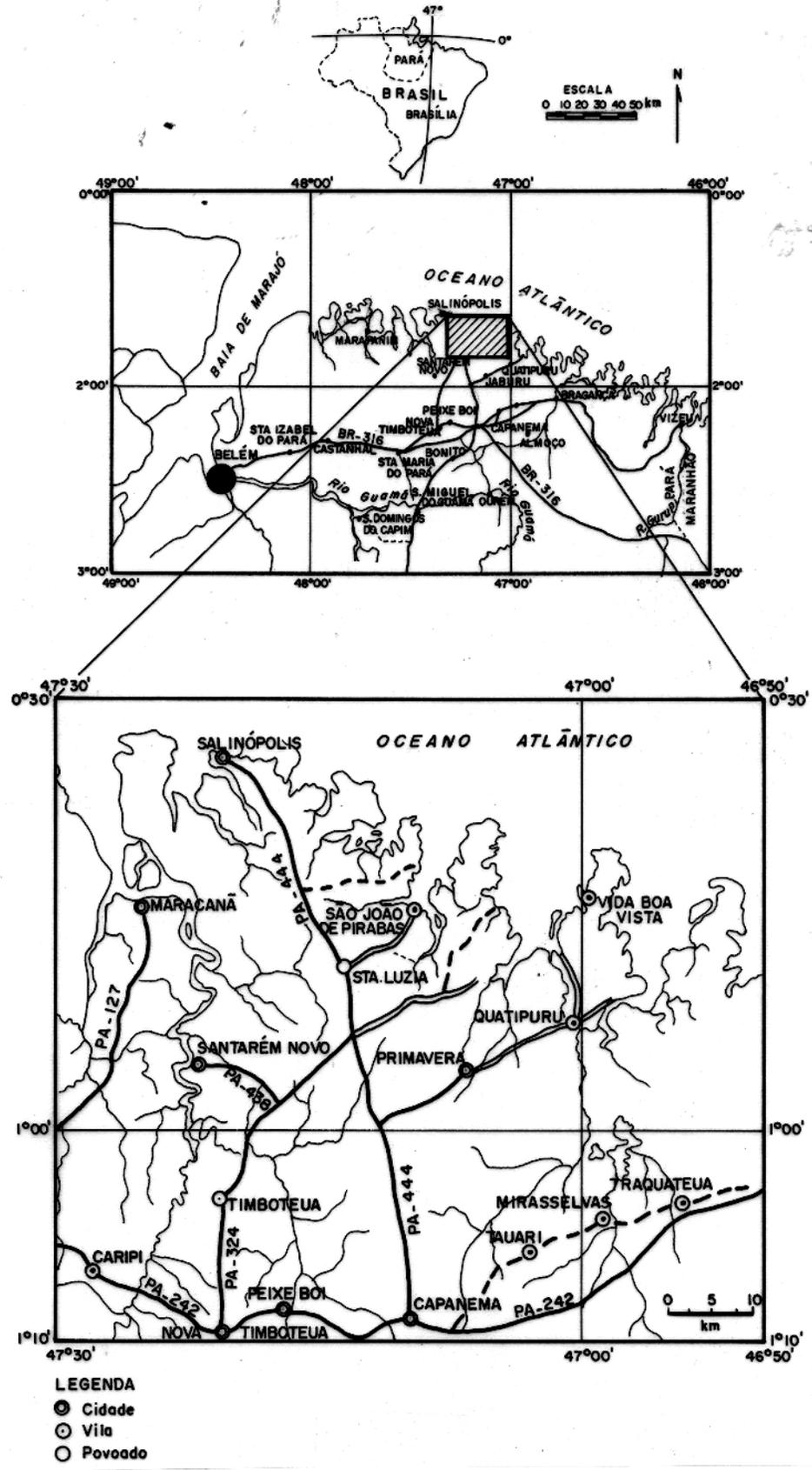


Figura 1.1 - Localização e acesso ao município de São João de Pirabas.

de heterogeneidades no calcário da Formação Pirabas. As SEVs que apresentaram perturbações devido a variações laterais de resistividade, foram analisadas através da técnica dos elementos finitos, que é uma técnica de análise numérica aplicada a problemas de contorno, com geometria complexa. Essa técnica dos elementos finitos foi usada, com sucesso, por CARRASQUILLA & RIJO (1991), na região da Ilha de Marajó, Pará, com o objetivo de analisar variações laterais de resistividade causadas por paleocanais.

Ademais, pretende-se também, com esse trabalho, contribuir, junto a Fundação Nacional de Saúde, para a solução do problema de abastecimento de água na cidade, baseado nas informações obtidas pelas sondagens elétricas e pelos trabalhos anteriores, na área em estudo.

A introdução e informações gerais sobre a área de estudo, constam do 1º Capítulo. As informações sobre os aspectos geológicos da área estudada e análise dos trabalhos anteriores de prospecção geofísica e hidrogeologia são apresentados no 2º Capítulo. Os conceitos fundamentais necessários para abordagem e análise do problema proposto na tese formam o 3º Capítulo. Os resultados da simulação numérica dos modelos de cavernas são discutidos no 4º Capítulo. A interpretação e discussão dos resultados constituem o 5º Capítulo. E finalmente, o 6º Capítulo trata das conclusões e sugestões.

2 - ASPECTOS DA GEOLOGIA LOCAL E TRABALHOS ANTERIORES DE GEOFÍSICA

2.1 ASPECTOS DA GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DE PIRABAS

Como foi mencionado na introdução deste trabalho, o arcabouço geológico da área é de uma bacia sedimentar de idade terciária, composta basicamente de rochas clásticas (Grupo Barreiras) e rochas químicas (Formação Pirabas). Esse contexto geológico, por se tratar de uma importante informação para a interpretação de dados geofísicos, é descrito sucintamente nesse trabalho, segundo os períodos relativos à deposição e sedimentação.

2.1.1 Pré-Cambriano

As rochas que constituem o embasamento da bacia de idade pré-cambrianas compõem a Faixa de Dobramento Gurupi e Craton São Luís, cujas principais unidades estratigráficas (Complexo Maracaçumé, Formação Santa Luzia, Grupo Gurupi, Granito Cantão, Formação Piriá) não apresentam exposições na área, não permitindo desta forma uma descrição em detalhes.

2.1.2 Terciário

SILVA JUNIOR & SOARES, (1992), propuseram uma coluna estratigráfica na qual é possível individualizar a Formação Pirabas e o Grupo Barreiras, Figura 2.1.

2.1.2.1 Formação Pirabas

Segundo os autores mencionados, as melhores exposições da Formação Pirabas ocorrem em afloramentos do tipo falésias ao longo da Ilha da Fortaleza, nas localidades de Ponta do Castelo, Fazenda e Ilha das Minas. Com base nas descrições de campo e análises petrográficas, os autores dividiram em quatro, as fácies da Formação Pirabas: Argilas Laminadas não Carbonáticas, Calcarenitos Estratificados, Calcários Maciços e Biocalciruditos.

- *Argilas Laminadas não Carbonáticas, (AN)*

Ocorre de maneira restrita, na porção mais basal da falésia e/ou intercalado nos calcarenitos estratificados, não exibem grande continuidade lateral, formando espécies de lentes, e sua espessura máxima alcança 40 centímetros, aproximadamente, Figura 2.2.

- *Calcarenitos Estratificados, (CE)*

Essa fácies apresenta corpos de forma alongada com extensão lateral, variando de 10 a 15 metros e sua espessura variando, no máximo, até 1,5 metros. Existe uma variação lateral quanto a sua estruturação, onde em determinadas porções pode se apresentar de forma maciça, bastante compacto, ou, em outras situações, preservando a estrutura primária, Figura 2.2.

- *Calcários maciços, (CM)*

Esses calcários apresentam como característica marcante uma forte litificação e uma cor cinza escura.

- *Biocalcirudito, (BC)*

Ocorre em forma de grandes blocos discordantes sobre os calcarenitos e demais fácies. Não apresentam uma estruturação definida.

2.1.2.2 Grupo Barreiras

Esses sedimentos ocorrem, assim como os sedimentos da Formação Pirabas, em forma de falésias ao longo da costa. SILVA JUNIOR & SOARES, (1992), baseados em critérios granulométricos e estruturas sedimentares (presença ou ausência), conseguiram individualizar três fácies: Argilitos com Laminação Plano-paralela, Argilito Maciço e Blocos de Arenito Ferruginizado.

- *Argilito com Laminação Plano-paralela, (AL)*

Ocorre finamente laminado sob forma de pacotes espessos, apresentando continuidade lateral.

- *Argilito Maciço, (AM)*

Composto predominantemente por argilas, porém, na sua matriz existe a presença de material arenoso, em torno de quinze por cento. A principal diferença entre essa fácies e a anterior está na falta de uma estrutura do tipo laminada.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA										
ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADES	FACIES	ASSOCIAÇÃO	DESCRIÇÃO	PROCESSOS	AMBIENTE		
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	NOLOCENO	SEDIMENTOS ATUAIS			dunas mangues praias barras aluviões				
			PÓS-BARREIRA	ARENO ARGILOSO	AA	D	Pacote areno-argiloso mal selecionado, com estrutura de dissipação de dunas eólicas	Gravitacionais	Eólico	
				ARENITO PILÕES	AP		Areinito cinza amarelado com laminação plano-paralela, bem selecionado, com granulações fina média	Tração com pouca suspensão	Sub-aquoso eólico	
		TERCIÁRIO	PLIOCENO	GRUPO BARREIRAS		AF	C	Blocos de arenito ferruginizados (Stone Line) formando uma superfície bastante irregular	Erosão/ Intemperismo	Sub-aéreo
						AM		Argila maciça de coloração cinza embranquicada, com raízes fósseis	Suspensão predominante. pouca tração	Ambiente lagunar e/ou de mangue
						AL		Argila laminada, branca-avermelhada com desenvolvimento de lateritas cavernosas (porção superior)		
	MIOCENO		SUPERIOR		FORMAÇÃO PIRABAS	BC	B	Calcário sem estruturação e com grande conteúdo fossilífero pelecipolas, gastrópodos, etc	Suspensão	Marinho plataformal raso
						CM		Calcários maciços de coloração escura bastante litificados		
						CE	A	Calcarenito com estratificação "Hummocky"	Ação das ondas de tempestade + tração	Plataforma carbonática com influência de ondas de tempestades
	AN	Argilas não carbonáticas apresentando laminação plano-paralela com lentes de areia intercaladas	Tração Suspensão							

Figura 2.1 - Coluna estratigráfica da área estudada proposta por SILVA JUNIOR & SOARES (1992).

- *Blocos de Arenitos Ferruginosos, (AF)*

Apresenta grande continuidade lateral. São blocos constituídos por arenitos com granulometria variando de fina a grossa, sendo que, geralmente na base dos mesmos, existe a presença de conglomerados de seixos quartzosos envolvidos por uma matriz areno-argilosa.

2.1.3 Quaternário

Os sedimentos relativos a esse período, segundo SILVA JUNIOR & SOARES, (1992), estão representados por siliciclásticos recentes dos rios e praias, dunas litorâneas e sedimentos arenosos da unidade Pós-Barreiras. Este último ocupa grande parte da área e é litologicamente composto por sedimentos areno-argilosos de coloração amarelada e/ou esbranquiçada, com seixos de quartzo e fragmentos de argila laterizados. A fração predominante desse fácies é arenosa de granulometria fina. O contato entre esses sedimentos e os sedimentos do Grupo Barreiras ocorre de forma discordante.

Um outro fácies desse período, segundo os autores acima citados, corresponde ao Arenito Pilões, encontrado em uma única ocorrência às margens da baía de Inajá, sob forma de falésia. É constituída por uma arenito de cor cinza com tons avermelhados, amarelados e, ocasionalmente, esbranquiçados. Apresenta um bom selecionamento com granulometria variando de fina a média.

2.2 TRABALHOS ANTERIORES EM GEOFÍSICA

O retrospecto de estudos geofísicos na região nordeste do Estado do Pará, consta de trabalhos com enfoques distintos. No período de 1957 a 1965, a PETROBRÁS realizou um levantamento gravimétrico com o objetivo de pesquisar a existência de uma bacia Cretácea, semelhante à que ocorre na costa do Maranhão. O método eletroresistivo foi usado, no ano de 1973, com a finalidade de prospecção em áreas de calcários, pela empresa Geomineração S.A (GEOMISA). GAMA JUNIOR & COUTINHO, (1976), utilizaram também o método eletroresistivo e mais o da cintilometria para dimensionar áreas de ocorrência de granitos.

FERREIRA (1979), utilizou os métodos geofísicos de eletroresistividade e magnético, objetivando determinar: a) a espessura do pacote de sedimentos que descansam sobre o embasamento, utilizando sondagens elétricas verticais associadas a perfis geológicos de poços perfurados; b) a paleotopografia da superfície de discordância entre rochas do Pré-Cambriano e Cenozoicas, através dos resultados da interpretação qualitativa das sondagens elétricas

verticais; c) a distinção entre diferentes litologias do Pré-Cambriano, usando-se métodos cintilométricos e magnéticos; d) o estudo da viabilidade do emprego da técnica de sondagens elétricas verticais na prospecção eficiente dos calcários da Formação Pirabas.

Esse trabalho realizado por FERREIRA, (1979), tem um papel fundamental como fonte de dados para interpretação das SEVs, realizadas no Município de São João de Pirabas. O autor, para efeito de interpretação final, dividiu as suas 48 sondagens em 4 grupos distintos, baseados em locais onde existem diferentes situações geológicas.

• GRUPO I

É subdividido por FERREIRA (1979), em 2 subgrupos distintos. O primeiro subgrupo, denominado de I-1 apresenta curvas do tipo H e representa SEVs de feição típica de embasamento raso (granito), tal como é mostrado na Figura 2.3. O outro subgrupo, denominado de I-2, também realizado sobre uma região de granitos, apresenta curvas do tipo KH, Figura 2.4, com uma maior camada de sedimentos.

• GRUPO II

O segundo grupo, GRUPO II, representa sondagens realizadas sobre áreas de ocorrência de calcários da Formação Pirabas. Segundo o autor, esse grupo foi subdividido em 2 subgrupos, denominados II-1 e II-2, respectivamente, com curvas predominantemente KH, chegando a apresentar mais de 4 camadas. O primeiro subgrupo, Figura 2.5, foi realizado sobre calcários aparentemente compactos e provavelmente rasos. Os valores de resistividade desse grupo apresenta o primeiro horizonte geoeletrico com valores entre 300 a 1000 $\Omega.m$, que o autor interpretou como sendo de solos secos e arenosos. O segundo horizonte apresentou valores entre 1000 a 10000 $\Omega.m$, que, segundo FERREIRA (1979), corresponde a sedimentos inconsolidados da Formação Barreiras, com a presença de água doce. O horizonte com menor resistividade, em torno de 25 $\Omega.m$, representa os calcários da Formação Pirabas. O segundo subgrupo de SEVs, Figura 2.6, foi realizado em áreas onde o calcário é menos compacto. Segundo o autor, esse calcário menos compacto contém areia fina e uma maior porcentagem em argilas em relação ao calcário do primeiro subgrupo. Neste subgrupo, o primeiro horizonte geoeletrico apresenta valores de resistividade variando entre 300 a 1500 $\Omega.m$. O segundo horizonte apresenta valores entre 1000 a 3000 $\Omega.m$ enquanto que a camada de menor valor de resistividade apresenta valor de 10 $\Omega.m$ pelo fato desse horizonte apresentar uma quantidade maior de argilas, como foi mencionado acima.

O autor propõe dois modelos geológicos para explicar essa diferença entre os valores de resistividade da Formação Pirabas. O primeiro, Figura 2.7, é suposto pelo autor que os

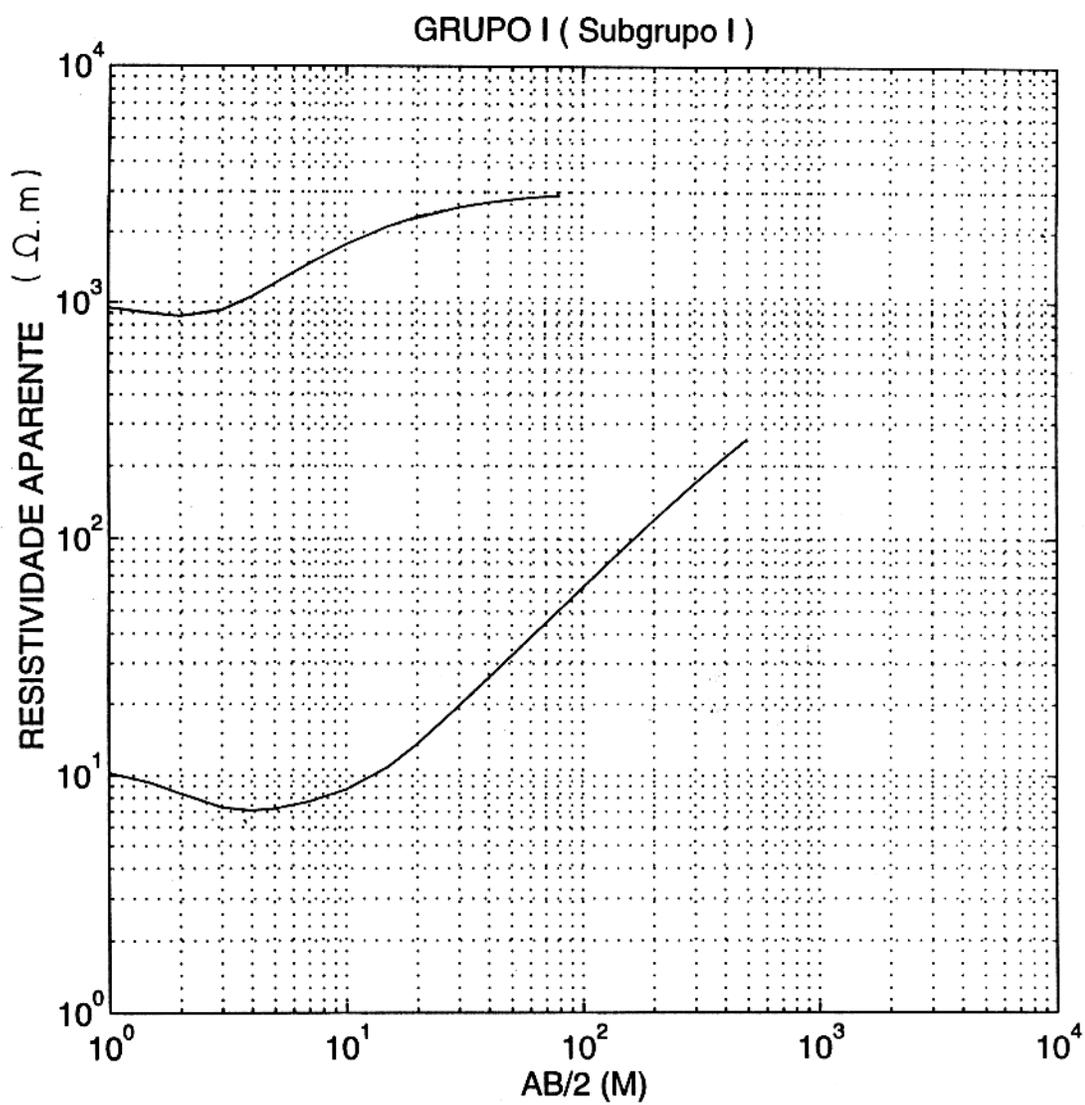


Figura 2.3 - Subgrupo I-1 de SEVs do GRUPO I, segundo FERREIRA (1979).

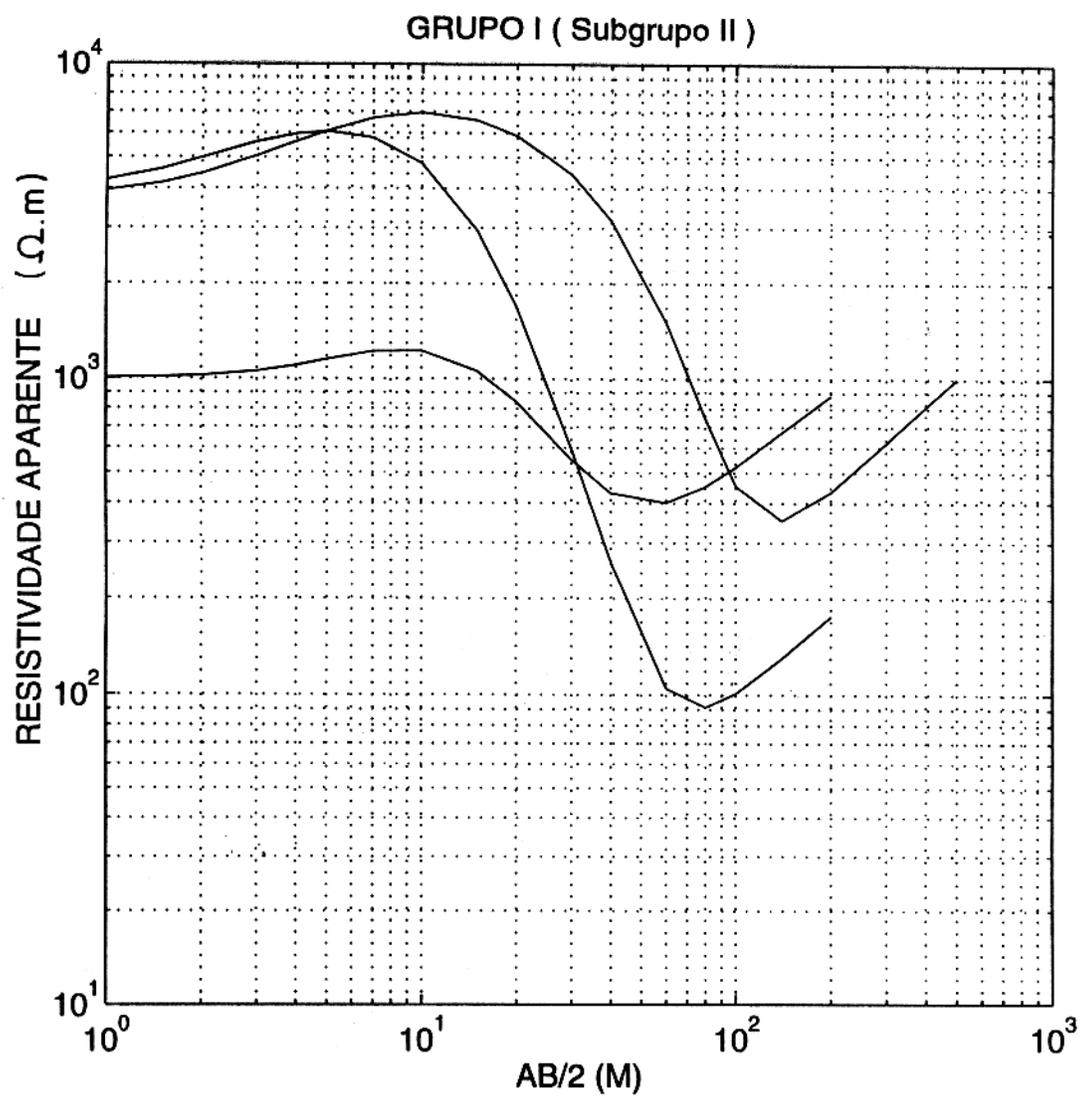


Figura 2.4 - Subgrupo I-2 de SEVs do GRUPO I, segundo FERREIRA (1979).

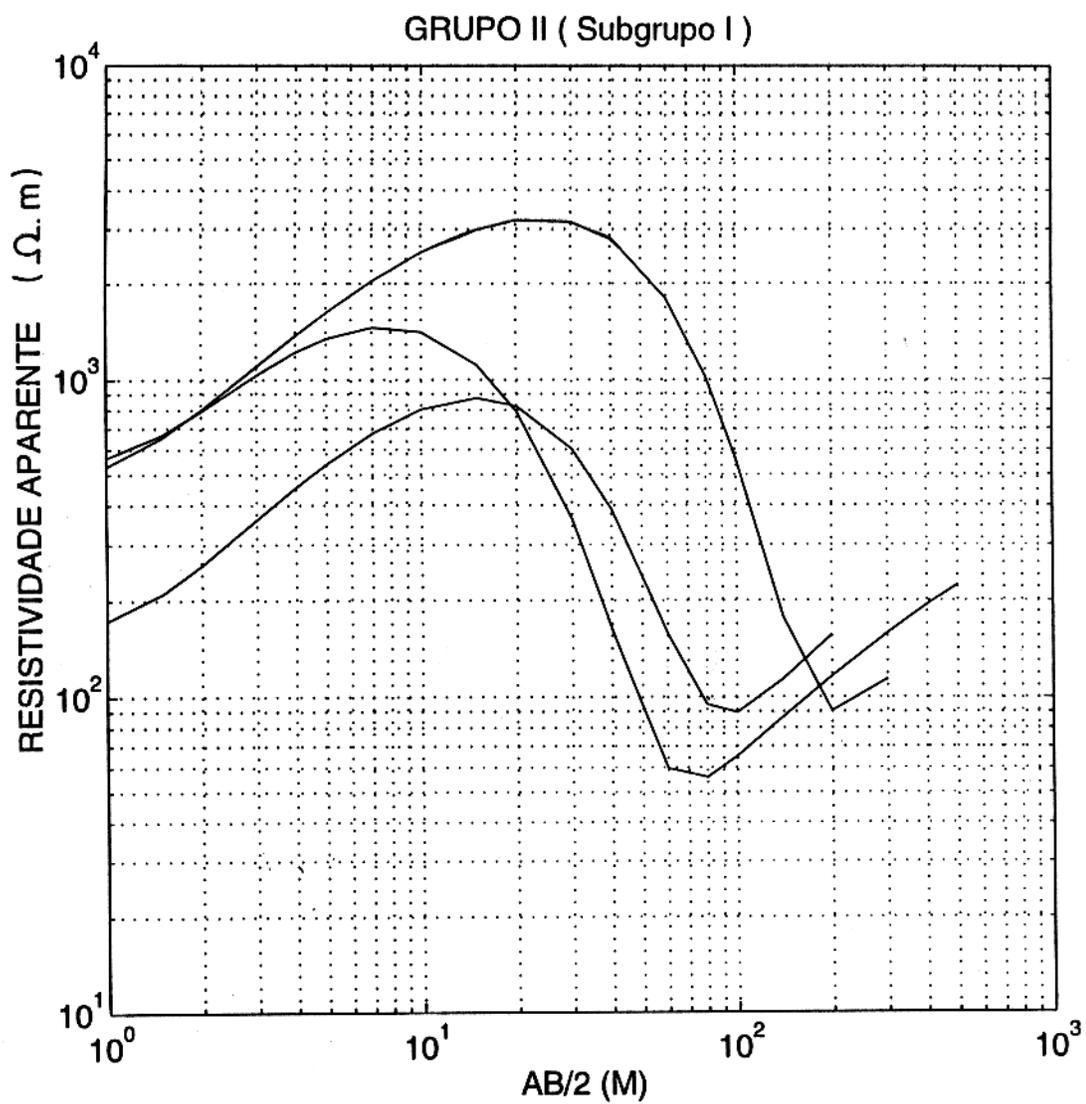


Figura 2.5 - Subgrupo II-1 de SEVs do GRUPO II, segundo FERREIRA (1979).

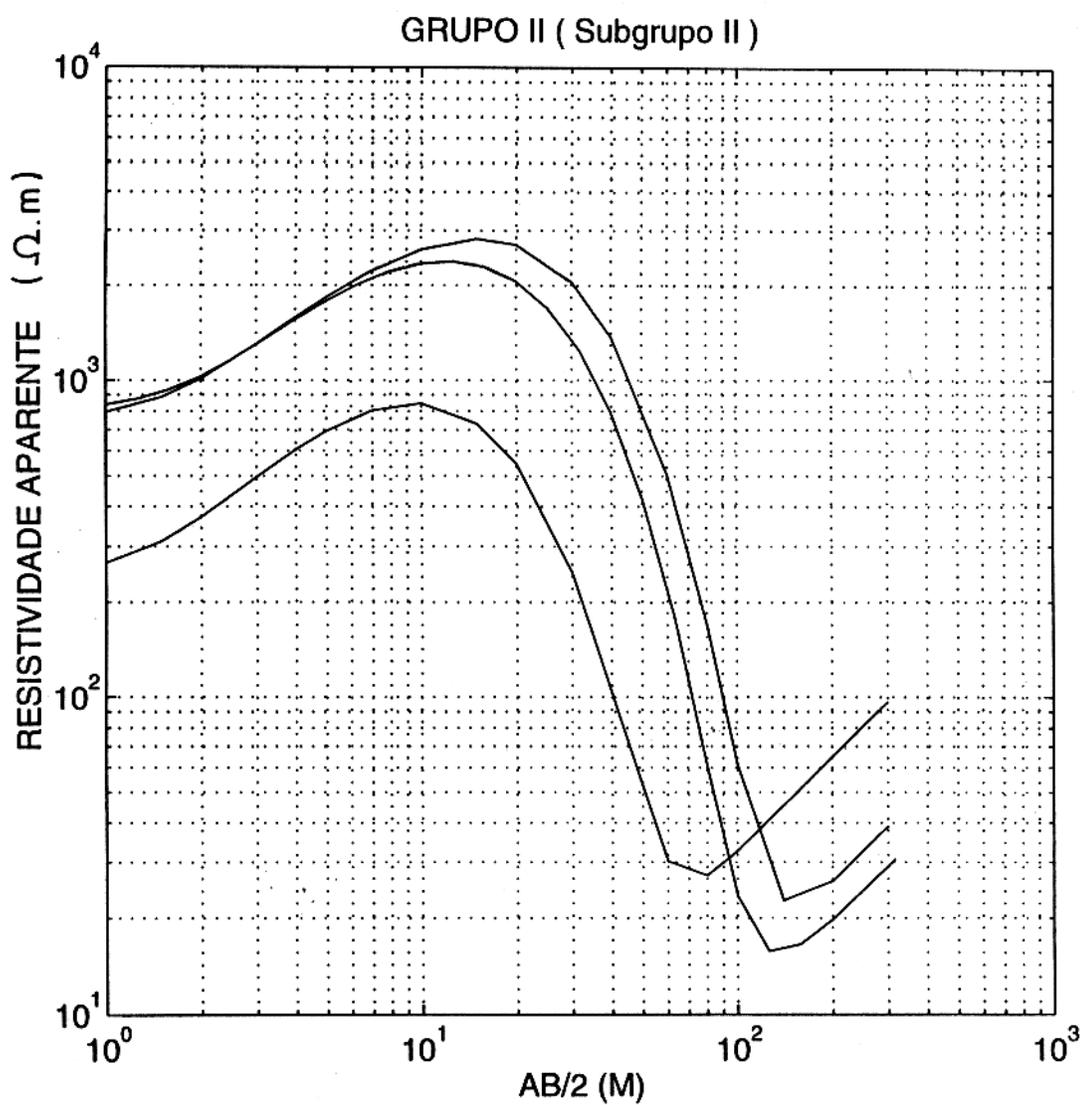


Figura 2.6 - Subgrupo II-2 de SEVs do GRUPO II, segundo FERREIRA (1979).

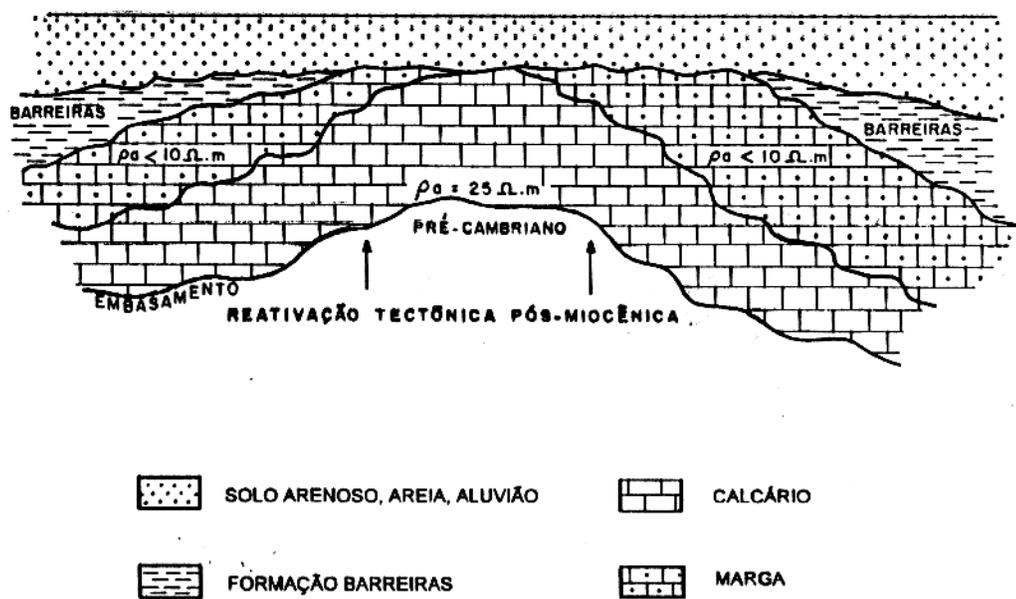


Figura 2.7 - Modelo de sedimentação para explicar as diferentes resistividades no calcário da Formação Pirabas, segundo FERREIRA (1979).

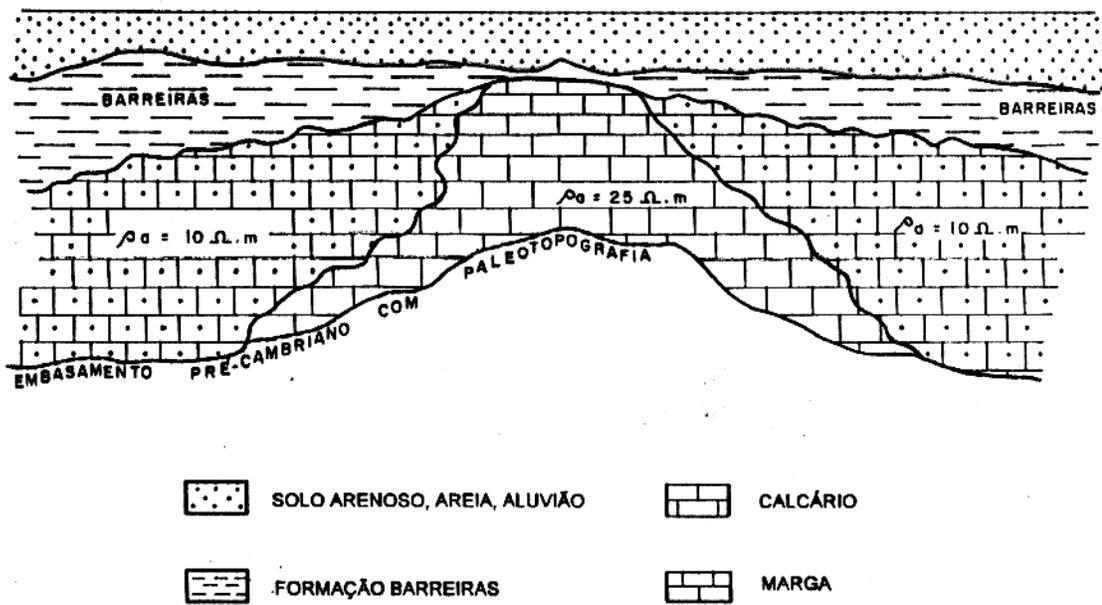


Figura 2.8 - Modelo de sedimentação para explicar as diferentes resistividades no calcário da Formação Pirabas, segundo FERREIRA (1979).

calcários da Formação Pirabas foram depositados sobre o embasamento e acima destes foi depositada uma camada mais argilosa. Essa sedimentação é interrompida por uma reativação pós-miocênica e, em seguida, as partes mais elevadas sofreram erosão superficial, deixando quase aflorante a camada da base sobre as partes altas do embasamento, e então, surgiu a distribuição atual dos dois tipos de calcários, segundo critérios de resistividade. O outro modelo, Figura 2.8, pressupõe que a Formação Pirabas depositou-se sobre uma já existente paleotopografia do embasamento, onde, nas partes mais altas, o calcário sofreria pouca contribuição de terrígenos, em relação às partes mais baixas.

- GRUPO III

Neste grupo, Figura 2.9, às SEVs foram realizadas sobre uma região onde o embasamento resistivo é aflorante e corresponde a filitos. A finalidade dessas sondagens foi de analisar os efeitos provocados pela anisotropia, que ocorrem em rochas apresentando descontinuidades devido às foliações.

- GRUPO IV

Neste grupo, Figura 2.10, refere-se às SEVs realizadas sobre a região estruturalmente denominada Bacia Sedimentar de Bragança-Viseu, com curvas apresentando feições do tipo KH e KQ, esta última sem um mínimo definido.

LUIZ (1991), realizou, a pedido da FNS, perfilagem geofísica, no poço PT-1/91-SJP no Município de São João de Pirabas. O objetivo desta perfilagem foi o de definir os limites de zonas atravessadas pela perfuração, com chances de produzir água (aquíferos) e auxiliar na localização de filtros de captação de água. Essa perfilagem contou com perfis de resistência elétrica, potencial espontâneo (SP) e raios gama, Figura 2.11. O autor interpretou três horizontes com potencialidades hídricas. O primeiro aquífero se encontra a 10 metros da superfície e apresenta uma espessura de 5,5 metros; o segundo está situado a 31 metros da superfície e se estende até 44 metros de profundidade; o último apresenta 11 metros de espessura a partir da profundidade de 79 metros, em relação à superfície. Segundo esse autor, as medidas de resistividade e raios gama indicam que o segundo aquífero apresenta as melhores potencialidades de reserva entre as profundidades de 39 metros e 44 metros.

Como se pode observar, os trabalhos realizados por FERREIRA (1979) e LUIZ (1991), constituem informações importantes para as interpretações das sondagens elétricas realizadas no Município de São João de Pirabas e, desta forma, foram aqui descritos em detalhes por permitir comparações, quanto a métodos de interpretação e enfoque do problema.

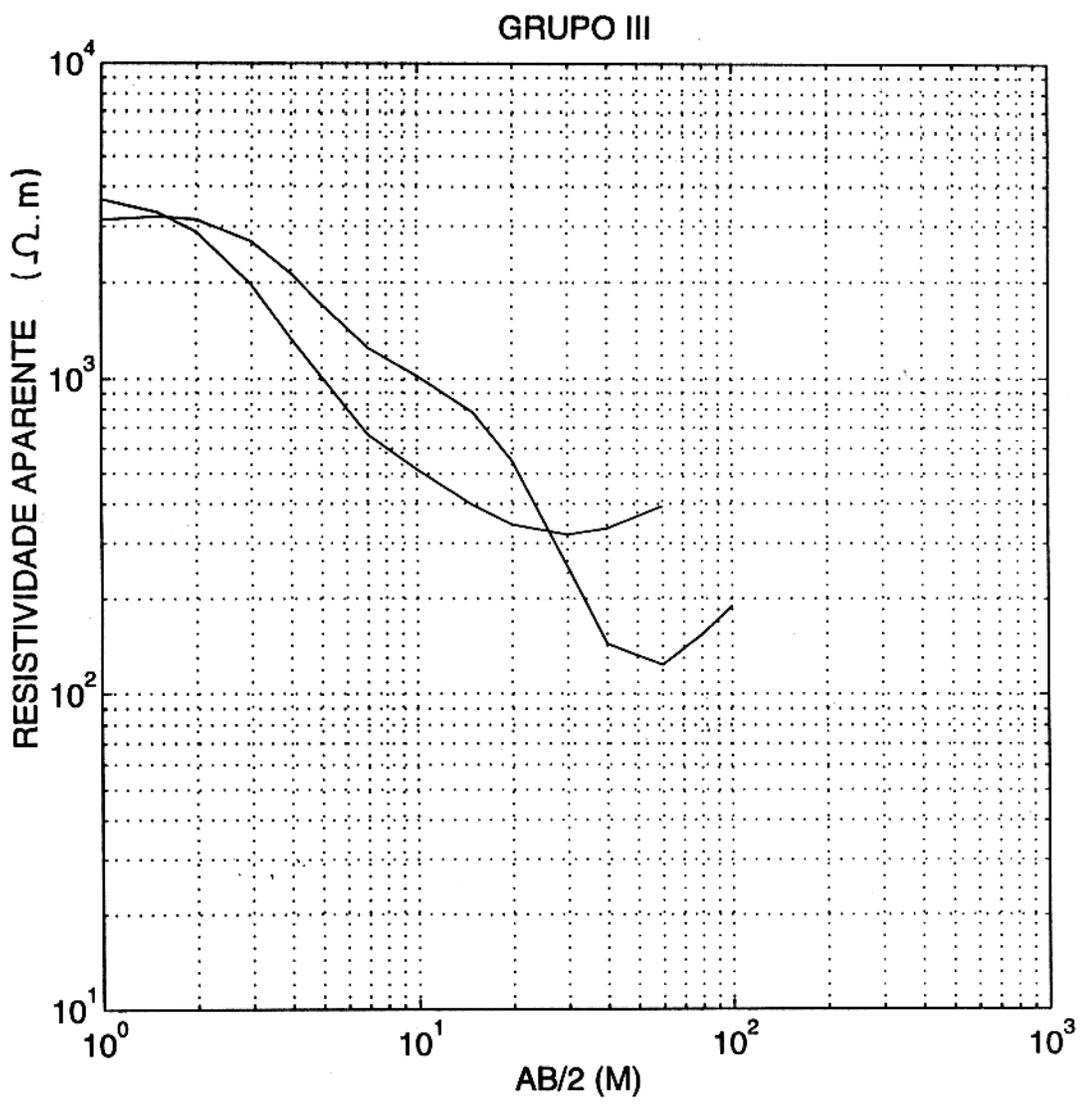


Figura 2.9 - SEVs do GRUPO III, segundo FERREIRA (1979).

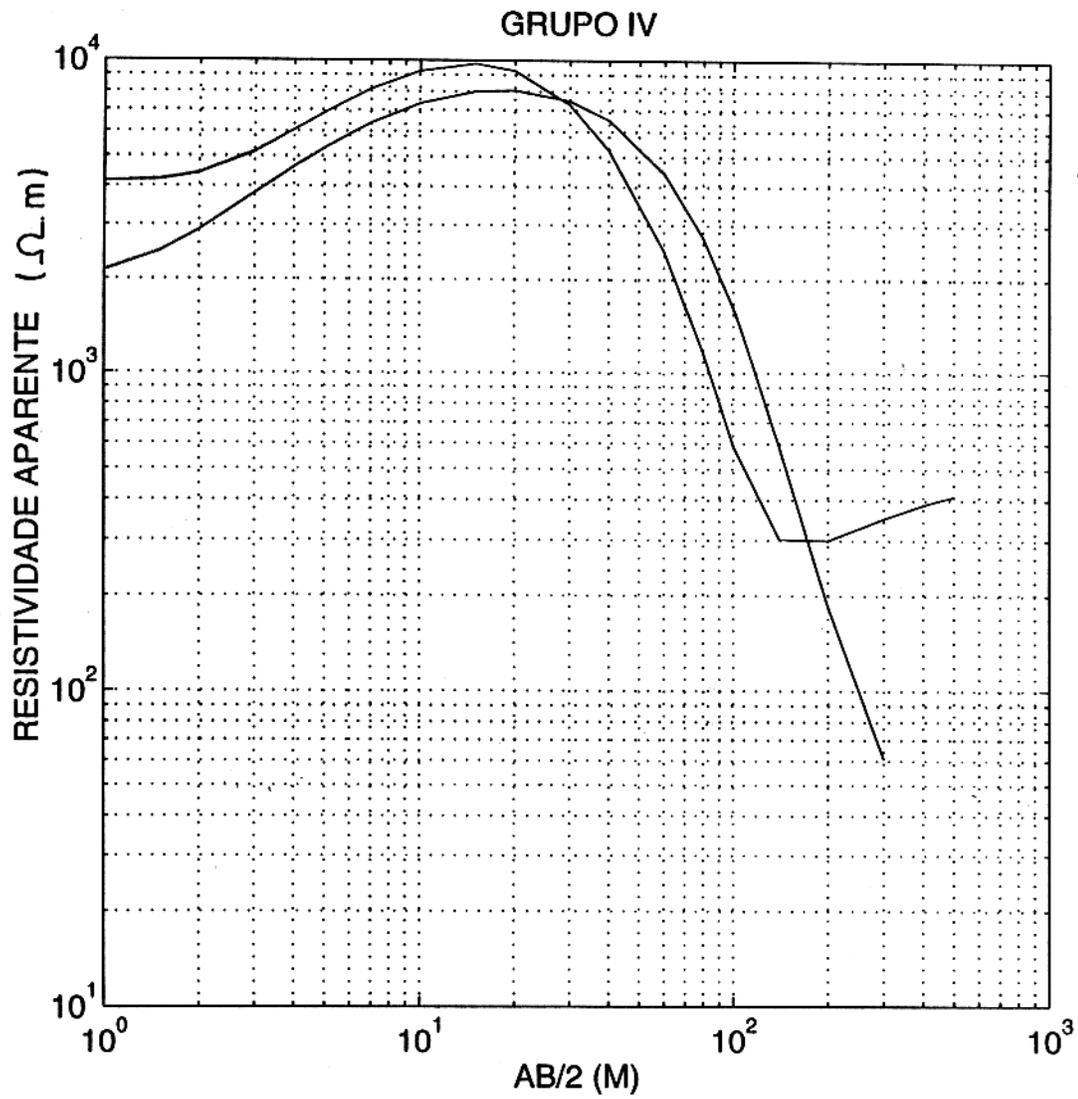


Figura 2.10 - SEVs do GRUPO IV, segundo FERREIRA (1979).

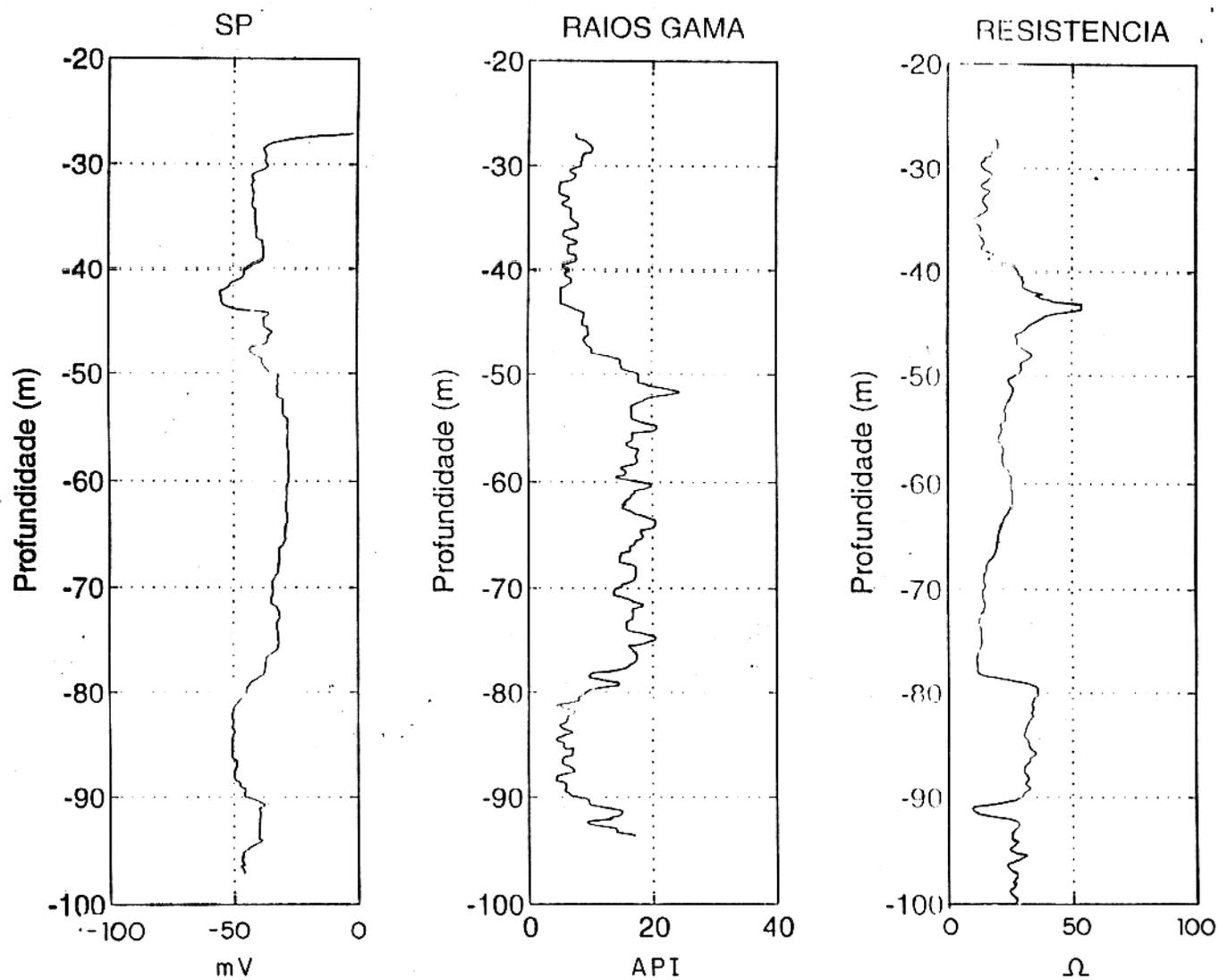


Figura 2.11 - Perfis de Resistência, Raios Gama e Potencial Espontâneo, no Município de São João de Pirabas, segundo LUIZ (1991).

3 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS E METODOLOGIA

3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO MÉTODO ELETRORESISTIVO

O método eletroresistivo consiste de uma operação em que é injetada corrente contínua (ou alternada de baixa frequência) em dois pontos, A e B, do terreno e a diferença de potencial é medida entre dois outros pontos, M e N, Figura 3.1. Para essa situação, e de acordo com a lei de Ohm, calcula-se a resistividade para um meio homogêneo e isotrópico, a partir da relação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (3.1)$$

em que:

ΔV - Diferença de potencial elétrico entre M e N. [V]

I - Corrente contínua aplicada entre A e B. [A]

ρ - Resistividade elétrica. [$\Omega.m$]

K - Fator geométrico do arranjo geral do quadripolo AMNB.

Esse fator geométrico dado pelo arranjo, cuja configuração geral correspondente aparece ilustrado na Figura 3.2, é fornecido pela fórmula, (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966)

$$K = 2\pi.(1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)^{-1}.$$

Esse fator é válido para qualquer tipo de arranjo.

Se o ambiente geológico fosse um semi-espaço homogêneo e ilimitado, como é inferido na equação 3.1, uma única medida seria suficiente para que se pudesse conhecer o comportamento eletroresistivo do meio. Porém essa simplicidade não é encontrada nos ambientes geológicos comuns, pois existem variações, laterais e verticais da resistividade, o que leva a escrever a equação 3.1, na forma:

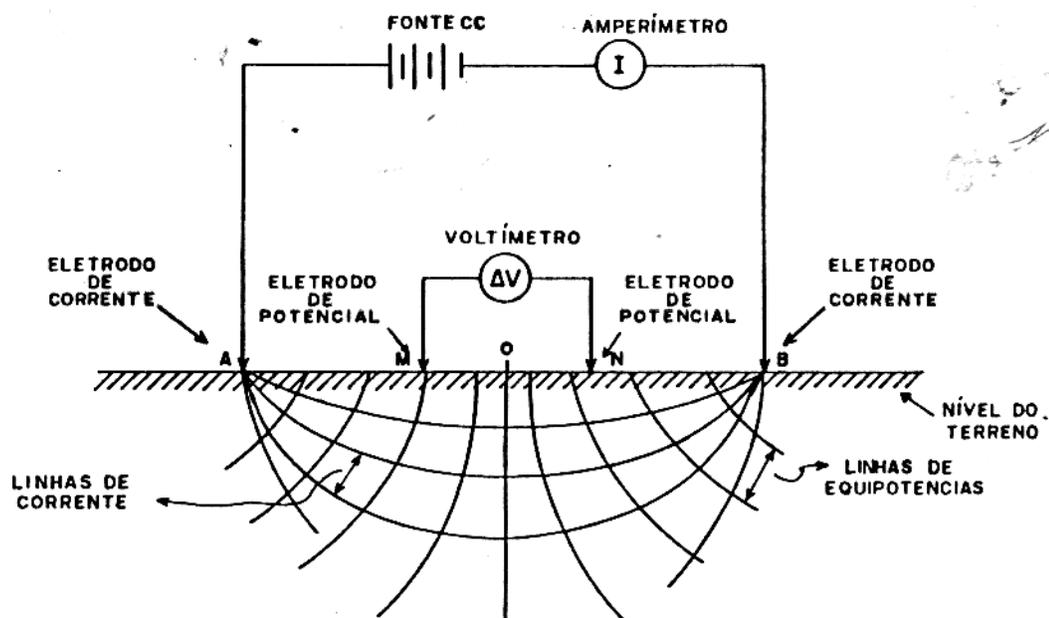


Figura 3.1 - Circuito elétrico para determinação de resistividade e campo elétrico de uma formação homogênea subsuperficial.

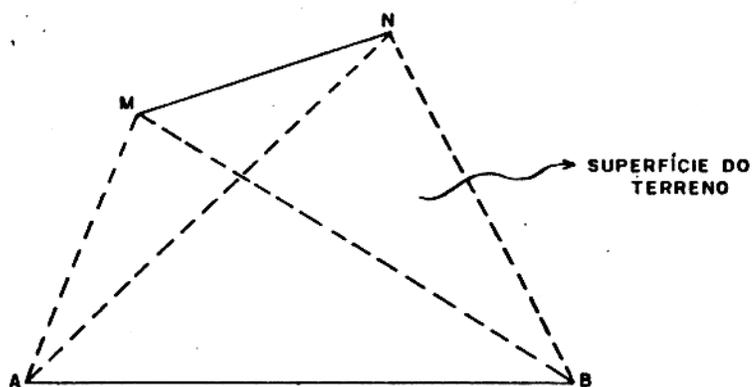


Figura 3.2 - Configuração geral para quatro eletrodos.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (3.2)$$

sendo a função ρ_a denominada de resistividade aparente. Ela depende não apenas das resistividades verdadeiras em subsuperfície, como também do arranjo dos eletrodos de medidas. Para saber o comportamento dessa resistividade aparente em subsuperfície é necessário que as distâncias dos eletrodos de corrente, (A e B), sejam aumentadas, continuamente, para se obter informações até a profundidade de interesse da investigação.

É comum dois tipos de configuração de eletrodos na investigação pelo método eletroresistivo:

- Os eletrodos de corrente são deslocados simetricamente em relação a um ponto central.
- Os eletrodos de corrente, assim como os de potencial se deslocam simultaneamente mantendo-se constantes o espaçamento entre os eletrodos.

Se o interesse da investigação é analisar a variação da resistividade em profundidade, é conveniente utilizar o primeiro tipo, onde os eletrodos são deslocados simetricamente. Esse método é chamado de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), muito utilizado na investigação de águas subterrâneas. Porém, se o ambiente a ser investigado apresentar variações laterais de resistividade, é mais conveniente usar o segundo tipo, que corresponde ao método de Caminhamento Elétrico, com o deslocamento simultâneo dos eletrodos.

No presente trabalho, utilizamos o arranjo Schlumberger para investigar a variação de resistividade em profundidade, enquanto que para determinar variações laterais de resistividade aparente foi empregado o arranjo dipolo-dipolo.

3.2 METODOLOGIA

As sondagens elétricas obtidas no campo foram interpretadas, primeiramente, levando em conta um modelo, onde as resistividades variam somente em profundidade. Esse tipo de modelo caracteriza uma situação unidimensional, em que cada horizonte geoeletrico é considerado isotrópico e homogêneo. Contudo, em regiões de com presença de calcários geralmente existem variações laterais devido a presença de cavidades. Portanto, as curvas de SEV que apresentaram perturbações devido a essas variações laterais, foram interpretadas usando modelos bidimensionais. Em seguida, são descritos os métodos aplicados para a interpretação unidimensional e bidimensional, para um melhor entendimento dos objetivos desta tese.

3.2.1 Métodos de Interpretação Unidimensional

As SEVs obtidas no campo foram, inicialmente, interpretadas usando o programa computacional EGSLIB/SEV1D, (RIJO, 1994a). Esse programa usa o método direto para calcular os valores de resistividade aparente para um dado modelo de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas. Para esse tipo de interpretação atribuímos valores de resistividade e espessuras para um modelo geoeletrico inicial, e comparamos visualmente os dados obtidos por esse modelo, com aqueles obtidos na sondagem de campo. Se a comparação entre os dados calculados se ajustam razoavelmente bem aos dados obtidos em campo, significa que o modelo adotado é satisfatório. No entanto, diferentes modelos podem produzir o mesmo conjunto de resistividades aparentes e ajustar os dados de campo, o que caracteriza uma ambigüidade inerente aos métodos de sondagem elétrica vertical, conhecida como princípio da equivalência. Objetivando reduzir essa ambigüidade, os modelos usados para interpretação das SEVs, basearam-se em informações a priori da geologia local, em dados de poço, e em interpretações de sondagens elétricas próximas ao local de estudo. Desta forma, foi possível minimizar as ambigüidades e obter modelos bastantes confiáveis.

Visando a um melhor refinamento nas interpretações das SEVs, utilizou-se, nessa etapa de interpretação, o programa computacional, EGSLIB/SEV1DINV, (RIJO, 1994b). Esse programa calcula as resistividades aparentes, para um modelo estratificado, pelo método de inversão. Para sondagens elétricas verticais, em primeiro lugar introduzimos no programa os valores de resistividade aparente obtidas no campo, conjuntamente com os valores de espessura e resistividade para um modelo inicial sugerido. Em seguida, através de sucessivas soluções do problema direto, no qual o modelo teórico depende dos parâmetros resistividade e espessura das camadas, o algoritmo de inversão procura ajustar automaticamente os dados de campo até que um ajuste mínimo seja atingido ou até uma porcentagem de erro no ajuste que seja do interesse da interpretação.

Nas SEVs, o algoritmo utilizado para a inversão se baseia nos mínimos quadrados simples (INMAN et al., 1973; RIJO, 1977; PELTON et al., 1978):

$$\Delta \vec{P} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta \vec{\rho}_a. \quad (3.3)$$

onde A é a matriz sensibilidade composta pelas derivadas das resistividades aparentes com relação aos parâmetros do modelo (resistividades verdadeiras e espessuras das camadas); A^T é a matriz transposta de A; \vec{P} é o vetor de parâmetros; $\Delta \vec{P}$ é a variação entre os parâmetros ao ajustar o mínimo; $\Delta \vec{\rho}_a$ é a variação entre as resistividades observadas (obtidas no campo)

e calculadas pelo programa do método direto. Portanto, se a variação $\Delta\vec{\rho}_a$ entre as resistividades observadas e calculadas é pequena, a variação entre os parâmetros que surgem ao ajustar o mínimo, $\Delta\vec{P}$, também é pequena e, conseqüentemente, o modelo inicial é próximo do real. Apesar da equação apresentar uma convergência muito rápida, muitas vezes pode convergir para um modelo irreal. Esse fato é decorrente da própria instabilidade da equação, que necessita de dados com o mínimo de erros e modelos iniciais muito próximos do real. Para que seja assegurada uma convergência usando modelos iniciais arbitrários, é utilizada a técnica dos mínimos quadrados amortecidos (LEVENBERG, 1944; MARQUART, 1963), cujo algoritmo é:

$$\Delta\vec{P} = (A^T + \lambda^2 I)^{-1} A^T \Delta\vec{\rho}_a^i, \quad (3.4)$$

onde I é a matriz identidade, λ é um parâmetro variável chamado de fator de amortecimento, e i é o número de iterações. No caso do valor de λ ser grande, o algoritmo se aproxima do método gradiente (BEVINGTON, 1969, p. 236), que é um método lento, mas tem a convergência garantida. Se o valor de λ é pequeno, o método usado é o de Newton-Raphson, mais rápido, porém pode divergir.

Portanto, a partir destes algoritmos e dos seu correspondentes programas computacionais pode-se obter, com uma precisão satisfatória, o comportamento geoeétrico da área de estudo.

3.2.2 Método de interpretação bidimensional

Como já foi citado, as formações geológicas com presença de calcários apresentam variações laterais de resistividade, por causa da presença de cavidades. Nessa situação, temos a resistividade variando em três direções e os métodos tradicionais de interpretações de SEVs, usando horizontes homogêneos e isotrópicos não devem ser aplicados. No caso das cavidades serem muito compridas em relação a extensão do arranjo dos eletrodos utilizados, as mesma podem ser aproximadas de estruturas bidimensionais. Para interpretar as SEVs que apresentaram este tipo de variações, foi empregado o programa computacional EGSLIB/SEV2D (RIJO, 1994c). Esse programa se baseia na técnica dos elementos finitos para interpretar sondagens elétricas verticais, que apresentem variações laterais de resistividade. A base dessa técnica consiste em aproximar a região de definição da solução procurada, por um conjunto de elementos discretos (RIJO, 1977).

Para os métodos eletroresistivos, tanto as propriedades elétricas do meio, como a fonte são tridimensionais (constituindo num problema 3D-3D) e, desta forma, o problema de contorno é tridimensional. O problema pode ser formulado como CARRASQUILLA & RIJO (1991):

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho(x, y, z)} \nabla U(x, y, z) \right] = I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (3.5)$$

onde, $U(x, y, z)$ é o potencial elétrico, $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$ é a função Delta tridimensional de Dirac, representando uma fonte pontual de corrente, e $\rho(x, y, z)$ é a resistividade do meio e $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$. Para que o potencial $U(x, y, z)$ seja limitado a grandes distâncias é necessário que existam condições de contorno que garantam um potencial limitado.

Se considerarmos que as propriedades elétricas sejam constantes ao longo de um dos eixos horizontais, no caso y , esse problema 3D-3D passa a ser um problema 2D-3D com a fonte ainda tridimensional (RIJO, 1982). Podemos ainda transformar esse Problema 2D-3D em um problema 2D-2D, se usarmos a Transformada direta de Fourier:

$$\hat{U}(x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) e^{ik_y y} dy \quad (3.6)$$

e a equação (3.5) passa no domínio da transformada para

$$\hat{\nabla} \cdot \left[\left(\frac{1}{\rho(x, z)} \right) \hat{\nabla} \hat{U}(x, k_y, z) \right] = I \delta(x - x_0) \delta(z - z_0), \quad (3.7)$$

em $\hat{\Omega}$ e as condições de contorno são:

$$n \cdot \left[\left(\frac{1}{\rho(x, z)} \right) \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} \right] = 0 \quad (3.8)$$

e

$$n \cdot \left[\left(\frac{1}{\rho(x, z)} \right) \frac{\partial \hat{U}}{\partial z} \right] = 0, \quad (3.9)$$

para $\partial \hat{\Omega}_1$. Enquanto que:

$$\hat{U} = \hat{U}_2 \quad (3.10)$$

em $\partial \hat{\Omega}_2$. Portanto $\hat{U}(x, k_y, z)$ é a transformada do potencial elétrico; $\hat{\nabla} = (\partial/\partial x, k_y, \partial/\partial z)$; $\delta(x - x_0) \delta(z - z_0)$ é a função delta bidimensional de Dirac; $\hat{\Omega}$ é uma região que representa a superfície; $\partial \hat{\Omega}_1$ é a interface terra e ar e $\partial \hat{\Omega}_2$ é a fronteira de $\hat{\Omega}$ dentro da terra, localizada

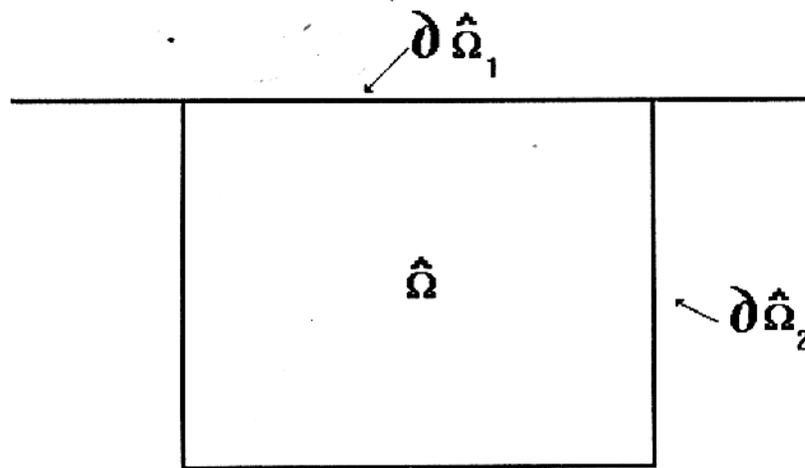


Figura 3.3 - Esquema das condições de contorno do Problema 2D-2D, do método de resistividade.

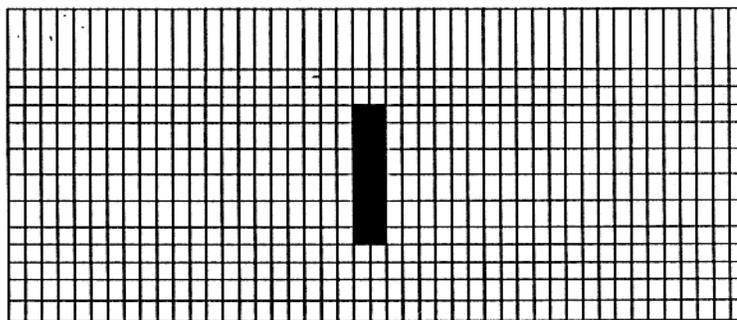


Figura 3.4 - Modelo de malha para elementos finitos, em destaque o corpo investigado.

longe da fonte transformada, Figura(3.3). As equações (3.8) e (3.9) correspondem à condição de Neuman, enquanto que a (3.10), a condição de Dirichlet (RIJO, 1991).

Para implementarmos o problema descrito, na técnica dos elementos finitos, dividimos a região $\hat{\Omega}$ em um número finito de subdomínios chamados de elementos. Neste trabalho esses elementos são retangulares, Figura (3.4). Para cada elemento dessa malha, a função $\hat{U}(x, k_y, z)$ é aproximada por polinômios de interpolação. Esses polinômios têm a forma:

$$N_i = \frac{(a_i + b_i x + c_i z + d_i xz)}{2\Delta}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.11)$$

onde x e z são coordenadas de um ponto arbitrário dentro do quadrado; a_i , b_i , c_i e d_i , são constantes que dependem das coordenadas dos vértices do retângulo e Δ é a área do elemento. O próximo passo é obter as equações matriciais dos elementos. Para tal usa-se o critério de Galerkin (RIJO, 1982) e as equações (3.7), (3.8) e (3.9), em cada elemento de $\hat{\Omega}$ serão:

$$H^e \hat{U} = f^e, \quad (3.12)$$

em que os elementos que constituem a matriz H^e são:

$$h_{ij} = \int_{\hat{\Omega}^e} \int \left(\frac{1}{\rho}\right) \left[\left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z}\right) - k_y^2 N_i N_j \right] dx dy.$$

Para f^e , teremos:

$$f_i = \int_{\hat{\Omega}^e} \int I \delta(x - x_0) \delta(z - z_0) N_i dx dy.$$

Após o cálculo para cada elemento, agrupamos o resultado das equações matriciais segundo a numeração dos nós da malha, resultando em:

$$H \hat{U} = \vec{f}, \quad (3.13)$$

que constitui a equação matricial global e \hat{U} é a solução geral procurada.

Porém essa solução é do problema 2D-2D. Para se ter a solução do problema original 2D-3D, basta aplicar a transformada inversa de Fourier. Como a função $\hat{U}(x, k_y, z)$ é par, em relação ao parâmetro k_y , essa transformada se reduz a uma transformada cosseno:

$$U(x, y, z) = 1/\pi \int_0^{\infty} \hat{U}(x, k_y, z) \cos(k_y y) dy \quad (3.14)$$

e assim obtemos o potencial elétrico $U(x, y, z)$. Para se obter as resistividades aparentes, usamos a relação $\vec{E} = -\Delta U(x, y, z)$ para calcular o campo elétrico e a equação :

$$\rho_{as} = \frac{2\pi s^2}{I} \vec{E}(s, \vec{P}), \quad (3.15)$$

que calcula a resistividade aparente Schlumberger na superfície de um semi-espaco estratificado (KOEFOED, 1979), em que $s = AB/2$ é a distância dos eletrodos ao centro do arranjo, I é a intensidade de corrente, $\vec{E}(s, \vec{P})$ é o campo elétrico e \vec{P} é o vetor de parâmetros (resistividade e espessura) dos horizontes geolétricos.

Como se pode observar, esse método permite calcular a resistividade aparente de ambientes geológicos que dificilmente seriam interpretadas a partir de modelos de SEV, que usam horizontes homogêneos e isotrópicos. Assim o programa EGSLIB/SEV2D, (RIJO, 1994c), teve importante contribuição nesse trabalho na interpretação de SEVs em locais onde existem cavidades nos calcários. O método dos elementos finitos também foi aplicado na interpretação bidimensional de caminhamentos elétricos. O programa utilizado para essa interpretação, EGSLIB/REIP2D (RIJO, 1994d), calcula as resistividades aparentes para caminhamentos elétricos usando o arranjo Dipolo-dipolo. Esse programa possui as mesmas bases metodológicas do programa de interpretação bidimensional de SEVs anteriormente apresentado, e foi utilizado para eliminar ambigüidades devido às interpretações das SEVs.

4 - MODELOS SINTÉTICOS

Os modelos sintéticos apresentados neste capítulo têm por objetivo mostrar os efeitos da presença de cavernas nas curvas de SEV. Esses modelos, Figura 4.1, representam um semi-espaço com resistividade $\rho_1 = 10 \Omega.m$, que contém um corpo de resistividade $\rho_2 = 1000 \Omega.m$ que representa a caverna. Inicialmente tem-se um modelo de caverna simétrica em relação ao centro da SEV, modelo I, Figura 4.1a. O modelo II, Figura 4.1b, representa uma caverna onde a distância (X) em relação ao centro da SEV é variada, ou seja, em um primeiro momento, a caverna está muito próxima desse centro e gradativamente o centro da SEV é deslocado em relação a caverna. Esses dois modelos apresentam a espessura da caverna constante, de $2 m$, e o comprimento variando $50 m$, $100 m$ e $200 m$. Finalmente, o modelo III, Figura 4.1c, representa uma caverna com espessura variando desde $2 m$ até $45 m$ e com comprimento constante de $10 m$ e simétrica em relação ao centro da SEV. A partir desses três modelos, pretende-se representar dois tipos de situação: uma onde os eletrodos de corrente AB são paralelos a caverna (modelos I e II) e uma outra onde os eletrodos AB são perpendiculares à caverna (modelo III).

4.1 MODELO I

As curvas de SEV relativas a esse modelo I estão representadas na Figura 4.2. Inicialmente tem-se a presença da caverna muito próxima à superfície, $H = 5 m$. Para esse tipo de situação pode-se observar que os valores de resistividade aparente crescem à medida que o corpo vai aumentando de comprimento, ou seja, os corpos maiores ($L = 200 m$) são responsáveis por uma perturbação maior da curva de resistividade aparente. Esse fato se repete para uma profundidade maior, $H = 20 m$. A diferença entre as curvas para $H = 5 m$ e $H = 20 m$ está na atenuação dos valores de resistividade aparente para cavernas mais profundas, que, por vezes, é tão forte que não se percebe a presença do corpo ($L = 50 m$). Ainda na Figura 4.2, nas duas situações descritas, as curvas obtidas lembram um modelo estratificado de três camadas ($\rho_1 = \rho_2 = 10 \Omega.m$ e $\rho_3 = 1000 \Omega.m$), denominados na figura por **CAMADAS 1D**. Entretanto, quando se compara as curvas do modelo I com uma situação de horizontes estratificados, as curvas obtidas são muito diferentes. Na Figura 4.2a as curvas referentes ao modelo I, apresentam forte declividade na curva para as cavernas com comprimentos 100 e $200 m$, enquanto que para um ambiente estratificado a curva apresenta

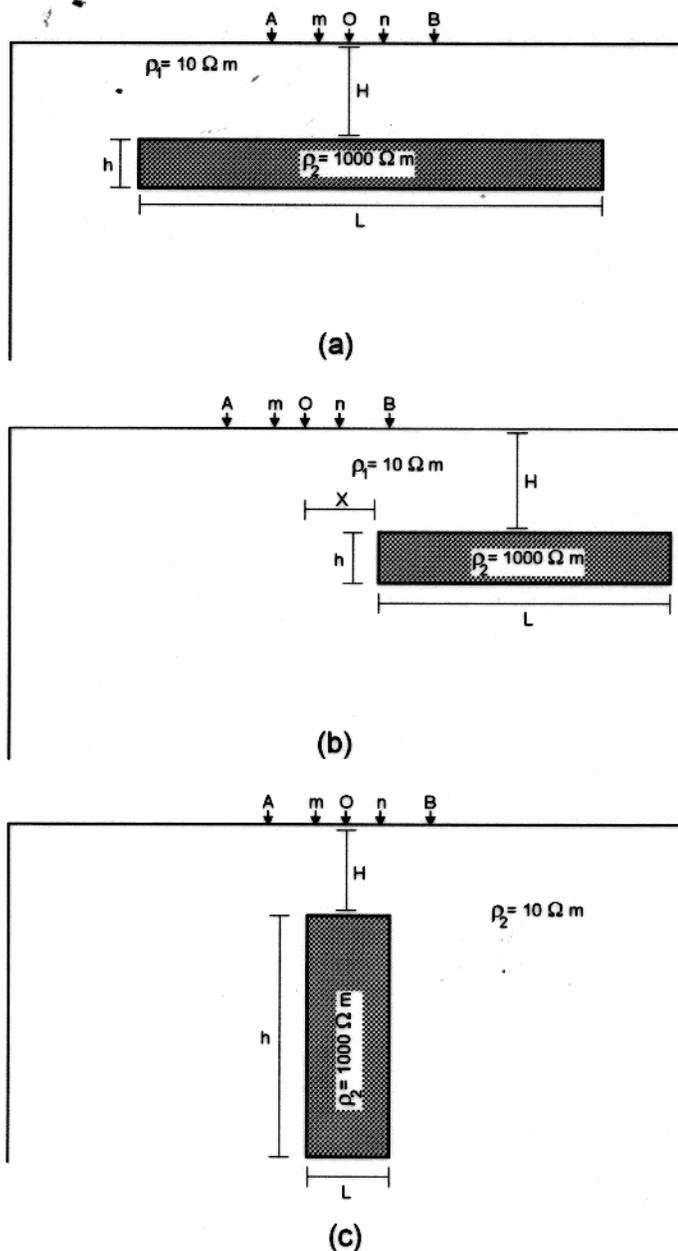


Figura 4.1 - Modelos sintéticos para representar um semi-espaco com $\rho_1 = 10 \Omega.m$ e uma caverna com $\rho_2 = 1000 \Omega.m$. A) Modelo I, caverna simétrica em relação ao centro da SEV com comprimento L variável. B) Modelo II, caverna assimétrica em relação ao centro da SEV com comprimento L e distância X variável. C) Modelo III, Caverna simétrica em relação ao centro da SEV com espessura h variável.

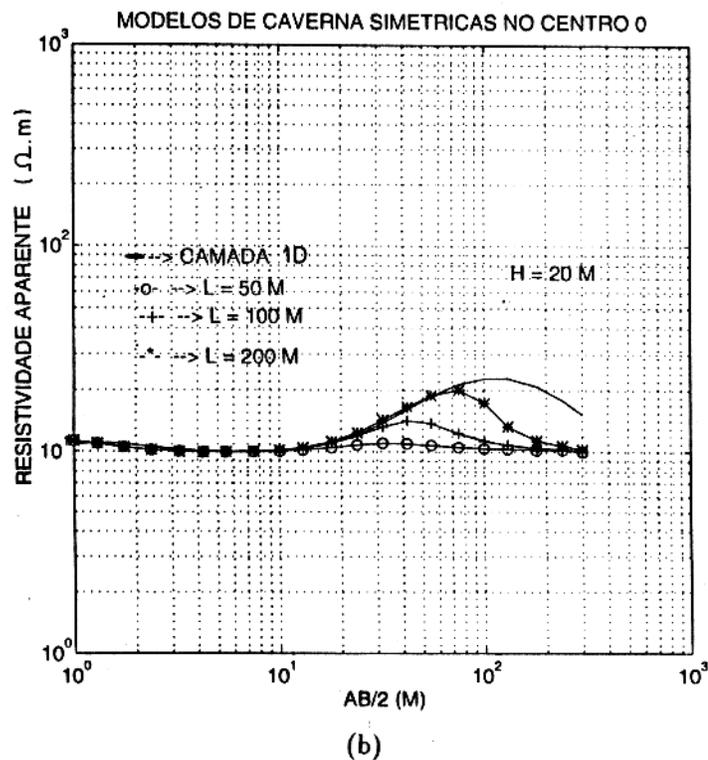
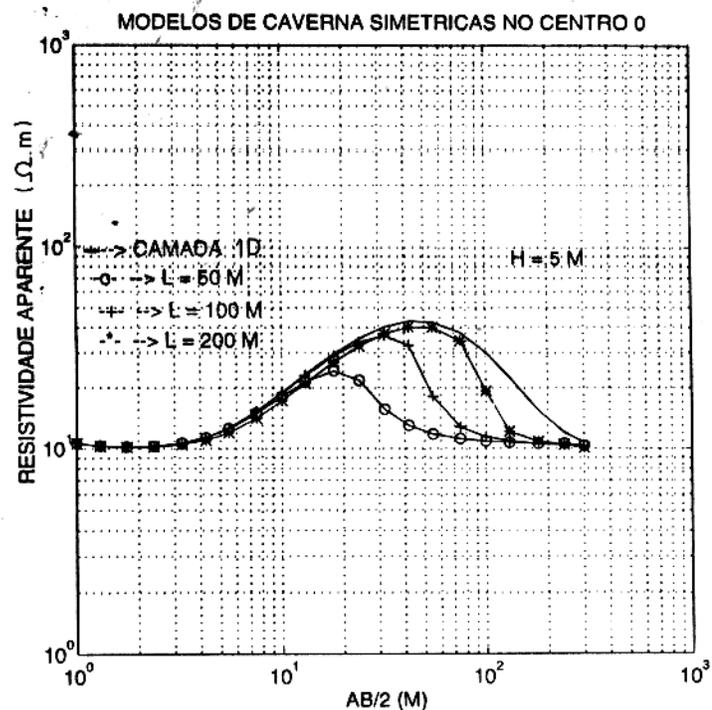


Figura 4.2 - Curvas de resistividade das cavernas simétricas do centro da SEV (Modelo I). A) Caverna a profundidade $H = 5\text{ m}$ da superfície e comprimentos $L = 50\text{ m}$, 100 m e 200 m . B) Caverna a profundidade $H = 20\text{ m}$ da superfície e comprimentos $L = 50\text{ m}$, 100 m e 200 m .

uma declividade suave. Nas cavernas mais profundas esta declividade nas curvas é menos intensa e só pode ser notada para as cavernas de comprimentos maiores, Figura 4.2b. Essa forte declividade causada pelas cavernas, nas curvas de resistividade aparente, é explicada pela relação entre a abertura dos eletrodos de corrente e o comprimento das cavernas. Percebe-se, principalmente na Figura 4.2a, que quando os eletrodos de corrente são próximos, a corrente injetada atinge somente o meio com resistividade $10 \Omega.m$. À medida que esses eletrodos apresentam distâncias maiores, a presença das cavernas influem na resistividade aparente e a curva é deslocada para cima. Porém, quando a distância entre os eletrodos é próxima ao comprimento total das cavernas, a corrente injetada pelos eletrodos tende a desviar-se das cavernas, levando a uma forte queda dos valores de resistividade aparente e levando a curva a apresentar uma forte declividade. Para modelos estratificados isso não ocorre porque são assumidas camadas infinitas, ou seja, sempre a camada resistiva irá contribuir para as medidas de resistividade aparente.

4.2 MODELO II

Esse modelo representa cavernas em posições assimétricas, em relação ao centro da SEV, Figura 4.1b. As curvas de resistividade aparente para esse modelo são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4, em que a primeira é devido a uma caverna rasa, com $H = 5 m$, e a segunda a uma caverna mais profunda com $H = 20 m$. Inicialmente, para a primeira profundidade, é apresentada a curva de resistividade aparente, quando uma das extremidades laterais das cavernas está muito próxima do centro da SEV, Figura 4.3a. Para essa situação, as curvas de resistividade aparente mostram um grande aumento desses valores quando comparadas a uma situação sem cavernas, só o semi-espaço. Quando essas cavernas se encontram a $25 m$ do centro da SEV, Figura 4.3b, os valores de resistividade aparente apresentam uma queda muito acentuada, para todos os comprimentos da caverna e as curvas não mostram claramente a presença delas. Para distâncias ainda maiores do centro ($X = 50 m$ e $75 m$), os valores de resistividade aparente são praticamente idênticos àqueles da situação sem caverna.

A uma profundidade de $20 m$, as curvas de resistividade aparente para cavernas próximas do centro, Figura 4.4a, apresentam comportamento semelhante àqueles obtidos para situações mais rasas, isto é, percebe-se um aumento da resistividade aparente na curva devido à presença dessas cavernas, porém, com amplitude menor devido a profundidade maior da caverna. As curvas relativas às cavernas distando $25 m$ em relação ao centro, Figura 4.4b, apresentam valores de resistividade aparente, maiores na parte final da curva, quando comparados à situação anterior desse modelo II, Figura 4.3b. Isso ocorre porque quando AB é muito grande,

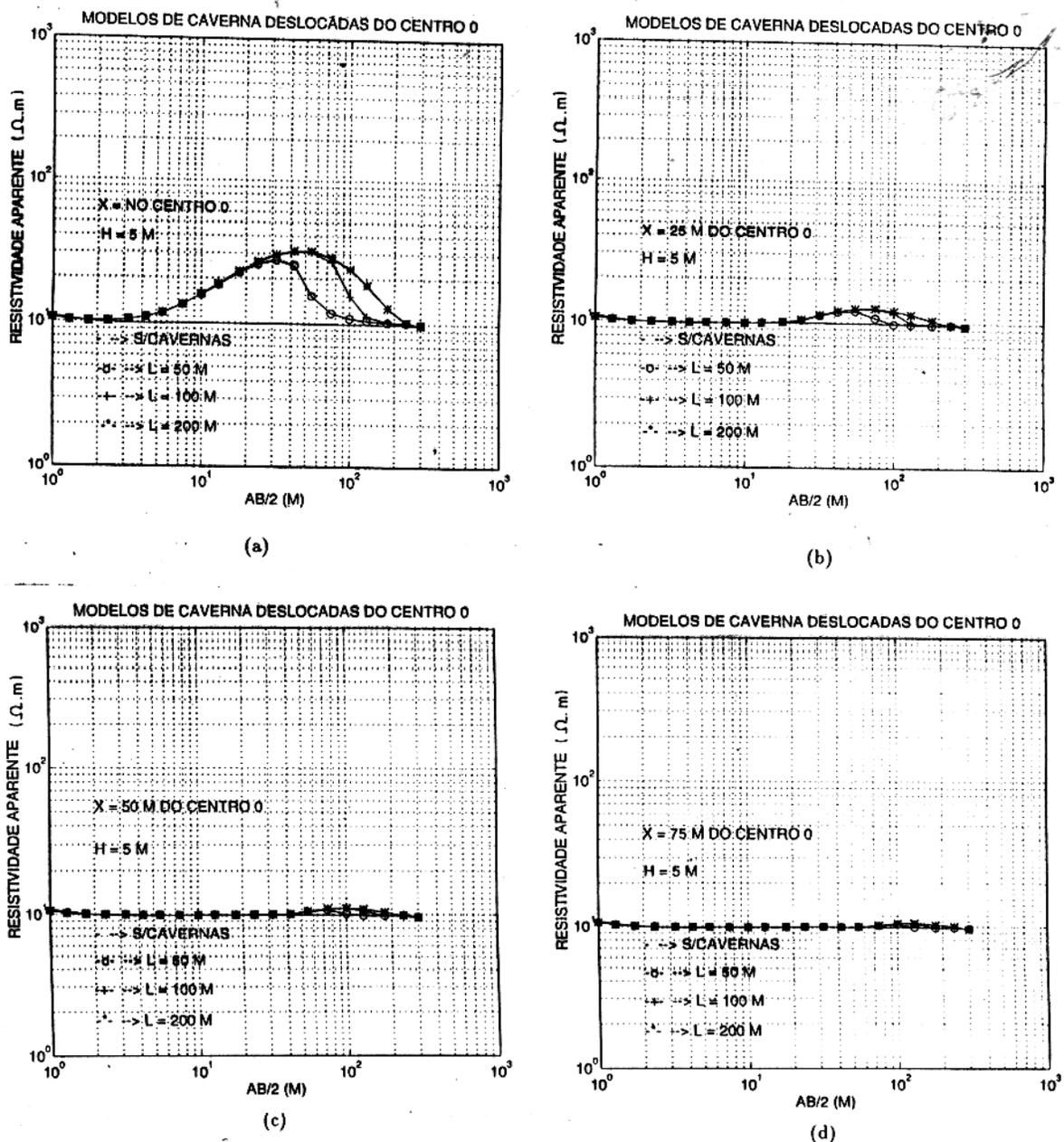


Figura 4.3 - Curvas de resistividade das cavernas deslocadas do centro da SEV (Modelo II), com $H = 5 \text{ m}$. A) Borda da caverna abaixo do centro da SEV. B) Caverna a 25 m do centro da SEV. C) Caverna a 50 m do centro da SEV. D) Caverna a 75 m do centro da SEV.

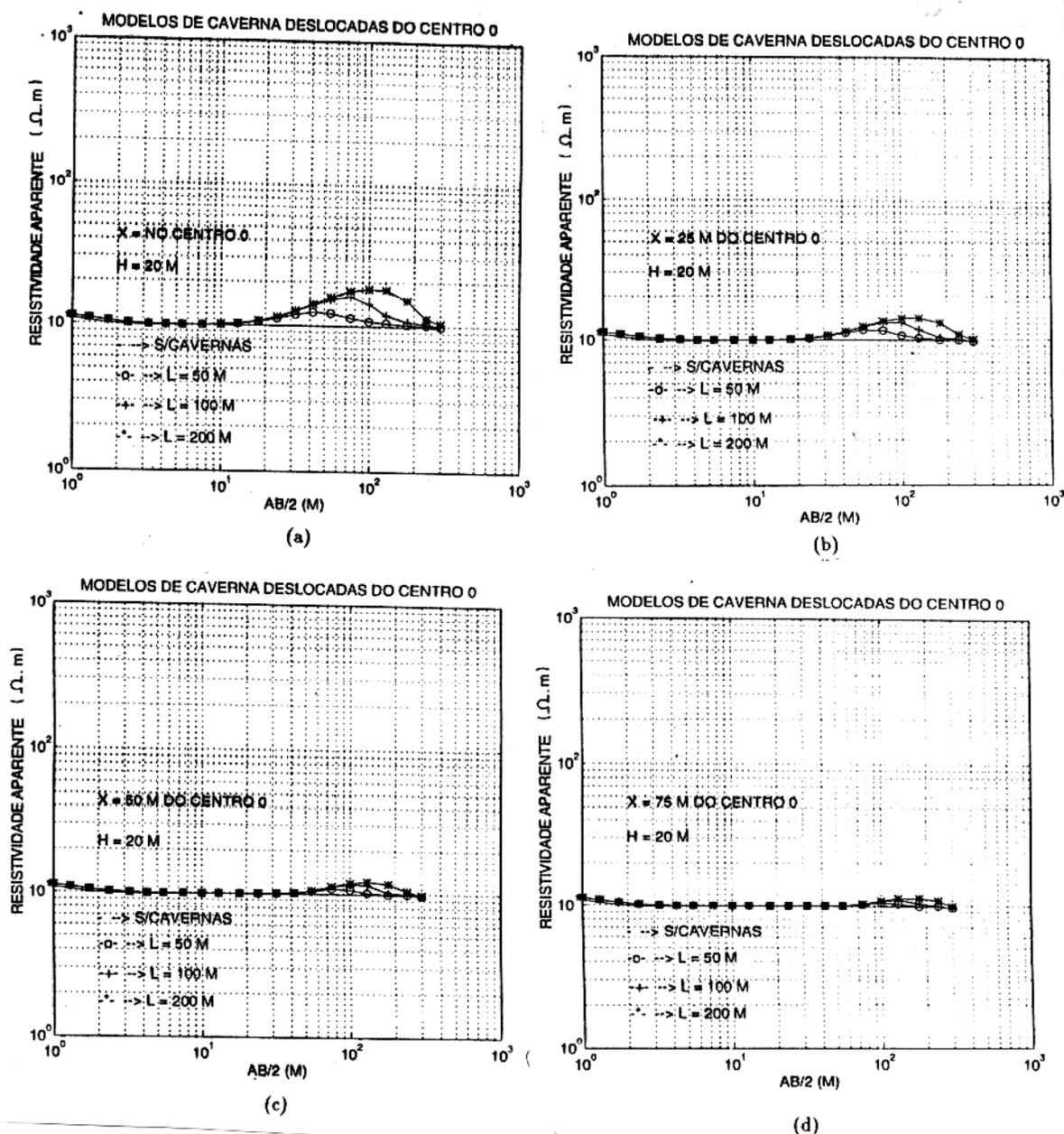


Figura 4.4 - Curvas de resistividade das cavernas deslocadas do centro da SEV (Modelo II), com $H = 20 \text{ m}$. A) Borda da caverna abaixo do centro da SEV. B) Caverna a 25 m do centro da SEV. C) Caverna a 50 m do centro da SEV. D) Caverna a 75 m do centro da SEV.

a corrente injetada tende a investigar horizontes mais profundos, portanto, as cavernas mais rasas não influem na curva como as cavernas mais profundas. Isso pode ser explicado fisicamente da seguinte forma: Quando essas cavernas estão próximas da superfície ($H = 5\text{ m}$); a densidade de corrente (J) no setor entre o topo da caverna e a superfície onde se encontra os eletrodos é maior que na situação onde as cavernas se encontram a uma maior profundidade ($H = 20\text{ m}$). Desta forma, como a resistividade é inversamente proporcional a essa densidade de corrente ($\rho \propto \frac{1}{J}$), é normal que a resistividade aparente aumente para as cavernas mais profundas. Para as cavernas mais distantes do centro da SEV, ($X = 50\text{ m e } 75\text{ m}$), também é notado esse efeito, Figura 4.4c e 4.4d. Apesar desse aumento na resistividade aparente, observado na parte final das curvas, para cavernas mais profundas, ainda não fica muito evidente nas curvas a presença dessas cavernas, quando estas estão distantes do centro da SEV.

4.3 MODELO III

Esse modelo, como se pode observar na Figura 4.1c, representa uma situação em que os eletrodos de corrente AB são perpendiculares à caverna e o comprimento da caverna é mantido constante. Para essa condição, obtiveram-se curvas de resistividade aparente que são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6. Inicialmente, o topo da caverna se encontra próximo da superfície e a espessura da caverna sofre uma variação primeiro para os valores de $h = 2\text{ m}$, $h = 4\text{ m}$ e $h = 8\text{ m}$, Figura 4.5a e, em seguida, para $h = 15\text{ m}$, $h = 30\text{ m}$ e $h = 45\text{ m}$, Figura 4.5b. Percebe-se que o aumento da espessura, nesse modelo de caverna contribui para um aumento da resistividade aparente em todas as situações. Porém essa contribuição é mais significativa para as cavernas com espessuras maiores que 15 m , Figura 4.5b. Para as espessuras, $h = 2\text{ m}$, $h = 4\text{ m}$ e $h = 8\text{ m}$, Figura 4.5a, apesar do aumento ser percebido, não induz à presença de uma caverna. Para uma profundidade $H = 20\text{ m}$, Figura 4.6a, cavernas com espessuras $h = 2\text{ m}$, $h = 4\text{ m}$ e $h = 8\text{ m}$, não existe nenhuma variação de resistividade aparente, ou seja, para essas condições é muito difícil detectar cavernas utilizando o método de SEV. Esse fato não é muito diferente quando se aumenta a espessura da caverna para $h = 15\text{ m}$, $h = 30\text{ m}$ e $h = 45\text{ m}$, Figura 4.6b. Para situações em que essas cavernas sejam distantes da superfície e os eletrodos AB aumentam perpendicularmente em relação à caverna, é muito difícil se detectar cavernas pelo método da SEV.

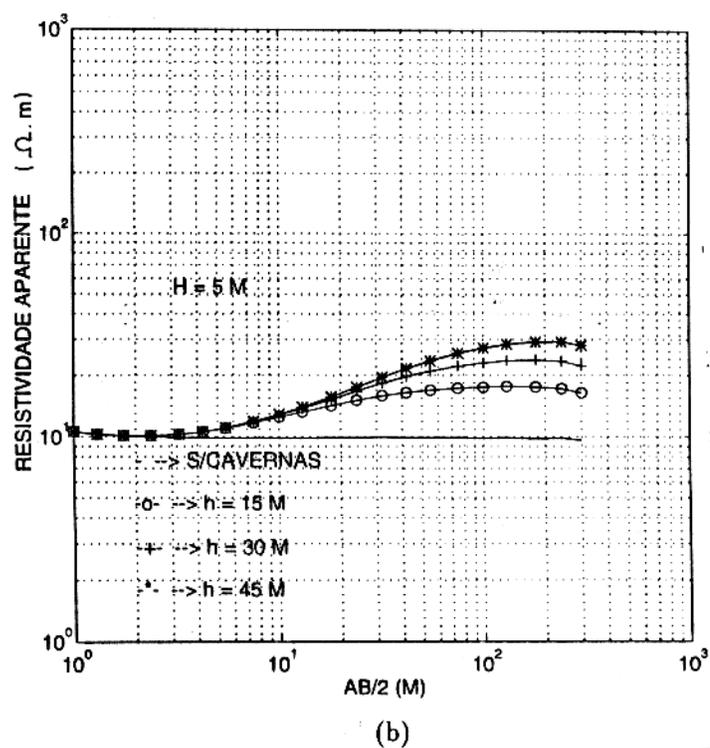
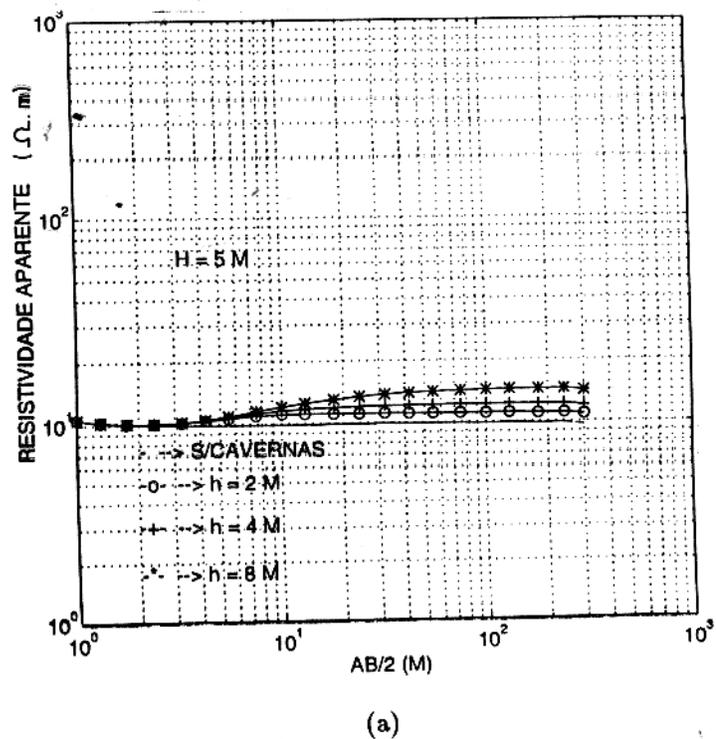


Figura 4.5 - Curvas de resistividade das cavernas transversais a SEV (Modelo III), com $H = 5$ m. A) Cavernas com espessuras $h = 2$ m, $h = 4$ m $h = 8$ m. B) Cavernas com espessuras $h = 15$ m, $h = 30$ m $h = 45$ m.

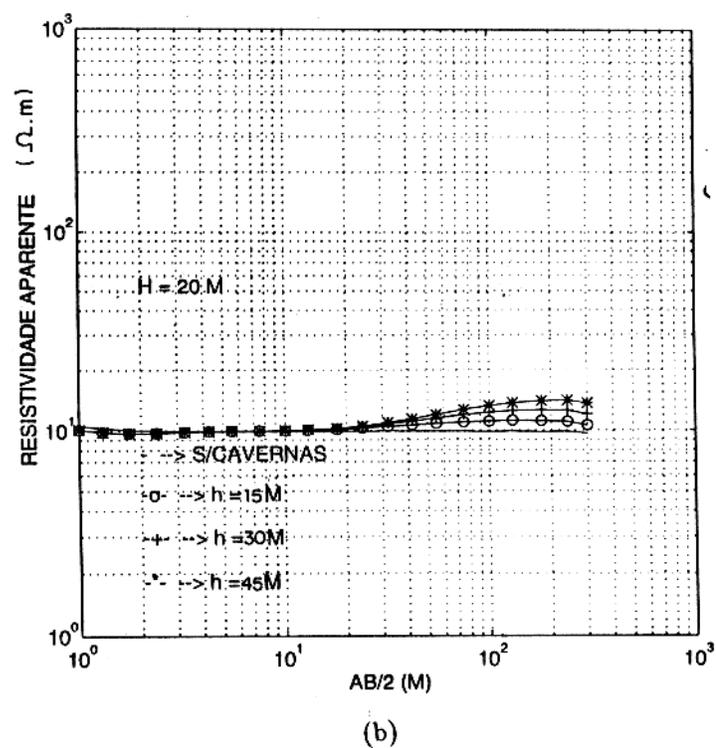
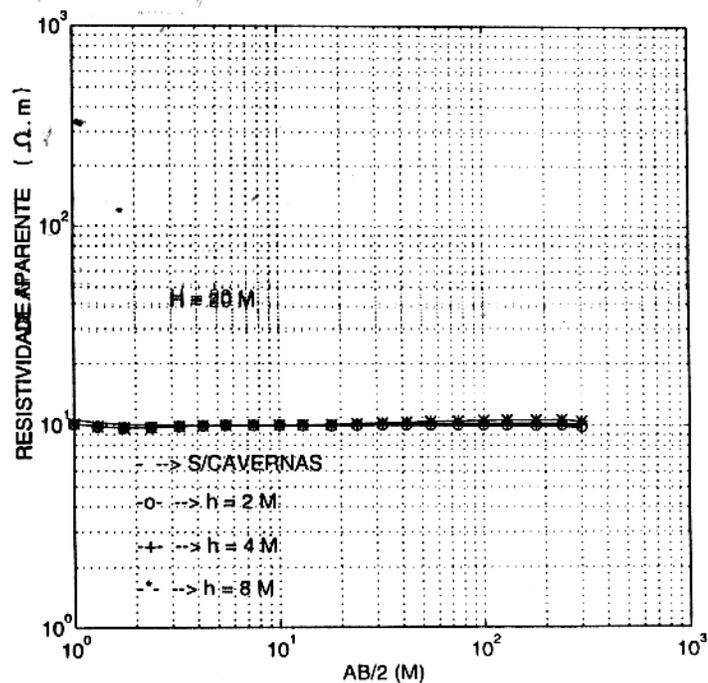


Figura 4.6 - Curvas de resistividade das cavernas transversais a SEV (Modelo III), com $H = 20$ m. A) Cavernas com espessuras $h = 2$ m, $h = 4$ m $h = 8$ m. B) Cavernas com espessuras $h = 15$ m, $h = 30$ m $h = 45$ m.

5 - INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das sondagens de campo, as suas interpretações e a discussão quanto à presença de cavernas nos calcários da Formação Pirabas. Inicialmente, como foi dito no capítulo 2 desse trabalho, são apresentadas as interpretações das sondagens para um modelo unidimensional de horizontes homogêneos e isotrópicos. Em seguida, as SEVs realizadas próximas à ocorrência da caverna são interpretadas usando, um modelo bidimensional.

5.1 FEIÇÕES GERAIS DAS CURVAS DE CAMPO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

No total foram realizadas 15 sondagens elétricas verticais por toda a área estudada, Figura 5.1, usando o arranjo Schlumberger, com abertura máxima para os eletrodos de corrente em torno de 600 m. As curvas de resistividade aparente obtidas para cada SEV e as interpretações dessas curvas se encontram num Anexo na parte final da tese. Baseado nos dados de geologia e no trabalho de FERREIRA (1979), as curvas de resistividade aparente foram divididas qualitativamente em três grupos distintos. O grupo I representa curvas padrão tipo KH com cinco camadas, Figura 5.2. Essas curvas são as que mais ocorrem na área estudada, em torno de 60% de todas as as sondagens realizadas. A partir das interpretações dessas curvas, foi possível estabelecer valores máximos e mínimos de resistividade e espessura dos horizontes que ocorrem nesse grupo, tal como aparece na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores máximos e mínimos de resistividade e espessura para as sondagens do Grupo I.

<i>horizontes</i>	<i>resistividade ($\Omega.m$)</i>	<i>Espessura (m)</i>
horizonte 1	110 - 600	1.0 - 2.0
horizonte 2	760 - 2500	1.0 - 15.0
horizonte 3	210 - 800	5.0 - 38.0
horizonte 4	5 - 18	50.0 - 60.0
horizonte 5	5000	

R I O P I R A B A S



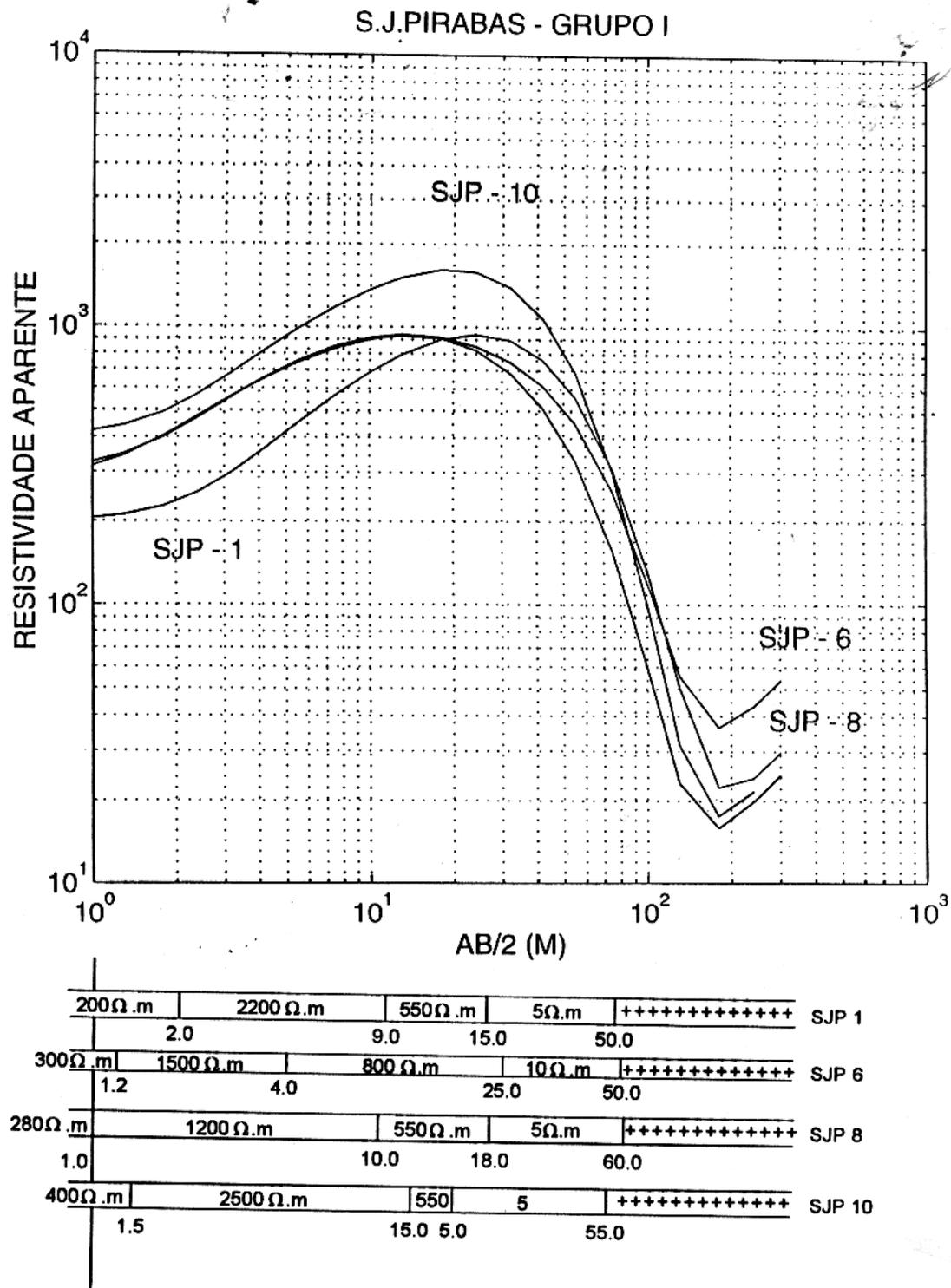


Figura 5.2 - Curvas de SEVs do Grupo I, tipo KH

Neste primeiro grupo de SEVs, os dois primeiros horizontes são relativos a sedimentos areno-argilosos, sendo o segundo horizonte mais arenoso devido a sua alta resistividade. O terceiro horizonte corresponde aos sedimentos do Grupo Barreiras e apresenta muitas variações nos seus valores de espessura e resistividade em torno de $550 \Omega.m$, exceto para as sondagens SJP-6 ($800 \Omega.m$) e SJP-7 ($210 \Omega.m$). O quarto horizonte identificado, corresponde aos sedimentos da Formação Pirabas e apresenta o menor valor de resistividade aparente na área estudada, $5 \Omega.m$ em média. Percebe-se, também, que esse horizonte é responsável pelo maior pacote de sedimentos nos locais onde foram realizadas as sondagens. Finalmente, o quinto e último horizonte desse grupo corresponde às rochas do embasamento da bacia com resistividade $5000 \Omega.m$.

Uma outra característica desse grupo é que as curvas de resistividade aparente, Figura 5.2, se assemelham muito às curvas obtidas por FERREIRA (1979) na região Bragantina, Figuras 3.5 e 3.6. Assim sendo, é possível afirmar que as curvas desse grupo apresentam um caráter regional.

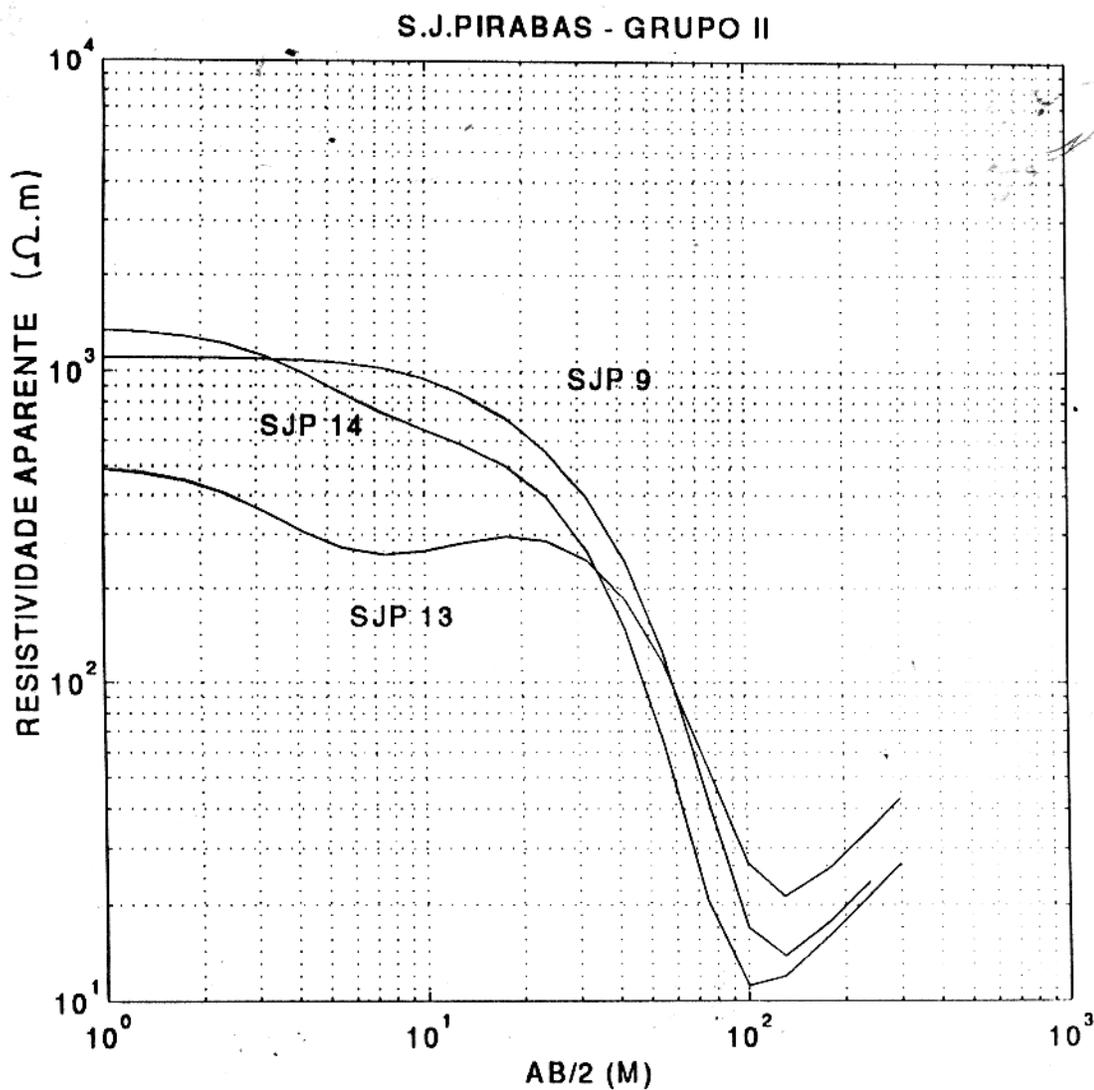
O Grupo II está representado pelas sondagens, SJP-9, SJP13, SJP14, Figura 5.3. As curvas desse grupo, apresentam um primeiro horizonte muito resistivo, variando de $500 \Omega.m$ a $1350 \Omega.m$, o que revela uma situação típica de sedimentos arenosos. Os demais horizontes desse grupo, apresentam um comportamento semelhante ao Grupo I, no que diz respeito à resistividade e espessura. O terceiro grupo de SEVs, Grupo III, corresponde as sondagens SJP-11 E SJP-2, próximas ao Rio Pirabas, Figura 5.4. Percebe-se claramente, para as SEVs desse grupo, uma queda nos valores de resistividade aparente na curva, quando comparadas com as curvas dos grupos, I e II. Essa queda nos valores de resistividade aparente é provocada pela infiltração de água salgada, oriunda do Rio Pirabas, nos sedimentos do Grupo Barreiras. Nos locais mais distantes do rio, os valores de resistividade dos sedimentos do Grupo Barreiras serão em torno de $550 \Omega.m$, enquanto que, próximo, ficam entre 100 e $200 \Omega.m$.

De forma geral, os horizontes geoeletricos da área estudada, apresentam contrastes de resistividade intimamente relacionados ao comportamento geológico da área. Essa relação é clara quando comparamos os dados geoeletricos das sondagens SJP-1 e SJP-8, próximas ao poço PT-1/91-SJP, com o perfil estratigráfico (cedido por MANFREDO XIMENES, geólogo da FNS) e geofísico (LUIZ, 1991) desse poço, Figura 5.5(a), 5.5(b) e 5.5(c). Percebe-se que em ambas as SEVs, o contato entre o terceiro horizonte (Grupo Barreiras) e o quarto horizonte (Formação Pirabas), Figura 5.2, ocorre para uma mesma profundidade observada no perfil estratigráfico, Figura 5.5(a), ou seja, o contraste de resistividade entre esses horizontes reflete o contato geológico entre esses sedimentos. Esse fato chama atenção não somente por refletir esse contato geológico, mas sim por ser no contato entre os sedimentos do Grupo

Barreiras e Formação Pirabas que ocorreu a caverna detectada durante a perfuração do poço PT-1/91-SJP (op.cit MANFREDO XIMENES). Essa informação será muito útil para esse trabalho, quando forem interpretadas as sondagens próximas a esse poço, usando um modelo bidimensional.

Uma e outra característica geológica que as curvas de resistividade aparente mostram, diz respeito à baixa resistividade dos calcários da Formação Pirabas. Como os sedimentos dessa Formação são os que apresentam uma grande quantidade de intercalações de folhelhos, Figura 5.5(a), a resistividade encontrada para esses sedimentos apresenta valores muito pequenos. Essas intercalações de folhelhos são nitidamente observadas no perfil de *raios gama*, entre as profundidades de 50 e 76 m, Figura 5.5(b). Percebe-se que nessas profundidades, a grande quantidade de folhelhos intercalados nos sedimentos dessa formação, desloca a curva para a direita e pode-se observar uma intensa variação na amplitude do sinal medido, devido a essas intercalações. Nos outros dois perfis geofísicos, *Potencial espontâneo e resistência*, Figura 5.5(b), não é possível identificar essa intercalação entre folhelhos e calcários. Porém, nesses perfis, podem-se observar dois horizontes com potencialidade de armazenar água, ambos nos calcários sem folhelhos da Formação Pirabas, sendo que o primeiro está a uma profundidade de 45 m da superfície e o segundo a 80 m da superfície, (LUIZ,1991).

Baseado nas interpretações de algumas SEVs, três perfis geoeletricos foram elaborados com o objetivo de ampliar as informações sobre os horizontes geoeletricos da área estudada. O primeiro desses perfis, Figura 5.6, está na direção NE - SW e mostra as sondagens, SJP-3, SJP-5, SJP-13 e SJP-14 praticamente alinhadas, como se pode observar na Figura 5.1. Nesse perfil 1, o horizonte relativo à Formação Pirabas apresenta sua espessura quase a mesma, em torno de 55 m e um mergulho muito suave, enquanto que o horizonte formado pelos sedimentos do Grupo Barreiras, apresenta espessura mais variada. O perfil 2, Figura 5.7, mostra as sondagens SJP-6 SJP-9 e SJP-10. Nesse segundo perfil pode-se observar que os sedimentos do Grupo Barreiras apresentam sua menor espessura nas proximidades onde foi realizada a sondagem SJP-10. O terceiro e último desses perfis, mostra as sondagens SJP-7, SJP-8 e SJP-10, Figura 5.8. Percebe-se que nesse perfil 3, a sondagem SJP-7 apresenta a maior espessura dos sedimentos do Grupo Barreiras. A informação mais importante nesses três perfis, mostra que o mergulho para esses horizontes é muito pequeno, ou seja, na área estudada os horizontes geoeletricos são formados por camadas praticamente planas e paralelas.



500Ω.m	200Ω.m	600Ω.m	8Ω.m	++++ ++++	SJP 13
1,5	5,0	10	55		
1350Ω.m	600Ω.m	5Ω.m	++++ ++++	SJP 14	
2,0	15	55			
1100Ω.m	550	5Ω.m	++++ ++++	SJP 9	
7,0	15	50			

Figura 5.3 - Curvas de SEVs do Grupo II.

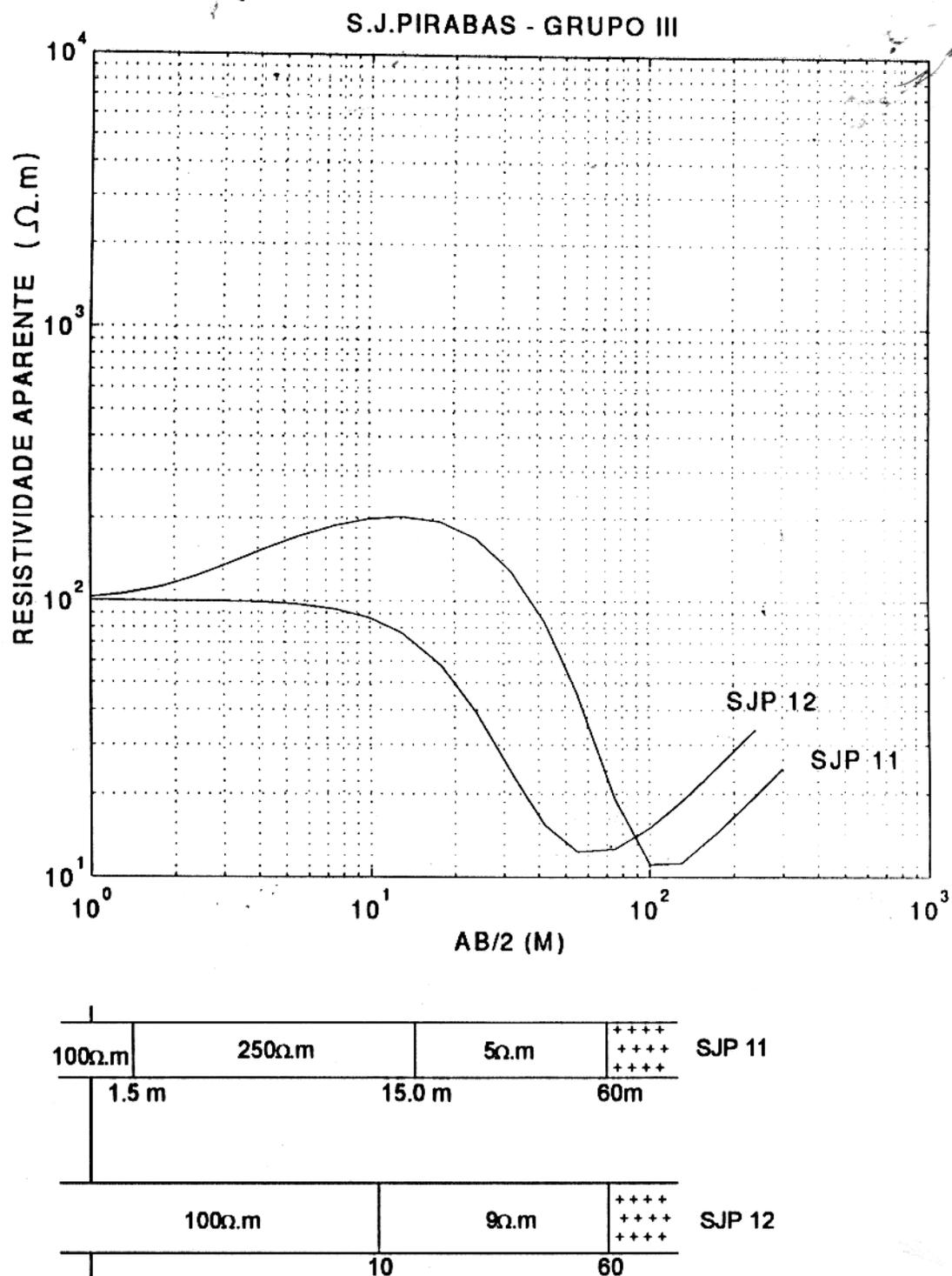


Figura 5.4 - Curvas de SEVs do Grupo III.

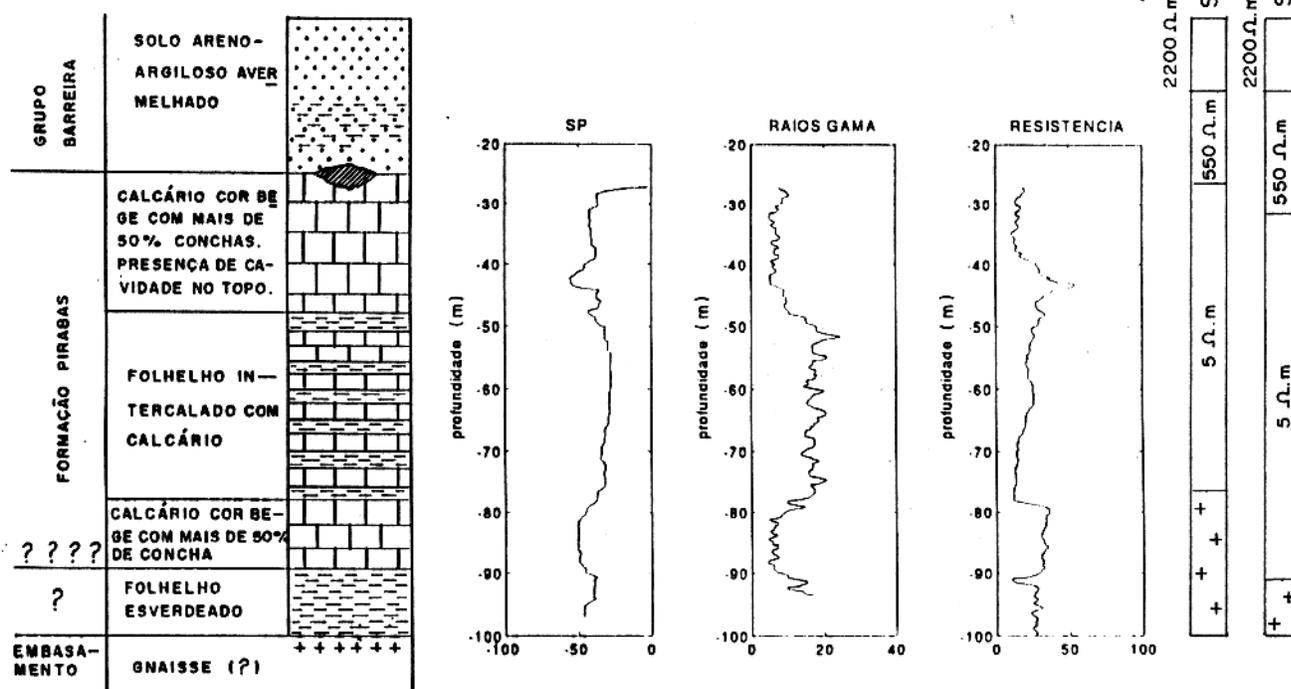


Figura 5.5 - Perfil geológico e perfis geofísicos do poço PT-1/91-SJP e dados geoeletricos interpretados das SJP-1 e SJP-8.

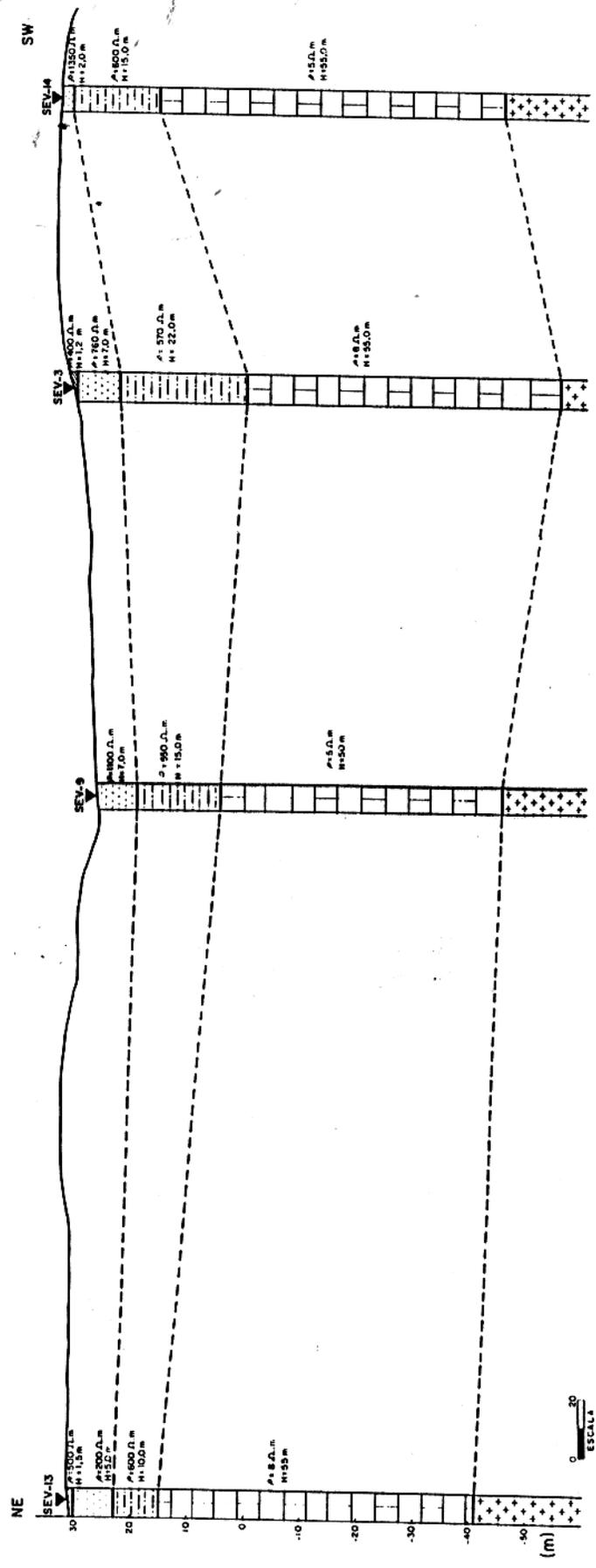


Figura 5.6 - Perfil geoeletrico na direção NE-SW das sondagens SJP-3, SJP-9, SJP-13, SJP-14.

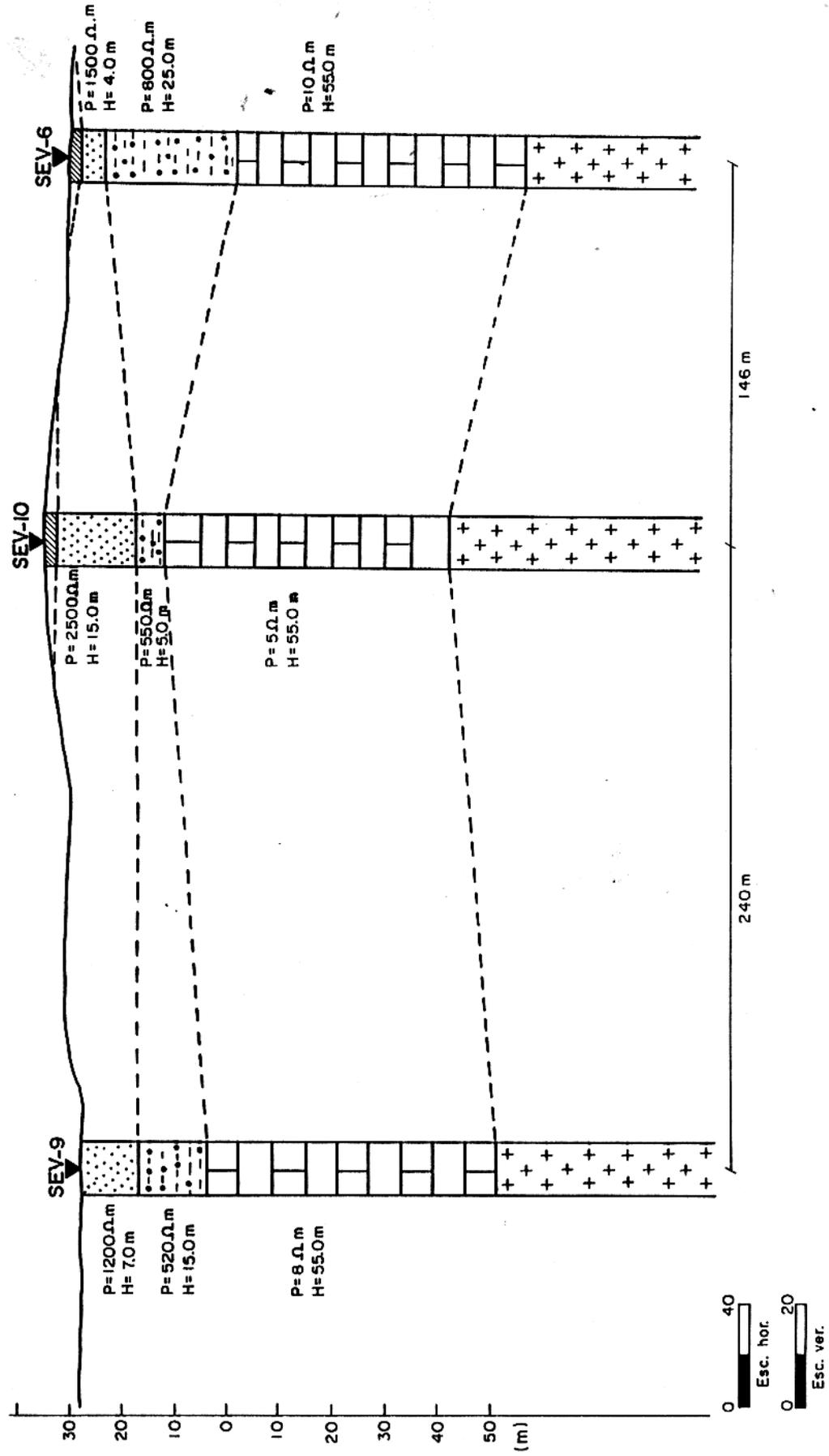


Figura 5.7 - Perfil geoelectrico na direcao NE-SW das sondagens SJP-6, SJP-9, SJP-10.

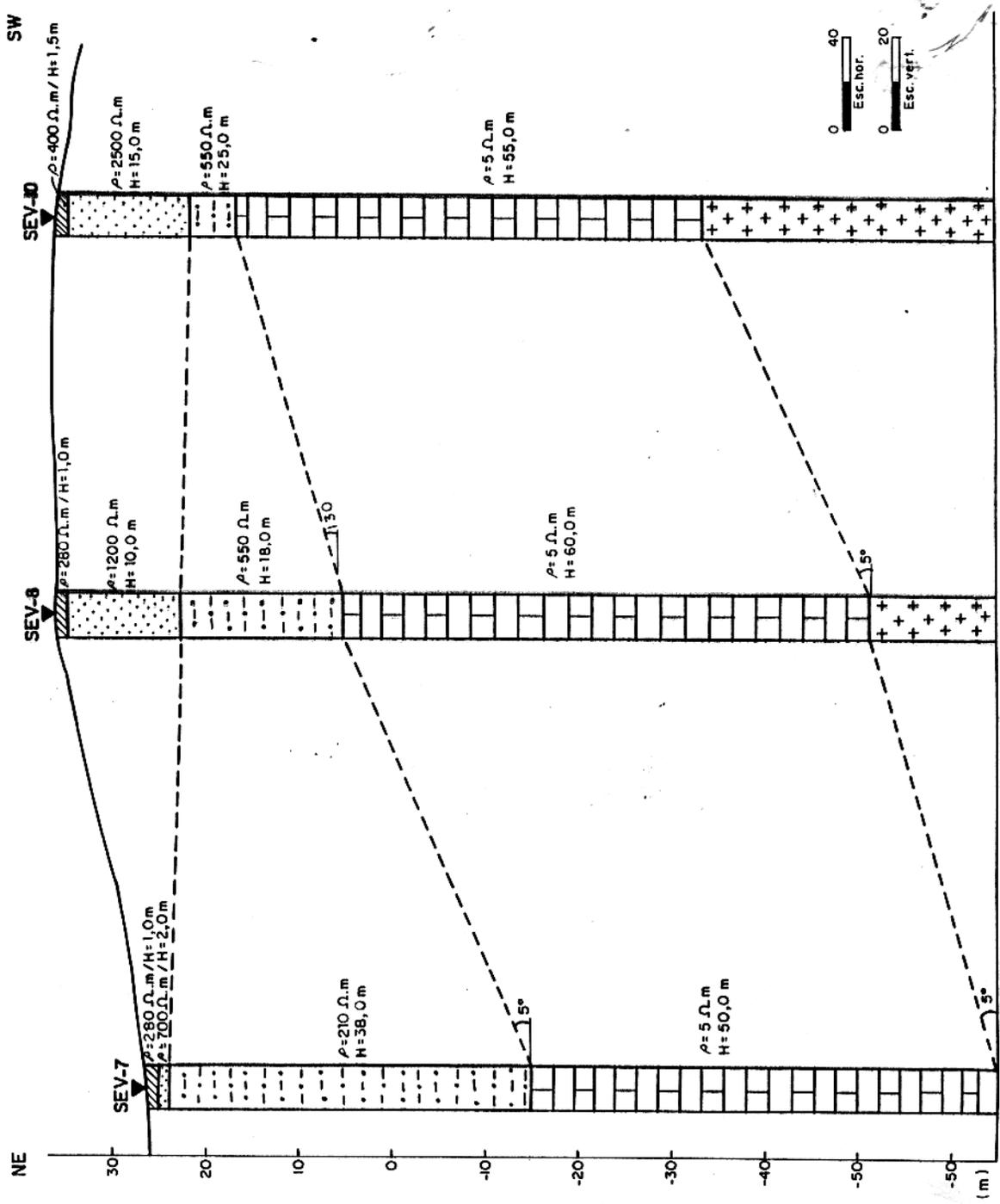


Figura 5.8 - Perfil geoelectrico na direção NE-SW das sondagens SJP-7, SJP-8, SJP-10

5.2 MODELAGEM E INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS USANDO MODELOS BIDIMENSIONAIS

Na seção anterior, foi dito que as sondagens SJP-1 e SJP-8 foram realizadas próximas ao poço onde ocorrem cavernas no contato entre os sedimentos do Grupo Barreiras e da Formação Pirabas, a aproximadamente 26 m de profundidade (MANFREDO XIMENES, comunicação verbal). Baseado nessas informações e nos dados de resistividade e espessura dessas duas sondagens, foi realizada uma série de simulações para analisar o comportamento das SEVs, devido a presença de heterogeneidades resistivas tipo cavernas, no topo dos calcários da Formação Pirabas.

O primeiro desses modelos, Figura 5.9, representa uma caverna com largura em torno de 10 m e espessura H variando entre 2 e 45 metros, colocada a 26 metros abaixo de 3 camadas. Esse modelo geoeletrico representa tipicamente a situação encontrada nesta região. As curvas de resistividade para H igual a 2, 4 e 8 metros. Figura 5.10(a), não apresentam alterações apreciáveis quando comparadas à curva de sondagem SJP-1 obtida no campo. Entretanto, quando a espessura é aumentada para valores, 15, 30 e 45 metros, a curva de resistividade aparente apresenta, no ramo final, um aumento dos valores da resistividade aparente devido à presença dessas cavernas, principalmente para espessuras H de 30 e 45 metros, Figura 5.10(b). Esse comportamento apresentado nas curvas das Figuras 5.10(a) e 5.10(b), corresponde de forma idêntica ao mesmo comportamento apresentado pelas curvas do modelo III, Figuras 4.7(a) e 4.7(b). Para as duas situações, percebe-se que as cavernas com espessuras H variando em torno de 2, 4 e 8 metros, não causam nenhuma perturbação na curva de resistividade aparente, enquanto que para cavernas com espessuras maiores que 15 m, apresentam um contraste nos valores de resistividade aparente mais visíveis.

Uma outra situação de caverna estudada é ilustrada na Figura 5.11. Esse modelo representa praticamente o modelo anterior de uma caverna com 10 m de comprimento e espessura variando de 2 m até 45 m, mas deslocada 11 m do centro da SEV. Da mesma forma como ocorreu no modelo anterior, as curvas de resistividade aparente para espessuras entre $H = 2$ m a $H = 8$ m, Figura 5.12(a) não apresentaram praticamente nenhuma mudança na curva de forma a caracterizar uma heterogeneidade. Aumentando o valor da espessura para $H = 15$ m, Figura 5.12(b), ainda assim não se percebe uma mudança na curva de resistividade aparente. A partir da espessura $H = 30$ m notou-se uma variação muito sutil na parte final da curva, porém tão pequena, que foge ao limite de precisão de qualquer resistímetro utilizado atualmente. Somente a caverna com espessura $H = 45$ m apresentou uma variação consistente para determinar uma variação lateral de resistividade. Conclui-se que quando o centro da SEV se encontra distante da caverna, a curva de resistividade aparente é fortemente

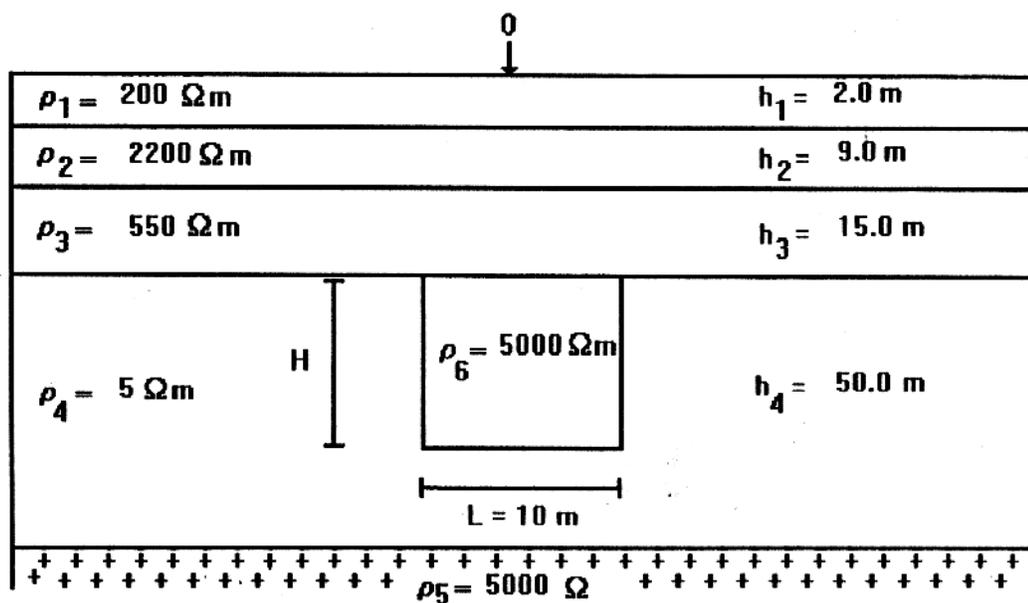


Figura 5.9 - Caverna no topo da Formação Pirabas, simétrica em relação ao centro da SEV, com largura $L = 10 m$ e espessura variando para $h = 2 m$, $4 m$, $8 m$, $15 m$, $30 m$ e $45 m$.

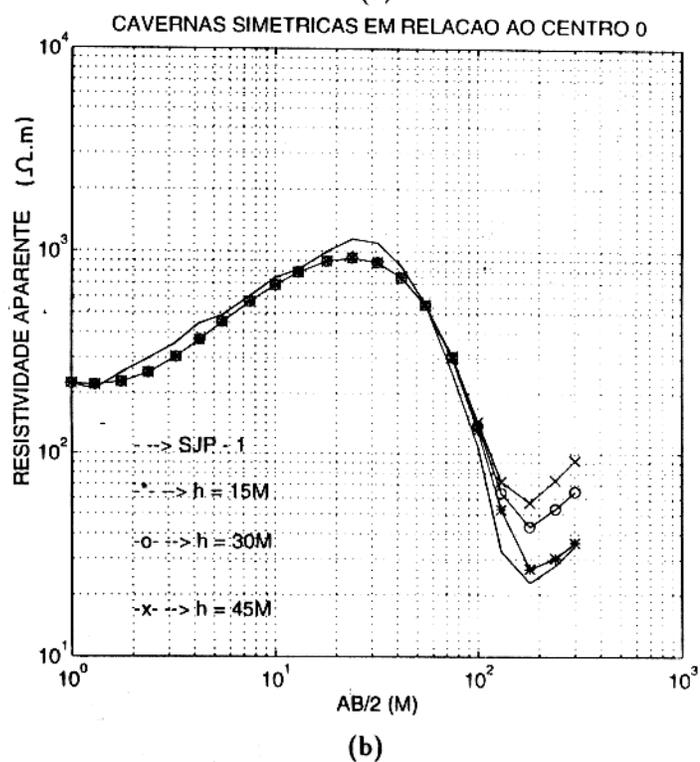
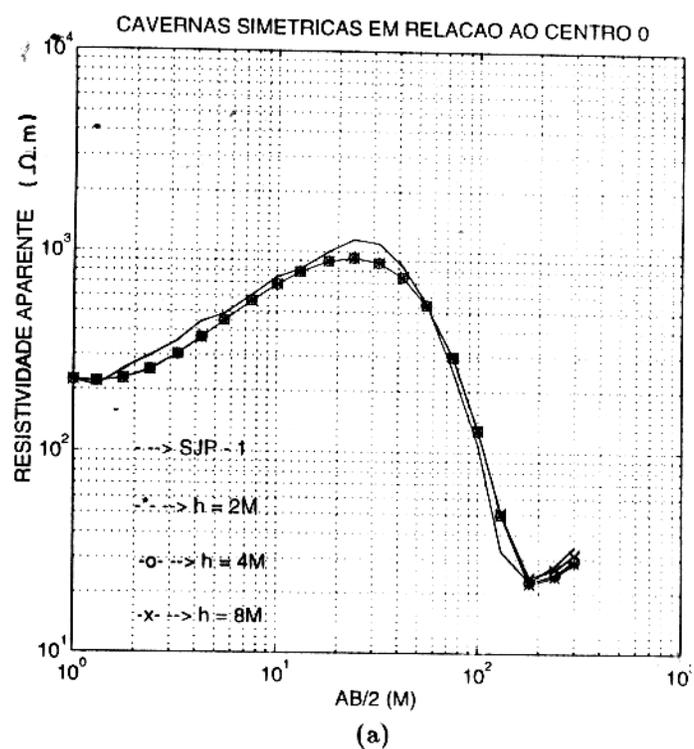


Figura 5.10 - Curvas de resistividade aparente para uma caverna simétrica na profundidade de 26 m, situada no topo da Formação Pirabas, sob 3 camadas. A) espessura variando $h = 2\text{ m}, 4\text{ m}, 8\text{ m}$ e B) espessura variando $h = 15\text{ m}, 30\text{ m}, 45\text{ m}$.

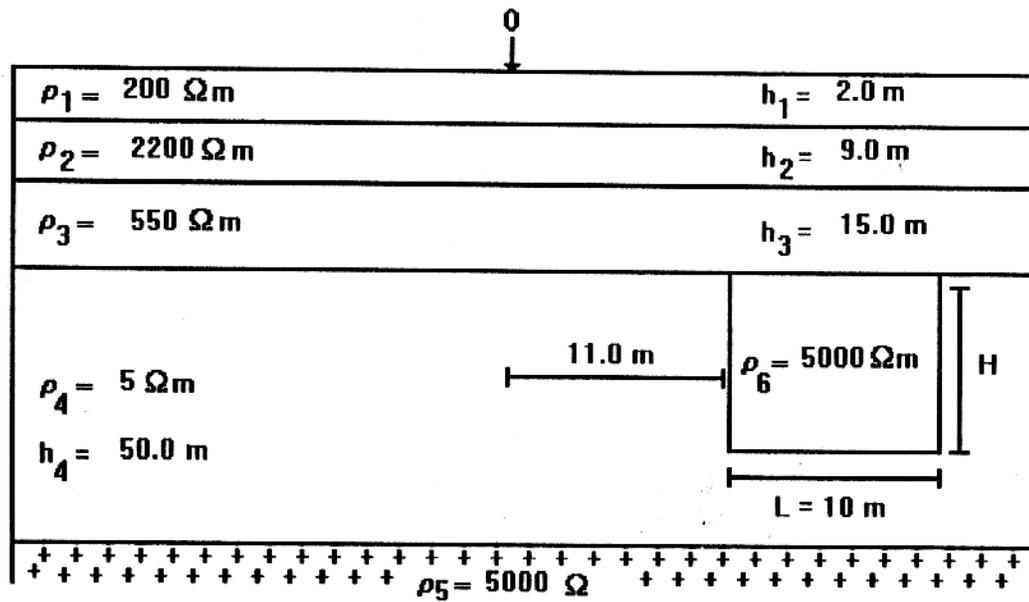


Figura 5.11 - Caverna no topo da Formação Pirabas, com centro da SEV deslocado 11 metros da caverna, com largura $L = 10 m$ e espessura variando para $h = 2 m, 4 m, 8 m, 15 m, 30 m$ e $45 m$.

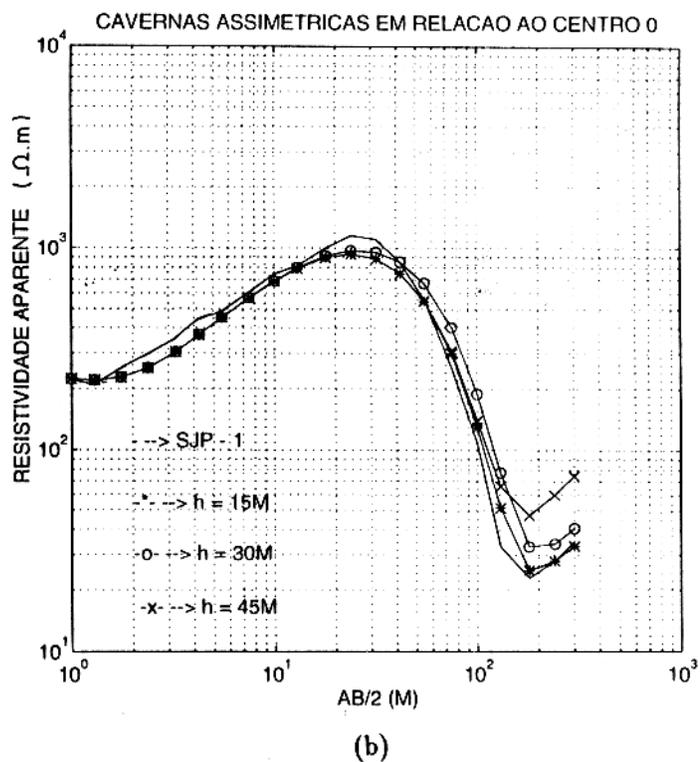
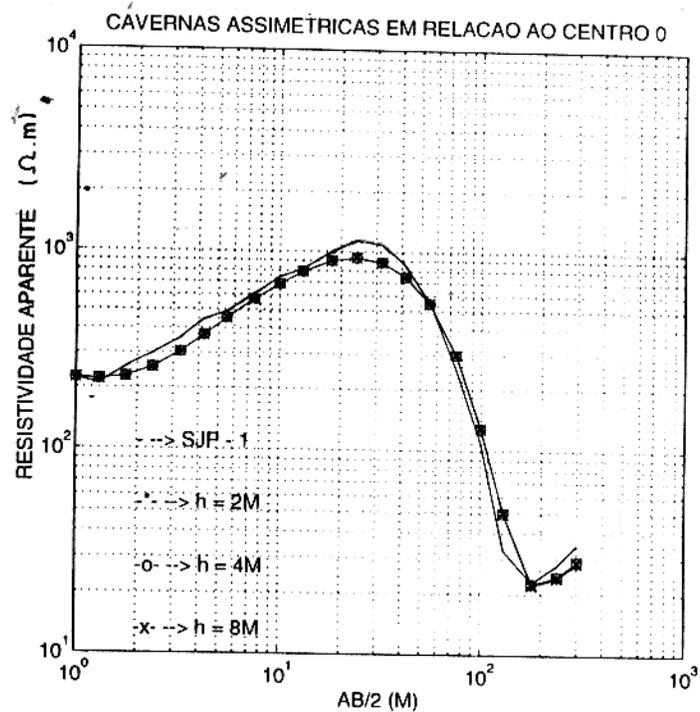
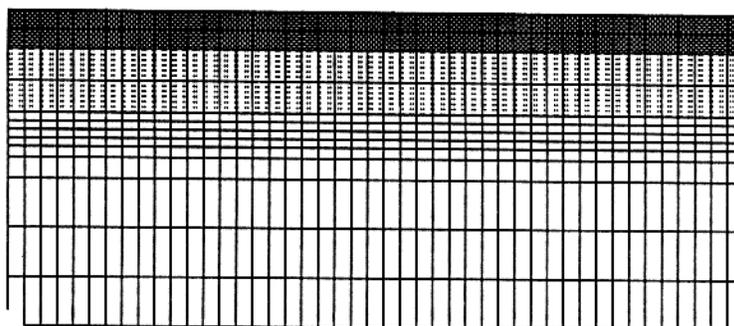


Figura 5.12 - Curvas de resistividade aparente para uma caverna assimétrica na profundidade de 26 m e situada no topo da Formação Pirabas, sob 3 camadas. Centro da SEV deslocada 11 metros da caverna. A) espessura variando $h = 2m, 4m, 8m$ e B) espessura variando $h = 15m, 30m, 45m$.

atenuada. Esse fato é bem visível quando comparamos as respostas para uma caverna com espessura $H = 15 m$ da Figura 5.10(b) com a Figura 5.12(b). A atenuação nos valores de resistividade aparente foi tão forte no segundo modelo, para a espessura $H = 15 m$, que a curva obtida se confunde com as curvas de resistividade aparente para as espessuras $h = 2 m$ e $h = 8 m$ do primeiro modelo, e desta forma o problema das cavernas passa a apresentar uma ambigüidade, que pelo método de sondagem elétrica vertical é muito difícil se chegar a uma solução.

Para tentar solucionar esse problema de ambigüidade e equivalência dos modelos acima analisados até o momento, e determinar com maior precisão a presença de cavernas, é apresentado neste trabalho, algumas pseudoseções de resistividade usando o método eletroresistivo de caminamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo ($a = 25 m$ e $n = 6$) computado com o programa EGSLIB/REIP2D. A primeira dessas pseudoseções mostra o comportamento dos diferentes horizontes de resistividade, sem a presença da caverna, Figura 5.13. Para essa situação, as linhas de isoresistividade são paralelas e elas não apresentam corpos que produzam variações laterais de resistividade. A finalidade principal desse modelo é calibrar a malha de elementos finitos. De fato, se a malha for adequada para o modelo estratificado, elas serão também para os modelos com variações laterais de resistividade. Em seguida, na Figura 5.14, temos uma pseudoseção de resistividade para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $H = 2 m$. Observe que a caverna é tão pequena, em relação ao quarto horizonte geoeletrico, que praticamente não é destacada na malha de elementos finitos, Figura 5.14. Para esse modelo de caverna as linhas de isoresistividade continuam paralelas, ou seja, essa caverna não apresenta um contraste de resistividade com a encaixante que possa ser detectado pelo método de caminamento elétrico. Aumentando a espessura da caverna para $H = 4 m$, Figura 5.15, começam a aparecer pequenas distorções nas linhas de isoresistividade com valores iguais a $10 \Omega.m$, devido à presença da caverna. Para $H = 8 m$, Figura 5.16, é bem visível a distorção que a linha de isoresistividade $10 \Omega.m$ sofre devido a presença dessa caverna. Para espessuras $H = 15 m$ e $H = 30 m$, Figuras 5.17 e 5.18, respectivamente, as distorções provocadas nas linhas de isoresistividade são bem nítidas e indicam com maior precisão a presença das cavernas. Essas duas últimas pseudoseções, além de ilustrar muito bem os efeitos dessas cavernas em dados de resistividade, podem ser utilizadas para minimizar as ambigüidades apresentadas nas curvas de resistividade aparente para as espessuras de $H = 15 m$ das Figuras 5.10(a) e 5.12(b). Para o método de sondagem elétrica vertical é difícil indicar a presença de cavernas, mesmo que sejam grandes, quando afastadas do centro da SEV; entretanto, usando o método de caminamento elétrico esse problema pode ser contornado.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

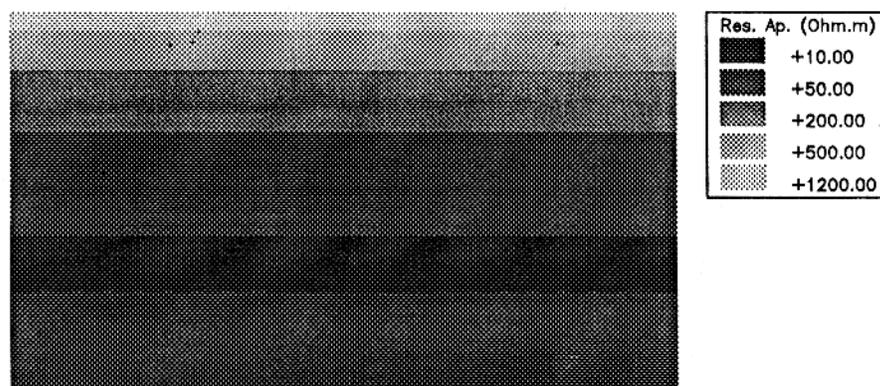
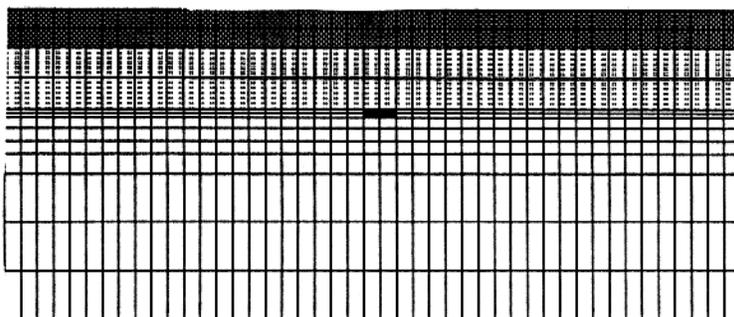


Figura 5.13 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo sem a presença de cavernas.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

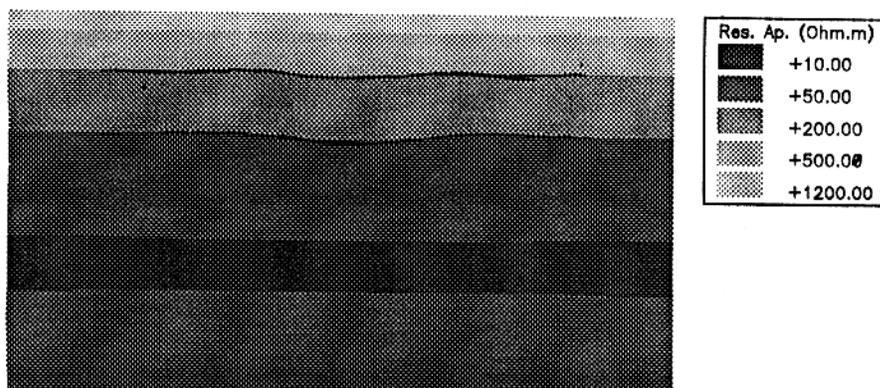
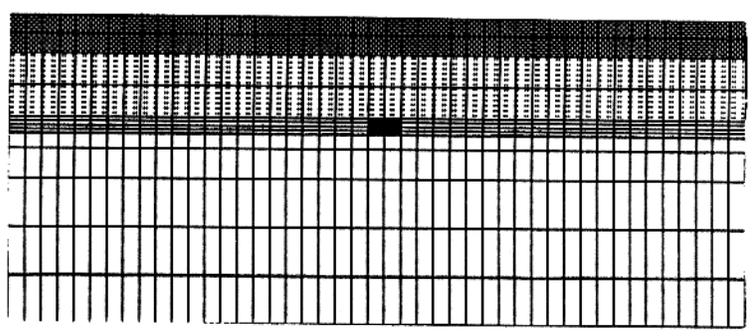


Figura 5.14 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10\text{ m}$ e espessura $h = 2\text{ m}$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

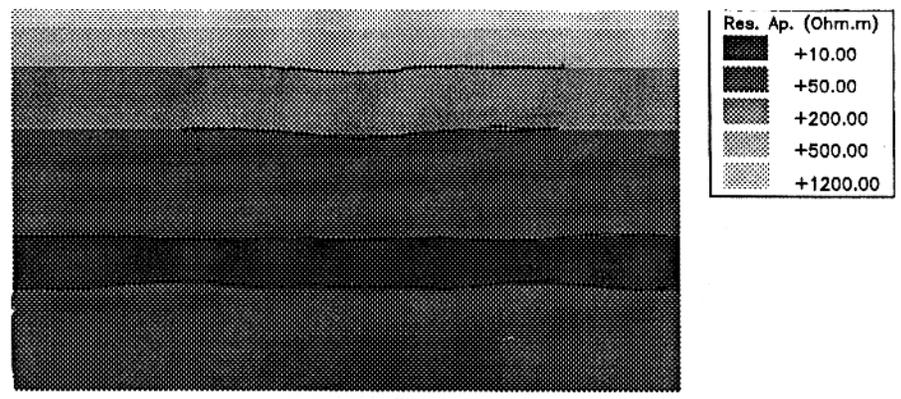
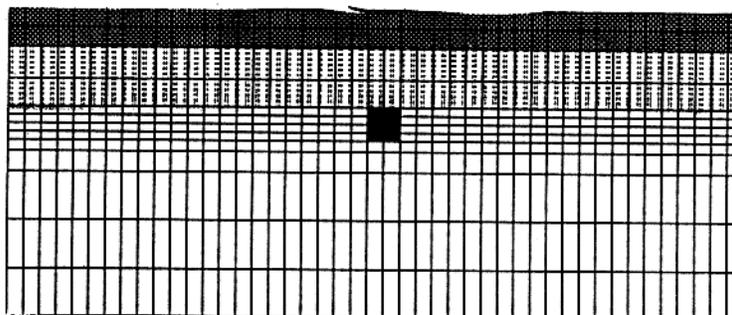


Figura 5.15 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10\text{ m}$ e espessura $h = 4\text{ m}$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

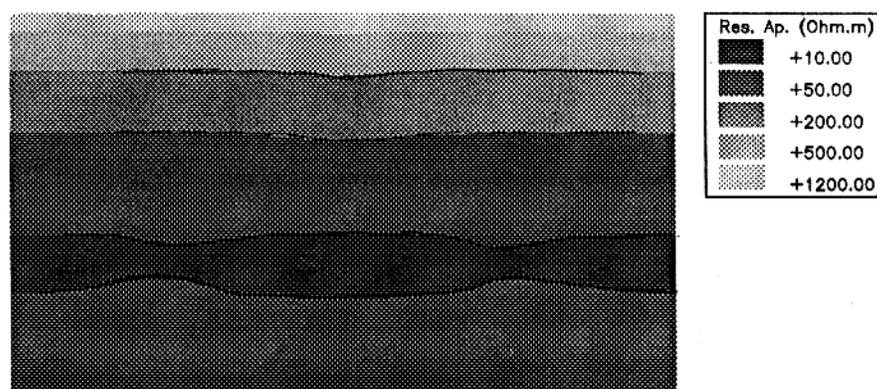
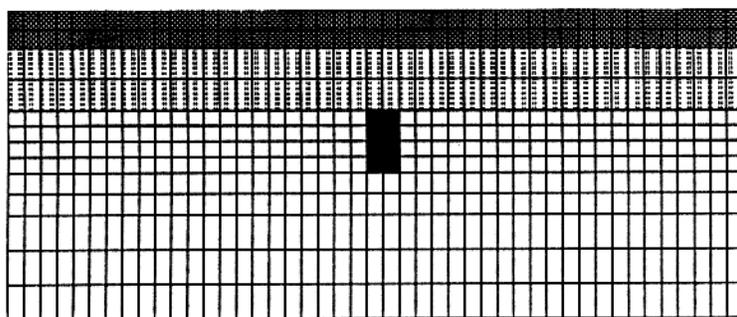


Figura 5.16 - Pseudoseção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10\text{ m}$ e espessura $h = 8\text{ m}$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

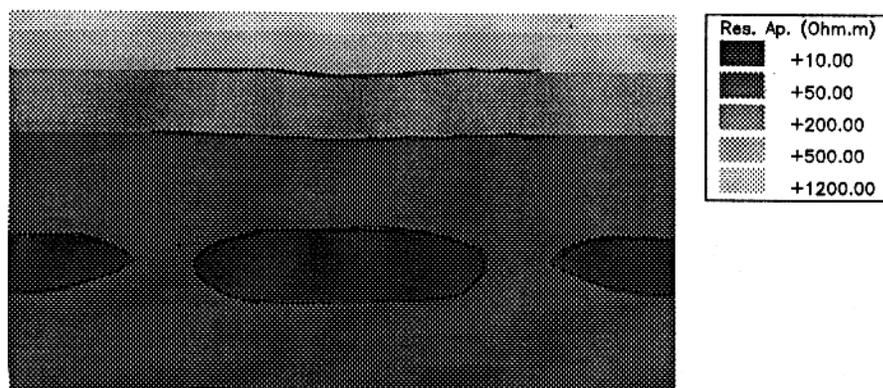
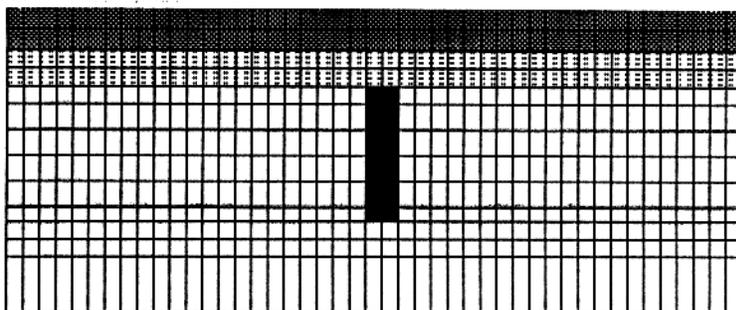


Figura 5.17 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 15 m$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

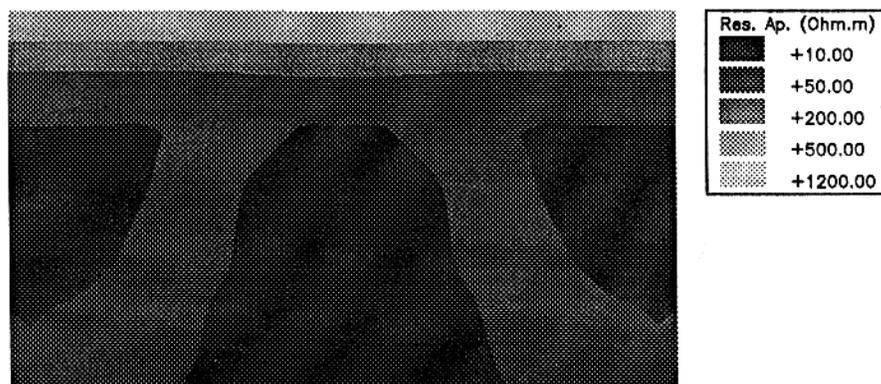


Figura 5.18 - Pseudoseção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 10 m$ e espessura $h = 30 m$.

Um outro modelo de caverna, baseado nas informações das sondagens SJP-1 e SJP-8, está ilustrado na Figura 5.19. Para esse modelo são apresentadas as curvas de resistividade aparente, de cavernas no topo da Formação Pirabas, com comprimentos laterais $L = 25\ m$, $L = 50\ m$ e $L = 100\ m$. A primeira dessas curvas de Figura 5.20(a), mostra as curvas de resistividade aparente para esses comprimentos citados, com espessura para a Formação Pirabas $h_4 = 50\ m$ e a espessura da caverna $H = 8\ m$. Nota-se que para todos os comprimentos da caverna, a curva de resistividade aparente não apresentou nenhuma variação em relação a curva de campo, ou seja, o aumento da caverna não apresentou nenhuma mudança significativa nos dados de resistividade aparente. Aumentando a espessura da caverna, para $H = 15\ m$, Figura 5.20(b), percebe-se uma ligeira variação no ramo final da curva devido a esse aumento de espessura, enquanto que para as diferentes larguras da caverna, os resultados são praticamente idênticos. Esse fato volta a se repetir quando a espessura da caverna aumenta para $H = 25\ m$, Figura 5.20(c). Novamente o aumento da espessura da caverna é o único parâmetro responsável por uma mudança considerável na curva de resistividade aparente, em relação à curva de campo. Assim, nas três situações apresentadas, a variação lateral no comprimento das cavernas não influi muito nos dados de resistividade aparente. As curvas ilustradas nas Figuras, 5.20(a), 5.20(b) e 5.20(c), não demonstram as mesmas variações observadas nas curvas do modelo I, relativas ao capítulo 4, Figuras 4.2(a) e 4.2(b). Naquele oportunidade, cavernas com espessuras menores produziram nítidas variações nos dados de resistividade aparente, mesmo a profundidades em torno de $20\ m$, o que leva a concluir que a presença de um horizonte muito resistivo ($\rho_2 = 2.000\ \Omega.m$), próximo a superfície na área estudada, prejudica na identificação dessas cavernas quanto a sua continuidade lateral. Baseado nesses últimos resultados, percebe-se, que é mais fácil, através de SEVs, delimitar a espessura do que o comprimento que elas possam apresentar. Todavia, se a espessura da Formação Pirabas aumentar de $h_4 = 50\ m$ para $60\ m$, ou seja, se passar a considerar a espessura dos sedimentos dessa Formação como sendo da sondagem SJP-8, a curva de resistividade aparente para uma caverna com $H = 25\ m$, Figura 5.20(d), é completamente compensada a ponto de ser confundida com a curva da Figura 5.20(a), ou seja, diferentes modelos apresentam os mesmos resultados mostrando que identificar cavernas usando sondagens elétricas é extremamente difícil, por causa desta ambigüidade. Para contornar esse problema, novamente foi usado o método de caminhamento dipolo-dipolo para determinar com maior precisão essas cavernas. De fato, as Figuras 5.21 e 5.22 ilustram a simulação dos modelos das Figuras 5.20(a) e 5.20(b), e que através do caminhamento dipolo-dipolo foi possível discriminar essas duas cavernas.

Com base nos resultados apresentados, o método de sondagem elétrica vertical não apresenta uma resolução suficiente para identificar, com precisão, as diferentes situações de caverna. Por outro lado, através do método dipolo-dipolo pode-se identificar com maior precisão, a presença dessas cavernas e minimizar as ambigüidades das curvas de SEV, na área estudada.

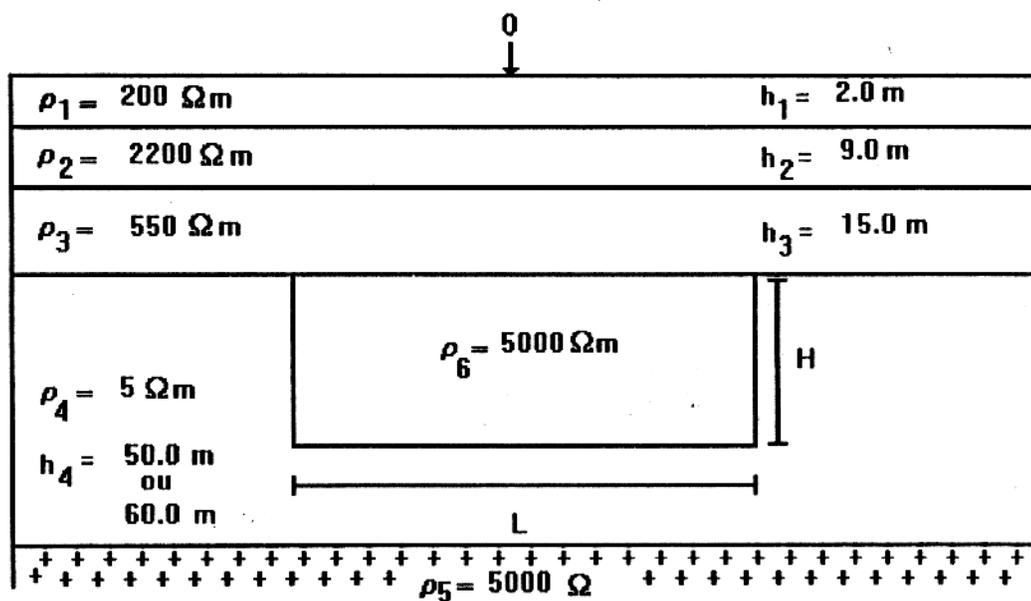


Figura 5.19 - Caverna no topo da Formação Pirabas, simétrica em relação ao centro da SEV, com larguras e espessuras variáveis.

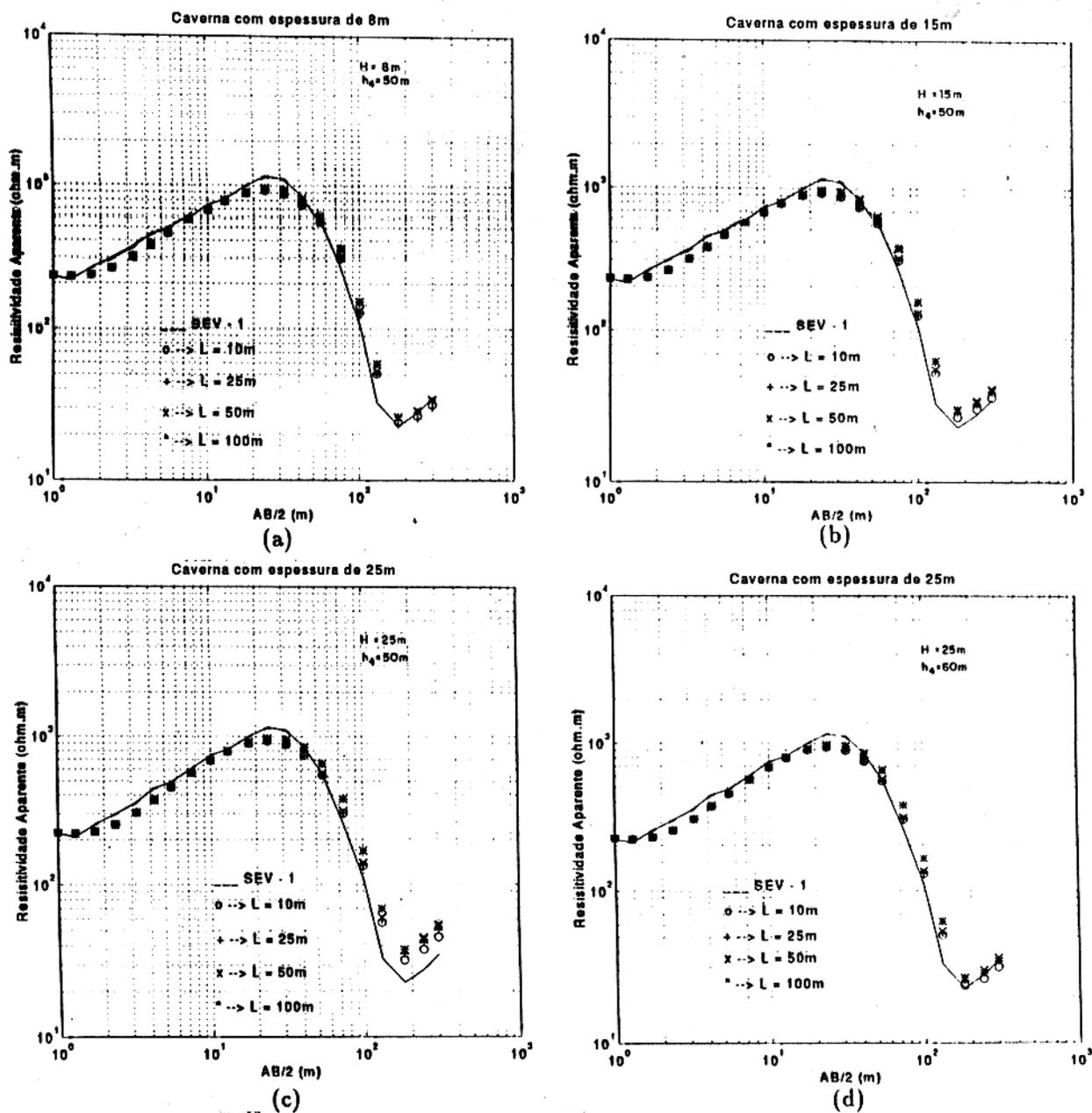
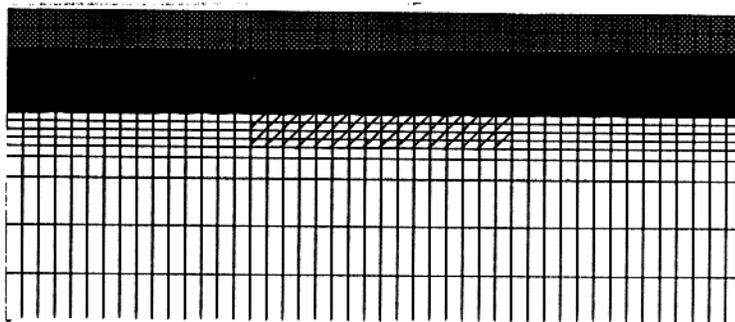


Figura 5.20 - Curvas de resistividade aparente para uma caverna no topo da Formação Pirabas. A) 8m e $h_4 = 50m$, B) 15m e $h_4 = 50m$, C) 25m e $h_4 = 50m$ e D) 25m e $h_4 = 60m$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

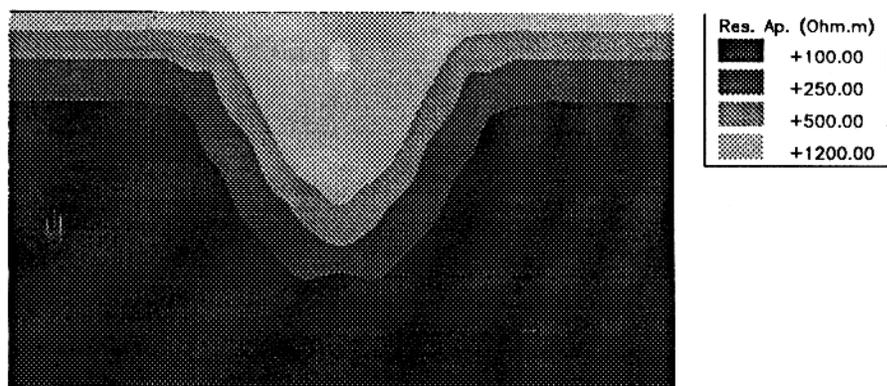
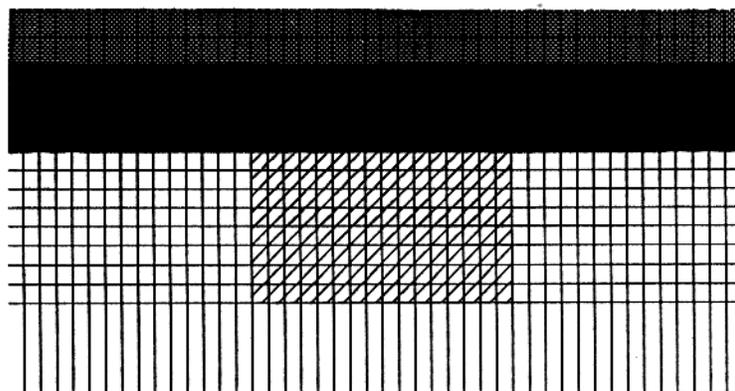


Figura 5.21 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 100\text{ m}$ e espessura $h = 8\text{ m}$.

MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS



SECÇÃO GEOELÉTRICA

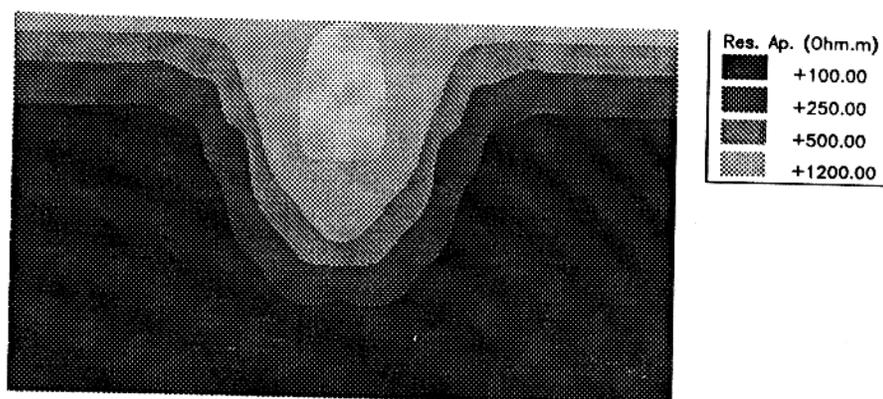


Figura 5.22 - Pseudosecção de resistividade utilizando o método dipolo-dipolo para uma caverna com comprimento $L = 100\text{ m}$ e espessura $h = 25\text{ m}$.

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A presença de cavernas nos calcários da Formação Pirabas, no Município de São João de Pirabas, cria problemas na perfuração de poços para o abastecimento de água da cidade.

Como foi demonstrado no capítulos 4 e 5, deste trabalho, para os diversos modelos de cavernas estudados, o uso do método de sondagem elétrica vertical para investigar esse tipo de problema é extremamente difícil e pode levar a resultados que não correspondem a uma situação real. Informações de sondagens elétricas verticais isoladas, não são muito conclusivas na identificação de cavernas. De fato, observamos, através de simulações numéricas, que existe uma grande ambigüidade entre resultados de vários modelos de caverna para diferentes dimensões e posições em relação ao centro da SEV. Assim sendo, é necessário o uso de um método que não apresente tantas ambigüidades e que possa ser usado para identificar cavernas. Neste trabalho, o método de caminamento elétrico dipolo-dipolo se mostrou eficiente para contornar os problemas de ambigüidade apresentados nas SEVs. Em todas as vezes que as curvas de SEVs não foram conclusivas, o caminamento dipolo-dipolo apresentou resultados convincentes e com melhor resolução. Desta forma, recomenda-se para a área estudada, um maior número de sondagens elétricas, onde ocorrem as cavernas (próximas do poço PT-1/91-SJP), como também caminhamentos dipolo-dipolo para minimizar as ambigüidades que os dados de SEV possam apresentar. É recomendável, também, que outros métodos geofísicos usando metodologias diferentes, como sísmica de refração e gravimetria, sejam aplicados para uma melhor localização espacial dessas cavernas.

Podemos observar que embora os dados obtidos pelas sondagens não sejam muito conclusivos, os programas utilizados para interpretar os modelos bidimensionais a partir de sondagens elétricas verticais, se mostraram bastante eficientes e com uma resolução muito satisfatória. Desta forma, para que possamos ter essa mesma resolução apresentada nas simulações de modelos, em dados reais obtidos diretamente no campo, é necessário que os equipamentos usados para investigação de campo sejam melhorados, para que apresentem melhor resolução e confiabilidade nos dados de campo.

Por outro lado, apesar das SEVs não contribuírem da maneira esperada para identificar as cavernas, essas SEVs ajudaram na indicação dos melhores locais para exploração de água subterrânea. A partir das sondagens realizadas, podemos concluir que nos locais próximos ao Rio Pirabas, a infiltração das águas provenientes desse rio modifica o comportamento

resistivo dos sedimentos, devido á presença de águas com alto teor de sais. Portanto, são locais impróprios para a locação de poços. Além dessa informação, na área estudada, as sondagens mostram que os melhores aquíferos estão localizados nos calcários da Formação Pirabas.

Finalmente, é importante lembrar que o método de caminhamento dipolo-dipolo é muito mais dispendioso do que o de sondagem elétrica vertical, tanto do ponto de vista de trabalho de campo como no processamento e interpretação dos dados. De fato, programas de computador para interpretação de sondagens elétricas verticais, para meios estratificados, são muito comuns na literatura. No entanto, para interpretação de dados dipolo-dipolo em ambientes bidimensionais é muito mais raro dispor de programas computacionais.

Como recomendação final, sugerimos que, é melhor investir mais recursos em levantamentos mais detalhados, para situações geológicas bidimensionais, do que em levantamentos mal dimensionados que no final resultam em desperdício de dinheiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEVINGTON, P.R., 1969. Data reduction and error analysis for the physical sciences: New York, Mc Graw-hill Book Co. Inc., 336 p.
- CARRASQUILLA, A. & RIJO, L. 1991. Análise da utilização da Teoria convencional dos meios estratificados na interpretação de SEVs da Ilha de Marajó - Pará. **Revista Brasileira de Geofísica.**, 9: 211-222 p.
- FERREIRA, J. B. 1979. **Métodos Geofísicos Aplicados ao Mapeamento Geológico numa área da Região Bragantina.** UFPA, NCGG, 88 p. Tese de Mestrado.
- GAMA JUNIOR, T & COUTINHO, A. 1976. Pesquisa em Iniciação Científica, Projeto Integrado/Subprojeto Tracuateua, Belém, UFPA, NCGG, **Relatório**, 12 p.
- GIUSTI, A. D. & CLOVIS JOSÉ. 1994. Métodos Elétricos em Áreas Cársticas do Paraná. in: 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Balneário de Camboriú-SC-1994. **Resumo expandido.** p. 27-28.
- LUIZ, J.G. 1991. Perfilagem no Poço PT-1/91-SJP, realizado no Município de São João de Pirabas. **Relatório.** FADESP/FNS. 12 p.
- IDESP. 1990. (Municípios Paraenses), 6. Belém. 26 p.
- INMAN, J.R.; RYU, J. & WARD, S.H. 1973. Resistivity inversion. **Geophysics**, 38: 1088-1108.
- KELLER, G.V & FRISCHKNECHT, F.C. 1966, Electrical methods in geophysical prospecting: New York, Pergamon press, 513 p. inversion. **Geophysics**, 38: 1088-1108.
- KOEFOD, O. 1979. Geosounding Principles. 1: Methods in Geochemistry and Geophysics, 14A. Elsevier, Amsterdam, 276 p.
- LEVENBERG, K. 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. **Quart. Appl. Math.**, 2: 164-168.
- MARQUART, D,W. 1963. An algorithm for least-square estimation of nonlinear parameters. **J. Soc. indust. Math.**, 11: 431-441.

- PELTON, W.H. RIJO, L. & SWIFT JR., C.M. 1978. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. **Geophysics**, 43: 788-803.
- RIJO, L. 1977. Modelling of electrical and electromagnetic data. Ph.D. Thesis, University of Utah, Salt Lake City, 242 p.
- RIJO, L. 1982. Mathematical modelling of applied geoelectromagnetism. Proceedings of the international Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions, Belém, Brasil, 1-8: 429-471.
- RIJO, L. 1991. Notas de aulas do curso "Teoria dos métodos elétricos e eletromagnéticos I e II". Belém, Brasil. (no prelo).
- RIJO, L. 1994a. SEV1D-Programa para modelagem de sondagens elétricas verticais unidimensionais. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. DGf/UFPA.
- RIJO, L. 1994b. SEV1DINV-Programa para inversão de sondagens elétricas verticais unidimensionais. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. DGf/UFPA.
- RIJO, L. 1994c. SEV2D-Programa para modelagem de sondagens elétricas verticais bidimensionais. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. DGf/UFPA.
- RIJO, L. 1994d. REIP2D-Programa para modelagem de sondagens elétricas verticais unidimensionais. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. DGf/UFPA.
- SILVA JUNIOR, O. G. & SOARES, C. M. 1992. Relatório final do mapeamento geológico no Município de São João de Pirabas. **Estagio de Campo-III**.

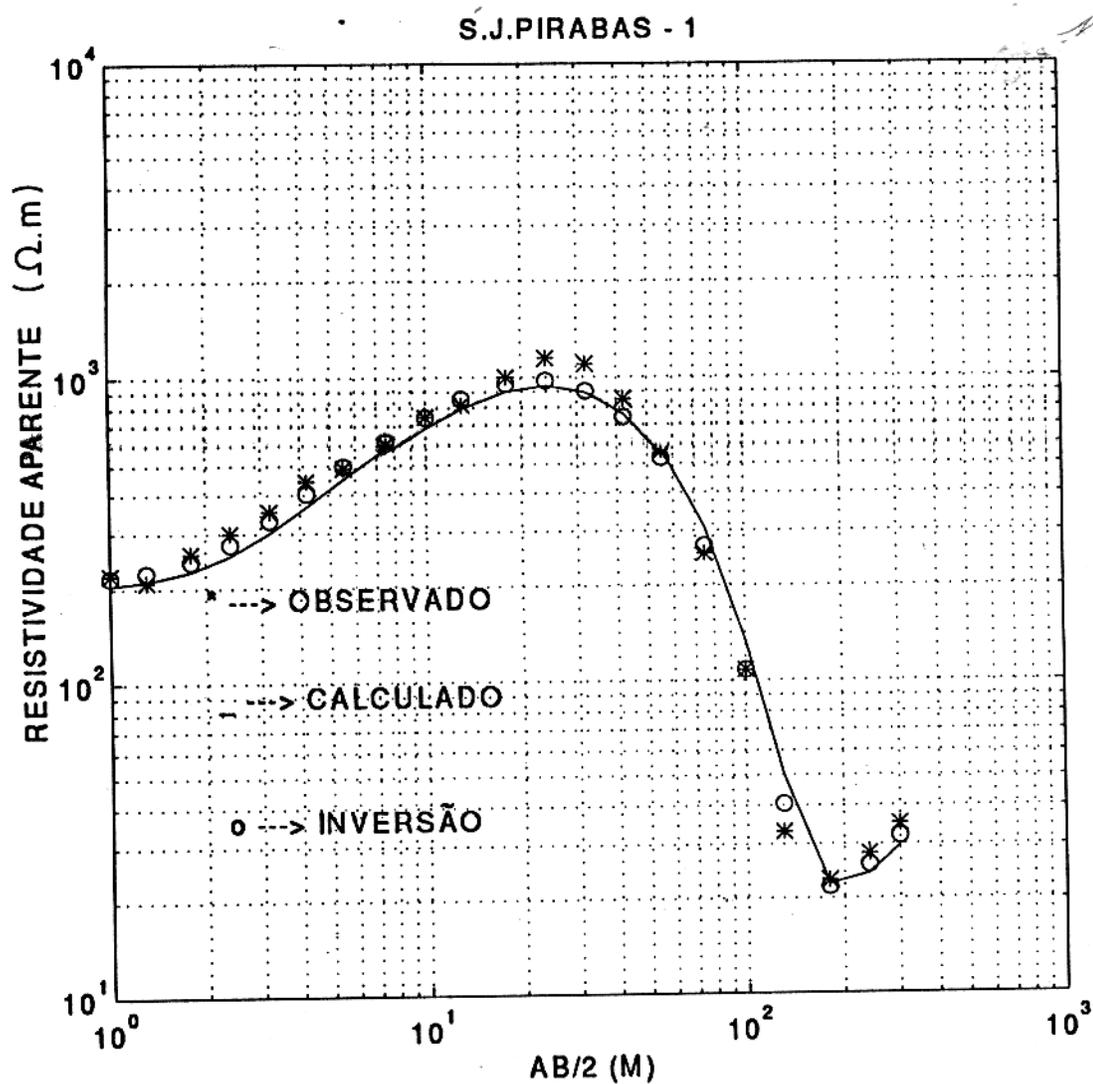
I - ANEXO - INTERPRETAÇÃO DAS CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

Neste anexo apresentamos as curvas de resistividade das sondagens eletricas verticais, usando o arranjo Schumberger, realizadas em locais dentro da sede do Município de São João de Pirabas. Como é possível observar na Figura 5.1, a maioria das sondagens foram alocadas aleatoriamente, devido as dificuldades de logística dentro da área urbana.

Inicialmente, essas sondagens foram interpretadas a partir de um programa que usa a solução do problema direto para ajustar os valores de resistividade aparente, com os valores obtidos no campo, utilizando um processo iterativo de mudança de resistividade e espessura do modelo estratificado, em que o modelo é sugerido pelo próprio formato da curva ou pelos dados geológicos e/ou geofísicos. Uma vez ajustada a curva de campo com a calculada pelo o programa, é obtido, assim, um modelo que representa o comportamento dos horizontes geoeletricos relativo a sondagem interpretada. Para um melhor refinamento destas interpretações, é utilizado um outro programa baseado num algoritmo de inversão, em que o modelo ajustado pelo método direto serve como tentativa inicial. Com esse último programa podemos confirmar se a interpretação obtida pelo método direto, está ou não proxima a dos dados obtidos no campo, determinando assim se ela é ou não é confiável.

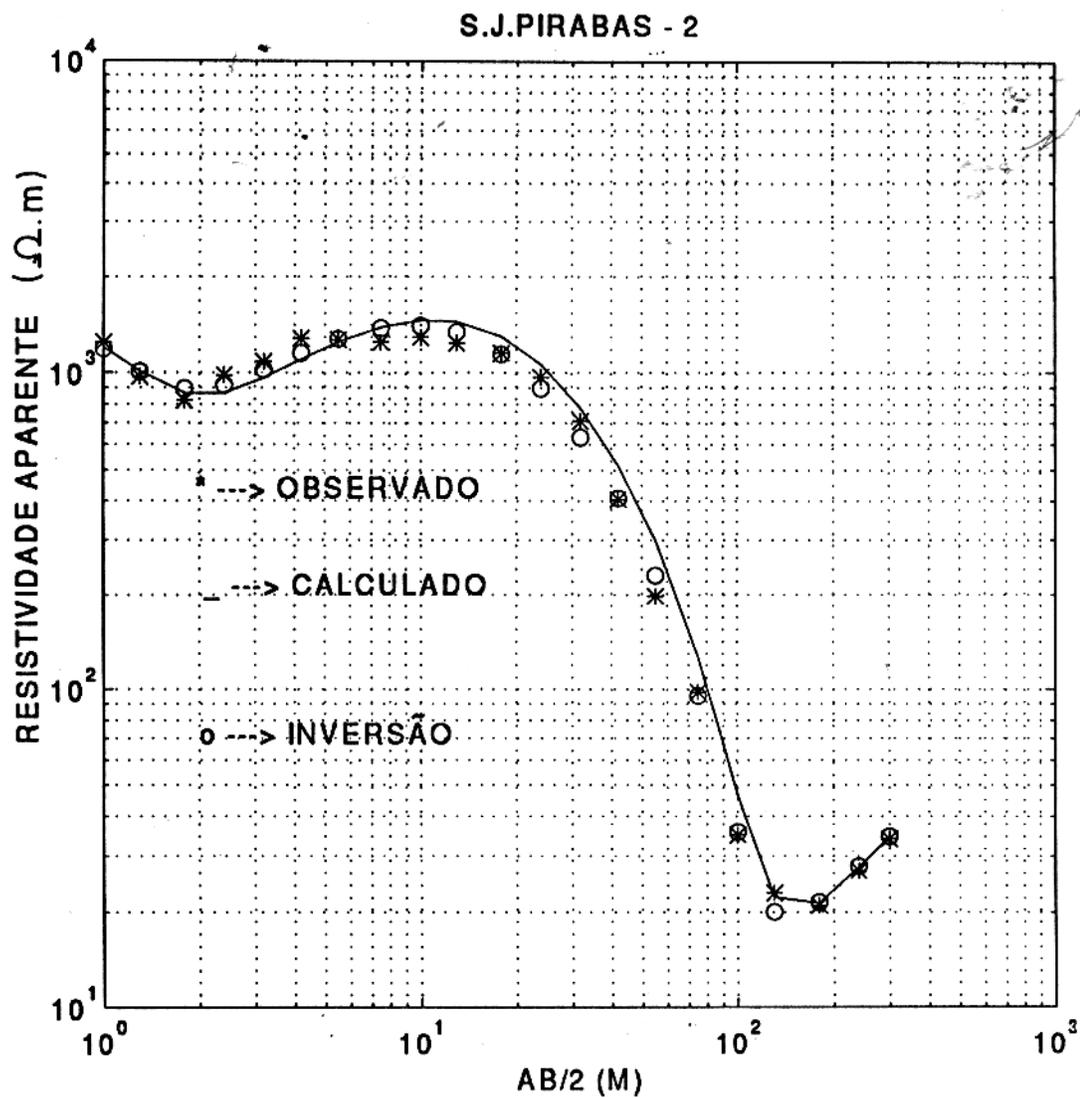
A maioria das curvas interpretadas revelam que a área estudada apresenta de 4 á 5 horizontes geoeletricos e sempre com um menor resistividade para o horizonte relativo a Formação Pirabas.

Finalmente, devemos salientar que o objetivo desse anexo é por os nossos dados à disposição de futuros trabalhos, que juntamente com outros tipos de dados geológicos e geofísicos irão, com certeza, contribuir para o aprimoramento dos conhecimentos hidrogeológicos da Região do Salgado.



Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	200	2.0
horizonte 2	2200	9.0
horizonte 3	550	15.0
horizonte 4	5	50.0
horizonte 5	5000	

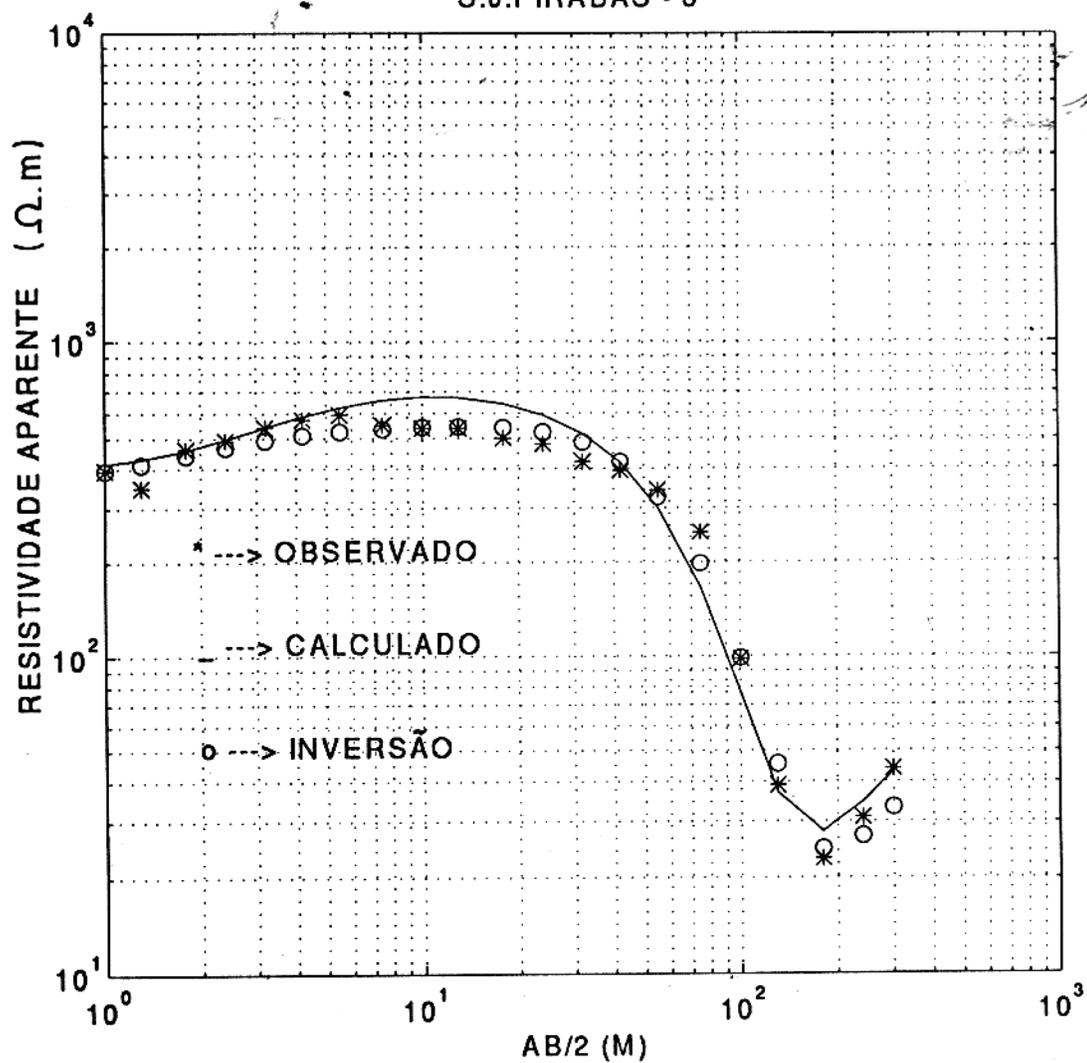
Interpretação da sondagen SPJ-1



Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	1800	0.5
horizonte 2	500	1.0
horizonte 3	2200	7.0
horizonte 4	550	20.0
horizonte 5	7	60.0
horizonte 6	5000	

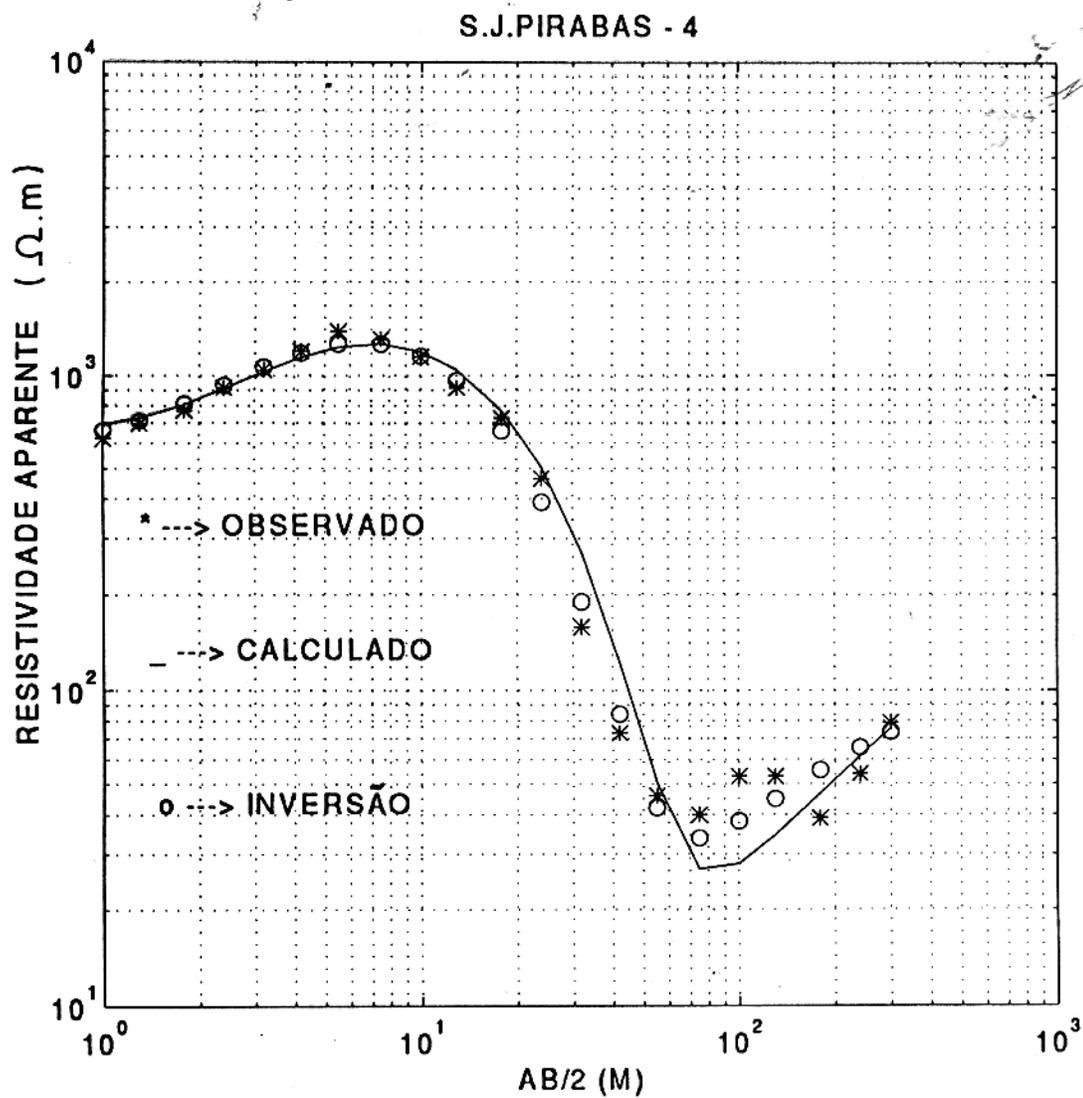
Interpretação da sondagen SPJ-2

S.J.PIRABAS - 3



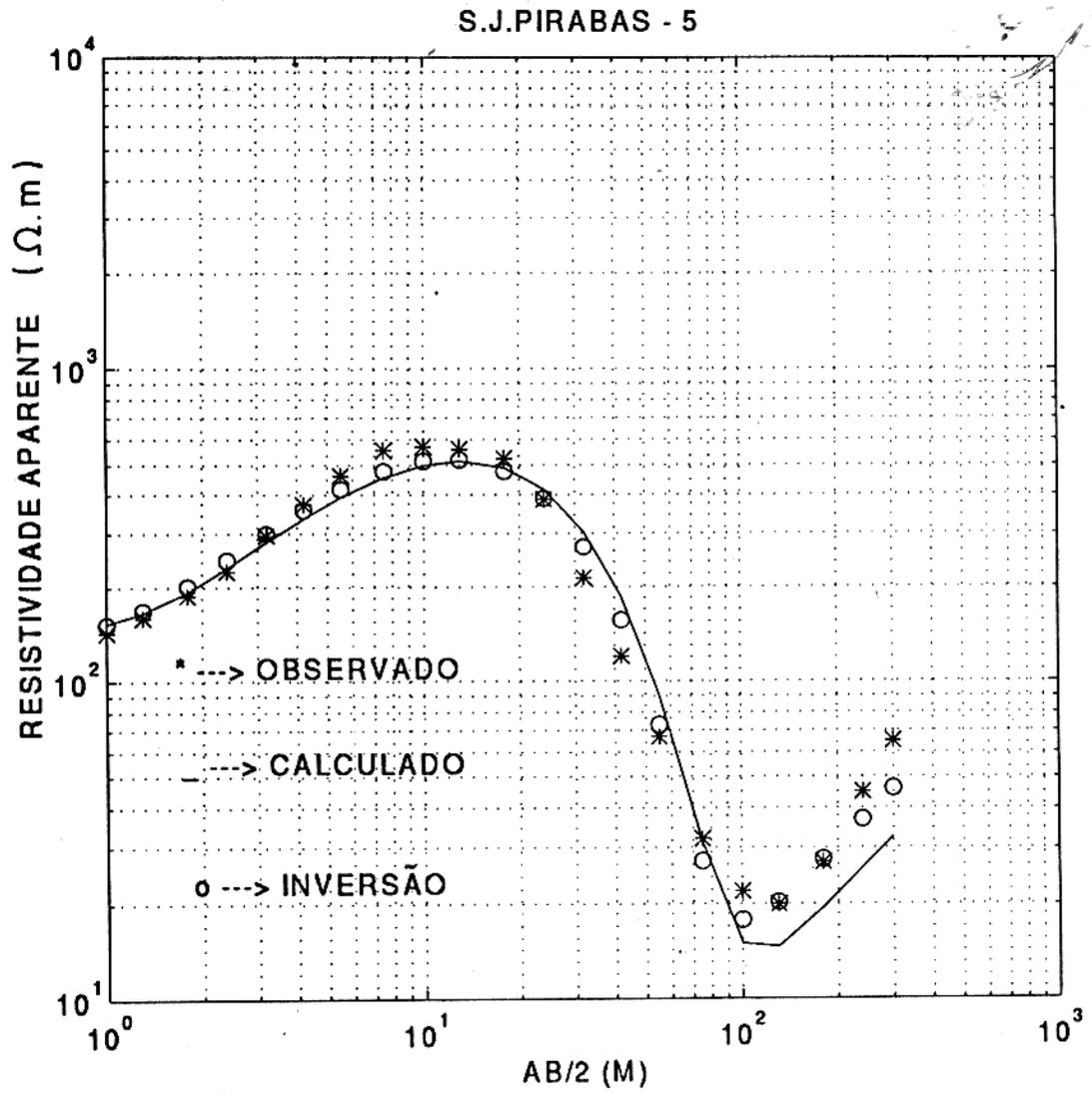
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	400	1.2
horizonte 2	760	7.0
horizonte 3	570	22.0
horizonte 4	8	55
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagem SPJ-3



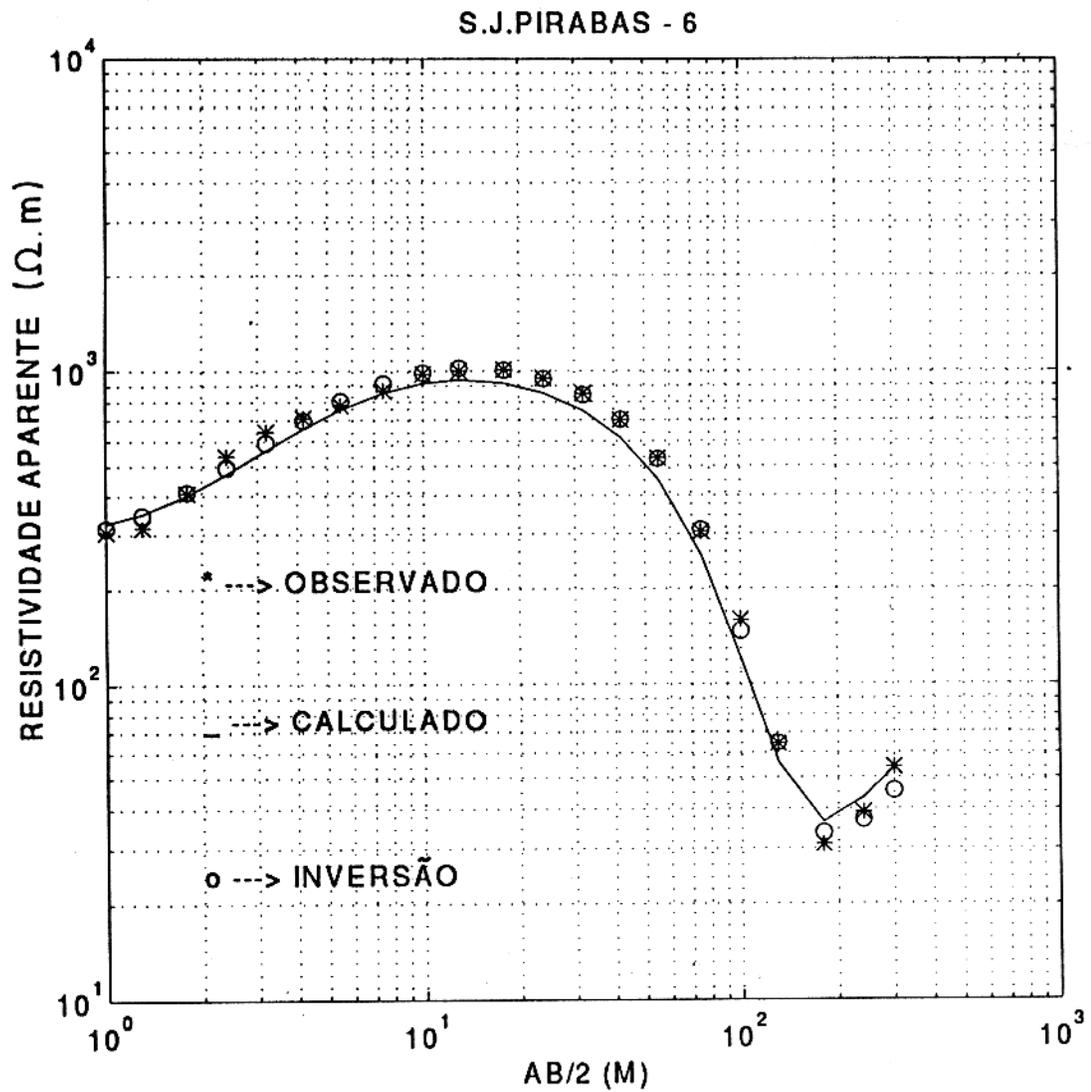
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	650	1.2
horizonte 2	2000	4.0
horizonte 3	550	9.5
horizonte 4	15	55.0
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-4



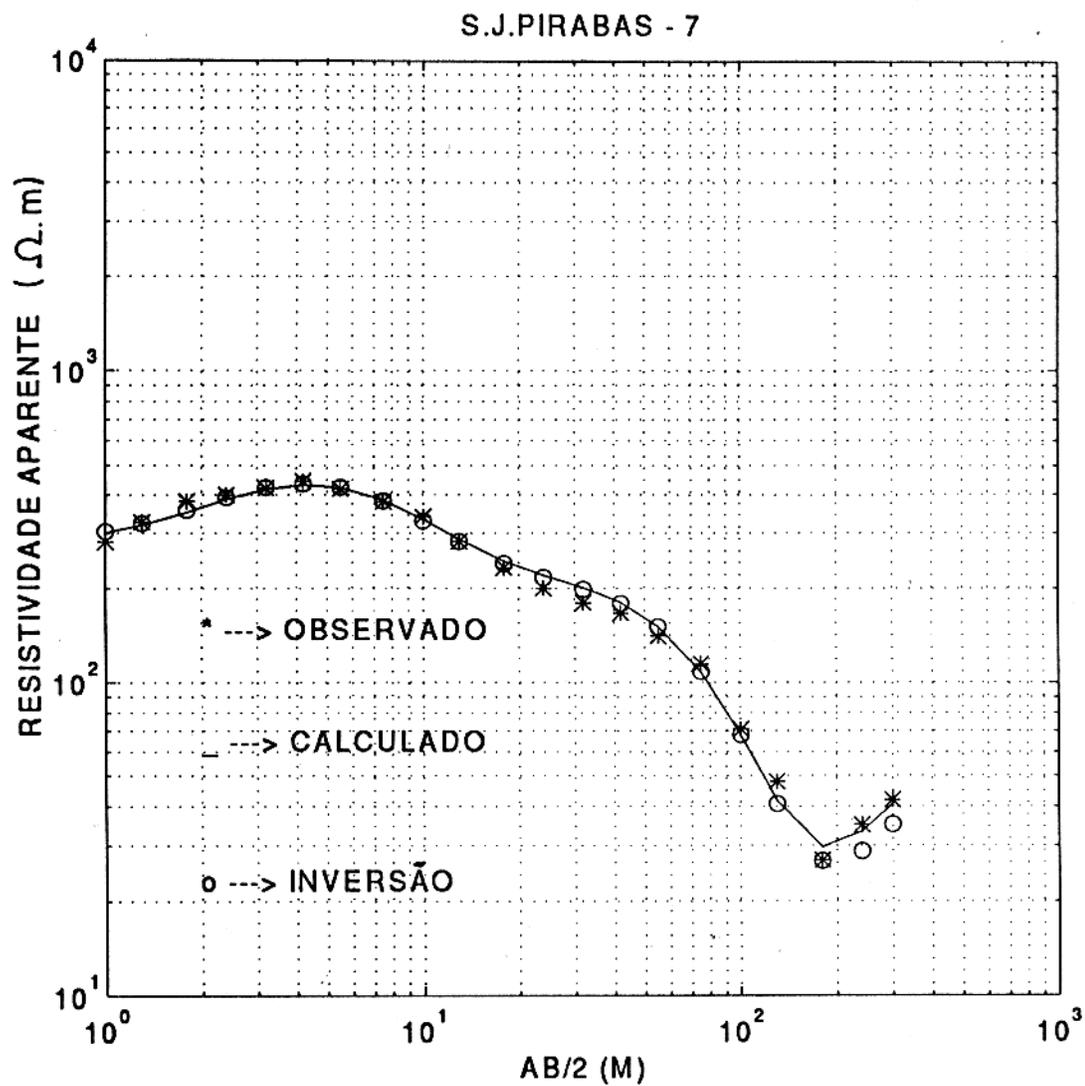
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	140	1.2
horizonte 2	930	4.0
horizonte 3	550	9.5
horizonte 4	8	55.0
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagem SPJ-5



Horizontes	Resistividade($ohm * m$)	Espessura(m)
horizonte 1	300	1.2
horizonte 2	1500	4.0
horizonte 3	800	25.0
horizonte 4	10	55.0
horizonte 5	5000	

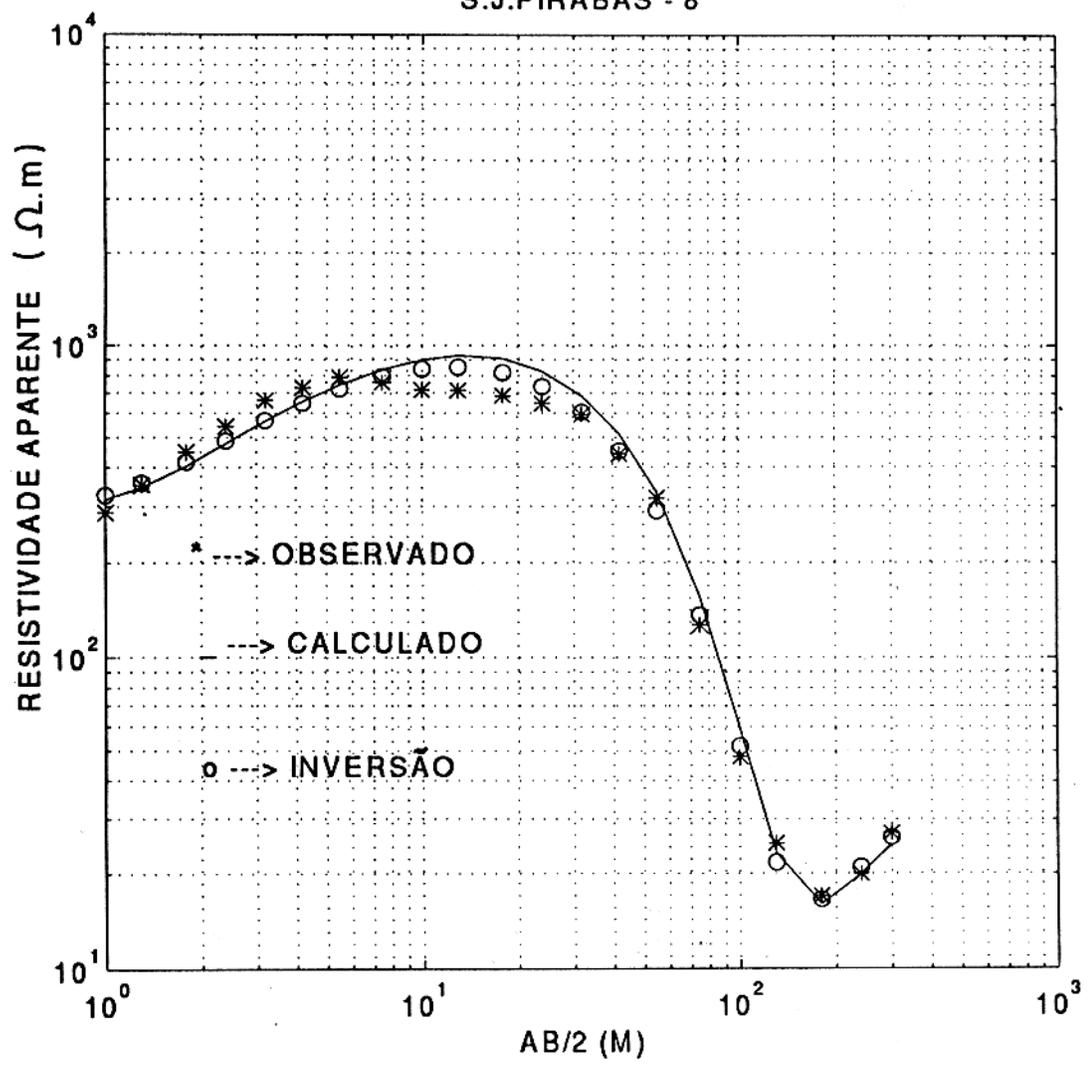
Interpretação da sondagen SPJ-6



Horizontes	Resistividade($\text{ohm} * m$)	Espessura(m)
horizonte 1	280	1.0
horizonte 2	700	2.0
horizonte 3	210	38.0
horizonte 4	5	50.0
horizonte 5	5000	

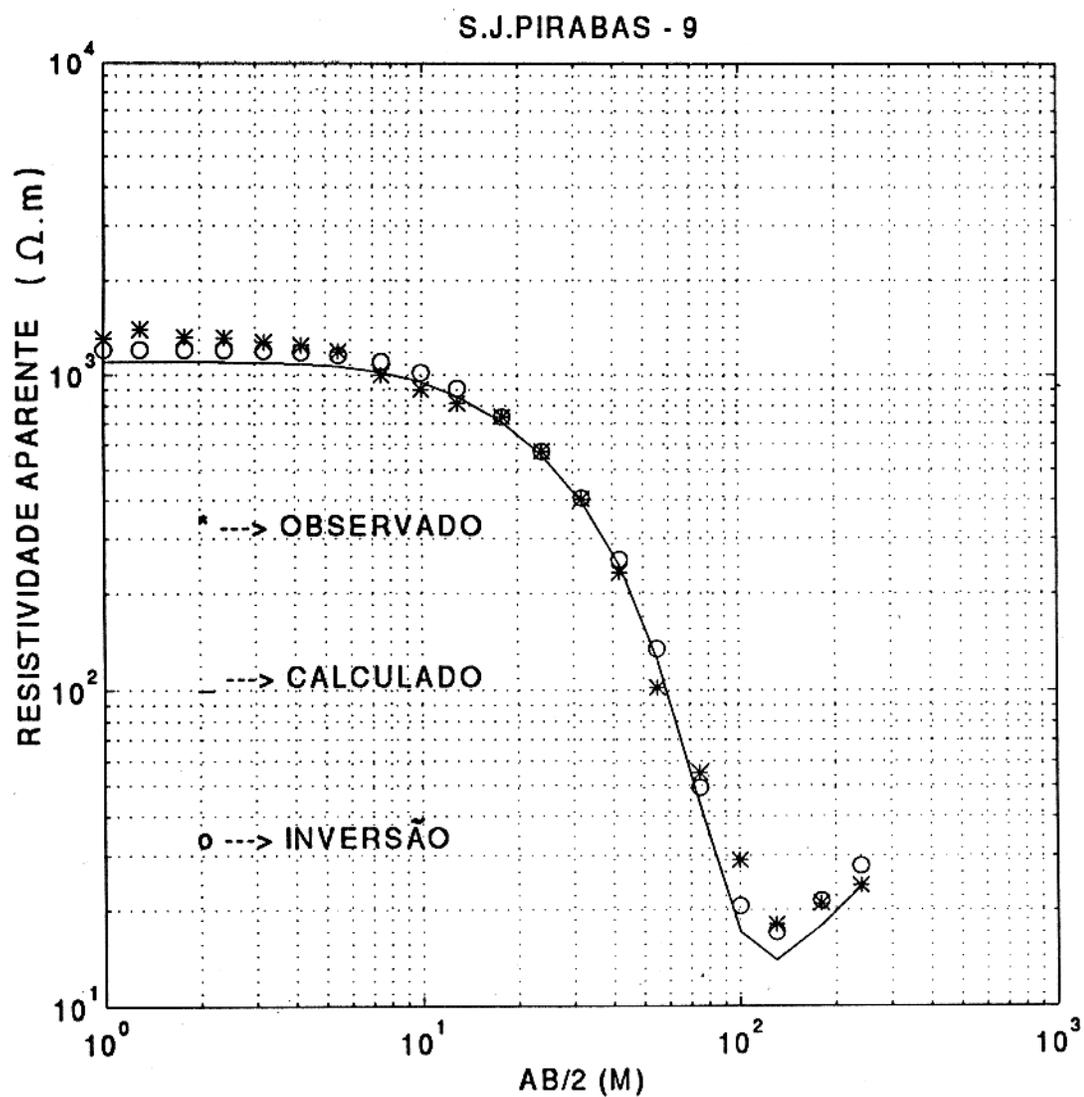
Interpretação da sondagen SPJ-7

S.J.PIRABAS - 8



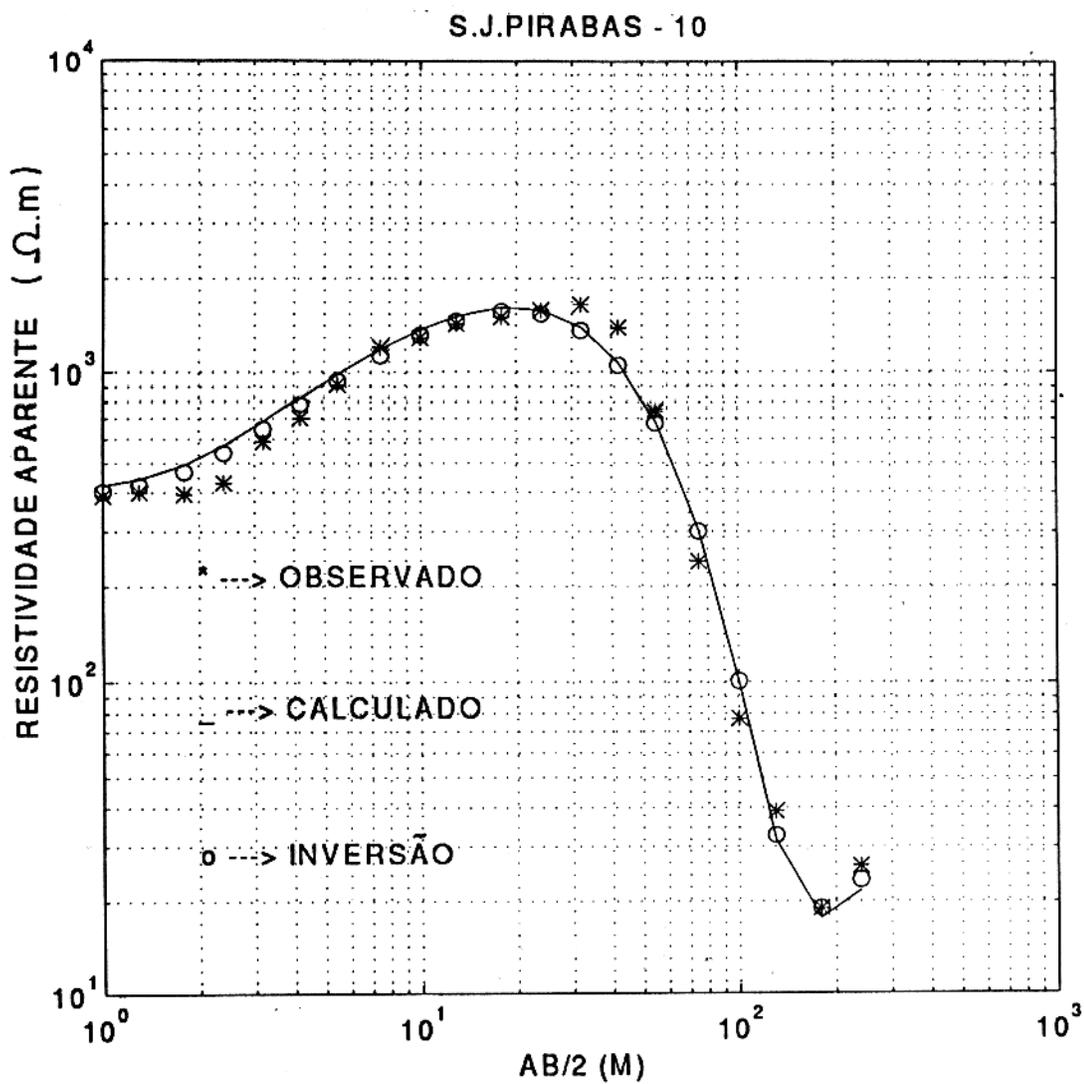
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	280	1.0
horizonte 2	1200	10.0
horizonte 3	550	18.0
horizonte 4	5	60.0
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-8



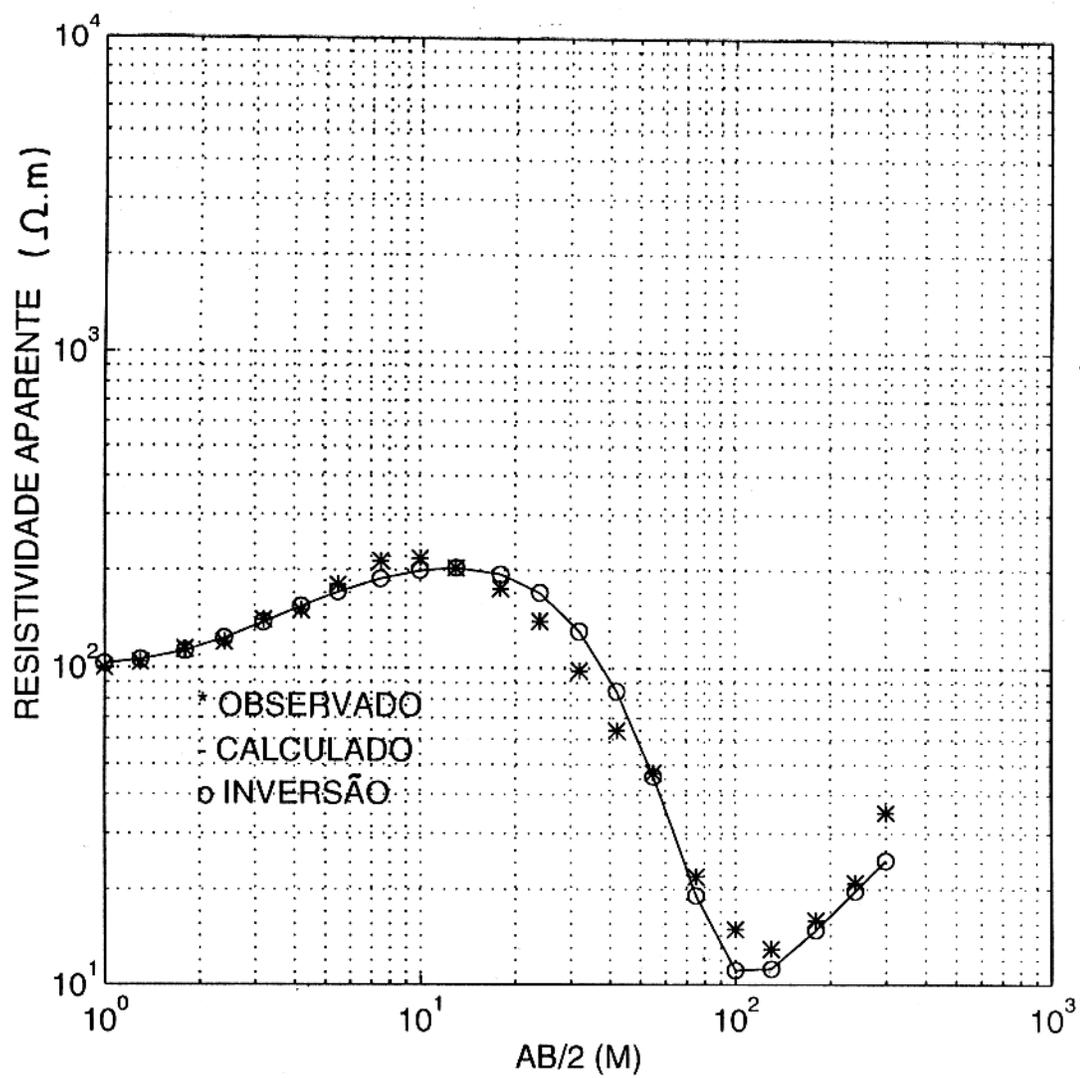
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	1100	7.0
horizonte 2	550	15.0
horizonte 3	5	50
horizonte 4	5000	
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagem SPJ-9



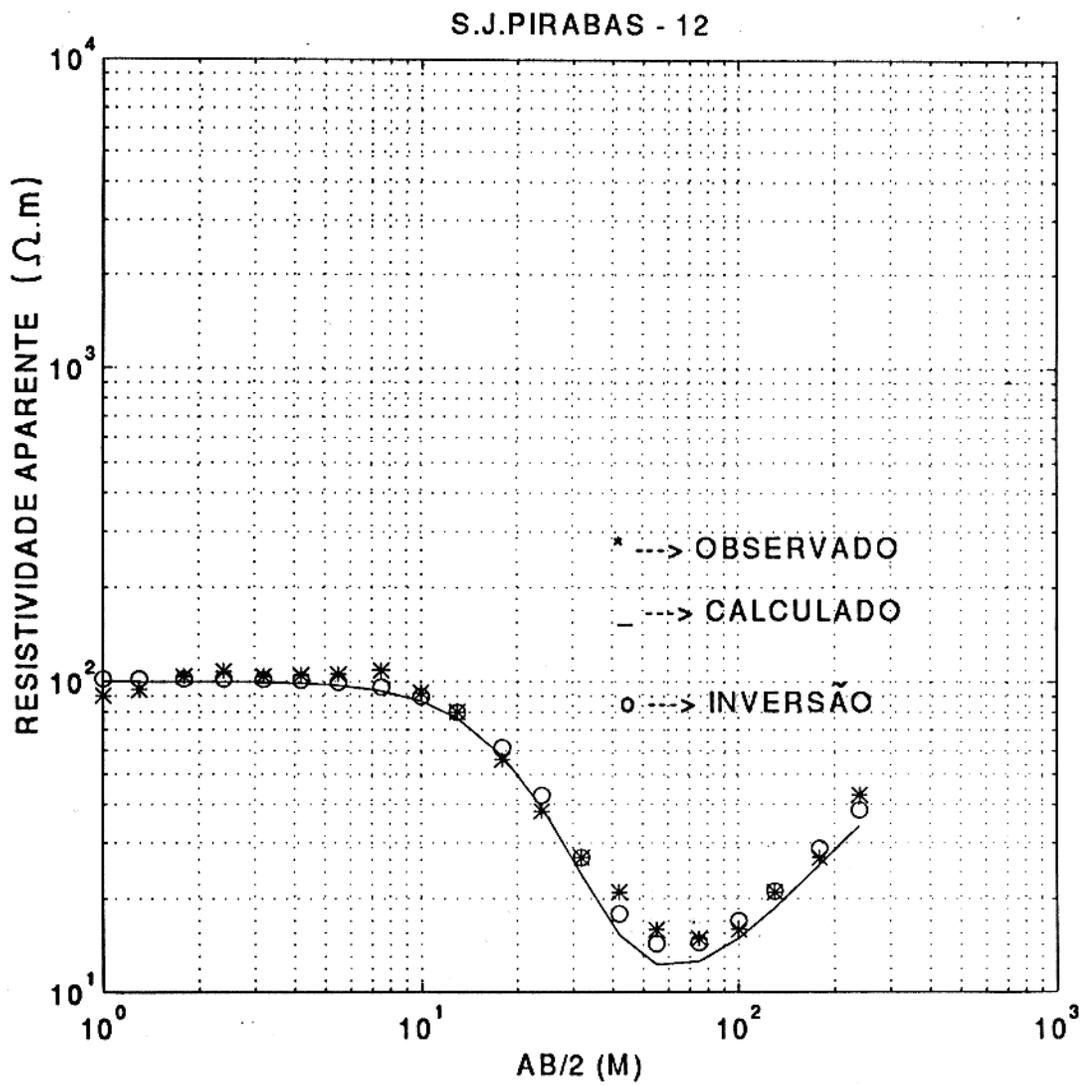
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	400	1.5
horizonte 2	2500	15.0
horizonte 3	550	5.0
horizonte 4	5	55.0
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-10



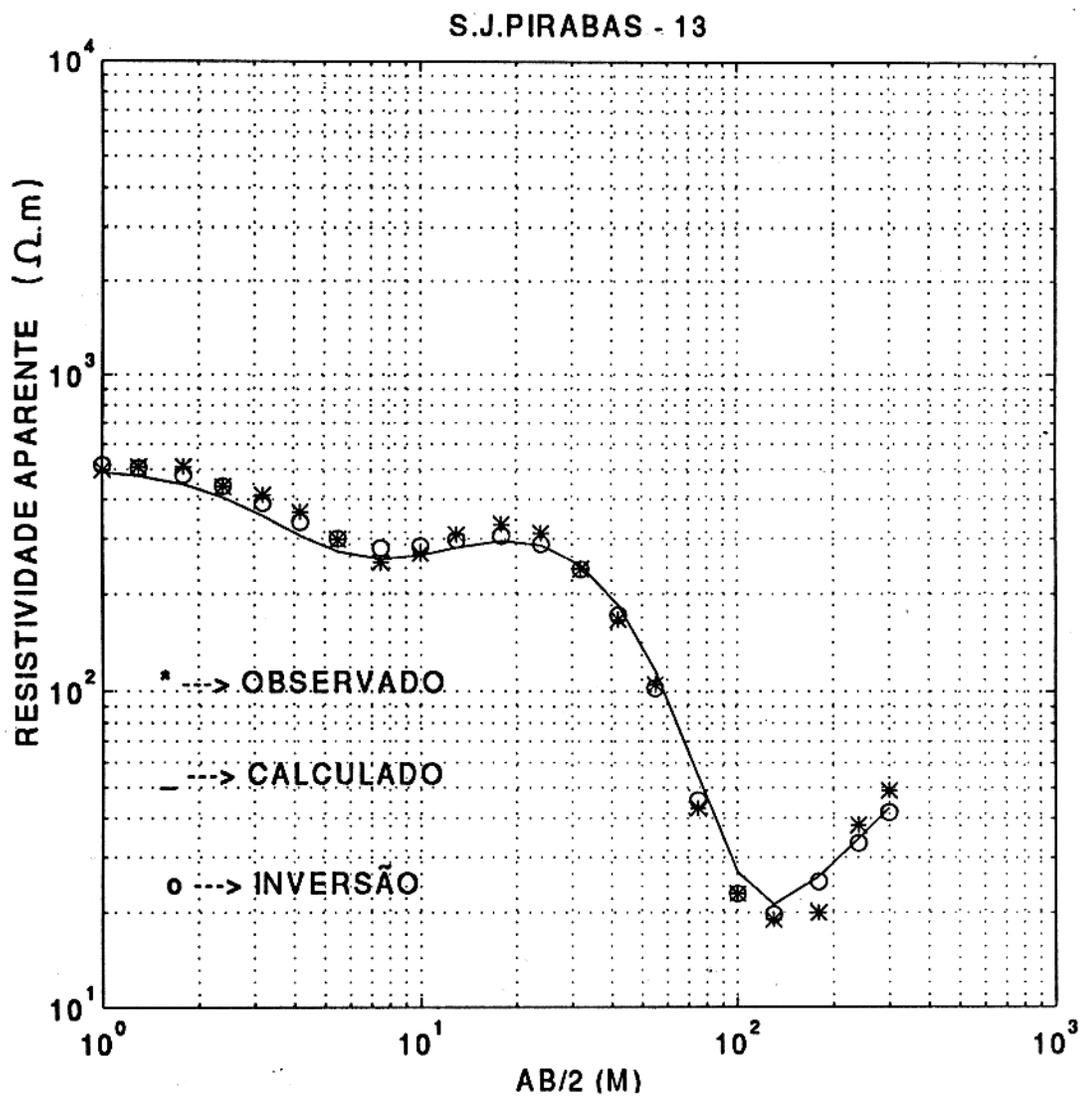
Horizontes	Resistividade($ohm * m$)	Espessura(m)
horizonte 1	100	1.5
horizonte 2	250	15.0
horizonte 3	5	60.0
horizonte 4	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-11



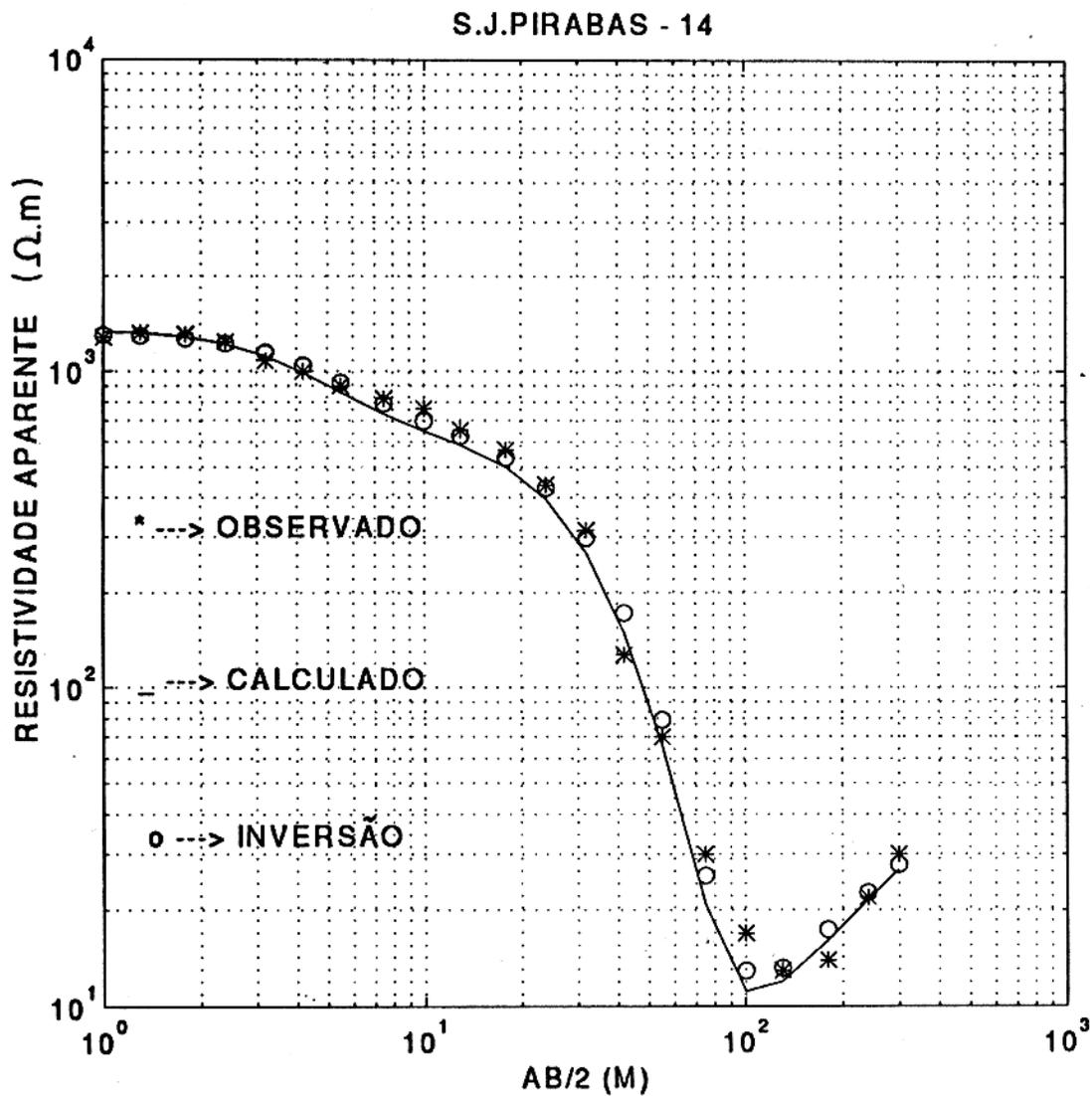
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	100	10
horizonte 2	9	60.0
horizonte 3	4120	

Interpretação da sondagem SPJ-12



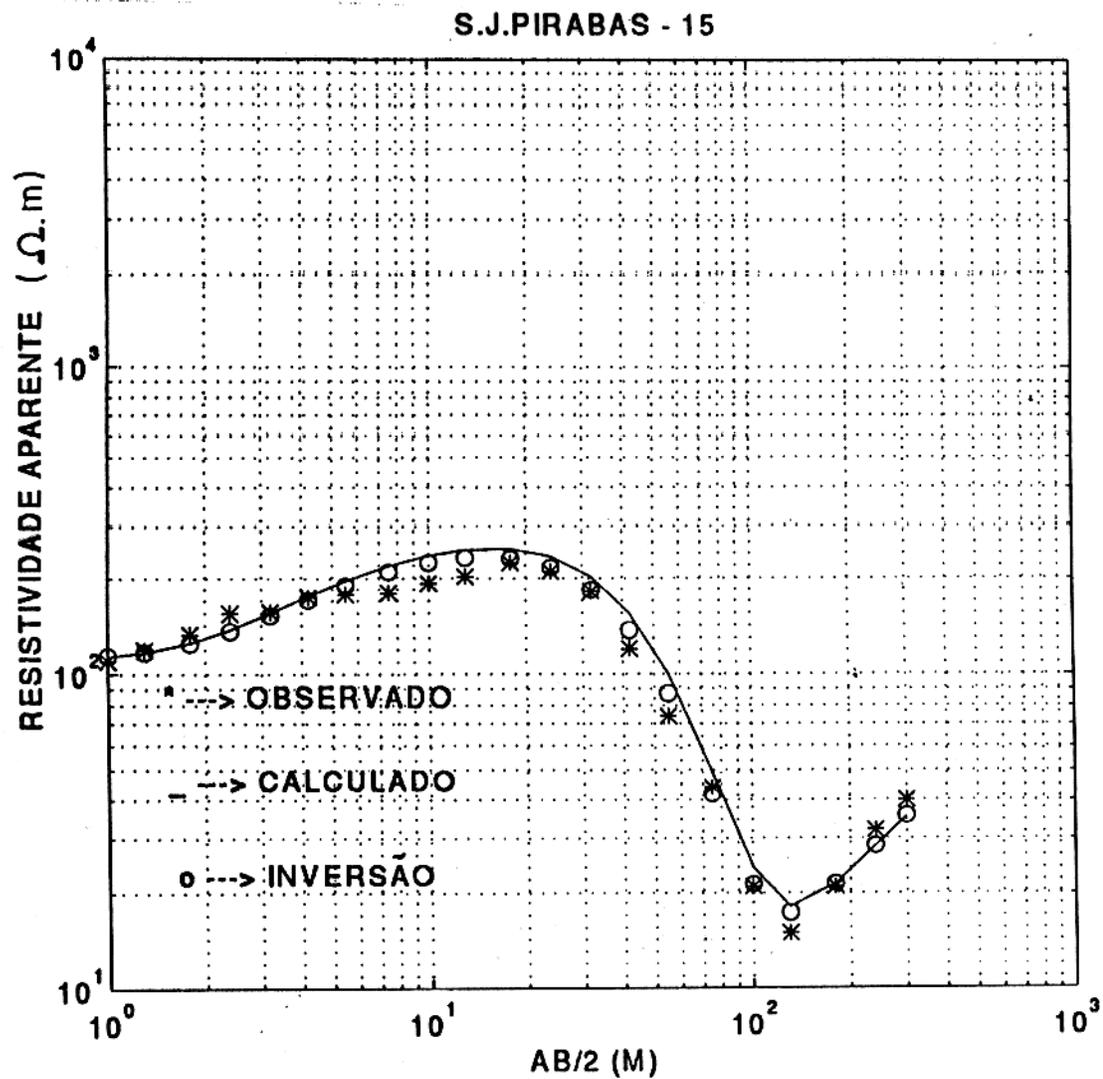
Horizontes	Resistividade(ohm * m)	Espessura(m)
horizonte 1	500	1.5
horizonte 2	200	5.0
horizonte 3	600	10.0
horizonte 4	8	55.0
horizonte 5	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-13



<i>Horizontes</i>	<i>Resistividade(ohm * m)</i>	<i>Espessura(m)</i>
horizonte 1	1350	2.0
horizonte 2	600	15.0
horizonte 3	5	55.0
horizonte 4	2000	

Interpretação da sondagen SPJ-14



Horizontes	Resistividade($\text{ohm} * m$)	Espessura(m)
horizonte 1	110	1.5
horizonte 2	300	20.0
horizonte 3	6	60.0
horizonte 4	5000	

Interpretação da sondagen SPJ-15