

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS A PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
NO MUNICÍPIO DE PONTA DE PEDRAS - ILHA DE MARAJÓ - PARÁ

Tese Apresentada por

CARMELINA NOBUKO KOBAYASHI

como requisito parcial à obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 22.02.79.

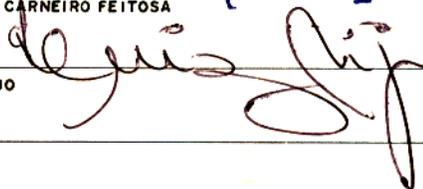


WILLIAM AUGUST SAWCK

(ORIENTADOR)

15.02.79
EDILTON CARNEIRO FEITOSA

LUIZ RIJO



Comitê de Tese

Belém (PA), janeiro/1979

R E S U M O

Este trabalho foi realizado numa área de 25 km² em Ponta de Pedras, Ilha de Marajó. Tem por objetivo o dimensionamento geométrico e seleção de zonas favoráveis à água subterrânea. Foram utilizados dois métodos geofísicos: sísmica de refração e eletroresistividade. O método sísmico foi empregado em caráter experimental, visando verificar a viabilidade de sua aplicação na área. Os resultados da interpretação confirmaram a suspeita inicial, da existência de horizontes geológicos pouco profundos, não possíveis de serem distinguidos pelo método sísmico. Com o método de eletroresistividade foram feitas sondagens verticais e perfis horizontais. Os resultados da interpretação indicaram áreas promissoras na parte central e numa faixa ao norte da área prospectada. A espessura do aquífero raso varia entre 0 e 50 m.

A B S T R A C T

This work was performed in an area of 25 km² in Ponta de Pedras, Marajó Island. The purpose of this work was to study the geometry of the aquifers and to select favorable zones for development of ground water. Two geophysical methods were used: seismic refraction and electroresistivity. The first one was used experimentally intending to find out the possibility of its application in the area. The seismic results obtained confirm the original expectance of the existence of shallow geologic horizon at the subsurface, not able to be distinguished by the seismic method. Vertical electrical soundings and horizontal perfil resistivity were done with the electrical resistivity method. The results of the interpretation point out favorable areas in the central part of the study area and in a zone extending to the north of the prospected area. The thickness of the shallow aquifer varies between 0 and 50 m.

S U M Á R I O

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
INTRODUÇÃO	viii
CAPÍTULO I - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	
1.1. Aspectos Gerais- Estudos Anteriores	1
1.2. Características Locais	7
CAPÍTULO II - MÉTODO DE ELETRORESISTIVIDADE	
2.1. Revisão de Conceitos	17
2.2. Trabalho e Metodologia de Campo	22
2.3. Feições Gerais das Curvas de Sondagem	26
2.4. Interpretação das Curvas de Sondagens Elétricas Verticais e Perfilagem Horizontal	32
CAPÍTULO III - MÉTODO DE REFRAÇÃO SÍSMICA	
3.1. Revisão de Conceitos	49
3.2. Trabalho e Metodologia de Campo	52
3.3. Feição Geral dos Registros e das Dromocrônicas	55
3.4. Interpretação e Resultados Obtidos	56
CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	
4.1. Discussão dos Resultados	62
4.2. Conclusões	72
AGRADECIMENTOS	74
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICES	77

Í N D I C E D E F I G U R A S

Fig. 1	- Mapa de Localização da Ilha	2
Fig. 2	- Mapa Estrutural da Bacia de Marajó	3
Fig. 3	- Coluna Estratigráfica da Bacia Sedimentar da Foz do Rio Amazonas	5
Fig. 4	- Mapa de Localização da Área	9
Fig. 5	- Perfil Altimétrico	10
Fig. 6	- Perfil Litológico do Piezômetro P42	11
Fig. 7	- Perfil Litológico do Piezômetro P44	12
Fig. 8	- Perfil Litológico do Piezômetro P43	13
Fig. 9	- Perfil Litológico do Piezômetro P38	14
Fig.10a	- Configuração Genérica de Quatro Eletrodos	19
Fig.10b	- Configuração Wenner	19
Fig.10c	- Configuração Schulumberger	21
Fig.10d	- Representação de um meio Condutor Estratifica do	21
Fig. 11	- Mapa de Localização das Sondagens Eletricas e Geológicas	anexo 1
Fig. 12	- SEV feito sob chuva	24
Fig. 13	- SEV Representativos do Grupo 1	28
Fig. 14	- SEV Representativos do Grupo 2	29
Fig. 15	- SEVs muito próximos, feitas em Períodos Dife- rentes	31
Fig. 16	- Interpretação da SEV 03	34
Fig. 17	- Interpretação da SEV 01	36
Fig. 18	- Interpretação da SEV 02	38

Fig.19	- Interpretação das SEVs 05,06 e 07	39
Fig.20	- SEV 20 com camada resistiva a 100 metros	41
Fig.21	- Erro na Resistividade Aparente, devido à <u>Im</u> precisão do Equipamento ER-300	42
Fig.22	- Erro na Resistividade Aparente, devido à <u>Im</u> precisão do Equipamento SERCEL	43
Fig.23	- Interpretação da SEV 09	45
Fig.24	- Interpretação da SEV 25	46
Fig.25	- Perfilagem Horizontal	48
Fig.26a	- Esquema da trajetória da Onda Sísmica	51
Fig.26b	- Esquema do Modelo Utilizado na Interpretação Sísmica	51
Fig.26c	- Configuração do Trabalho de Campo na Refra - ção Sísmica	54
Fig.27	-- Registro Sísmico	57
Fig.28	- Hodócrona de uma Interface	58
Fig.29	- Hodócrona de duas Interfaces	59
Fig.30	- Caso de Ambiguidade	63
Fig.31	- Mapa de Contorno da Base do Horizonte A1	anexo 2
Fig.32	- Curvas de Contorno da Resistencia Trans- versal do Horizonte A1	anexo 3
Fig.33	- Curvas de Contorno da Resistencia Trans- versal, dos Horizontes A1 e A2	anexo 4
Fig.34	- Seção Geométrica-Interpretação Prelimi- nar	68
Fig.35	- Seção Geométrica-Interpretação Numérica	69
Fig.36	- Seção Geométrica-Interpretação Numérica	70

I N T R O D U Ç Ã O

O projeto "Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha do Marajó", tem como objetivo fundamental, o estudo de águas subterrâneas em algumas áreas piloto da Ilha de Marajó: estudos hidrogeológicos das áreas de campos naturais onde se desenvolvem atividades pecuárias e das áreas de concentração populacional, tal como cidades e vilas. A área de campos naturais está localizada na parte oriental e abrange também parte do sul da Ilha. Nessa área ocorrem problemas tais como cheias dos rios, de janeiro a julho, período de secas, de agosto a dezembro e presença de água salgada. Vários trabalhos e estudos vêm sendo desenvolvidos nessa área. Destacam-se IDESP (1974), DNOS e DNPVN. Dentre os trabalhos realizados pelo IDESP, consta o de prospecção elétrica em uma área de 20.000 km².

O objetivo deste trabalho é o estudo de detalhe para avaliar quantitativamente as dimensões de estruturas favoráveis à água subterrânea numa área de 25 km² em Ponta de Pedras, bem como selecionar locais favoráveis à construção de poços. A escolha da cidade de Ponta de Pedras e vizinhança como área piloto para o Projeto, deveu-se a três razões: na cidade, a água de abastecimento é desagradável ao paladar devido à presença de Fe⁺⁺ e Fe⁺⁺⁺; durante o verão, ocorre diminuição na vazão do poço; próximo à cidade, nas diversas vilas onde se desenvolvem atividades agrícolas, há locais com problema de vazão devido à predominância de argila.

O acesso de Belém à cidade de Ponta de Pedras se faz

por embarcações e aviões monomotores. Dentro da área, o deslocamento se faz de carros ou a pé. Este trabalho foi desenvolvido, utilizando todos esses recursos.

Dois métodos geofísicos foram empregados: sísmica de refração e eletroresistividade. No método sísmico, os geofones foram distribuídos em linha reta, com espaçamento variados, sendo cada distribuição, na maioria, de 177 metros. Foram feitos tiros diretos e reversos, próximos e distantes à distribuição. Em eletroresistividade foram realizados vinte e oito sondagens elétricas verticais (SEV), utilizando o dispositivo simétrico Schlumberger. O espaçamento máximo entre os eletrodos (AB) de corrente variou entre 200 e 1.000 metros. Para verificar a variação lateral de resistividade foi feito um perfil horizontal com o dispositivo Wenner, tomando o espaçamento de 40 metros. O estudo geofísico por eletroresistividade se faz necessário para auxiliar na solução do problema de água em época de seca, pois embora se encontre água subterrânea a pouca profundidade, em uma grande parte da ilha ela se apresenta salgada. Este método eletroresistivo é útil, também, para o estudo de litologias cujas distinções são importantes para o estudo de águas subterrâneas.

Três poços a percursão foram perfurados para auxiliar a interpretação dos métodos geofísicos. Testemunhos foram coletados para verificar a variação vertical de litologia. Água desses poços e outros poços domésticos foram coletadas para medidas das propriedades hidroquímicas. Já estavam instalados, na área, oito piezômetros, a maioria com 12 metros de profundidade. Também, já existiam vários poços domésticos escavados.

O estudo topográfico foi feito com altimetria, tomando-se como referência um ponto da estrada a 780 metros do Rio Arapinam.

Trabalhos de hidrogeologia estão sendo feitos numa área maior e que contém a área onde este trabalho foi realizado.

Instrumentos de medidas hidrológicas tais como pluviômetro, linígrado, foram instalados na mesma área.

C A P Í T U L O I

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

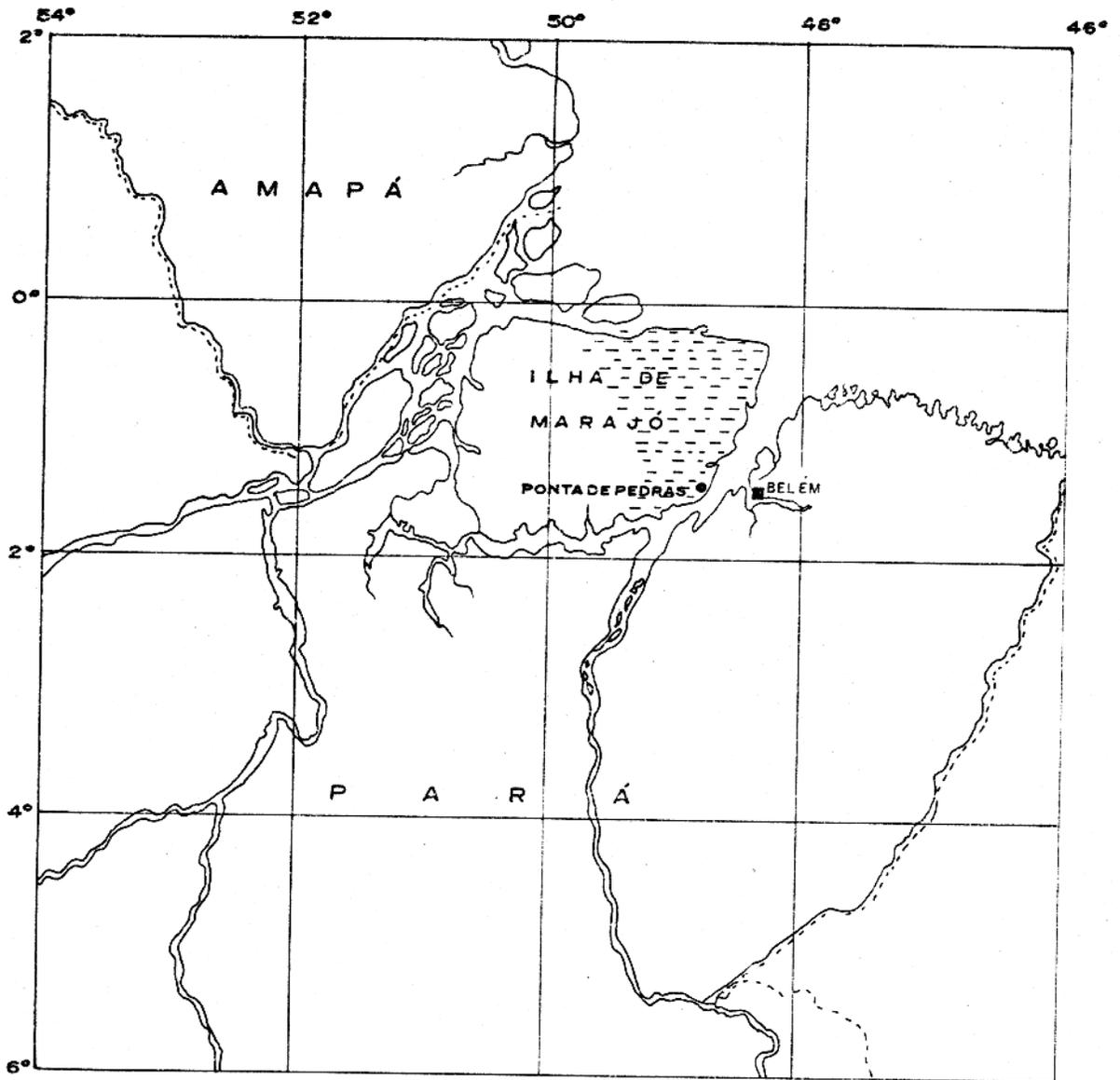
1.1. ASPECTOS GERAIS - ESTUDOS ANTERIORES

Geologia Regional

A Ilha de Marajó faz parte da bacia sedimentar da foz do Amazonas, possuindo uma superfície de, aproximadamente, 49.606 km². Situa-se entre 48°20' e 51°W de longitude e 0° e 2°S de latitude. É limitada ao norte pelo canal principal do Rio Amazonas e pelo Oceano Atlântico, ao sul pela foz dos rios Pará e Tocantins, a oeste pelo canal de Breves e a leste pelo Oceano Atlântico (Fig. 1).

Sob o ponto de vista geomorfológico (Projeto RADAM, 1974), ela pertence à Planície Amazônica, apresentando diversidade de feições, com canais recentes, paleocanais, "furos" e "igapés". Está sujeita a inundações periódicas devido às chuvas e cheias dos rios, os quais estão sob influência da maré. Do mapeamento regional feito pelo Projeto RADAM, distinguem-se na Ilha, três feições geomorfológicas: a leste, planícies colmatadas, no centro o Pediplano Pleistocênico e a oeste, uma extensa região ainda em processo de colmatagem. As áreas colmatadas, com sedimentação holocênica é de uma grande extensão contínua, com predominância de vegetação gramínea. A topografia da Ilha é suave, apresentando altitudes que não atingem duas dezenas de metros.

A bacia sedimentar da foz do Amazonas (Fig. 2) é constituída por um conjunto de bacias interiores, Marajó, Bragan



ESCALA
0 60 120Km



ESCALA
0 750 1500Km

--- CAMPOS NATURAIS
..... LIMITES INTERESTADUAIS

FIG. 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO

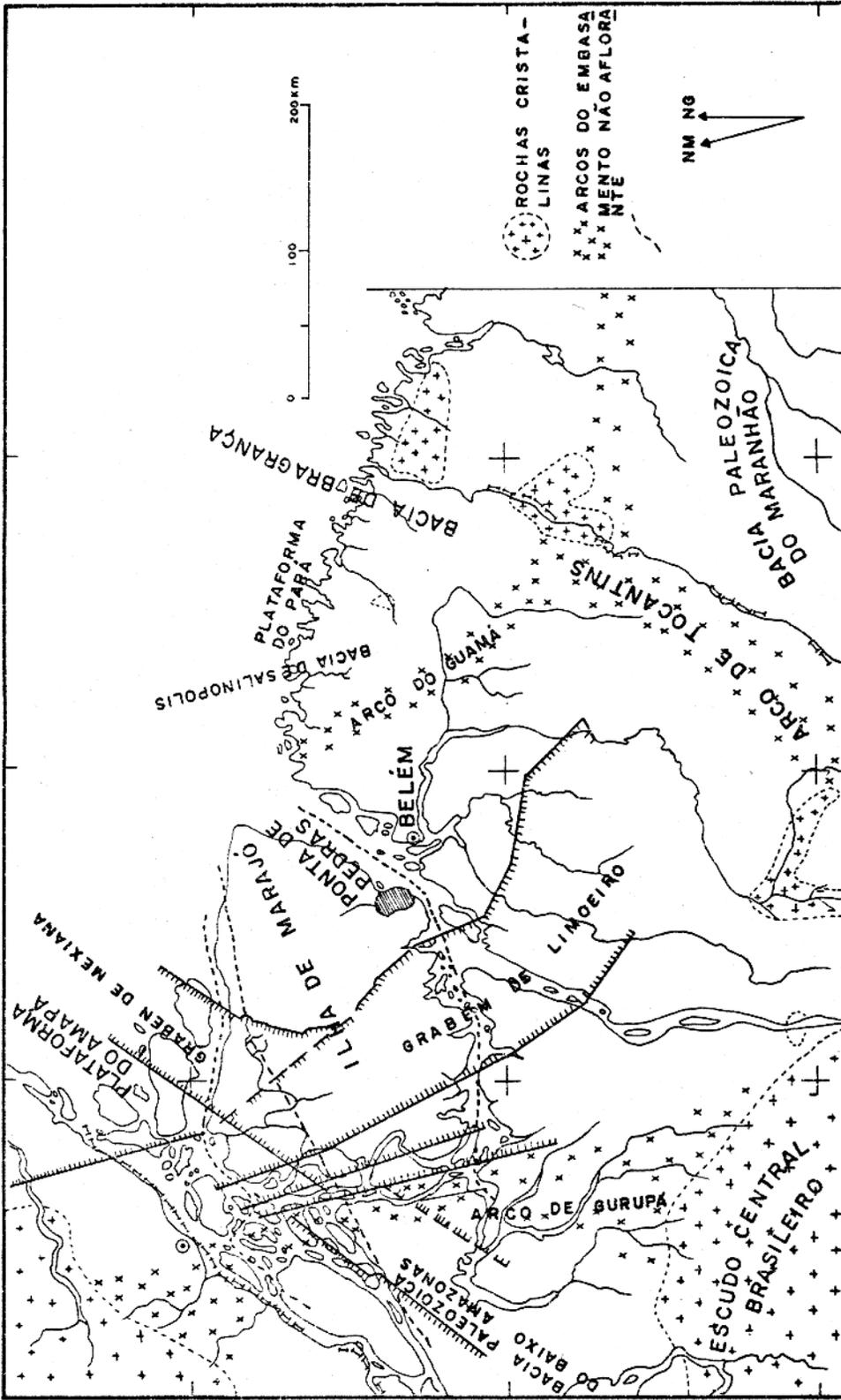


FIG. 2 - MAPA ESTRUTURAL DA BACIA DO MARAJÓ
LUDWIG (1968) POR JACIRO PIUCCI

ça, São Luís e exteriores, Barreirinhas e Salinópolis (Ludwig, 1964). A bacia de Marajó comporta dois grandes Grabens, o de Limoeiro e o de Mexiana e ainda as Plataformas do Pará e Amapá. O Graben de Limoeiro tem direções $N60^{\circ}W$ e $N30^{\circ}W$ e o de Mexiana, $N35^{\circ}E$, e consistem de falhas escalonadas, estendendo-se até a profundidade de 5.500 metros, de acordo com os resultados sísmicos de reflexão da Petrobrás.

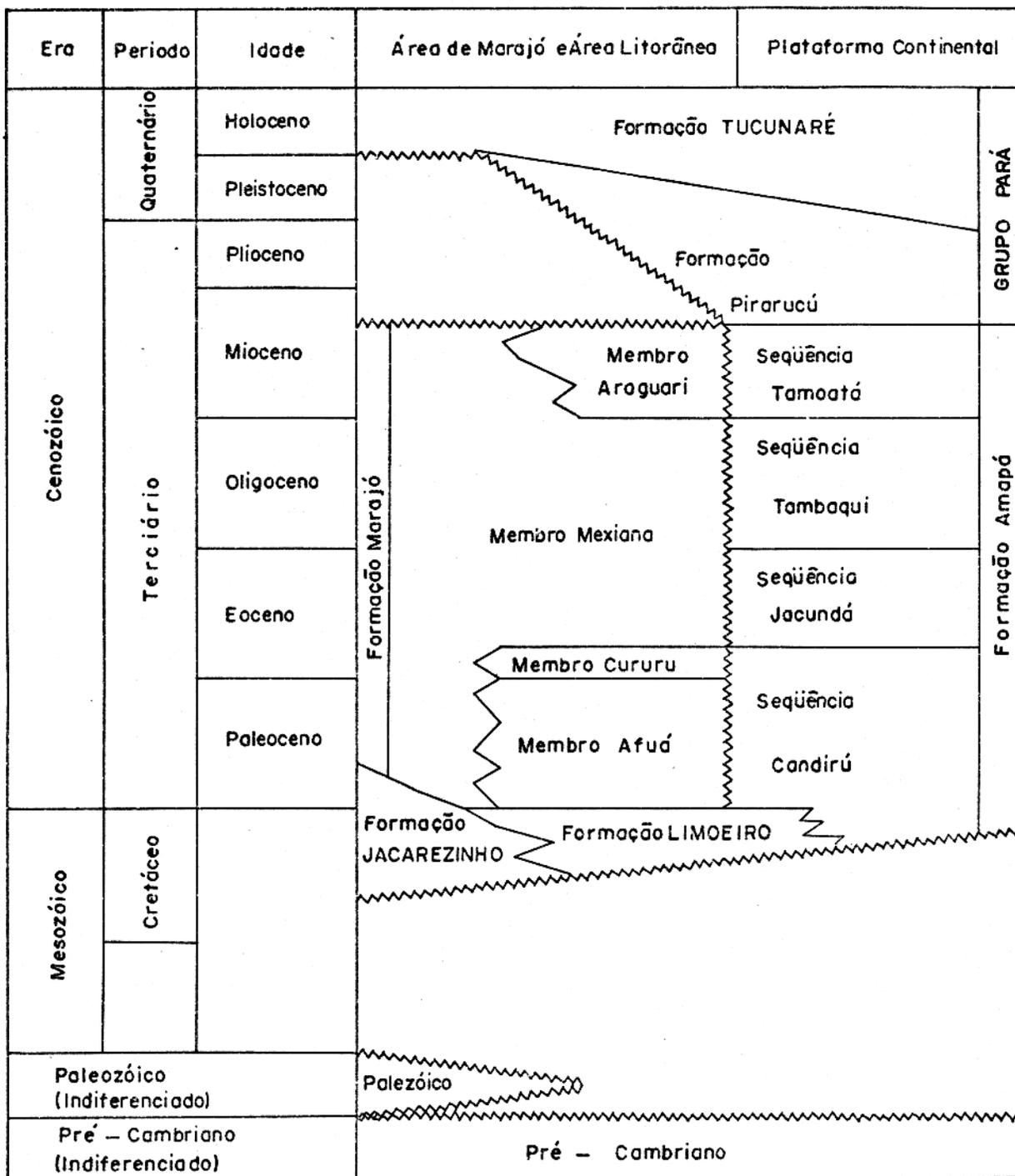
É delimitada a bacia de Marajó, pelos arcos de Gurupá e Tocantins, que a separa das bacias inferior do Amazonas e da bacia do Maranhão, respectivamente.

As formações cristalinas da foz do Amazonas são constituídas, principalmente, por granitos-gnaisses, xistos, quartzitos e filitos Pre-cambriano.

O início da sedimentação data do Cretáceo Superior com as formações Jacarezinho e Limoeiro (IDESP, 1974), Fig. 3. A primeira é constituída, principalmente, de conglomerados compostos, e a segunda de arenitos com intercalações de argilitos.

A seguir, no Terciário, temos as deposições que foram designadas de Marajó e Amapá, constituídas, essencialmente, por arenitos, argilitos e folhelhos, a primeira, e por carbonatos a segunda.

Os sedimentos clásticos do Mioceno ao Holoceno, formam o chamado Grupo Pará, designação proposta por Schaller, Vasconcelos e Castro (1971). O Grupo Pará se estende até a plataforma continental e os sedimentos são de origem fluvial e pará-



(Seg. Schaller, Vasconcelos e Castro-1971)

FIG. 3. COLUNA ESTRATIGRÁFICA PRELIMINAR DA BACIA SEDIMENTAR DA FOZ DO RIO AMAZONAS

lica no continente e nerítica na plataforma continental. Os autores acima dividem o Grupo Pará nas formações Pirarucu, de predominância argilosa e Tucunaré, arenosa. A seção das formações do Grupo Pará atingiu 1.900 metros de espessura em uma perfuração na plataforma continental.

Hidrologia e Condições Climáticas

A Ilha de Marajó possui um clima tropical e úmido (OEA, 1974), com a temperatura estável e em média de 27°C, sendo que na região da mata é, ligeiramente, mais baixa do que nos campos.

A precipitação pluviométrica é desigual na Ilha, tendo a região de campos uma média de 2.700 mm/ano e a região da mata uma média de 2.960 mm/ano.

O índice evaporimétrico é de 1.600 mm na região dos campos e somente 650 mm na zona da floresta.

A drenagem da Ilha tem influência topográfica, está sujeita ao efeito das marés. As amplitudes diárias de marés registradas no linígrafo instalado em frente à cidade de Ponta de Pedras (próximo à foz do Rio Marajó-Açu), mostraram uma variação muito grande durante o ano, entre cerca de 1,5m a 3m. Também, os rios estão sujeitos às enchentes, em menor ou maior proporção, no período de janeiro a julho. Dentre os rios distinguem-se:

Rios Anabiju, Arari, Camará e Marajó-Açu que desembocam na Baía de Marajó; Rio Paracauari, que desemboca no Oceano

Atlântico; Rios Anajá e Caruru, principais dentre os que drenam a área central e oeste da Ilha; Tartarugas, o mais importante na costa norte, ligado ao Rio Arari pelo canal de mesmo nome.

Os rios cuja foz se encontra próximo ao Oceano Atlântico, ficam com a água bastante salobra durante o período de seca.

Na parte ocidental da Ilha se observam numerosos e extensos canais de drenagem denominados de "furos" e "igarapés".

Hidrogeologia

Na Ilha de Marajó (IDESP, 1974) afloram areias, siltes, argilas e lateritas. Estes sedimentos estão saturados de água a partir de alguns metros de profundidade, constituindo os aquíferos livres e confinados. Os aquíferos confinados situam-se na parte central dos campos naturais, onde predominam terrenos argilosos superficiais impermeáveis.

A recarga dos aquíferos é de origem pluvial, processando-se por infiltração direta e/ou diferencial.

Acrescente-se que no período de fevereiro a junho, a região central da Ilha fica totalmente inundada pelas enchentes dos rios, devido, principalmente, as abundantes chuvas neste período.

1.2. CARACTERÍSTICAS LOCAIS

Geologia - Hidrogeologia e Hidrologia

A área prospectada possui cerca de 25 km² e é limita-

da ao norte pelo Rio Armazém, a oeste e ao sul pelo Rio Marajó-Açu e a leste pela Baía de Marajó (Fig. 4). A população da área é cerca de 10.000 habitantes.

Cerca de 5% da área pesquisada é constituída de campos naturais e o restante, de vegetação baixa, conhecida como ca poeira. A vegetação original já foi totalmente destruída. Praticamente toda a área pesquisada está tomada por plantações de ma dioca, feijão, malva e outras.

A topografia é plana (Relatório interno do NCGG, Pro jeto Marajó, 1975), com um gradiente máximo de 0,5%, conforme le vantamento altimétrico realizado ao longo da Rodovia que liga a cidade de Ponta de Pedras ao povoado de Mangabeira (Fig. 5).

Afloram na superfície, argila, silte e concreções li moníticas, estas últimas conhecidas na região como grês do Pará. São formadas pela precipitação de óxido ou hidróxido de ferro, ci mentando grãos de quartzo ou argila e outras substâncias. Na Praia Grande, tem-se a predominância de argila, enquanto que na Praia de Mangabeira é de predominância quartzosa. Essas concreções ocorrem a profundidades e proporções variadas. Há locais em que são encontradas camadas contínuas e de espessura apreciável, enquanto que em outros, ocorrem em quantidades pequenas e descon tínuas.

As informações geológicas de subsuperfície são forne cidas por diversos poços rasos (Figs. 6, 7, 8 e 9; apêndice 1, 2 e 3). Encontram-se neles, em proporções e seqüências variadas, areia fina a grossa, quartzosa, variegada; argila variegada, es-

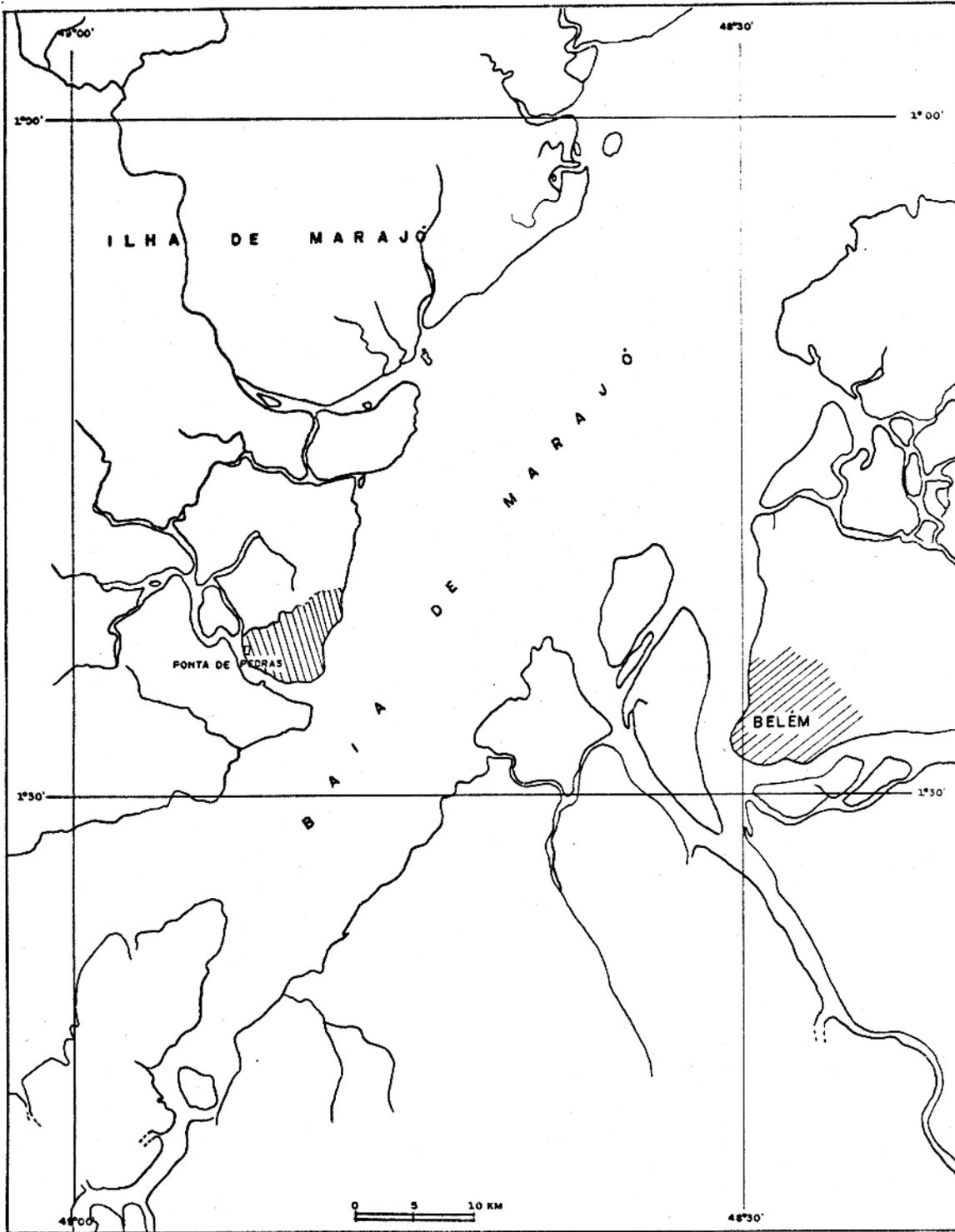


FIG. 4 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

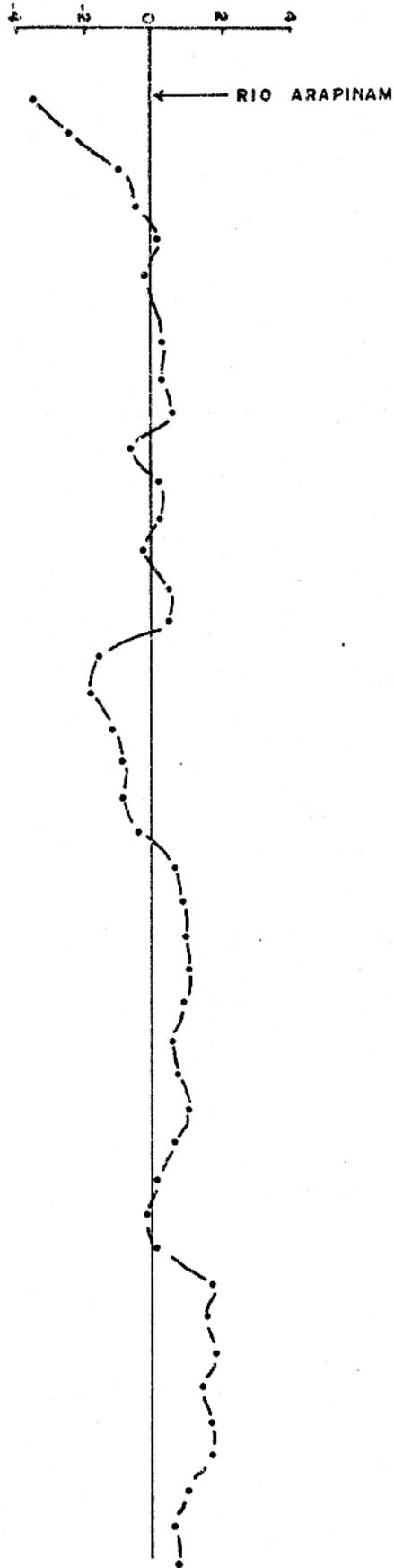


FIG. 5 - PERFIL ALTIMÉTRICO, ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA.

ESCALA HORIZONTAL
0 800 M

ESCALA VERTICAL
0 4 M

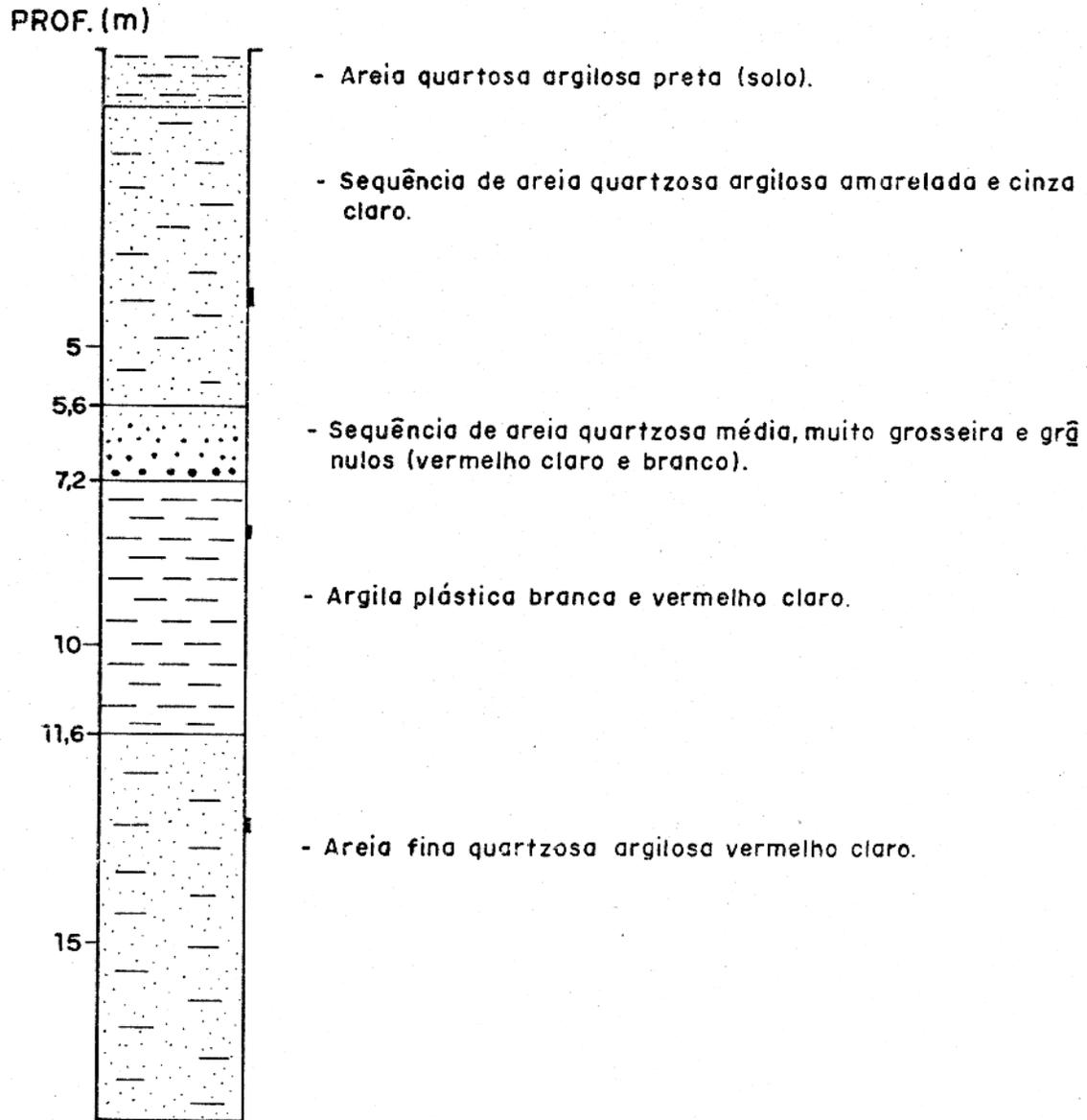


FIG. 6 - PERFIL LITOLÓGICO DA SONDAGEM GEOLÓGICA-PIEZÔ-METRO P42.

■ AMOSTRAGEM

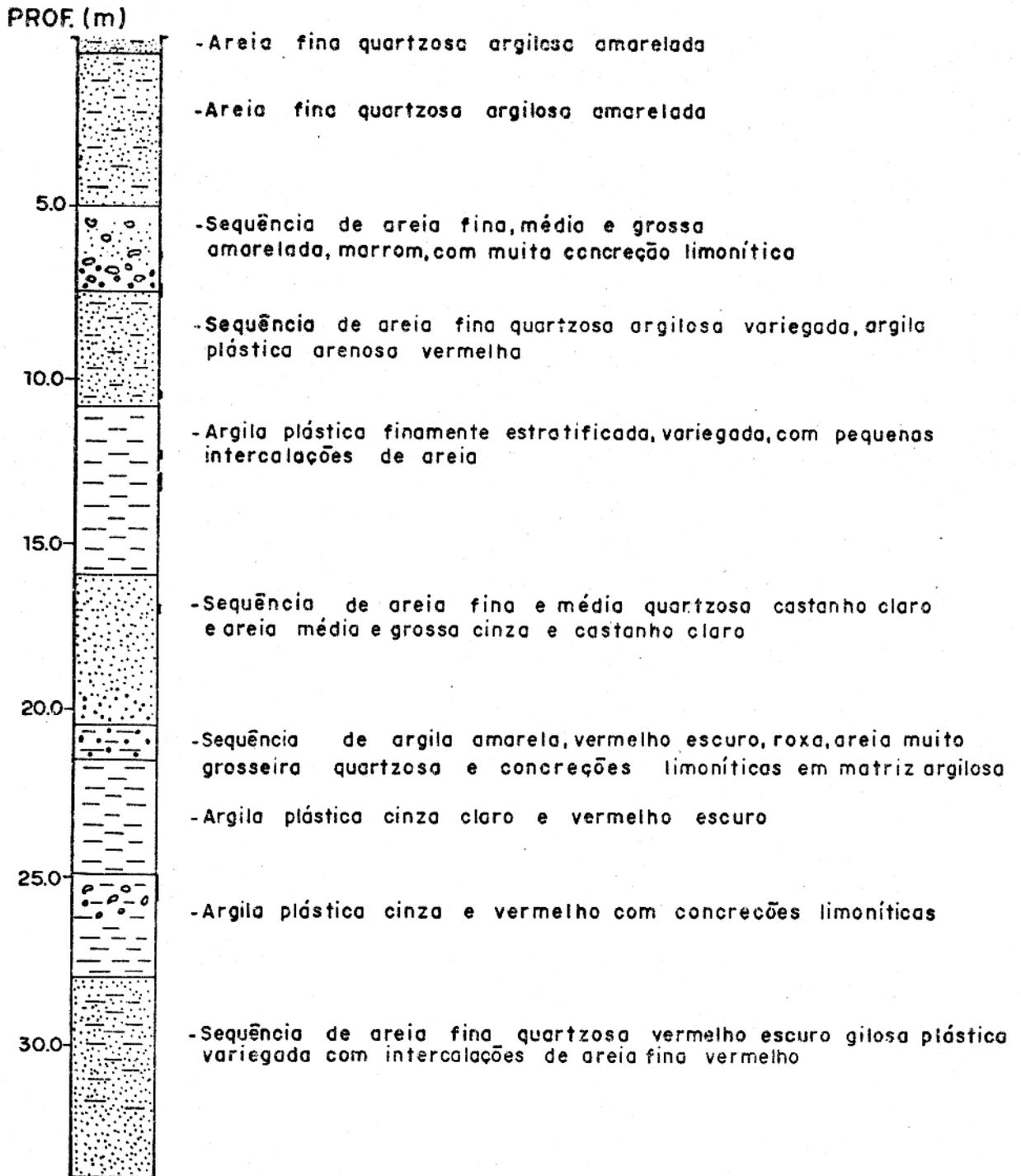


FIG.7 - PERFIL LITOLÓGICO DA SONDAGEM GEOLÓGICA - PIEZÔMETRO P 44

I AMOSTRAGEM

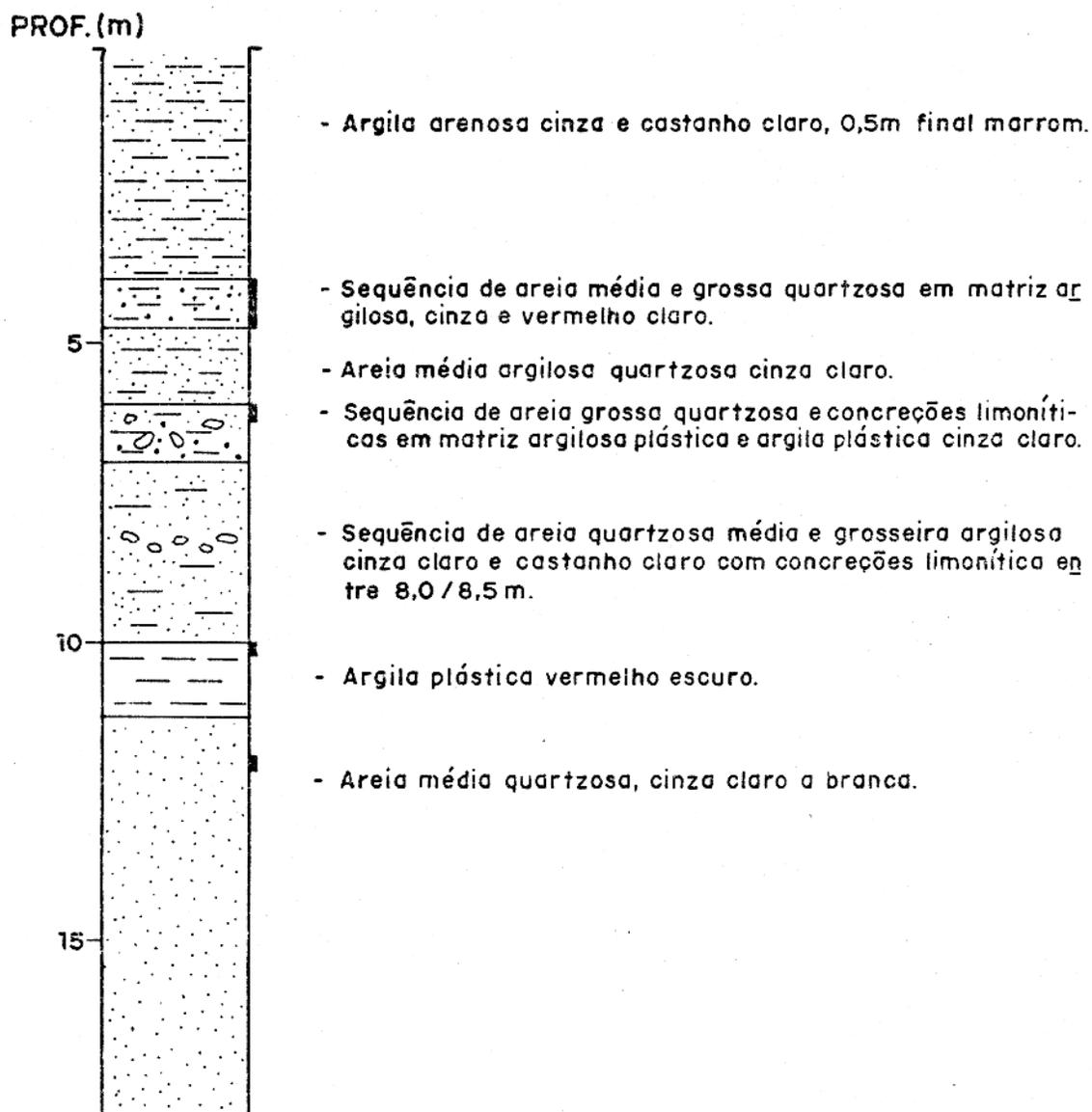


FIG.8 - PERFIL LITOLÓGICO DA SONDAGEM GEOLÓGICA-PIEZÔ-METRO P43.

■ AMOSTRAGEM

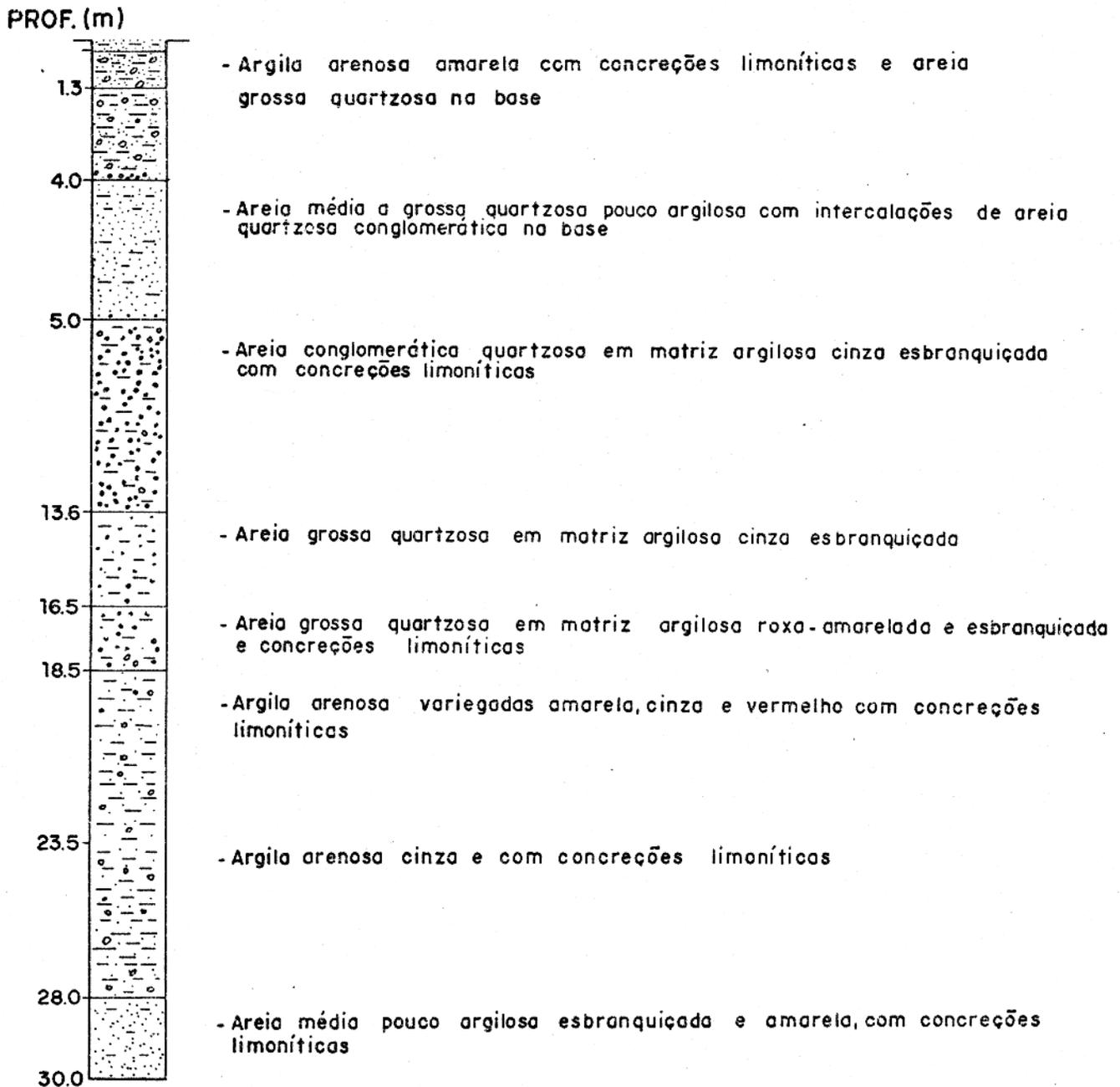


FIG. 9 - PERFIL LITOLÓGICO DA SONDAGEM GEOLÓGICA, PIEZÔMETRO P38, EXECUÇÃO: JACIRO PIUCCI.

ADAPTADO: CARMELINA KOBAYASHI

tratificada ou não, e concreções limoníticas. O conhecimento local da litologia vem auxiliar as interpretações geofísicas. Como neste estudo são de interesse apenas os aquíferos rasos, a pesquisa se limitou ao Grupo Pará.

Na área em estudo, a unidade mais importante para a água subterrânea é horizonte arenoso, que está bem evidenciado na maioria das sondagens elétricas, como será visto no Capítulo II. A delimitação de suas dimensões constitui o objetivo principal do levantamento geofísico realizado.

A superfície piezométrica varia entre 1 metro a 8 metros, conforme medidas feitas em diversos poços escavados domésticos e nos poços perfurados.

A drenagem da área é feita pelos Rios Marajó-Açu e seus afluentes da margem esquerda, sendo o mais importante o Rio Armazém. Ainda se destacam os Rios Arapinam, Cucuíra e Ipanema. Todos esses rios estão sujeitos ao fenômeno das marés e, em menor escala, às enchentes. A água desses rios é doce, com uma condutividade média de 60 uS/cm (Apêndice 4).

A água da baía de Marajó apresentou uma condutividade de 41 uS/cm, coletada em fins de janeiro.

Na área em estudo, não ocorrem problemas de enchentes nem de água salgada a profundidades rasas até 30m. Todos os aquíferos estão saturados de água doce até essa profundidade, com condutividade variando entre 17 e 61 uS/cm, conforme Apêndices 4 e 5.

Foram observados dois problemas de água subterrânea: Primeiro, em alguns pontos, há um excesso no teor de ferro total ($\text{Fe}^{++} + \text{Fe}^{+++}$), que tornam a água desagradável ao paladar. É o caso da água que abastece a cidade de Ponta de Pedras, cujo resultado de análise química apresentou um teor máximo de 3,45 mg/l, em 27/10/77. Segundo o Padrão Internacional da Organização Mundial de Saúde, o teor de ferro total aconselhável para o consumo humano é de 0,3 mg/l. O segundo problema consiste na pequena vazão que certos locais apresentam, sobretudo no verão, onde predominam terrenos argilosos.

C A P Í T U L O I I

MÉTODO DE ELETRORESISTIVIDADE

2.1. REVISÃO DE CONCEITOS

Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Perfilagem Horizontal

Os conceitos fundamentais sobre o método de eletroresistividade podem ser encontrados na literatura, em particular, Keller and Frischknecht (1966). A seguir será visto um rápido resumo das características mais importantes desse método, necessárias a este trabalho.

Em geral, no método de eletroresistividade, uma corrente elétrica contínua é dirigida através da terra por meio de dois eletrodos de corrente, localizados na superfície da terra, e a diferença de potencial é medida entre dois outros eletrodos. A partir das medidas destes parâmetros, é estudada a distribuição de resistividade elétrica na sub-superfície. Se os eletrodos de corrente são expandidos em relação a um ponto fixo, tem-se o estudo das variações de resistividade com a profundidade. Caso todos os eletrodos sejam deslocados em linha reta, mantendo intervalos constantes entre si, tem-se a investigação lateral de resistividade. O primeiro caso é chamado de sondagem vertical e o segundo, de perfilagem horizontal.

A interpretação das medidas nas sondagens verticais é, normalmente, baseada na suposição de que a sub-superfície consiste de um número finito de camadas distintas, separadas por limites planos horizontais, sendo cada camada isotrópica e homogê

nea. A distribuição de resistividade na terra pode ser determinada a partir da equação que dá o potencial de fontes puntiformes de corrente. No caso particular para um arranjo de quatro eletrodos, sendo a diferença de potencial ΔU entre dois pontos M e N dos eletrodos de medida, a resistividade será:

$$\rho = \frac{K(U_M - U_N)}{I} = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

onde K é um fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos, dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}}$$

onde B e A representam os eletrodos de corrente, M e N os de potencial, como ilustra a Fig. 10a .

A equação (1) pode somente ser usada para calcular a resistividade de um terreno homogêneo e isotrópico. Caso não o seja, a equação define a resistividade aparente.

Na configuração denominada Wenner (Fig. 10b), as distâncias entre os eletrodos adjacentes são iguais entre si e o valor da constante dada em (1) torna-se:

$$K = 2\pi a \quad (2)$$

Na configuração simétrica de Schlumberger (Fig. 10c) em que a distância entre os eletrodos de potencial é muito pequena em relação aos eletrodos de corrente, e dispostos a meia distância entre estes, K em (1) é dado por:

$$K = \pi(a^2/b - b/4) \quad (3)$$

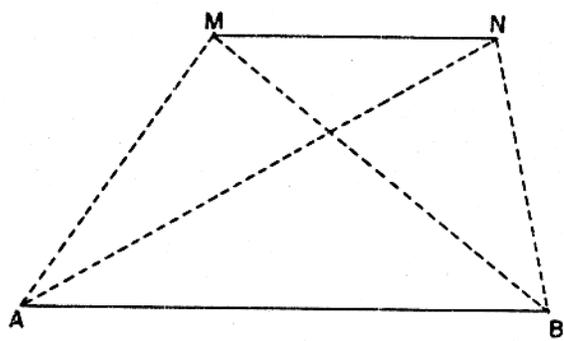


FIG. 10a - CONFIGURAÇÃO GENÉRICA DE QUATRO ELETRODOS

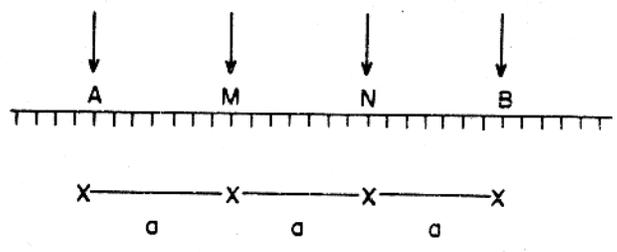


FIG. 10b - CONFIGURAÇÃO WENNER

Para $b < 0,435 a$ (Keller, 1966), (3) pode ser calculado por $K = \pi a^2/b$ (4) e a razão $\Delta V/b$ se aproxima satisfatoriamente do campo elétrico no centro do quadripolo.

Resistência Transversal e Princípio de Equivalência

Na interpretação de sondagens elétricas verticais em meios condutores estratificados, os conceitos de resistência transversal unitária T e condutância longitudinal unitária S são muito importantes. Também não podem ser ignoradas determinadas condições de resistividade e espessura de camadas desses meios, que levam ao "princípio de equivalência". Será vista, neste trabalho, a resistência transversal unitária T e princípio de equivalência em T , devido às curvas desta área corresponderem ao tipo KQ e KQQ conforme será visto na seção 2.3 deste capítulo.

Considere-se a Fig. 10d de um prisma reto de seção quadrada (Orellana, 1972) e de lado unitário, representando um meio condutor estratificado de n camadas. Supondo que o prisma é atravessado por uma corrente elétrica que flui perpendicularmente à estratificação, as diferentes camadas se comportam como condutores em série. Assim, a resistência de uma dada camada será:

$$T_1 = \frac{\rho_1 E_1}{1 \times 1}$$

$$T_1 = \rho_1 E_1$$

T_1 é chamada de resistência transversal unitária, ρ_1 e E_1 são respectivamente, a resistência e a espessura da camada i . A resistência transversal total T será: $T = \sum_1 E_1 \rho_1$

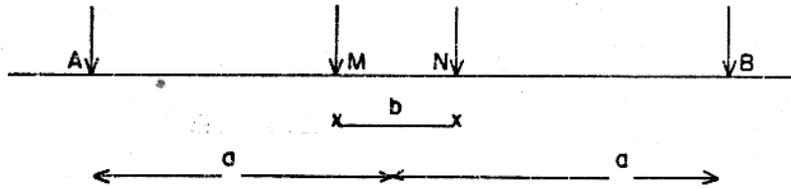


FIG. 10c. CONFIGURAÇÃO SCHULLUMBERGER

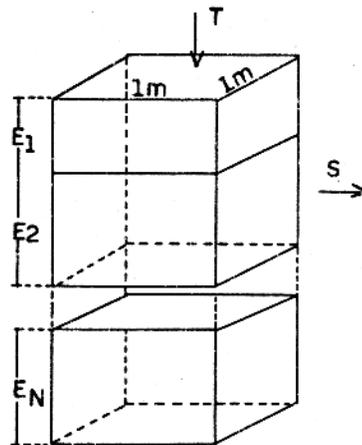


FIG. 10d. REPRESENTAÇÃO DE UM MEIO CONDUTOR ESTRATIFICADO DE N CAMADAS

O princípio de equivalência em T (Bhattacharya and Patra, 1968), ocorre quando se tem uma camada muito mais resistiva que as adjacentes, e sua espessura não é muito grande. A forma das curvas das SEVs permanece praticamente a mesma, se sua resistividade é correspondentemente diminuída ou aumentada pelo mesmo fator, numa dada interpretação. Isto se deve ao fato de que, sob as condições geoeletricas acima, a resistividade aparente não depende dos valores absolutos de ρ e E mas somente do produto $T = \rho E$. Assim, modelos diferentes podem levar a um mesmo resultado, e erros podem ser envolvidos na interpretação.

2.2. TRABALHO E METODOLOGIA DE CAMPO

Instrumentação e Medidas de Sondagens Elétricas

Foram utilizados dois instrumentos nas SEVs: o SERCEL, da série AE 631A, da Companhia Francesa SOCIÉTÉ d'ETUDES RECHERCHES ET CONSTRUCTIONS ÉLÉTRONIQUES, potência máxima de 1000 Watts, sendo usado neste trabalho até o máximo de 200 Watts; o ER-300 da Companhia Nacional PERGEO, que opera com potência máxima de 80 Watts. Os dois equipamentos enviam sinais em corrente contínua.

Dentre esses equipamentos, o ER-300 revelou melhor desempenho no que diz respeito à facilidade de operação e transporte. Os valores das medidas obtidas através dos dois equipamentos foram equivalentes, conforme um teste realizado no campo. Ambos se tornaram instáveis quando o espaçamento AB entre os eletrodos de emissão de corrente atingiam valores em torno

de 400 a 600 metros. Por essa razão, limitou-se o espaçamento máximo até esses valores.

Foram executadas 28 SEVs, utilizando-se o arranjo sísmico Schlumberger (Fig. 11). Não foi obedecida uma distribuição sistemática e criteriosa segundo malha regular, por ser uma área pioneira em estudos geofísicos. A malha regular utiliza-se geralmente quando, verificada uma anomalia, há o interesse em detalhá-la.

Perfilagem elétrica horizontal foi feita numa extensão de 2350 m, do cemitério até o final do campo de pouso. Era de interesse executar outras perfilagens paralelas a esta, para dar maior apoio à investigação, mas não foi possível devido às condições locais. Na perfilagem foi utilizado o arranjo Wenner, com o espaçamento de 40 metros entre os eletrodos.

Os dados de resistividade foram coletados no período de julho a janeiro, num total de três campanhas de campo. Foi escolhido este período para evitar a chuva, que causaria dois problemas no desenvolvimento do trabalho: dificuldade no acesso a alguns pontos da área e, o mais sério, variação nos valores dos parâmetros medidos. A Fig. 12 mostra uma sondagem feita sob a chuva. Nota-se que essas variações tornam-se mais acentuadas à medida que se aumenta o valor de $AB/2$. Foram observadas variações de até 50% no valor da resistividade aparente. Duas causas concorrem para isso:

a) O solo úmido torna-se mais condutor pela dissolução de sais.

Os fios não sendo em geral cem por cento isolados, permitem

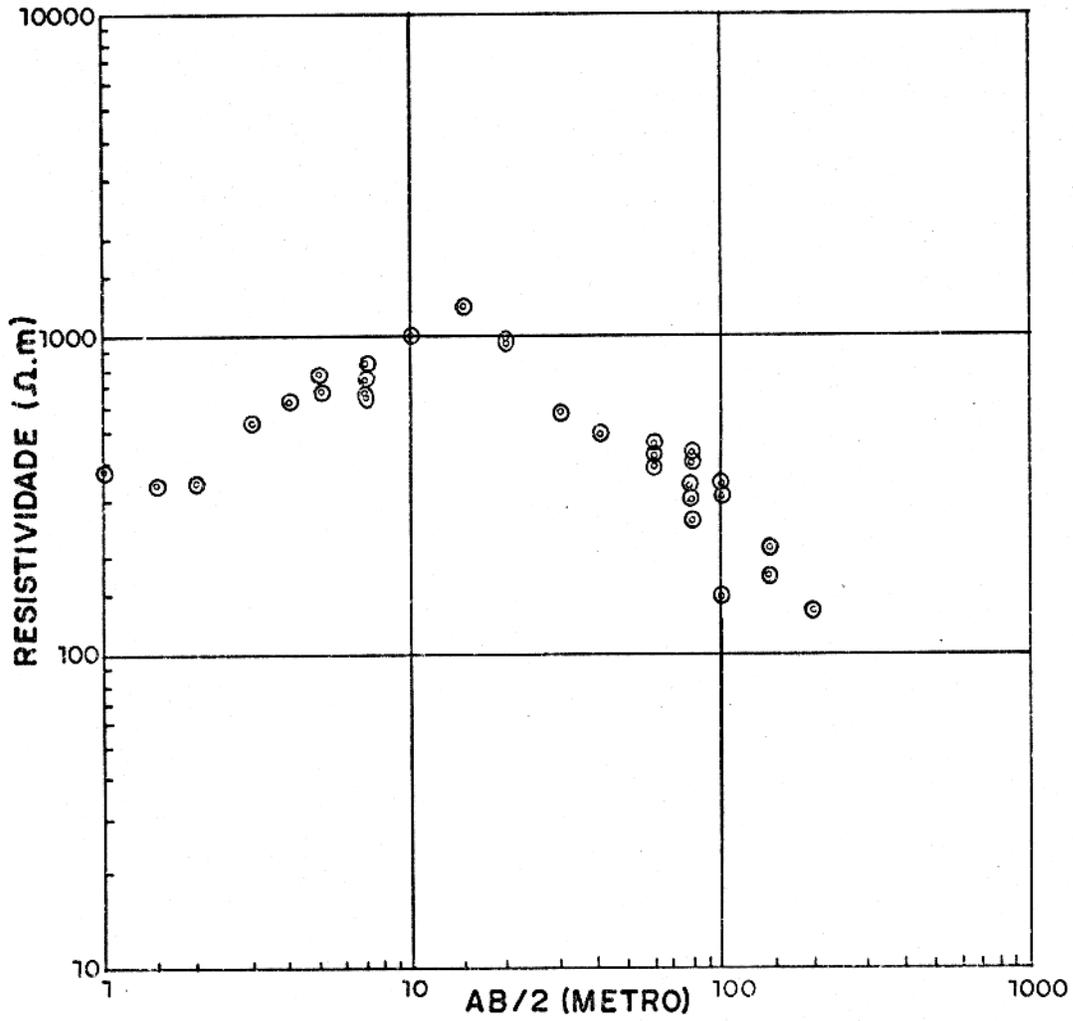


FIG. 12 - SEV FEITO NA CHUVA, PRÓXIMO À PRAIA GRANDE.

fugas de corrente. E à medida que se aumenta o valor de $AB/2$, maior a tensão que deve ser aplicada e, conseqüentemente, maior é a probabilidade de fuga.

- b) A água da chuva torna o potencial espontâneo muito instável, fato constatado durante as medidas de campo. Como, para valores altos de $AB/2$, temos uma diminuição no valor da voltagem, a leitura pode ficar muito afetada pela variação do potencial espontâneo.

Em toda a área, a resistência de contato apresentou valores bem elevados e para minimizar esse efeito, foi colocada água salgada no local dos eletrodos de corrente.

Problemas de heterogeneidade lateral surgiram algumas vezes, constatados por ocasião das "embreagens". Tal fato é verificado por uma diferença bem acentuada no valor da resistividade para um mesmo valor de $AB/2$ com MN diferente. O problema foi contornado, tomando valores mínimos para MN, através de tentativas no campo.

Um outro problema ocorrido no campo foi com relação ao assistente que desloca o fio de $AB/2$. Dado o sinal para o deslocamento, um deles deixou de o fazer. Conseqüentemente o valor da resistividade aparente calculado para aquele ponto ficou aumentado em relação ao da medida. Isso porque o fator K, tomado da tabela, foi maior do que o valor de K da medida efetuada para aquele ponto, resultante de $AB/2$ menor do que o da tabela. Tal erro foi constatado relacionando com outras sondagens realizadas,

próximas, e do conhecimento da geologia local. Este tipo de erro e, também, o de ultrapassagem da marca seguinte pode ocorrer facilmente e exige do pesquisador bastante atenção.

As sondagens 25, 26, 27 e 28 foram feitas utilizando eletrodos de póte poroso para medir a voltagem com um mínimo de influência do potencial espontâneo (SP) e efeitos da polarização de eletrodos metálicos. Para tal operação, colocou-se, no dia anterior, solução saturada de sulfato de cobre dentro dos eletrodos e mergulhou-se a parte porosa na mesma solução. O seu uso resultou em rapidez de operação no campo, uma vez que, eliminados os efeitos da polarização de eletrodos metálicos, os ponteiros do medidor de voltagem permaneciam estáveis. Além disso, aumentou o grau de confiabilidade das medidas obtidas.

Nos trabalhos com eletrodos do tipo "barra de metal" para o MN, esperou-se muitas vezes 5 a 10 minutos, a fim de estabilizar os ponteiros de medida de voltagem. A instabilidade era mais acentuada quando se mudava a posição dos eletrodos MN nos valores de AB/2 maiores do que 100 a 200 metros. Esse fato foi constatado tanto no instrumento SERCEL como no ER-300.

As sondagens 25, 26, 27 e 28 foram feitas na fase final deste trabalho, com a finalidade de tirar dúvidas quanto ao comportamento geométrico na parte oeste da área.

2.3. FEIÇÕES GERAIS DAS CURVAS DE SONDAAGEM

Seleção e Agrupamentos de Curva

Observando o conjunto das curvas de campo, as sondagens podem ser divididas em dois grupos, correspondendo provavelmente a feições geelétricas diferentes.

1) O primeiro grupo, que compreende a maioria das sondagens é do tipo KQQ ou KHKQ (P.K. Bhattacharya e Patra, 1968), conforme mostra a Fig. 13. As resistividades aparentes para $AB/2$ igual a 1 metro são em geral bem altas, variando entre 1000 e 8000 ohm.m. Corresponde a um horizonte que será designado de S. A seguir, a maioria das curvas deste grupo apresenta um aumento no valor da resistividade aparente. Esse horizonte geelétrico será designado de horizonte L. Em seguida os valores de resistividade aparente diminuem de valor, até aproximadamente $AB/2$ igual a 20 metros, apresentando a seguir uma tendência de aumento ou aproximação a um valor constante. Este comportamento é marcante em todas as curvas deste grupo e o horizonte correspondente será designado de A1. Várias curvas deste grupo sugerem a existência de um horizonte mais condutor do que o A1, intercalado entre este e o horizonte L. Seguindo o horizonte A1, a curva não decresce rapidamente, sugerindo a existência de um horizonte semi-resistivo, que será chamado de horizonte A2. Na parte final todas as curvas tendem a um valor baixo de resistividade aparente, e o horizonte geelétrico correspondente será chamado de horizonte C.

2) O segundo grupo de curvas é do tipo KQ e KQQ (Fig. 14). Em $AB/2$ igual a 1 metro, o valor da resistividade aparente é mais baixo do que as do primeiro grupo de curvas: varia entre 700 e 170 ohm.m (horizonte S). A segunda parte da curva tem um comportamento similar ao do primeiro grupo, com aumento da resis

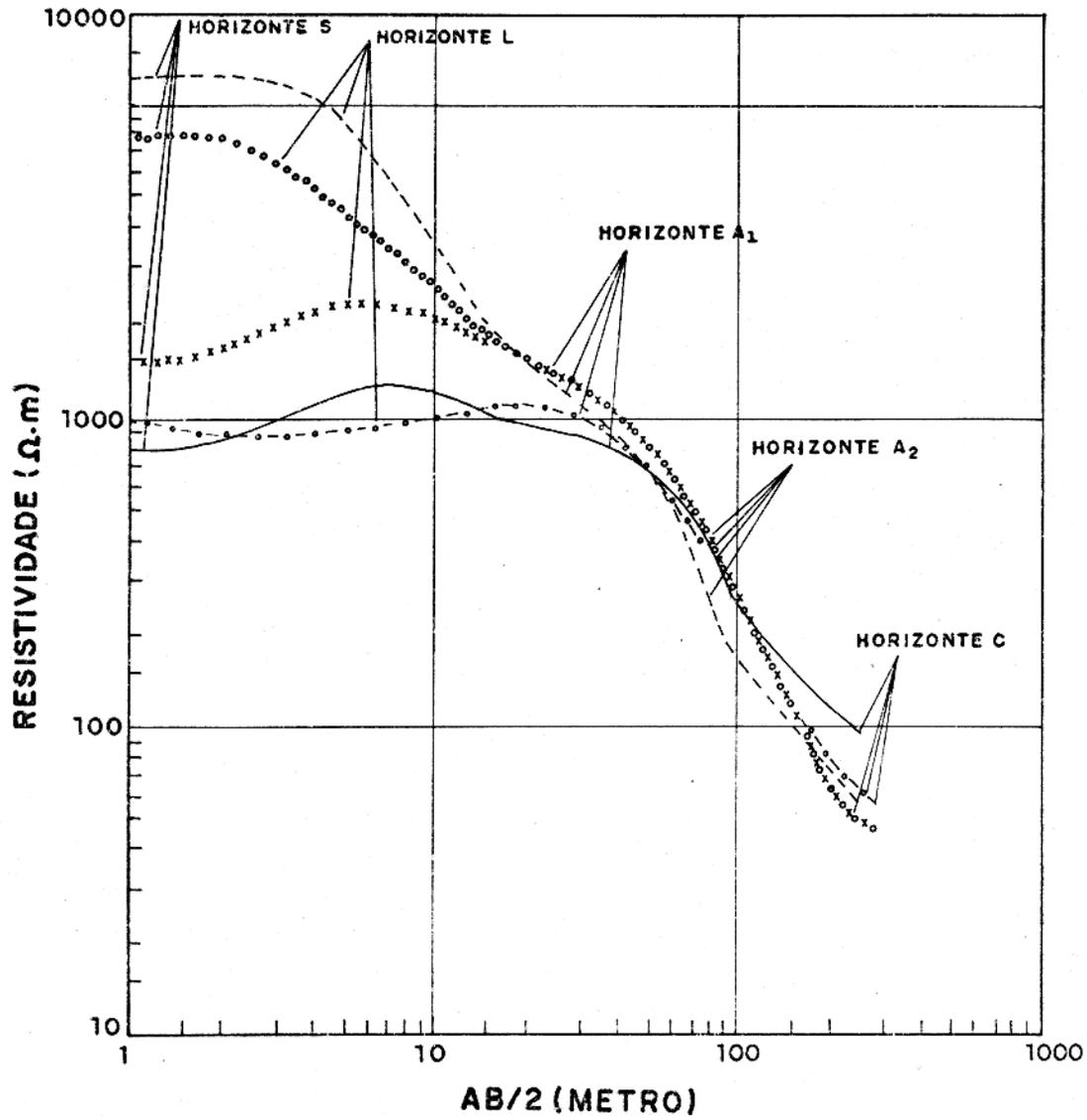


FIG.13 - SEV REPRESENTATIVOS DO GRUPO 1: CORRELAÇÃO DOS MESMOS HORIZONTES EM DIFERENTES SONDAGENS.

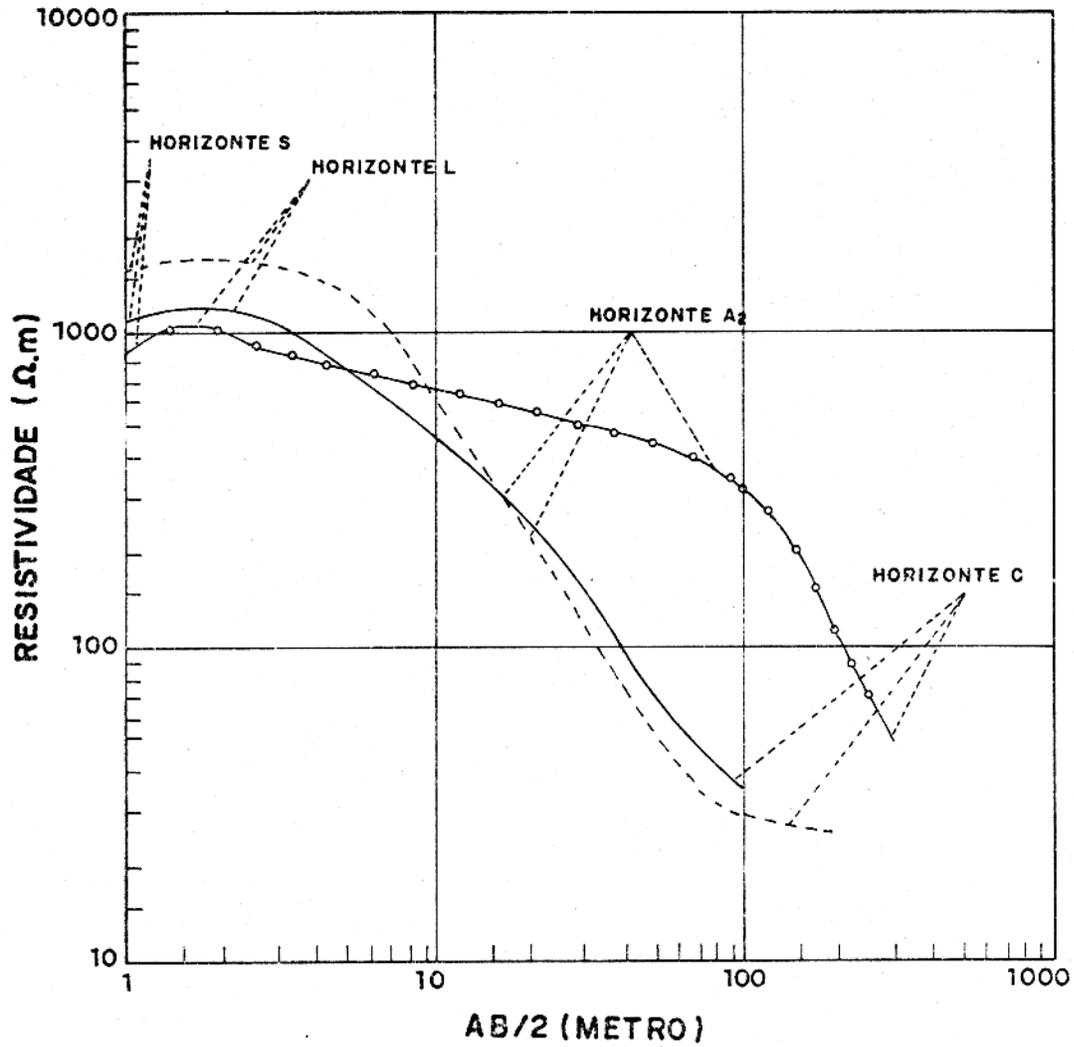


FIG.14 - SEV REPRESENTATIVOS DO GRUPO 2: CORRELAÇÃO DOS MESMOS HORIZONTES EM DIFERENTES SONDAGENS.

tividade aparente (horizonte L). A partir daí, a curva decresce, continuamente, sugerindo a existência apenas dos horizontes A2 e C. A diferença mais significativa em relação ao primeiro grupo de curvas, é que no segundo grupo, não é visível o horizonte A1, que é marcante nas curvas do 1º grupo. Sob o ponto de vista hidrogeológico, o horizonte A1, é melhor do que o horizonte A2 e, conseqüentemente, as curvas mostradas na Fig. 13, representam áreas mais favoráveis à água subterrânea do que aquelas mostradas na Fig. 14.

A sondagem 28 (Fig. 15) foi localizada a cerca de 50 metros da SEV 04, do lado oposto, separado pelo campo de pouso de aviões, sendo as linhas de sondagens estendidas na mesma direção da SEV 04. Um fato interessante que se observa é a SEV 28 que apresenta um valor de resistividade aparente muito mais baixa do que a SEV 04 até $AB/2$ igual a 10 metros. A partir daí, as duas curvas apresentam a mesma feição, com os valores muito próximos. É muito provável que a diferença até $AB/2 = 10$ metros seja devido a épocas diferentes em que elas foram feitas. A SEV 04 foi feita em fins de julho, época de seca, enquanto a SEV 28 foi feita no início de fevereiro, após um período de abundantes chuvas, a partir de dezembro. A água da chuva, penetrando no solo, dissolve os sais existentes nos interstícios da zona de aeração, acumulando, assim, a quantidade de ions condutores de eletricidade. Como conseqüência, ocorre uma diminuição nos valores de resistividade. Algumas sondagens feitas no período de chuvas apresentaram o mesmo tipo de comportamento, com a resistividade da primeira camada sempre menor que da segunda camada.

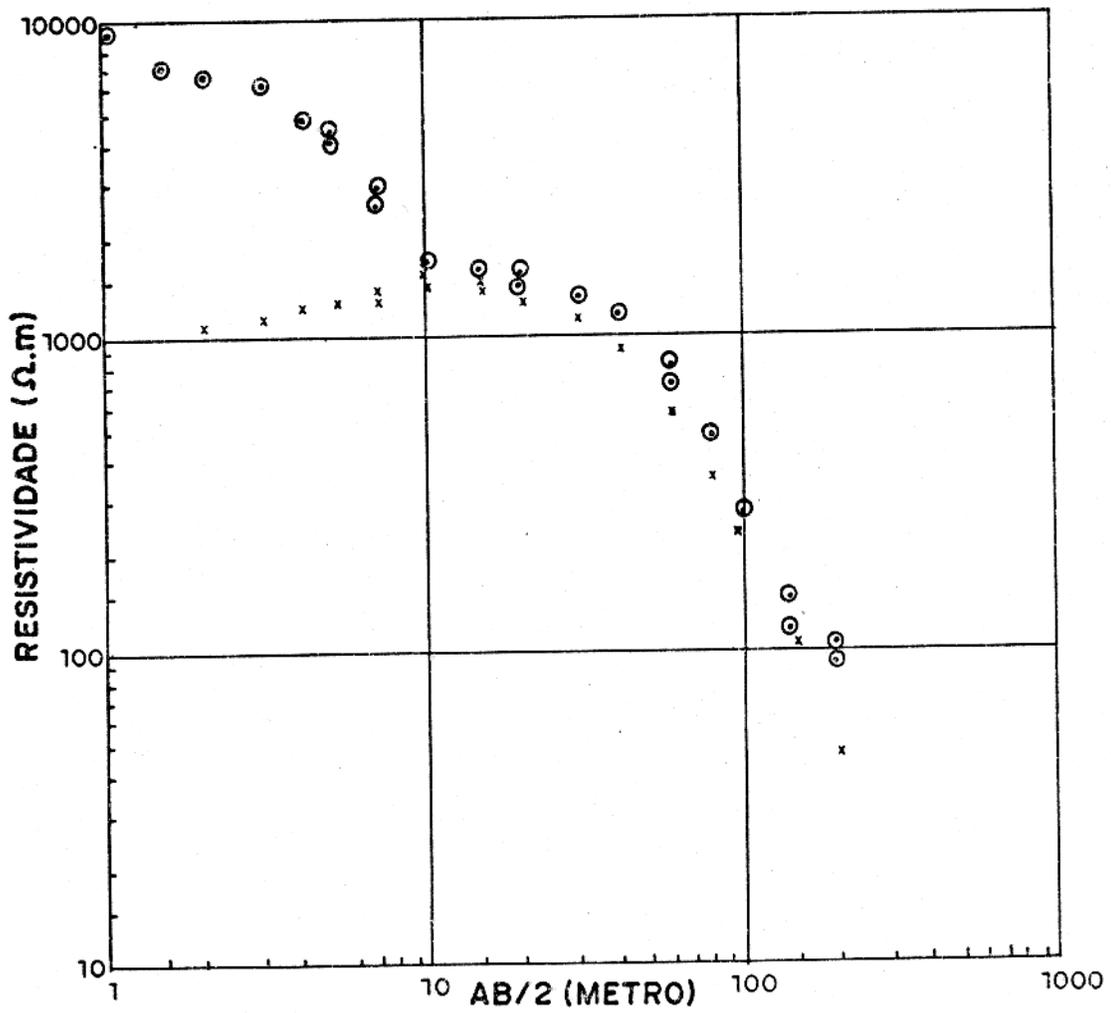


FIG. 15 - SEVs FEITAS EM PERÍODOS DIFERENTES, DISTANTES DE 50 METROS ENTRE S1.

⊙ SEV04 EM 23/07/75

× SEV28 EM 03/02/78

Também é provável que as seqüências dos terrenos nos locais das sondagens sejam ligeiramente diferentes. Será construtivo verificar a causa da diferença, fazendo sondagens nos dois pontos, em épocas diferentes.

2.4. INTERPRETAÇÃO DAS CURVAS DE SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS E PERFILAGEM HORIZONTAL

Sondagens Elétricas Verticais

Para uma rápida avaliação no campo, a interpretação das curvas de SEVs, foi feito pelo método gráfico do ponto auxiliar (Keller and Frischknecht, 1966), utilizando curvas de duas camadas. Na interpretação por este método, a maioria das curvas apresentou dificuldade na ajustagem em certos trechos, resultando na supressão de algumas camadas. Esse comportamento das curvas está ligado à estatigrafia, com seus horizontes de areia, argila e concreções limoníticas, ocorrendo em espessuras e proporções variadas, ao longo da profundidade pesquisada. Em locais onde as camadas de diferentes sedimentos são bem distintas e de espessuras regulares, o método gráfico de interpretação com curvas de duas camadas, fornece um bom resultado.

Para uma interpretação mais refinada, foi utilizado o programa escrito em FORTRAN IV por Rijo (1977). Está baseado nos trabalhos de D.P. Ghosh (1971), Koefoed, O. Ghosh, D.P. and Palman, G.J. (1972). O método utilizado por esses pesquisadores consiste em calcular a curva de SEV através de um método numérico envolvendo filtros digitais lineares de dimensões finitas. R

jo (1977) utilizou um filtro de 61 valores e para esse tipo de filtro, a precisão do método é de aproximadamente $\pm 5\%$ para curvas do tipo KQQ e KQ como é o caso das curvas de sondagem deste trabalho. Para as curvas do tipo H o erro pode ser muito maior. Este trabalho foi adaptado para o computador HP/9866A e para o IMB/370, modelo 135, pelo pessoal do setor de computação do NCGG da UFPa. Este programa, que fornece a sondagem elétrica de um modelo arbitrário, pode calcular um número qualquer de camadas e de pontos de observação.

Na interpretação, usando este programa, define-se um modelo já estudado preliminarmente e faz-se variar os valores de resistividade e espessura até obter-se uma ajustagem da curva deste modelo com a curva de campo. Tanto a curva de campo como a do modelo fornecido pelo programa são obtidas através de pontos discretos.

A seguir, serão apresentadas as interpretações de algumas sondagens representativas de cada grupo mencionado na seção 2.3. deste capítulo e que possuem controle de poços.

Interpretação da SEV 03

A sondagem 03 (Fig. 16) foi localizada aproximadamente a 6 metros do piezômetro P 38 (Fig. 9).

A primeira camada, de resistividade igual a 1100 ohm.m e espessura de 0,2m, constitui o solo orgânico. O aumento de resistividade da segunda camada (2000 ohm.m), deve-se à presença de concreções limoníticas e areia, ou outros fatores. A

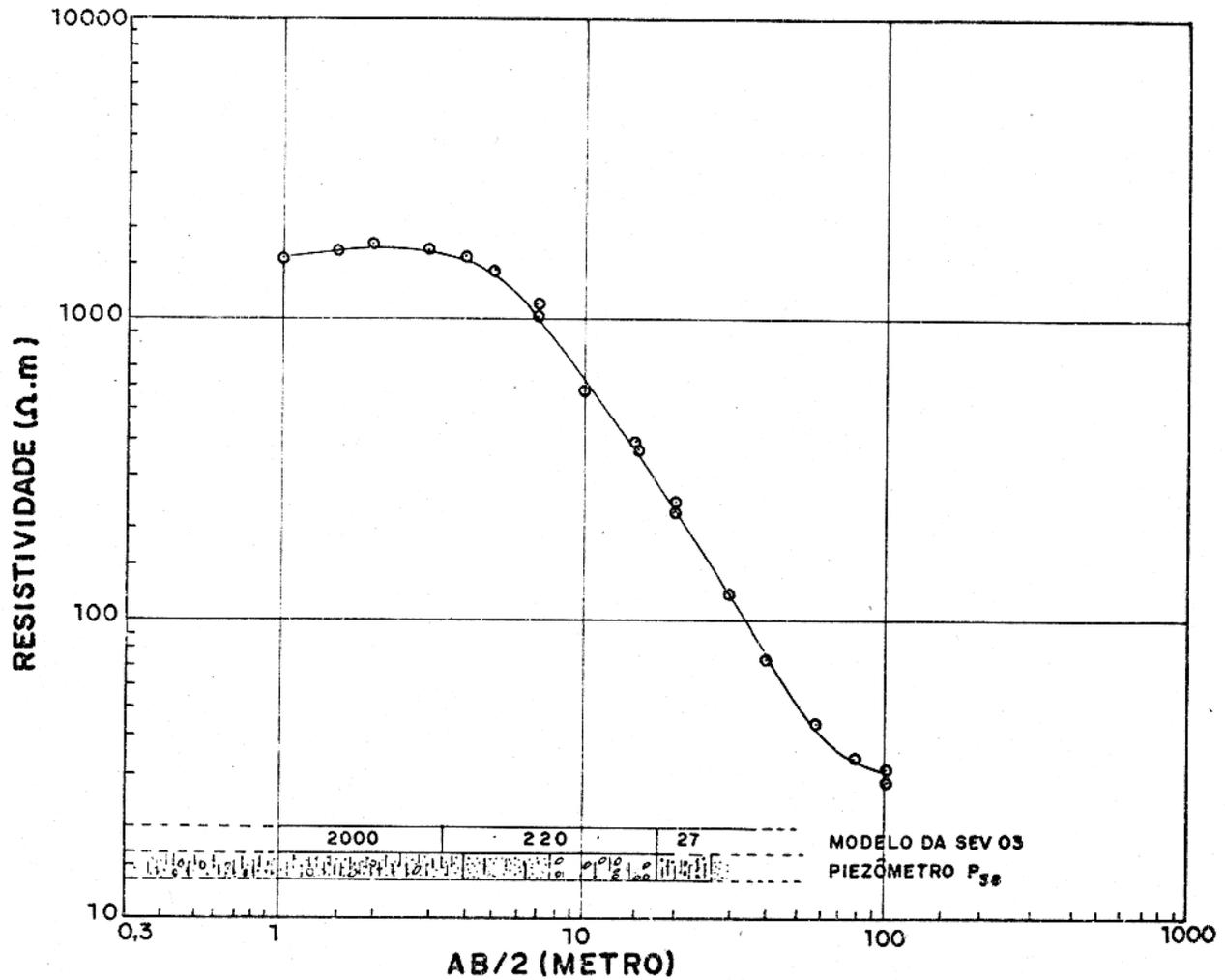


FIG. 16 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 03 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

- OBSERVAÇÕES DE CAMPO
 - CURVA OBTIDA DO MODELO ACIMA
- 2000 RESISTIVIDADE EM OHM.m

terceira camada (horizonte A2), interpretada com uma resistividade de 220 ohm.m e espessura de 13,6 metros, consiste de areia em matriz argilosa, conforme o piezômetro P38. Parte da 2a. camada e a terceira camada estão saturadas de água doce e constituem o aquífero de onde está se fazendo o abastecimento da cidade de Ponta de Pedras. A presença de argila na terceira camada, resulta numa diminuição da permeabilidade e, conseqüentemente, na qualidade do aquífero. A última camada da SEV 03, interpretada com resistividade igual a 27 ohm.m, é de predominância argilosa. Sua espessura não pôde ser determinada devido à imprecisão do instrumento a partir de AB/2 igual a 100 metros e, também, devido às condições locais. Não se podia estender a linha AB/2 maior do que 300 metros em nenhuma direção, devido ao Rio Armazém. Mas o comportamento final da curva sugere uma grande espessura.

As espessuras da SEV 03 foram controladas pelo piezômetro P38 na sua interpretação, e há uma boa concordância entre os valores encontrados na sondagem geofísica e geológica.

Interpretação da SEV 01

A SEV 01 (Fig. 17) foi localizada a 200 metros da SEV 03 e a linha AB foi estendida numa direção perpendicular a SEV 03. Os resultados entre as duas interpretações têm boa concordância. As resistividades da primeira e segunda camada são mais baixas, respectivamente iguais a 670 e 870 ohm.m; as espessuras são 1 e 3 metros. A terceira camada, com espessura igual a 15 metros e resistividade de 200 ohm.m, corresponde ao horizonte A2, mesmo da SEV 03. O horizonte C tem resistividade baixa,

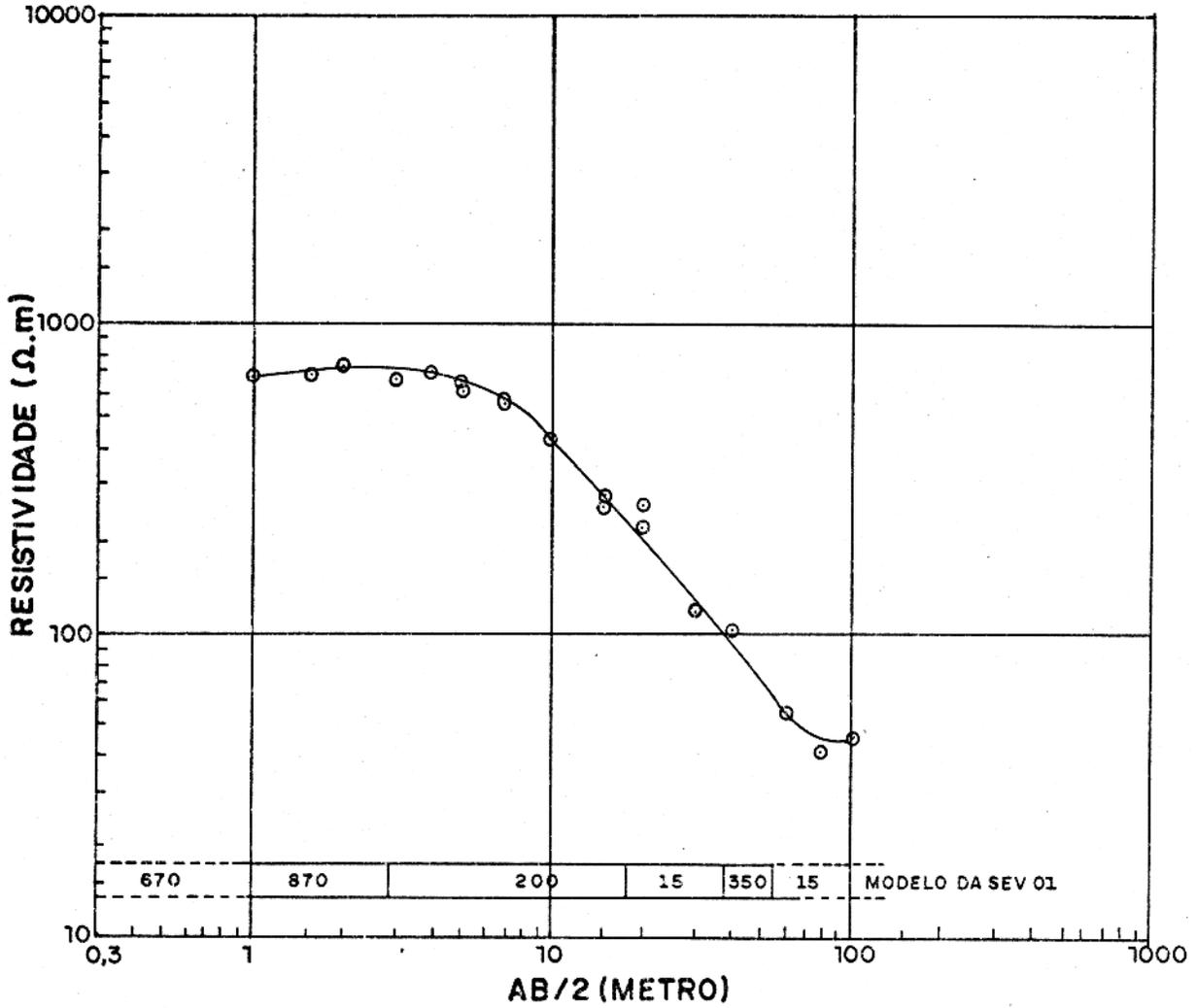


FIG.17 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 01 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

⊙ DADOS DE CAMPO

— CURVA OBTIDA CONFORME MODELO ACIMA

670 RESISTIVIDADE EM OHM.m

de 15 ohm.m. A parte final da curva sugere um ligeiro aumento no valor da resistividade aparente. Pode ser presença de uma camada resistiva. Admitindo a presença dessa camada, o valor da sua resistividade é de 350 ohm.m e 15 ohm.m para a última camada. Se não, tem-se um modelo de quatro camadas, com resistividade de 30 ohm.m para a última camada.

Interpretação da SEV 02

O centro da SEV 02 (Fig. 18), fica cerca de 260 metros da SEV 03, e a linha AB foi estendida na mesma direção desta. A curva tem feição semelhante à SEV 01, mas os valores interpretados são ligeiramente diferentes. A terceira camada apresentou um valor mais alto de resistividade (570 ohm.m). A sua espesura é de 6 metros. A quarta camada tem resistividade 180 ohm.m e espessura de 15 metros. Geoeletricamente, esta camada tem as mesmas características do horizonte A2 das SEV 03 e 01. O horizonte C tem resistividade de 25 ohm.m

Interpretação das SEVs 05, 06 e 07

A Figura 19 mostra as sondagens 05, 06 e 07, localizadas a 500, 600 e 500 metros, respectivamente, do piezômetro P42. A partir de AB/2 igual a 15 metros, todas elas apresentam um mesmo comportamento, sugerindo representar mesma seqüência geométrica, o horizonte A1. A resistividade das camadas que compõem esse trecho da curva nas três sondagens, foi interpretada como sendo, respectivamente, iguais a 1350, 1275 e 1275 ohm.m. As espessuras não puderam ser controladas por estarem distanciadas dos poços e, também, porque a profundidade máxima do poço

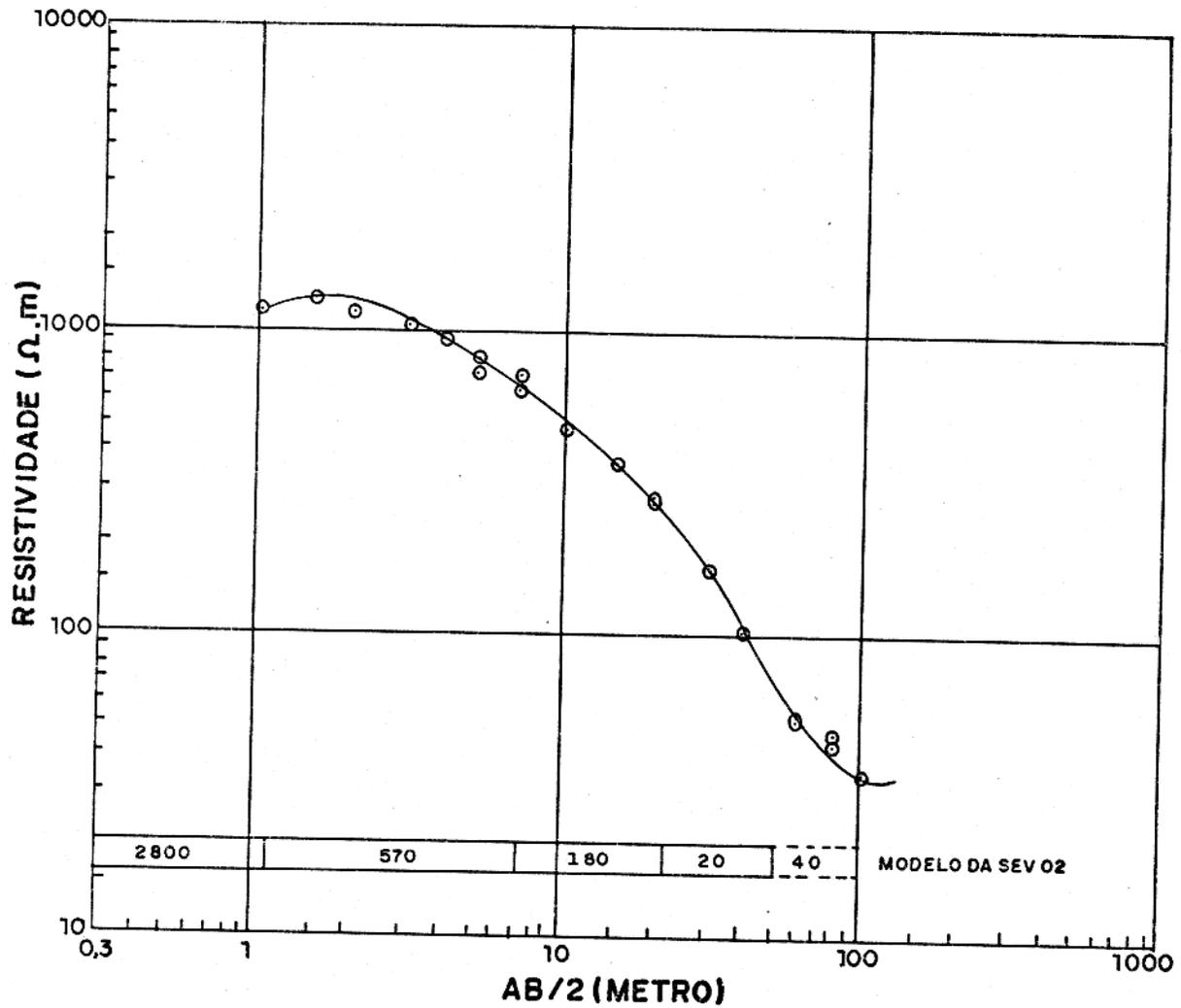


FIG.18 - INTERPRETAÇÃO DA SEV02 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

⊙ DADOS DE CAMPO

— CURVA OBTIDA CONFORME MODELO ACIMA

2800 RESISTIVIDADE EM OHM.m

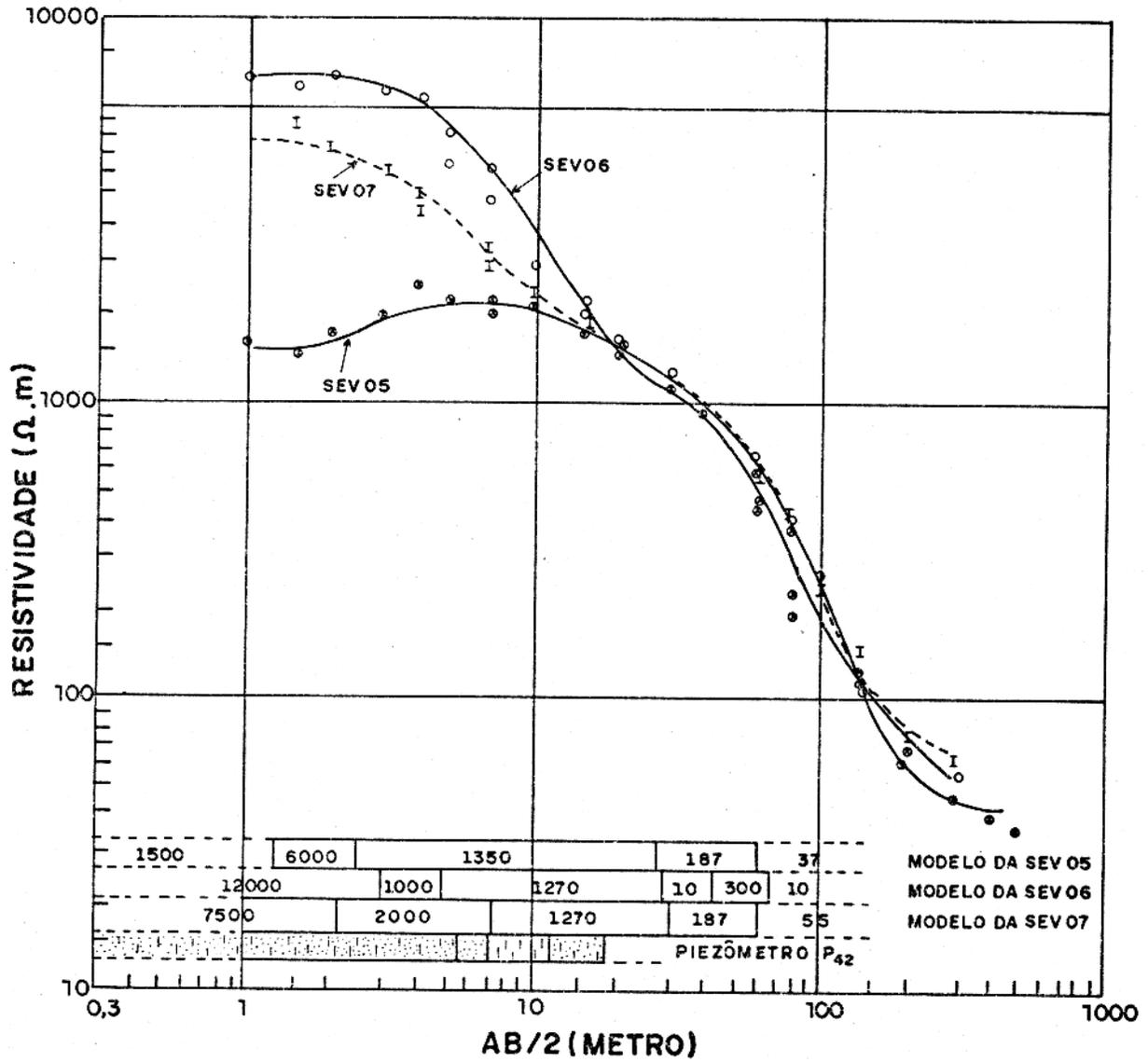


FIG. 19 - INTERPRETAÇÃO DAS SEV 05, 06, 07 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

O, I, ⊗ - OBSERVAÇÕES DE CAMPO

--- - CURVAS OBTIDAS DO MODELO ACIMA

1500 RESISTIVIDADE EM OHM.m

mais próximo é de 18 metros, menor, portanto, do que a profundidade pesquisada pelo método elétrico. Os valores interpretados forneceram espessuras de 25 metros (SEV 05), 24 metros (SEV 06) e 23 metros (SEV 07). Pela própria feição das curvas de SEVs, nota-se que esse horizonte é bem espesso. A litologia predominantemente arenosa e a amostragem do piezômetro P42 (Fig. 6) indica uma areia fina. Abaixo dessa camada resistiva, nas SEV 05 e 07, se encontra uma outra, com espessura considerável e resistividade de 187 ohm.m. Esta camada possui, provavelmente, características semelhantes ao do horizonte A2 da SEV 03.

O número de camadas do modelo em cada uma das sondagens é diferente, por apresentarem o trecho inicial e final da curva diferentes. As resistividades da primeira camada das sondagens 06 e 07 são, respectivamente, iguais a 12.000 ohm.m e 7500 ohm.m. Na parte final da SEV 06, observa-se um ligeiro aumento da resistividade aparente, para depois baixar novamente. Pode ser presença de uma camada resistiva bastante espessa ou, então, imprecisão do equipamento de medida. Observa-se esse comportamento em algumas outras sondagens, sendo muito evidente na SEV 19 (Fig. 20). Esta última sondagem foi repetida duas vezes com equipamentos diferentes e em épocas diferentes, com resultados iguais. Foi calculado o intervalo de variação no valor da resistividade aparente, com base na imprecisão dos equipamentos utilizado nas SEVs. As medidas feitas com o R-300, cuja imprecisão é de $\pm 10\%$ nas medidas de I e ΔV , são mostradas na Fig. 21. As medidas de I e ΔV feitas com o SERCEL, cuja imprecisão é de apenas 5%, são mostradas na Fig. 22.

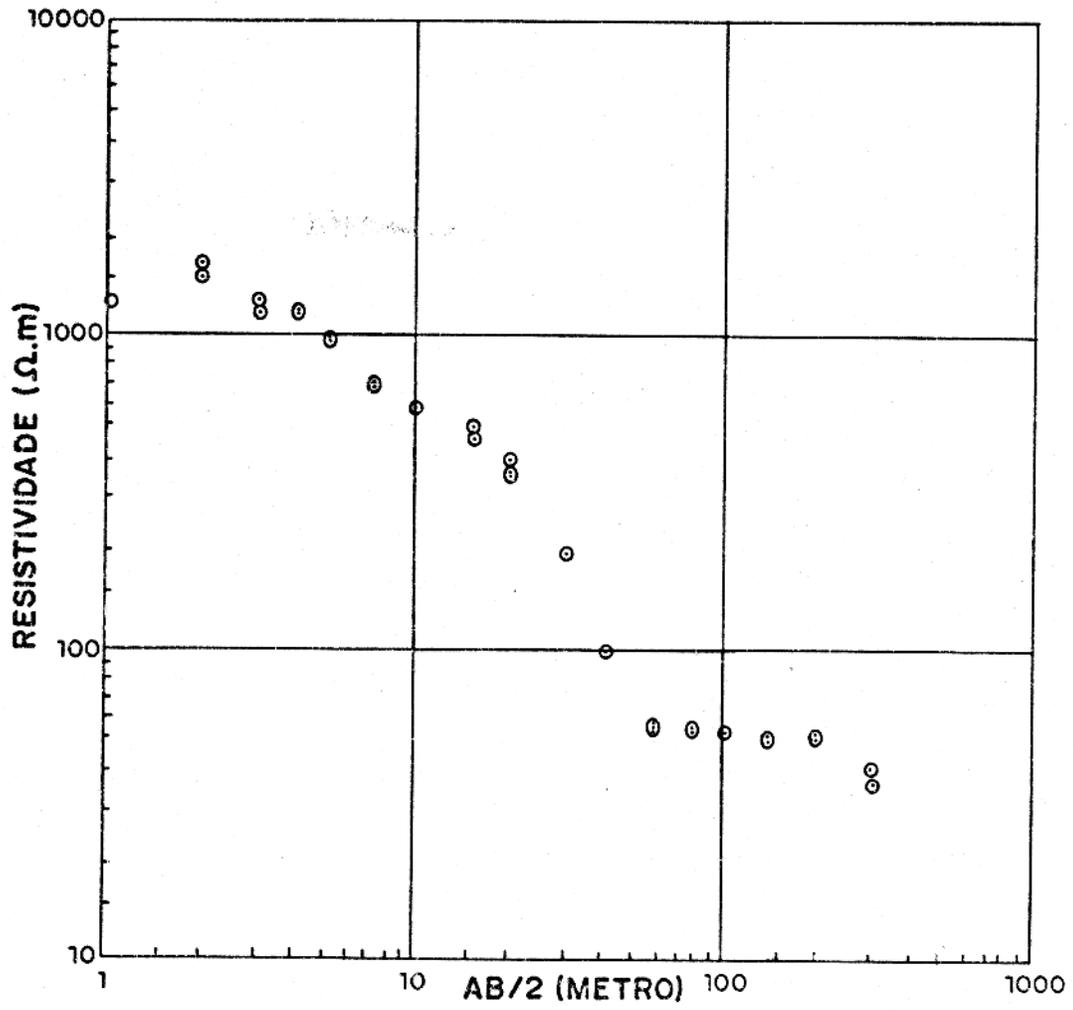


FIG.20- SEV 20, APRESENTANDO CAMADA RESISTIVA A 100 METROS.

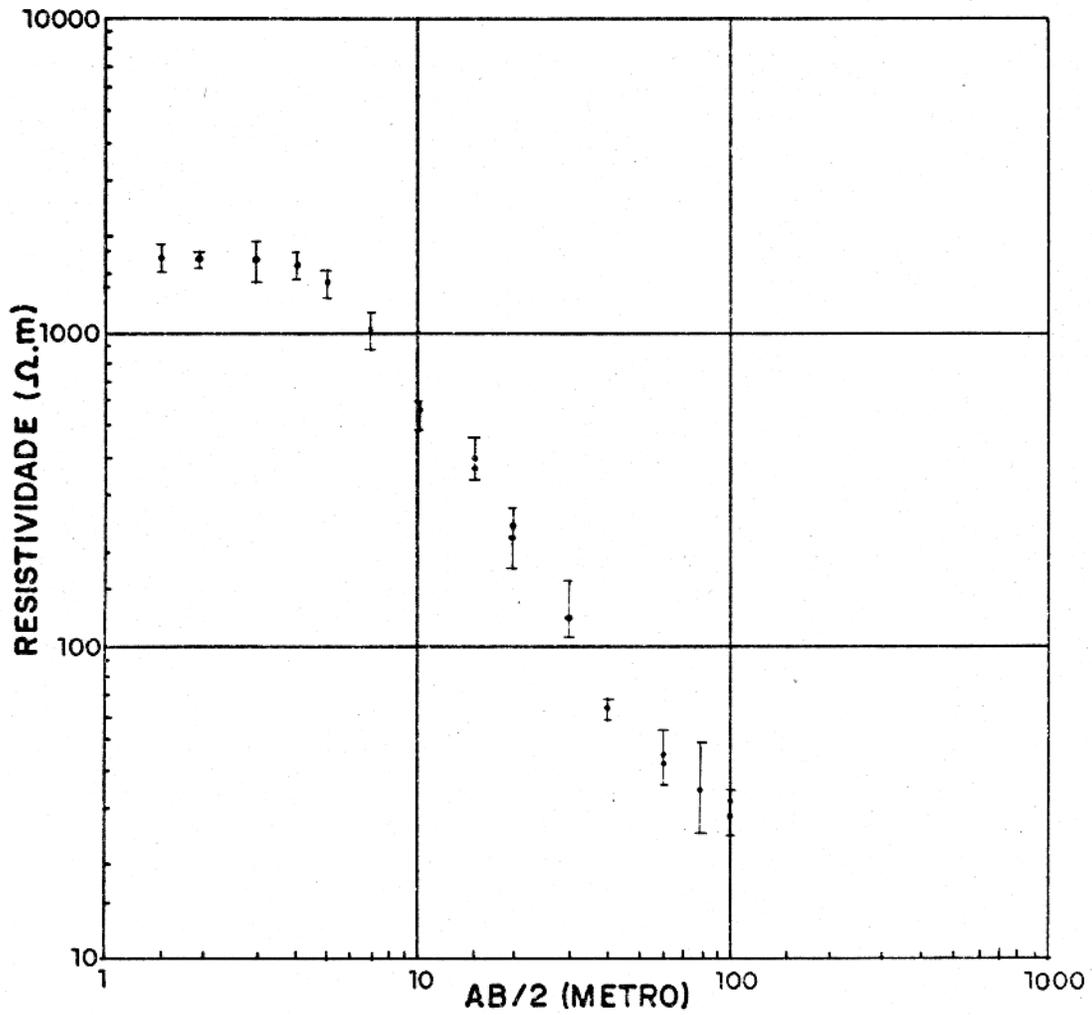


FIG. 21 - INTERVALO DE VARIAÇÃO NO VALOR DA RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADO COM BASE NA IMPRECISÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIDA, ER-300.

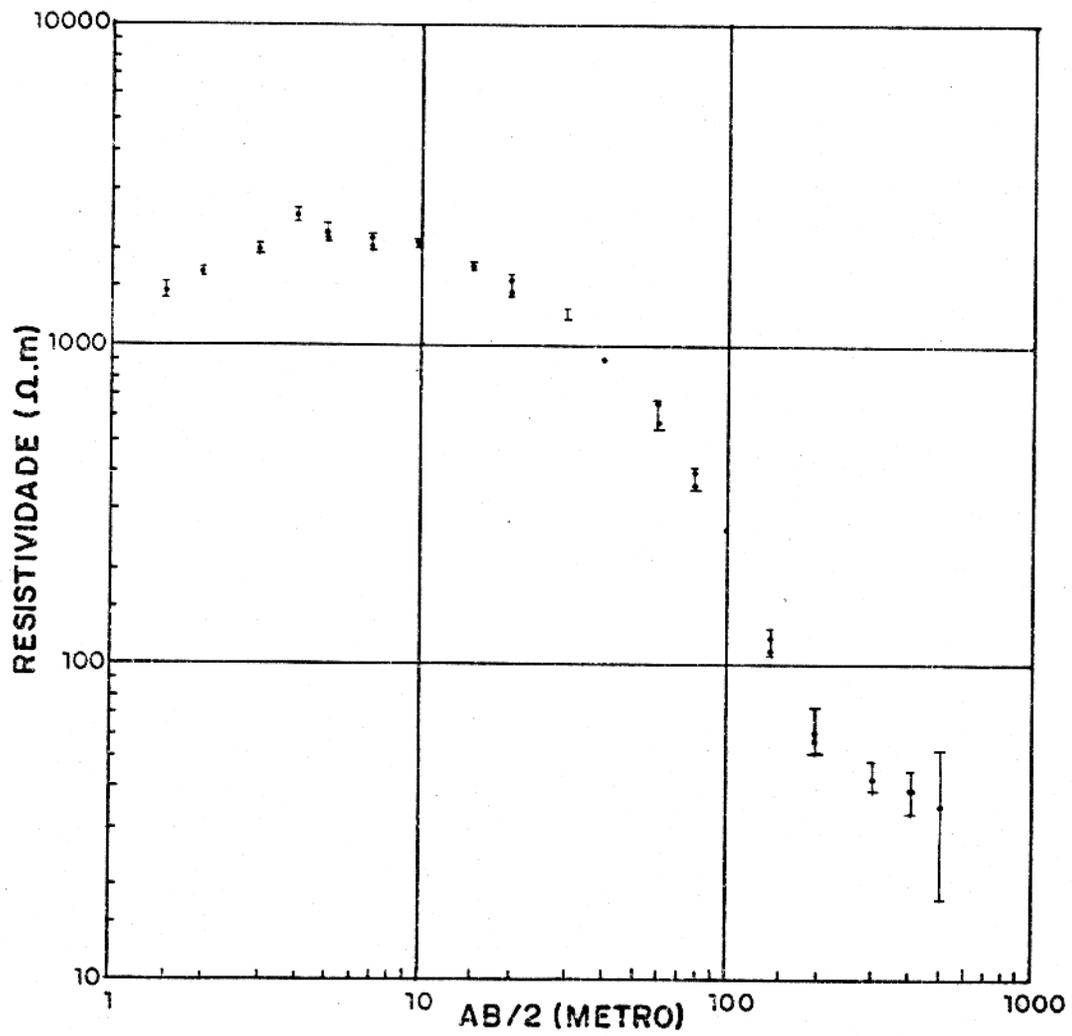


FIG. 22 - INTERVALO DE VARIAÇÃO NO VALOR DA RESISTIVIDADE APARENTE, DA SEV 05 CALCULADO COM BASE NA IMPRECISÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIDA SERCEL.

Interpretação da SEV 09

O centro da sondagem 09 (Fig. 23) fica, aproximadamente, a 10 metros do poço. A primeira camada apresentou uma resistividade relativamente baixa (820 ohm.m), comparada com a ordem de grandeza das resistividades do mesmo horizonte, encontradas em outros locais na área prospectada. Deve-se, provavelmente, a intercalações argilosas. O horizonte L apresentou uma resistividade de 2.900 ohm.m, e espessura de 2,2 metros. A seguir, vem uma camada com intercalações argilosas de resistividade 450 ohm.m e espessura de 6,3 metros. Como pode ser visto na figura 8, entre a profundidade de 10 a 11,3 metros foi encontrada argila plástica. É possível que essa camada tenha início a uma profundidade de 8,5 metros, pela descrição dos sedimentos entre 8 e 8,50 metros. As espessuras de cada uma das três primeiras camadas geelétricas não puderam ser controladas pelo piezômetro P43, devido a heterogeneidade até a profundidade de 10 metros. A quarta camada corresponde ao horizonte A1 e sua resistividade foi de 1500 ohm.m e corresponde à predominância de areia branca. A sua espessura foi calculada em 16 metros. A profundidade do topo dessa camada está em boa concordância com o valor da sondagem geológica.

Interpretação da SEV 25

A sondagem 25 (Fig. 24) foi localizada a 50 cm do piezômetro P44. A primeira e segunda camadas constituem o solo (640 e 860 ohm.m). A segunda camada, horizonte L, com espessura de 9 metros e resistividade de 1570 ohm.m, tem grandes influências de concreções limoníticas, encontradas bem desenvolvidas a cerca de 7 metros de profundidade. Segue uma camada, também, com resistivi

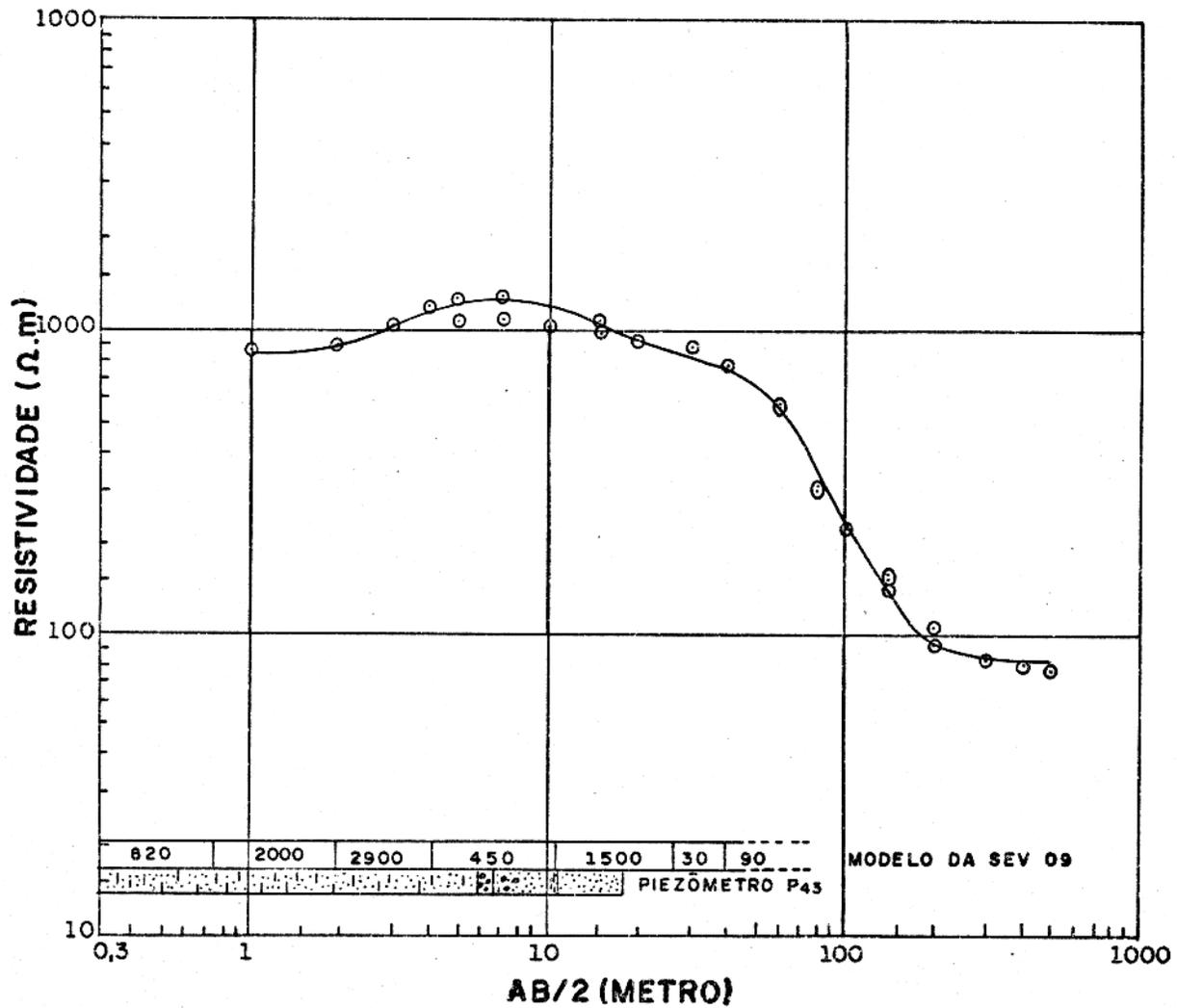


FIG. 23 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 09 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

○ DADOS DE CAMPO

— CURVA OBTIDA CONFORME MODELO ACIMA

820 RESISTIVIDADE EM OHM.m

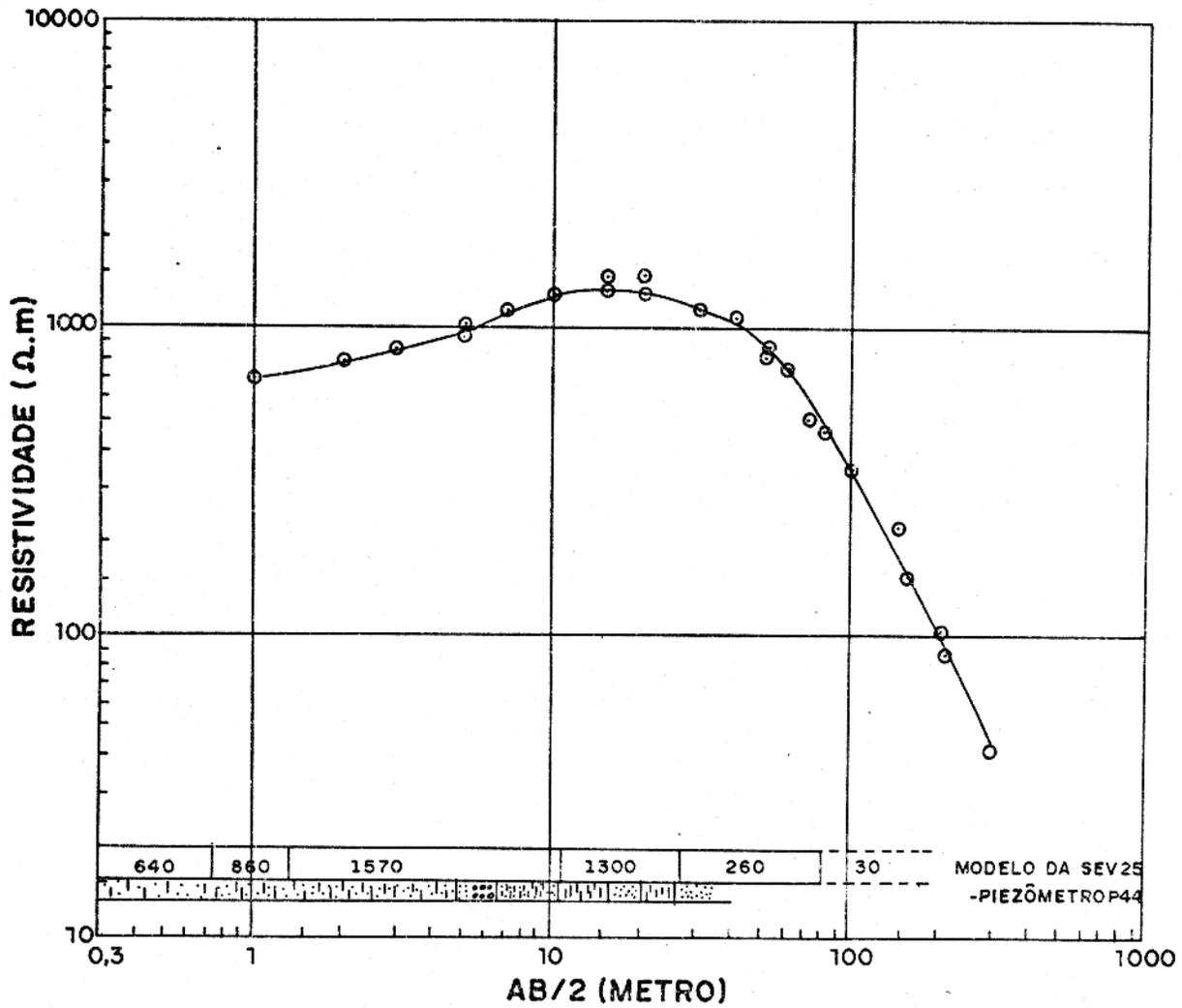


FIG. 24 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 25 PELO MÉTODO NUMÉRICO.

○ DADOS DE CAMPO

— CURVA OBTIDA CONFORME MODELO ACIMA

640 RESISTIVIDADE EM OHM.m

dade alta (1300 ohm.m) e espessura interpretada como 16 metros. Esta é de predominância arenosa, embora esteja intercalada de uma camada de argila plástica, interestratificada com areia fina. Segue-se uma camada semi-resistiva e de espessura bem grande (55 metros) e 260 ohm.m de resistividade. A última camada sondada apresentou resistividade de 30 ohm.m. Esta sondagem não pôde ser bem controlada pela sondagem geológica devido ao próprio comportamento das camadas."

Na área deste estudo, cada camada geoeétrica expressa apenas a predominância de um sedimento sobre o outro porque essas camadas são geralmente interestratificadas de areia e argila. Como consequência, não se pode fazer um controle exato entre os valores da sondagem geológica e da sondagem elétrica, mesmo que se conheça a espessura de cada camada geológica

Perfilagem Horizontal

A perfilagem horizontal (Fig. 25) foi feita para confirmar a diferença de comportamento geoeétrico entre as áreas separadas pelo Rio Arapinam, constatado nas SEVs. Como se pode observar no perfil, verifica-se uma diferença de aproximadamente 300 ohm.m no valor da resistividade, ao passar da margem direita para a margem esquerda do Rio. Essa diferença pode ser explicada pela diferença de salinização da água, com base nos resultados da análise química, conforme Apêndice 7. Uma outra possibilidade seria a diferença de litologia dos horizontes em cada lado do Rio Arapinam. Pode também haver outros fatores.

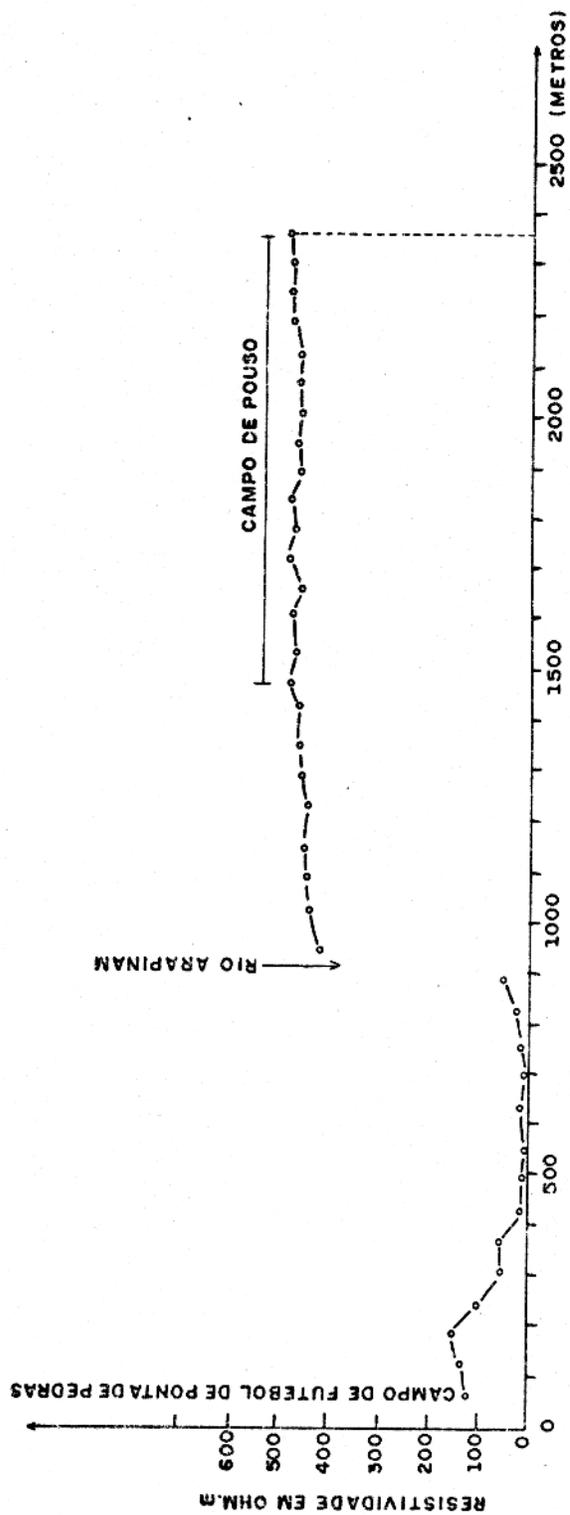


FIG. 25- PERFILAGEM HORIZONTAL NA ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA, ARRANJO WENNER COM $a = 40m$.

C A P Í T U L O I I I

MÉTODOS DE REFRAÇÃO SÍSMICA

3.1. REVISÃO DE CONCEITOS

Teoria Básica da Propagação de Ondas Sísmicas

A teoria fundamental do método sísmico de refração pode ser encontrada na literatura como, por exemplo, Dobrin (1976). Para uma idéia geral, será apresentado nesta seção, um resumo sobre os fundamentos do método.

No método de refração sísmica, a quantidade observada é o tempo de propagação de uma onda elástica, gerada na superfície do solo ou a poucas profundidades, por uma fonte artificial. Quando esta onda encontra uma interface que separa dois meios de velocidades distintas, se refrata obedecendo a lei de Snell. Como em sísmica de refração, um dos parâmetros interessado é o tempo de propagação das ondas sísmicas, é conveniente, para efeito de cálculos, representá-los por meio de raios geométricos. Assim, um raio que tenha incidido numa interface segundo um ângulo crítico i_c (ângulo para refração total), Fig. 26a, implica que o seno do ângulo refratado é igual à unidade e portanto,

$$\text{sen } i_c = V_m / V_n, \text{ onde } V_m \text{ e } V_n \text{ são as velocidades das ondas nas camadas adjacentes}$$

O raio refratado com o ângulo crítico segue uma trajetória paralela à interface, e, ao se propagar com velocidade maior ao longo do lado inferior da interface, gera no meio supe

rior, segundo o Princípio de Huygens, um trem de ondas chamado "onda frontal". Esse trem de ondas forma um ângulo crítico com a normal, e é captado na superfície da terra por detetores denominados geralmente de geofones. Estes detetores transformam a energia mecânica devido ao movimento do solo em energia eletromagnética, que é enviada através de cabos para o sistema de registro, que impressiona um papel fotográfico especial. A partir desses registros, se obtém os valores dos intervalos de tempo entre a produção das ondas e a sua recepção pelos geofones. Os geofones deverão estar prévia e convenientemente distribuídos no solo. Tendo o tempo de propagação e a distância do ponto de tiro aos geofones, pode-se calcular as velocidades aparentes e, como consequência, a profundidade de cada camada que apresente contraste de velocidade.

Teoria da Interpretação

Para a aplicação do método de interpretação foi feita a suposição de que as camadas são homogêneas e isotrópicas, com velocidade da ondasísmica aumentando com a profundidade. Os valores da velocidade das camadas foram determinados construindo a hodocrona, curva tempo-distância. O inverso da inclinação da reta dá o valor da velocidade aparente.

No cálculo das profundidades das camadas refratoras, utilizaram-se as fórmulas desenvolvidas por W.A. Knox (1967), para as camadas horizontais.

Em todo o trabalho de campo, o tiro foi dado na la.

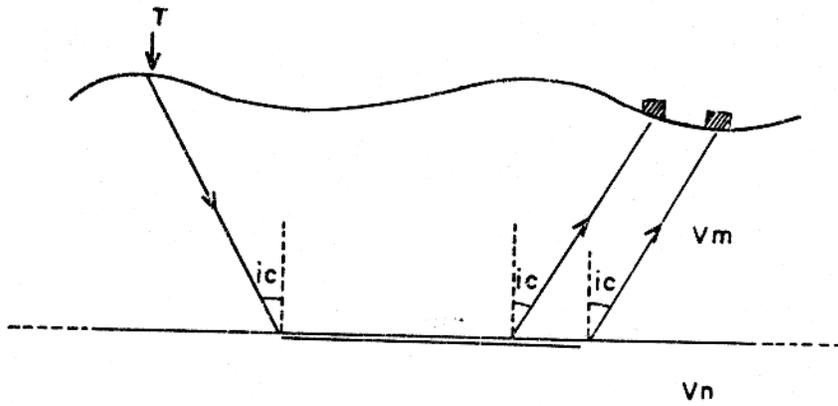


FIG. 26 a. ESQUEMA DA TRAJETÓRIA DA ONDA SÍSMICA NA REFRAÇÃO TOTAL

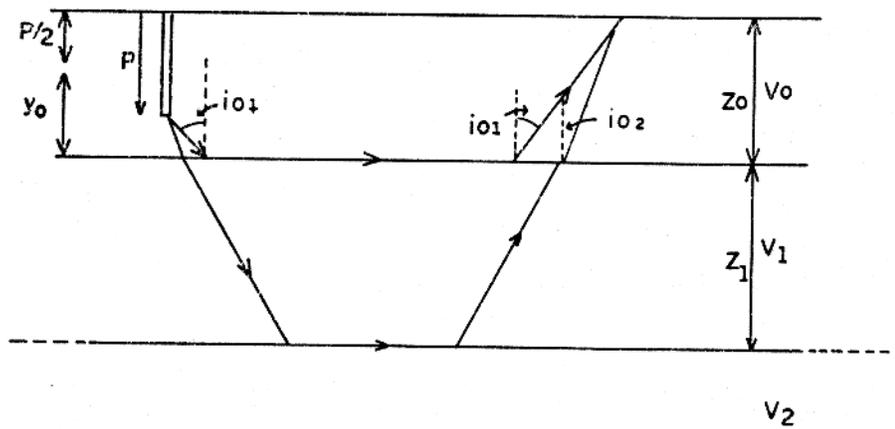


FIG. 26 b. ESQUEMA DO MODELO UTILIZADO NA INTERPRETAÇÃO SÍSMICA

camada. Assim, se p é a profundidade do tiro e d a posição de um detetor na superfície do solo (Fig. 26b), as espessuras Z_0 e Z_1 podem ser calculadas a partir de:

$$Z_0 = T_1 V_0 / 2 \cos i_{01} + p/2$$

$$Z_1 = (T_2 - T_{0,2}) V_1 / 2 \cos i_{1,2}$$

onde:

T_j - é o intercept-time

V_i - velocidade aparente de propagação da onda sísmica

$$T_{02} = (Y_0 / V_0) 2 \cos i_{02}$$

$$Y_0 = Z_0 - p/2$$

$$\cos i_{ij} = \frac{V_j^2 - V_i^2}{V_j^2} \quad \text{com } j = 0$$

3.2. TRABALHO E METODOLOGIA DE CAMPO

Instrumentação e Medidas de Campo

Os trabalhos de campo foram feitos nos meses de setembro e outubro por ser um período não chuvoso.

O equipamento utilizado foi o sistema TRIO de Refração Sísmica, tipo 5352896-04-104 da Companhia ABEM, de 24 canais.

Com a finalidade de investigar, de maneira rápida e econômica, a superfície piezométrica e outras interfaces não muito profundas, foi testada no campo a possibilidade do uso de mar-

telo para a produção do impulso elástico. Como o registro do instante de choque do martelo no solo dependia de controle visual e manual, geralmente não se conseguia fazer o registro. Então, esta tentativa foi abandonada e substituída por espoletas elétricas sismográficas nº 8 e dinamite gelatinosa 40%. Foi utilizado uma carga de, aproximadamente, 45 gramas para os tiros próximos e cerca de 75 gramas para os tiros distantes. Na maioria dos tiros as cargas foram enterradas a uma profundidade de um metro. Os furos foram feitos com trado manual e com um pequeno motor rotativo.

Foram testadas várias maneiras de distribuição dos geofones no solo, bem como os pontos de tiro em relação à distribuição. A configuração que se revelou mais conveniente para o objetivo foi um espaçamento de 2 metros entre os quatro geofones das extremidades e os restantes, entre eles, de 11 metros, que é o máximo permitido entre os geofones consecutivos neste equipamento. A escolha do pequeno espaçamento nas extremidades visava ao registro do impulso sísmico direto (onda direta). O espaçamento de 11 metros visava dar uma extensão maior à distribuição para possibilitar a detecção de camadas mais profundas e facilidade de operação no campo. Os geofones foram estendidos em linha reta, ao longo da margem da estrada que liga Ponta de Pedras a Mangabeira, e os tiros foram dados na mesma direção. Na maioria dos espalhamentos utilizou-se vinte e dois geofones, em virtude de não funcionamento de dois canais do equipamento. Assim, a configuração mais usada resultou na Figura 26c

O levantamento foi efetivado com tiros diretos e re-

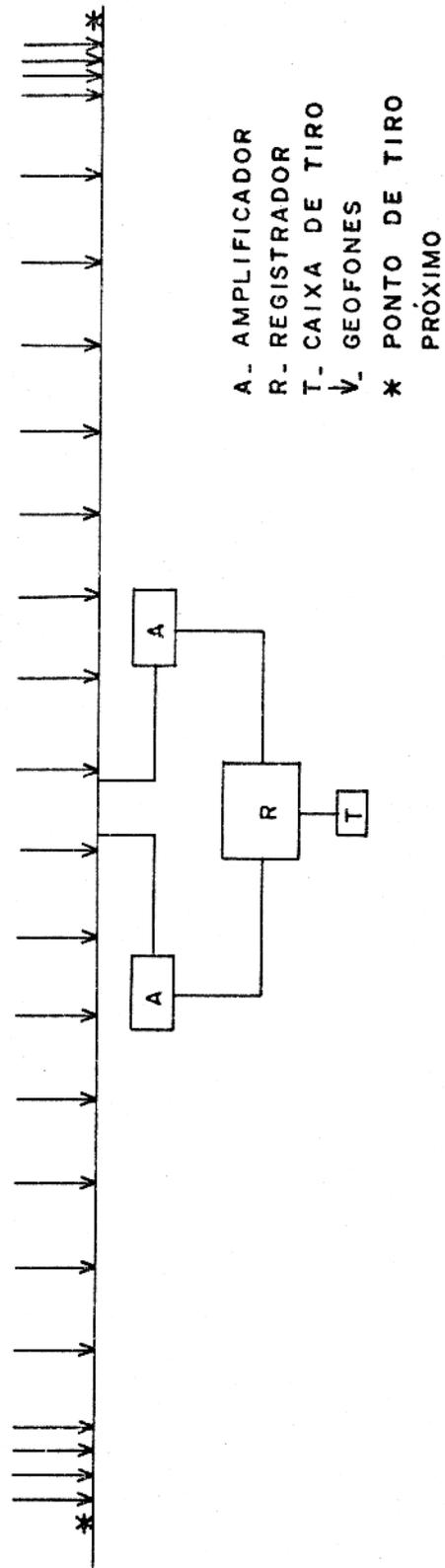


FIG. 26 c. CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NO TRABALHO DE CAMPO COM SÍSMICA DE REFRAÇÃO

versos, objetivando estudar o comportamento dos mergulhos das camadas no que se refere a sua inclinação, sendo dois tiros próximos e dois tiros distantes da distribuição. Os tiros próximos, na maioria a 2 metros do primeiro geofone, foram necessários para investigar a primeira camada. Os tiros distantes, na maioria a 30 metros, visavam detetar camadas mais profundas e distingui-las de possíveis variações na velocidade, relacionadas às diferentes camadas geológicas.

Os ajustes de ganho nos amplificadores permite ajustar a amplitude dos impulsos registrados e suprimir os ruídos. Em Ponta de Pedras, geralmente até o 12º geofone do mesmo lado do tiro, foi utilizada a supressão automática de ruídos (A N S vermelho do ajuste), que eliminou muito bem os ruídos mas perdeu um pouco em amplificação. Os restante foram ajustados utilizando A N S branco do ajuste que amplificou os registros mas não eliminou muito bem os ruídos. Os ruídos registrados, entretanto, não prejudicavam o sinal, por não serem muito acentuados.

Os trabalhos se desenvolveram normalmente sem problemas sérios. Houve apenas um pouco de dificuldade para fixar os geofones no solo visto serem os trabalhos desenvolvidos em período de seca e na margem da estrada. Foi feito um total de 1500 metros de perfil, ao longo da estrada Ponta de Pedras-Mangabeira.

Um cuidado necessário foi colocar os equipamentos de medida sobre um colchão de esponja, para minimizar os ruídos produzidos pela trepidação no instrumento, na ocasião do registro.

3.3. FEIÇÃO GERAL DOS REGISTROS E DAS DROMOCRÔNICAS

Registros Sísmicos e Gráficos

Os registros sísmicos foram bons, não sendo muito prejudicados por ruídos, devido ao local ser bastante tranquilo e, também, por causa dos cuidados tomados. Na Fig. 27, ilustra-se um dos registros obtidos. Observa-se perfeitamente a primeira chegada da onda, marcada com símbolo ∇ .

O gráfico de intervalo de tempo, desde o instante do tiro até a chegada aos geofones, plotados contra a distância do ponto de tiro até cada um dos geofones, chama-se dromocrônica ou hodocrona (Fig. 28 e 29). Observando esses gráficos, nota-se que ligando esses pontos resulta numa linha reta. A maioria deles apresenta duas retas com diferentes inclinações. A cada inclinação diferente está ligado a um determinado horizonte sísmico com velocidades diferentes. Desta maneira, verifica-se que a seqüência de sedimentos se comporta de uma maneira homogênea sob o ponto de vista de velocidade sísmica.

A pequena diferença de velocidade observada na Fig. 29 não é suficiente para se determinar com precisão a influência de contrastes entre camadas. Estes resultados nãoconstituem surpresa, porque já era esperado que na área não existissem variações faciológicas abruptas, comportando-se como bons refratores.

3.4. INTERPRETAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Velocidades Sísmicas

A interpretação foi feita observando o registro cor-

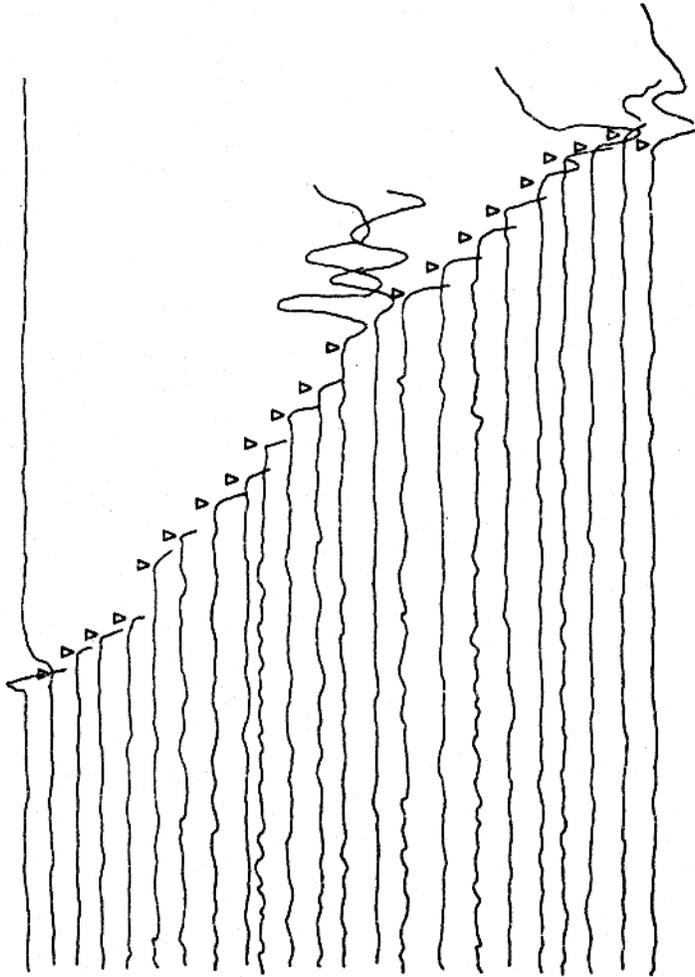


FIG. 27 - REGISTRO SÍSMICO - TIRO REALIZADO EM SANTO LENÇO, NA ESTRADA
PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA.

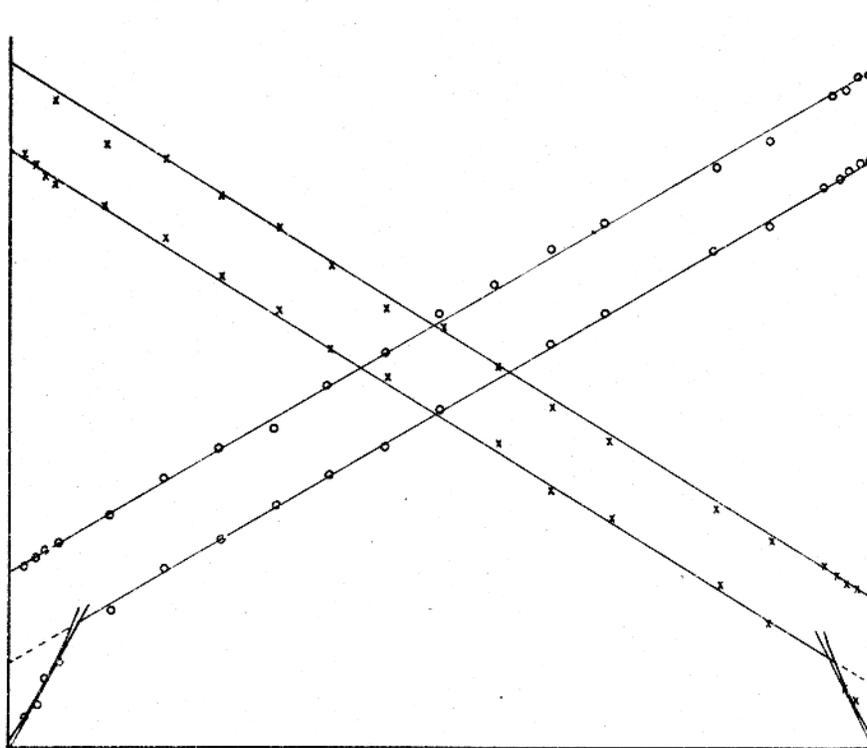


FIG.28- HODOCRONA DE UMA DISTRIBUIÇÃO A 400m DO PIEZÔMETRO P₄₂ NA ESTRADA PONTA DE PEDRAS-MANGABEIRA.

TEMPO DA 1ª ONDA REFRATADA
ESCALA VERTICAL 0 — 20M

DISTRIBUIÇÃO DOS GEOFONES
ESCALA HORIZONTAL 0 — 20M

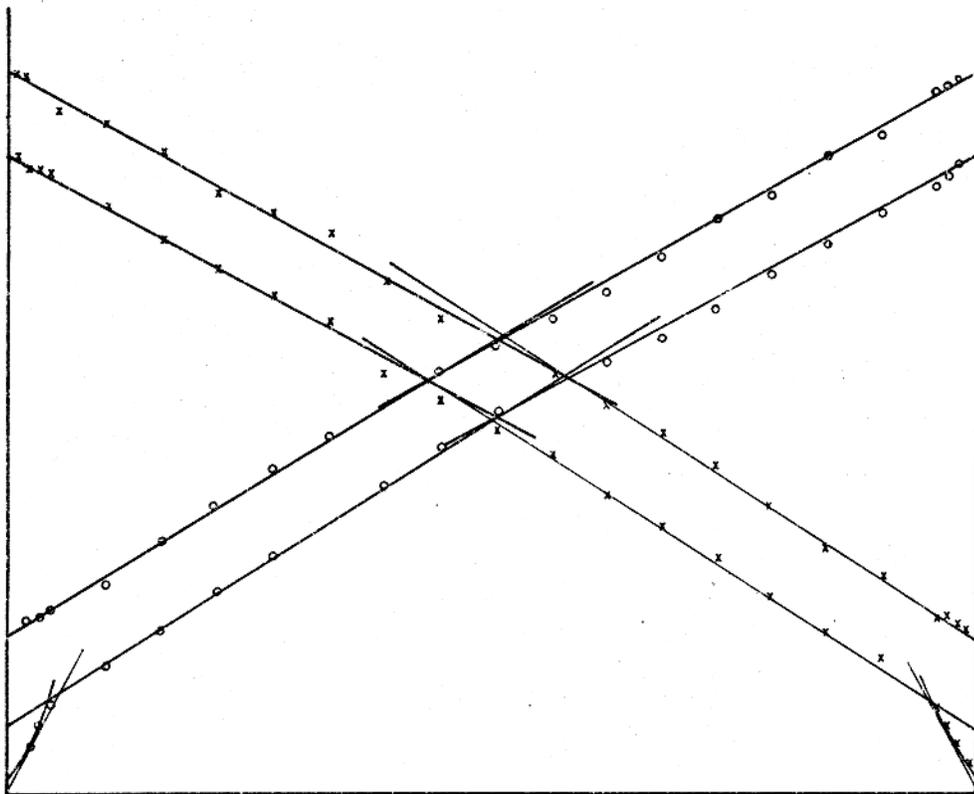


FIG. 29 - HODOCRONA DE UMA DISTRIBUIÇÃO PRÓXIMO AO CAMPO DE POUSO, NA ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA.

TEMPO DA 1ª ONDA REFRATADA
 ESCALA VERTICAL 0 — 20M

DISTRIBUIÇÃO DOS GEOFONES
 ESCALA HORIZONTAL 0 — 20M

respondente às primeiras chegadas da onda sísmica.

As correções topográficas não foram efetuadas pelo fato da área ser muito plana, com gradiente máximo de 0,5%, conforme mostra o levantamento altimétrico (Fig. 5), realizado ao longo da Rodovia que liga Ponta de Pedras a Mangabeira (Relatório Projeto Marajó, 1975).

A correção da camada intemperizada não foi necessária porque não foram observadas evidências que a caracterizavam. O. Koefoed (1954), num estudo desse problema observou que ocorrem dois fatos:

- 1) Muitas variações laterais na velocidade da onda sísmica nessa camada;
- 2) Na hodocrona, a reta da onda direta não passa na origem dos eixos.

Tais fatos não foram observados nos dados deste trabalho.

O ângulo máximo de inclinação determinado para as camadas foi de apenas $0,5^{\circ}$, o que lhe dá um caráter de horizontalidade. Daí pode-se concluir que as velocidades aparentes constituem as velocidades verdadeiras das camadas.

As velocidades e profundidades das camadas interpretadas por este método se encontram no apêndice 6.

Os modelos interpretados são de duas camadas e algumas de três camadas. A primeira camada com uma velocidade média

de 507 m/s e espessura variando entre 3,5 e 6 metros, foi interpretada como camada não saturada, confirmada com dados de poços escavados existentes ao longo dos perfis. A segunda, com velocidade média de 1.650 m/s e espessura não definida por este método, representa provavelmente a camada saturada de água. Em três perfis, foi possível detetar uma terceira camada com velocidade média de 1.887 m/s e profundidade variando entre 10,2 e 21,6 metros. Acredita-se que seja alguma lente localizada de material mais compactado. Estas velocidades estão dentro da faixa apresentada por Clark (1966), onde areia saturada tem velocidade 750 m/s a 1.800 m/s.

C A P Í T U L O I V

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

4.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inter relação das Medidas Geofísicas com Hidrogeologia e Geologia

Na interpretação quantitativa de sondagens elétricas, é muito útil que se conheça um dos parâmetros, ou a espessura ou a resistividade das camadas ao longo da profundidade pesquisada. O conhecimento de um desses parâmetros evita que se cometa erro por ambigüidade, que é inerente à interpretação quantitativa, qualquer que seja o método de interpretação empregado. Em geral, a resistividade é conhecida (ou pelo menos estimada) e então as espessuras dos horizontes podem ser facilmente obtidas. A Fig. 30 mostra um exemplo típico de ambigüidade. Dois modelos diferentes, se ajustando aos dados de campo. Como se tinha uma sondagem geológica bem próxima, foi possível selecionar o melhor modelo, conforme mostra a Fig. 16.

Os resultados das interpretações das SEVs estão apresentados de dois modos: mapas com curvas de contorno e seções geoelétricas. Foram feitos três mapas de contorno. Um mostra a profundidade da base do horizonte A1 (Fig. 31) que como foi visto, constitui a camada mais importante do ponto de vista hidrogeológico. Corresponde ao aquífero raso e pode ser considerado um bom aquífero, desde que satisfeitas determinadas condições hidrogeológicas. Estas curvas mostram que as maiores profundida

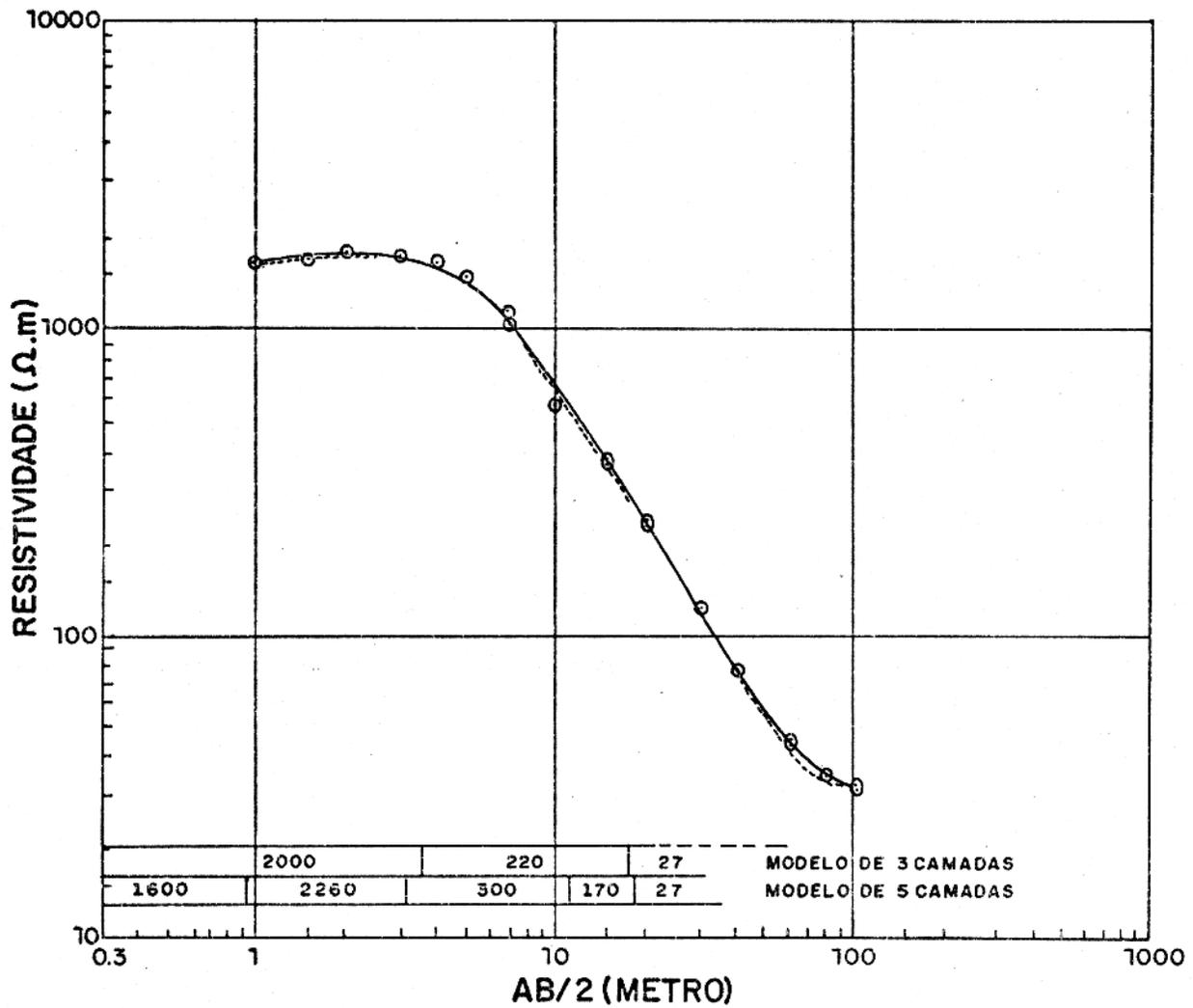


FIG. 30 - CASO DE AMBIGUIDADE: DOIS MODELOS DIFERENTES AJUSTANDO-SE AOS DADOS DE CAMPO DA SEV 03.

○ OBSERVAÇÕES DE CAMPO

— MODELO DE 3 CAMADAS

- - - MODELO DE 5 CAMADAS

des deste horizonte, da ordem de 50 m, são encontradas na parte central e norte da área. A Fig. 32 mostra as curvas de contorno da resistância transversal T correspondente ao horizonte A1, calculado multiplicando-se o valor da resistividade pela espessura ($T = \rho E$) da camada correspondente a esse horizonte. Os valores da resistividade ρ e espessura E foram aqueles calculados na interpretação pelo método numérico. Este mapa é importante por dois motivos:

a) Fornece o comportamento da camada resistiva com um mínimo de ambigüidade, pois os valores máximos relativos na curva de resistividade aparente estão relacionados ao produto $T = \rho E$. Daí o mapa da resistância transversal T , ser menos ambíguo do que mapas representando apenas um dos parâmetros, uma vez que cada um deles está sujeito a ambigüidade conforme visto no início desta seção;

b) Porque os valores altos de resistância transversal indicam camadas de grandes espessuras ou valores altos de resistividade ou a combinação dos dois fatores. E, geralmente, os valores altos de resistividade em material inconsolidado corresponde aos sedimentos com grãos grosseiros saturados com água doce.

Na área em estudo, provavelmente as causas dos valores altos de resistividade são as seguintes:

- a) em período de seca, a zona de aeração retém poucos eletrólitos entre os poros da rocha e como a condução elétrica se faz através dos eletrólitos, a resistividade é grande;
- b) presença de concreções limoníticas;
- c) camadas com predominância de areia, com água doce.

Das camadas constituídas por estes três elementos citados, a última apresentou maior resistência transversal, devido à espessura, que chega a ser dez a vinte vezes maior que as duas primeiras. Assim, este mapa é básico na interpretação da hidrogeologia para o geofísico, pois ele reflete locais de mais alta transmissibilidade hidráulica e coeficiente de armazenamento.

Utilizando-se a Lei de Archie e os valores de resistividade encontrados na interpretação e resultado de análise da água, calculou-se a porosidade do horizonte A1 e A2.

Segundo Archie,

$$\rho_r = a \rho_a^{-m}$$

onde:

P - porosidade total da rocha

ρ_r - resistividade da rocha

ρ_a - resistividade da água contida na rocha

m - parâmetro de cimentação

a - parâmetro de ajuste

Tomou-se $a = 0,9$ e $m = 1,4$ (Orellana, 1972) e

$\rho_a = 400 \text{ ohm.m}$ ($\sigma = 25 \text{ uS/cm}$)

Encontrou-se os valores para P abaixo:

<u>ρ_r (ohm.m)</u>	<u>P</u>
1.270	40%
600	69%
200	179%

Para $\rho_a = 250 \text{ ohm.m}$ ($\sigma = \text{uS/cm}$)

<u>ρ_r (ohm.m)</u>	<u>P</u>
1.270	29%
600	49%
200	109%

Como pode ser visto, os dois primeiros valores de porosidade estão dentro do intervalo da tabela apresentada por Orellana (1972). Segundo Keller (1966), a maior incerteza no cálculo da porosidade é introduzida pelo parâmetro ρ_a . De fato, tomando-se por base os dados da SEV 03 e da sondagem geológica P38, conservando a e m igual aos dos cálculos anteriores, tem-se:

$$\rho_a = 28,57 \text{ (ohm.m)} \quad (\sigma = 350 \text{ uS/cm})$$

Para $\rho_r = 200 \text{ ohm.m}$, $P = 25\%$

que é um valor perfeitamente aceitável, o que não ocorre tomando-se $\sigma = 40 \text{ uS/cm}$ conforme mostram os cálculos acima.

Em hidrogeologia, a porosidade efetiva é um parâmetro mais importante do que a porosidade total. Mas para calculá-lo é necessário conhecer a retenção específica. Como este último parâmetro não pôde ser determinado durante o desenvolvimento deste trabalho, não foi possível calcular a porosidade efetiva.

A Fig. 33 mostra o mapa de contorno da soma das resistências transversais do horizonte A1 com o horizonte A2. Este último, embora tenha geralmente espessura maior do que o horizonte A1, a resistância transversal é muito mais baixa, não modifi-

cando muito os resultados apresentados na Fig. 32.

Foram construídas quatro seções geoeletricas, como mostram as Figuras 34, 35, 36 e 37. As seções ilustradas nas figuras 34 e 35 foram obtidas através das mesmas sondagens elétricas, feitas ao longo da estrada Ponta de Pedras-Mangabeira. As seções ilustradas nas Figuras 36 e 37 foram obtidas de sondagens de maneira tal que tivessem a direção norte-sul (transversal à estrada Ponta de Pedras/Mangabeira). A seção da Figura 34 mostra resultado de interpretação feito pelo método do ponto auxiliar (método gráfico), enquanto que a seção da Figura 35 foi obtida pelo método numérico, já mencionado na seção 2.4. Conforme se pode observar, o método numérico dá um maior grau de detalhe do que o método do ponto auxiliar, embora o comportamento global seja semelhante. Observando a seção apresentada na Figura 35, pode-se estabelecer uma correção entre as sondagens, enquanto que nas Figuras 36 e 37 há certas dificuldades, devido ao comportamento bastante irregular entre os modelos das sondagens que constituem as seções.

De um modo geral, nas figuras 35, 36, 37, destacam-se três seções geoeletricas, uma como resistividade entre 1.200 a 1.600 ohm.m, identificada como horizontal A1, outra com resistividade entre 100 a 300 ohm.m identificada como horizonte A2, e finalmente uma entre 10 e 80 ohm.m, horizonte C. Na ausência de água salina, esta última seção sugere predominância de argila. No topo dessas seções, tem um horizonte de espessura pequena e resistividade muito altas. A base desta seção não tem relação com a superfície piezométrica. Trata-se de camada alterada com pre-

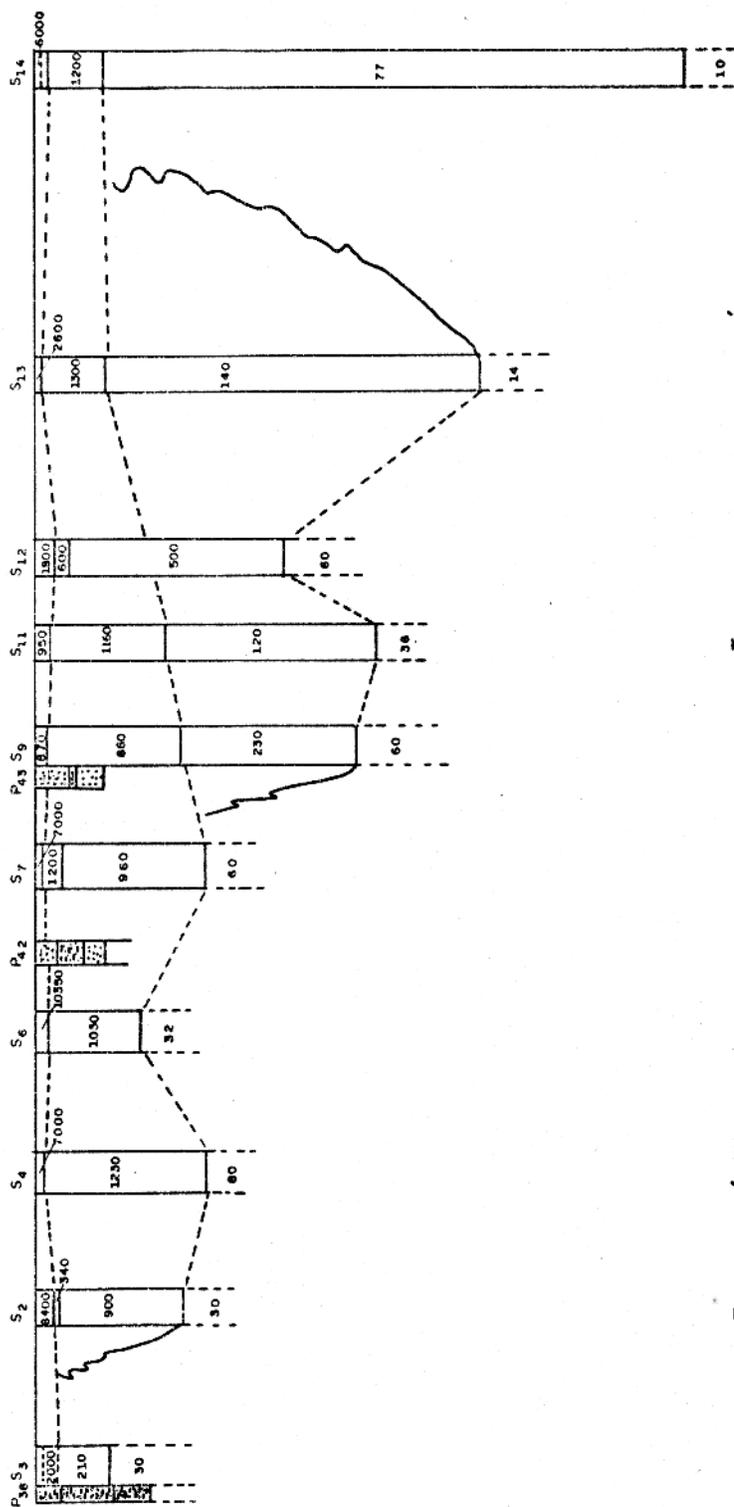


FIG.34 - SEÇÃO GEOELÉTRICA DOS MODELOS DE INTERPRETAÇÃO PRELIMINAR PELO MÉTODO DO PONTO AUXILIAR. SEV FEITA NA ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA E DADOS GEOLÓGICOS.

VALORES DAS COLUNAS - RESISTIVIDADE INTERPRETADA EM OHM.M

S_n - NÚMERO DA SEV

P_n - NÚMERO DA SONDAGEM GEOLÓGICA - PIEZÔMETRO

ESCALA HORIZONTAL



ESCALA VERTICAL



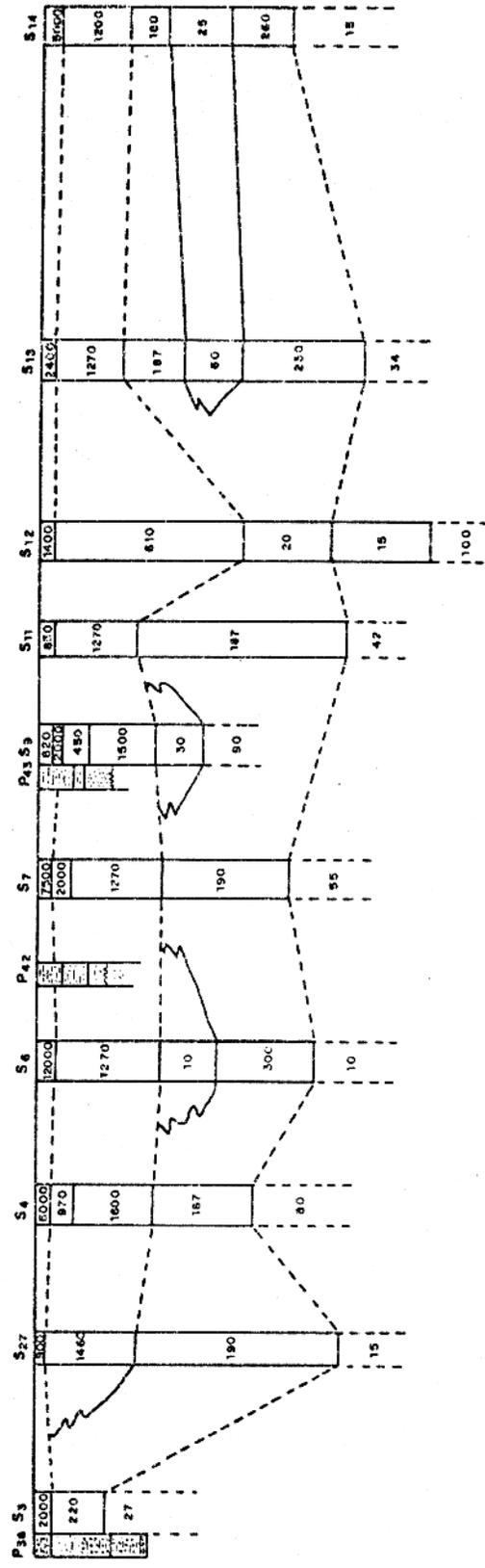


FIG. 35 - SEÇÃO GEOELÉTRICA DOS MODELOS INTERPRETADOS PELO MÉTODO NUMÉRICO SEV FEITAS NA ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA, E DADOS GEOLÓGICOS.

VALORES DAS COLUNAS - RESISTIVIDADE INTERPRETADA EM OHM.m
 S₃ - NÚMERO DA SEV
 P₃₆ - NÚMERO DA SONDAGEM GEOLÓGICA - PIEZÔMETRO

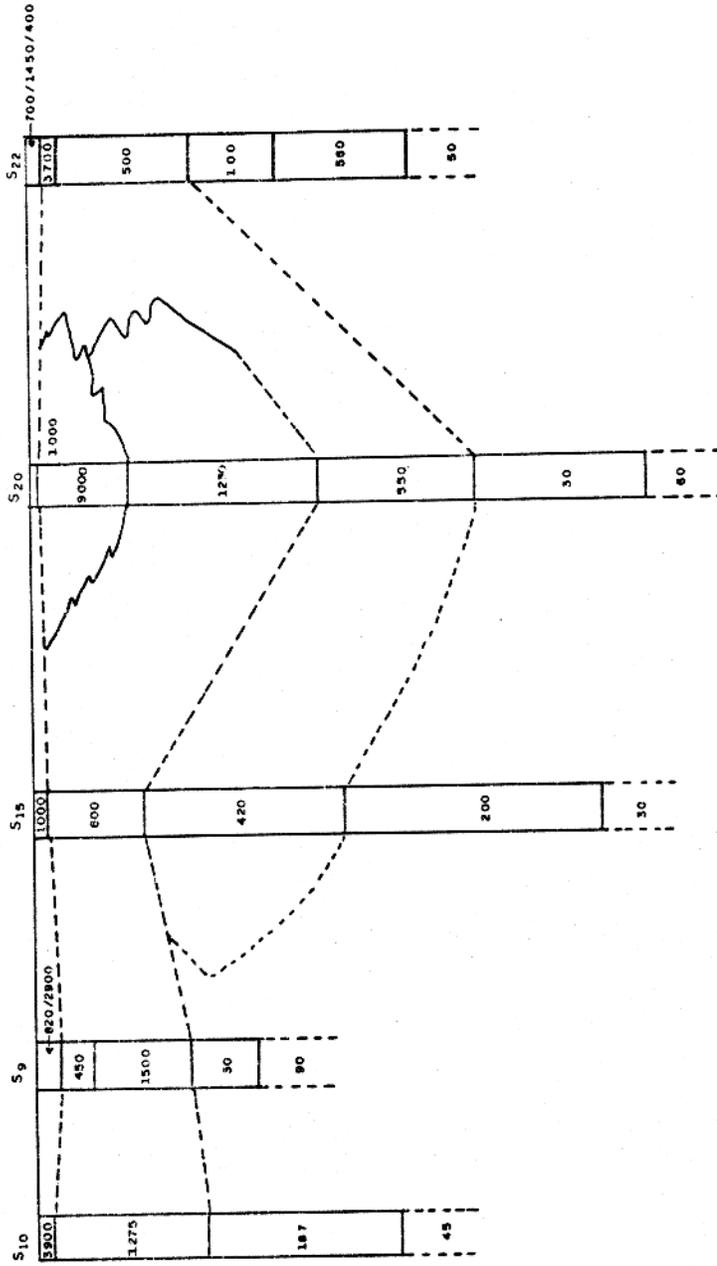


FIG. 36 - SEÇÃO GEOELÉTRICA DOS MODELOS INTERPRETADOS PELO MÉTODO NUMÉRICO, TRANSVERSAL À ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA.

VALORES DAS COLUNAS - RESISTIVIDADE INTERPRETADA EM OHM.M
S10 - NÚMERO DA SEV

ESCALA VERTICAL 0 20M
ESCALA HORIZONTAL 0 400M

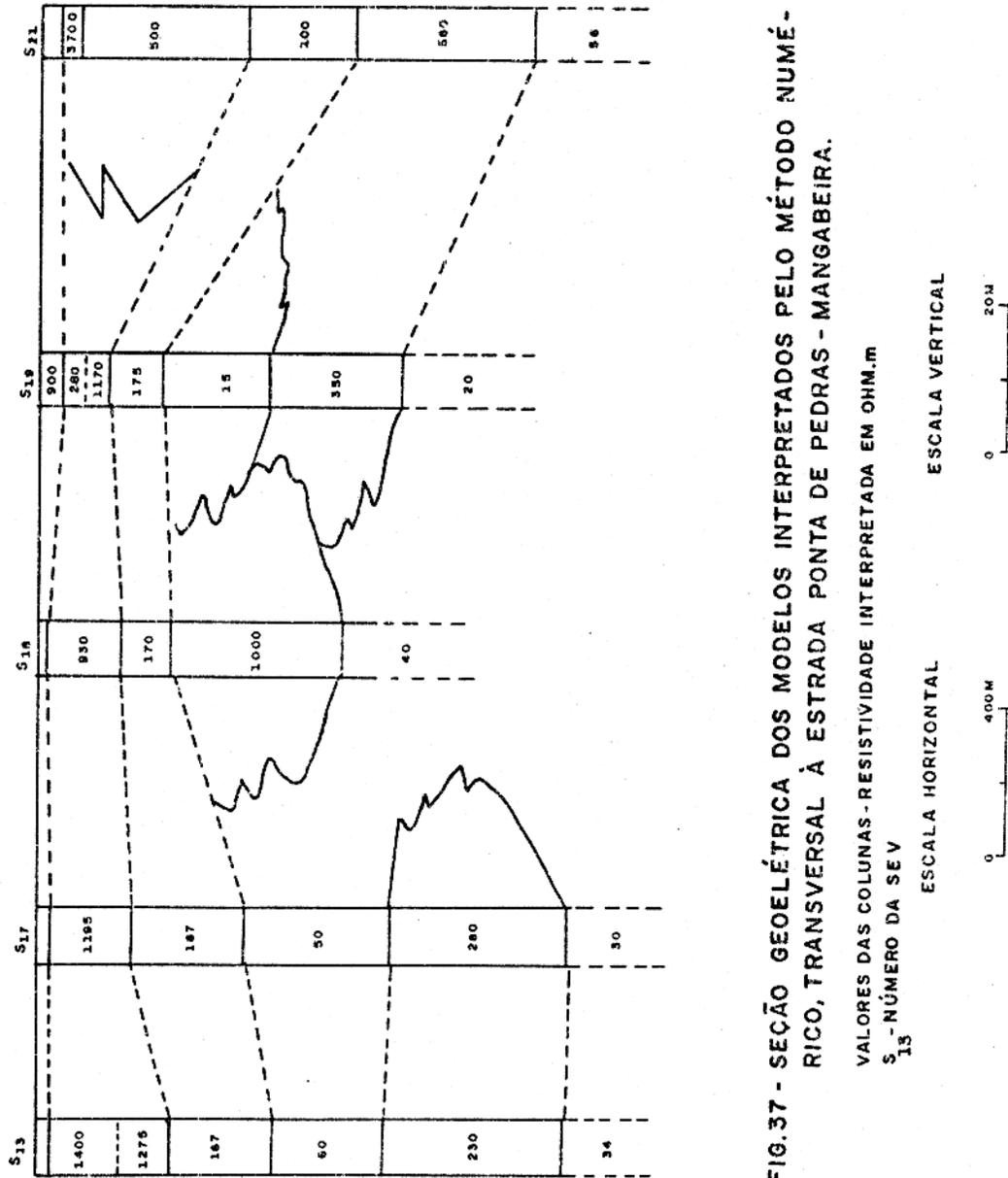


FIG.37 - SEÇÃO GEOELÉTRICA DOS MODELOS INTERPRETADOS PELO MÉTODO NUMÉRICO, TRANSVERSAL À ESTRADA PONTA DE PEDRAS - MANGABEIRA.

sença de concreções limoníticas. A superfície piezométrica pode estar acima ou abaixo desse limite.

4.2. CONCLUSÕES

Com suporte nas sondagens elétricas e geológicas, tornou-se possível a demarcação de zonas que denominaremos de "zonas produtivas", "semi-produtivas" e "pouco produtivas". As figuras 31, 32 e 33 sugerem áreas produtivas na parte central limitada a oeste pelo Rio Arapinam e a leste, às proximidades de Vila Nova e, aproximadamente, a 1 km da costa. Ao norte, essa área se localiza entre Santo Lenço e Vila Nova. Na área urbana, tem-se uma provável zona "semi-produtiva". E, a oeste, ao longo da Praia Grande e ao sul tem-se uma provável zona "pouco produtiva".

Quanto ao método sísmico, cujo objetivo era verificar a viabilidade de sua aplicação, ficou constatado pelos resultados da interpretação, que não é adequado para este estudo na área.

Assim, embora se tenha conseguido alcançar os objetivos deste trabalho, nem todas as questões estão completamente respondidas, principalmente porque não se pôde ter controle litológico a profundidades maiores do que 20m e 30m, obtenção de amostras de água até o limite, pesquisado pelo método elétrico e também, devido à imprecisão dos equipamentos. Apesar destas limitações, estudos de resistividade superficial constituem uma ferramenta básica na investigação de água subterrânea nesta área.

Conforme já mencionado no Capítulo II, algumas sonda

gens elétricas verticais indicaram a presença de camadas resistivas a profundidades maiores do que 100 metros. Apenas na sondagem 19 (Fig. 20) esta camada está evidente. Nas outras, pode ser resultado de imprecisão dos equipamentos utilizados. Portanto, nos trabalhos futuros, sugere-se que sejam feitas sondagens mais profundas com eletrodos não polarizáveis e sondagens geológicas para confirmação desta possível camada. Caso se confirme, esta camada é representativa de um bom aquífero, pois está livre de contaminação bacteriológica.

Sondagens geológicas até a profundidade de 100 metros tornam-se necessárias para verificar se o horizonte C da Figura 13 e 14 trata-se de uma camada argilosa com água doce ou arenosa com água salgada, ou ainda argilosa com água salgada.

Os horizontes A1 e A2 dimensionados pela prospecção geofísica e ilustrados nas figuras 35 e 37, podem ser considerados potencialmente favoráveis para exploração de água subterrânea, entretanto, ainda se requerem estudos hidrogeológicos para o conhecimento das características hidrodinâmicas. Completadas com o conhecimento das propriedades hidroquímicas e biológicas da água, pode-se, finalmente, saber se os horizontes A1 e A2 são bons aquíferos ou não.

AGRADECIMENTOS:

Ao Professor Dr. William Sauck, pela orientação

Ao Professor Dr. Luiz Rijo, pela co-orientação

Ao Professor Dr. Edilton Feitosa, pelas valiosas sugestões

Ao Dr. Antonio Tancredi, pelas valiosas colaborações

Aos técnicos, Galvão, Borba, Anastacio, Iran e outros, pela
cooperação nos trabalhos de campo

A todos os funcionários do Núcleo de Ciências Geofísicas e
Geológicas que contribuíram para a realização deste trabalho

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio em forma de Bolsa de Estudos

À Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, pelo apoio financeiro

Ao Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, na pessoa de
seu Coordenador Dr. José Seixas Lourenço

Ao Departamento de Física

R E F E R Ê N C I A S

- Bhattacharya, P. K. and Patra, H. P., 1968, Direct current geo
electric sounding, principles and interpretation, Elsevier Publis
hing Company.
- Clark, Jr. S. P., 1966, Handbook of Physical Constants, The Geolo
gical Society of America Inc, New York.
- Dobrin, M. B., 1976, Introduction to Geophysical Prospecting, Mc
Graw-Hill Book Company.
- Fenzl, N. y Piuci, J., 1977, Estudio hidroquímico de las águas sub
terranneas de pequeñas profundidades en el area piloto "Ponta de
Pedras"- Isla de Marajó Pará-Brasil, Anais do V Congresso Vene
zuelano de Geologia.
- Ghosh, D. P., 1971, The application of linear filter theory to the
direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding
measurements, Geophysical Prospecting, V. 19, n°2, p.192.
- IDESP-Instituto de Desenvolvimento Economico e Social do Pará,1974,
Estudos Integrados da Ilha de Marajó, Governo do Estado do Pará.
- Keller and Frischnecht, 1966, Electrical Methods in Geophysical
Prospecting, Pergamon Press.
- Koefoed, O., 1954, Some Observations on seismic weathering cor
rections, Geophysical Prospecting, V. 2, n° 4, p. 274.
- Koefoed, O. Ghosh, D.P., and Polman, G.J., 1971, Compuatation of
type curves for electromagnetic depth sounding with a horizontal
transmitting coil by means of a digital linear filter, Geophys
ical Prospecting, V. 20, n° 2, p. 206.

- Knox, W. A., 1970, Multilayer Near-Surface refraction computation, Seismic Refraction Prospecting, The Society of Exploration Geophysicists, Mobil Oil Corporation.
- Ludwig, G., 1968, Die Geologische entwicklung des Marajó-Bechens in nordbrasilien, Geol. Jb., 86, S845.878, 3Abb., 8Tab., 10Taf Hannover.
- OEA-Organização dos Estados Americanos, 1974, Marajó, um Estudo para o seu Desenvolvimento, Secretaria Geral da OEA, Departamento de Desenvolvimento Regional.
- Orellana, E., 1972, Prospeccion geoelectrica en corriente continua, Biblioteca Tecnica Philips, Paraninfo, Madrid.
- Projeto RADAM-Radar Amazonia, 1974, Levantamentos de Recursos Naturais, V. 5, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasil.
- Relatório Interno do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas (NCGG), 1975, Projeto: Utilização de Recursos Hídricos da Ilha do Marajó- Pará, para Financiadora de Estudos e Projetos-FINEP.
- Rijo, L., Pelton, W. H., Feitosa, E. C., Ward, S. H., 1977, Interpretation of Apparent resistivity data from Apodi Valley Rio Grande do Norte, Brazil, Geophysics, V. 42, nº 4, p. 811.
- Shaller, Vasconcellos e Castro, 1971, Estratigrafia Preliminar da bacia sedimentar da foz do Rio Amazonas, Anais do 25º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, SBG.

Nº	PROFUNDIDADE (m)	D E S C R I Ç Ã O	MODO DE AMOSTRAGEM
K-23	3,9/4,6	areia fina quartzosa argilosa cinza e verde lho claro	amostrador bipartido
K-24	4,0/4,6	areia quartzosa média e grossa em matriz ar- gilosa cinza e vermelho claro	amostrador bipartido
K-25	6,0/6,3	areia quartzosa grossa e concreções limoní- ticas em matriz argilosa	amostrador bipartido
K-26	8,0/8,3	areia quartzosa grossa e concreções limoní- ticas em matriz argilosa	amostrador bipartido
K-27	8,3/8,5	areia quartzosa média, branca	amostrador bipartido
K-28	10,2/10,4	areia quartzosa fina argilosa castanho cla- ro	amostrador bipartido
K-29	10,2/10,5	areia fina quartzosa argilosa, vermelho es- curo e claro	amostrador bipartido
K-30	12,0	areia quartzosa média, branca	água de lavagem

APÊNDICE 1 - DADOS DE AMOSTRAGENS DE SEDIMENTOS DO POÇO P-43

PERÍODO: 08 a 11/07/1977

Nº	PROFUNDIDADE (m)	D E S C R I Ç Ã O	MODO DE AMOSTRAGEM
K-31	4,0/4,5	areia quartzosa argilosa média cinza claro	amostrador bipartido
K-32	8,0	areia quartzosa média e grosseira castanho claro	coletor de areia
K-33	8,0/8,2	areia quartzosa média e muito grosseira, avermelhada	água de lavagem
K-34	13,0	areia fina quartzosa argilosa avermelhada	água de lavagem

APÊNDICE 2 - DADOS DE AMOSTRAGENS DE SEDIMENTOS DO POÇO P-42

PERÍODO: 21 a 22/07/1977

Nº	PROFUNDIDADE (m)	D E S C R I Ç Ã O	MODO DE AMOSTRAGEM
K-9	6,5/6,6	areia fina quartzosa argilosa, vermelho escuro	amostrador bipartido
K-10	7,2/7,4	areia média quartzosa argilosa, amarelada e marrom e concreções limoníticas	amostrador bipartido
K-11	7,4/7,6	areia grossa quartzosa marrom e branco, concreções limoníticas	amostrador bipartido
K-12	7,6/7,8	areia fina quartzosa argilosa, cinza claro	amostrador bipartido
K-13	10,8	argila plástica cinza e vermelha com intercalações de areia fina vermelha	amostrador bipartido
K-14	12,4/12,5	argila plástica variegada	amostrador bipartido
K-15	13,0/13,6	argila plástica variegada	amostrador bipartido
K-16	17,0	areia quartzosa média castanho claro	água de lavagem
K-18	20,0	areia quartzosa média amarelada	água de lavagem
K-19	21,6/21,8	argila plástica cinza e vermelha com intercalações de areia grossa	amostrador bipartido
K-20	25,0/25,8	argila plástica cinza e vermelho	amostrador bipartido
K-21	28,0/28,4	areia fina quartzosa vermelho escuro	amostrador bipartido
K-22	28,4/28,45	argila plástica variegada com intercalações de areia fina	amostrador bipartido

APÊNDICE 3 - DADOS DE AMOSTRAGENS DE SEDIMENTOS DO POÇO P-44

PERÍODO: 12 a 20/07/1977

P R O V E N I Ê N C I A	CONDUTIVIDADE (μ S)/cm
Rio Arapinam (maré baixa)	60
Poço - 15 m do Rio Arapinam, P _{E2}	49
Baía de Marajó (Praia Grande)	41
Poço escavado próximo ao piezômetro P-32 (Mangabeira)	21

APÊNDICE 4 - MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE DE ÁGUA

DATA DA COLETA: 25 a 30/01/1977

P R O V E N I Ê N C I A	CONDUTIVIDADE (μS)/cm
Poço escavado Sr. Manoel Oliveira, P _{E6}	26
Piezômetro P-44 (22 m)	61
Piezômetro P-44 (27 m)	31
Poço escavado Sr. Jaime - Santo Lenço, P _{E8}	17
Água do tanque (lavagem) de P-44	56
Santo Lenço - próximo ao Rio Armazém, P _{E7}	18
Poço roça da comunidade, P _{E10}	27
Piezômetro P-44 (15 m)	49

APÊNDICE 5 - MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE DE ÁGUA

DATA DA COLETA: 16 a 23/07/1977

DISTRIBUIÇÃO	PROFUNDIDADE		VELOCIDADE (m/s)		
	1a. CAMADA	2a. CAMADA	1a. CAMADA	2a. CAMADA	3a. CAMADA
P ₁	4.2		500	1590	
P ₂	4.6		530	1900	
P ₃	4.1	6.2	441	1500	1760
P ₄	4.4		500	1650	
P ₅	5.1		545	1690	
P ₆	4.5	12.5	533	1617	1857
P ₇	4.6		562	1710	
P ₈	4.0		500	1685	
P ₉	4.3		482	1620	
P ₁₀	5.6		560	1710	
P ₁₁	4.0		466	1636	
P ₁₂	3.0		500	1687	
P ₁₃	3.5		500	1625	
P ₁₄	5.8	5.0	750	1628	1854
P ₁₅	3.8		600	1667	
P ₁₆	3.5		590	1646	
P ₁₇	5.0		560	1640	
P ₁₈	4.6	11.3	650	1617	1875
P ₁₉	4.2		606	1667	
P ₂₀	3.8		550	1628	
P ₂₁	5.4		590	1677	
P ₂₂	5.0		610	1640	

Apêndice 6 - Resultados de interpretação de refração sísmica.

LOCAL	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl (mg/l)	CONDUTIVIDADE
PP-01	62	288	74,40	350
P-33	2	19,5	42,00	175
P-34	1	3,0	7,98	29
P-35	1	5,0	12,97	58
P-36	2	6,25	11,98	70

Apêndice 7 - Quantidade de ions condutores presentes na água coletada e analisada em julho de 1977.

		SEV 01 18/07/75			SEV 02 21/07/75			SEV 03 08/07/76		
$\frac{AB}{2}$ m	MN m	I mA	ΔV mV	ρ Ohm.m	I mA	ΔV mV	ρ Ohm.m	I mA	ΔV mV	ρ Ohm.m
1	0,6	2,6	375	686	2	470	1119	0,6	222	1625
1,5	0,6	2,75	170	698	1,9	205	1219	0,8	132	1754
2	0,6	3,35	120	734	2	110	1127	0,9	85	1834
3	0,6	3,0	42	654	2,3	50	1015	0,5	20,5	1740
4	0,6	2,9	25	718	2,6	29	929	0,7	14,8	1644
5	0,6	3,0	14	607	2,3	14	791	0,9	9,6	1422
5	2	2,95	50	639	2,3	45	738	0,9	34	1473
7	0,6	3,25	7	551	1,9	5,4	728	0,7	3	1024
7	2	3,2	24	565	1,9	16	635	0,7	11	1105
10	2	2,6	7,2	432	4,5	14	485	0,7	2,7	570
15	2	19	15	278	11,8	11	328	1,2	1,3	397
15	6	19	45	267	12	44	414	1,2	3,7	364
20	2	28	10	224	10,8	4,9	284	1,6	0,6	228
20	6	28	28	205	11	14	261	1,6	2	248
30	6	16	4	117	5,9	2,1	166	1,3	0,3	120
40	6	44	5	100	20	2,4	100	2,2	0,2	75
60	6	87	2	43	35	0,95	51	6,6	0,2	43
60	20	70	7	55	53	5,2	54	6,6	0,5	45
80	6	119	1,5	42	46	0,65	47	6,6	0,1	35
80	20	119	4	33	45	1,9	42	7	0,2	35
100	20	55	1,5	43	18	0,4	35	37	0,7	29
140					30	0,35	36	27	0,2	24
140					33	1,1	33	25	0,7	27
200					50	0,3	37	72	0,4	34
200					50	0,85	35	75	1	27
300					470	2,8	28,5	110	0,7	29
					230	0,9	32,5			

Apêndice 8- Dados de Campo das Sondagens Elétricas Verticais

		SEV 04 23/07/75			SEV 05 28/01/76			SEV 06		
$\frac{AB}{2}$	MN	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ
m	m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m
1	0,6	0,2	380	9044	1	325	1547	0,15	380	12060
1,5	0,6	0,25	155	7006	1	130	1469	0,25	255	11520
2	0,6	0,25	80	6560	1,2	100	1708	0,25	150	12300
3	0,6	0,3	40	6226	1,2	51	1984	0,3	65	11240
4	0,6	0,3	17,8	4942	1,6	48	2500	0,3	39	10830
5	0,6	0,3	10,8	4387	3,6	61	2202	0,3	19	8230
5	2	0,3	33	4147	3,6	210	2200	0,3	50	6215
7	0,6	0,45	5,25	2987	4,6	38	2114	0,65	16	6300
7	2	0,5	17	2564	4,6	125	2048	0,7	43	4630
10	2	0,4	4,5	1755	2,4	32	2080	1	19	2960
15	2	0,7	3,2	1609	2	10	1760	0,95	6	2220
15	6	0,75	9,2	1431	2	31	1751	0,95	17	2020
20	2	0,8	2,1	1645	2	5	1567	1,3	3,5	1625
20	6	0,8	5,75	1473	2	14	1435	1,35	10	1576
30	6	1,1	3,1	1316	3,8	10	1228	13,5	32	1107
40	6	3,4	4,8	1176	4,2	4,6	912	25	6,2	910
60	6	3,5	1,5	806	6,0	1,8	564	11,5	3,6	466
60	20	3,5	4,5	707	6,0	7,2	660	2,6	21,6	457
80	6	6,6	0,95	480	11	1,2	364	21,5	1,45	225
80	20	6,6	2,5	375	11,2	4,6	406	2	3,8	188
100	20	4,0	0,7	273	20	3,4	265	26,6	2,5	146
140	20	8,5	0,3	119	22	0,8	111	31,5	1,15	112
140	60	8,5	1,25	144	24	3	122	32	3,5	127
200	20	8,5	0,15	107	30	0,3	62	47,5	0,5	66
200	60	9,0	0,4	91	56	1,6	58	47,5	1,4	60
300	60	5,5	0,1	85	42	0,4	44	61	0,7	54
400	60				62	0,3	40			
500	60				36	0,1	36			

		SEV 07 14/08/75			SEV 08 20/01/75			SEV 09 05/08/75		
$\frac{AB}{2}$	MN	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ
m	m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m
1	0,6	0,2	410	9290	0,2	195	4640	1,25	375	1428
1,5	0,6	0,2	175	9416	0,2	90	5085	1,15	100	980
2	0,6	0,3	105	7175	0,2	44	4510	2,9	125	884
3	0,6	0,3	39	5980	0,25	26	4856	1,25	27	1010
4	0,6	0,3	18	5000	0,4	24,2	5040	1	14	1166
5	0,6	0,35	12	4330	0,5	17	4420	2	19	1235
5	2	0,4	49	4620	0,5	54	4070	4,45	125	1060
7	0,6	0,8	9	2860	1,2	17	3626	5,2	27	1330
7	2	0,9	28	2345	1,2	51	3204	5,4	78	1090
10	2	1,05	15	2230	1,4	19,6	2184	4,9	32	1020
15	2	1,1	5,8	1850	1,6	5,8	1276	16,2	45	978
15	6	1,1	18	1850	1,6	19,2	1314	16,8	155	1042
20	2	1,35	3,6	1670	8,2	12,2	930	8,8	13	926
20	6	1,45	11	1550	8,4	36	878	11	50	930
30	6	4,4	12	1270	9,8	11	524	10,8	20	864
40	6	9,6	11,1	960	38,5	19,4	420	11	10	757
60	6	25	8,6	670	20	2,4	225	13	4	578
60	20	26	27	570	20	9	247	13	14	590
80	6	16,5	2,1	430	40	1,8	150	40	3,6	300
80	20	17,8	6,8	378	40	6,4	158	44	15	337
100	20	33	5	236	40	2,6	101	50	7	218
140	20	31	1,5	148	80	1,5	57	90	4,2	143
140	60	32,5	3,9	118	80	5,2	63	90	14	152
200	20	55	0,8	91	44	0,35	49	98	1,7	108
200	60	55,5	2	74	46	1	44	98	4,4	92
300	60	120	1,55	60	80	0,65	37	55,5	1	84
400	60							68	0,65	80
500								58,5	0,35	77

		SEV 10 27/01/76			SEV 11 06/08/75			SEV 12 07/08/75		
$\frac{AB}{2}$ m	MN m	I mA	ΔV mV	ρ Ohm.m	I mA	ΔV mV	ρ ohm.m	I mA	ΔV mV	ρ ohm.m
1	0,6	0,4	315	3748	1,25	265	1010			
1,5	0,6	0,4	130	3672	1,7	135	897			
2	0,6	0,6	111	3792	1,5	62,5	871	4,5	335	1526
3	0,6	0,6	95	4436	1,45	28	900	5,5	220	1868
4	0,6	1	60	5000	1,55	17	913	5	112	1865
5	0,6	1,2	41	4440	1,8	13,5	964	8	114	1853
5	2	1,2	115	3612	3,55	88	990	8	370	1744
7	0,6	1,2	17	3626	4,5	18	1024	3,5	22	1610
7	2	1,2	50	3114	4,5	61	1022	3,5	70	1508
10	2	2,4	42	2730	3,7	25,5	1075	7	55	1226
15	2	2,8	14	1760	3,4	10,6	1090	5,5	16,4	1050
15	6	2,8	48	1937	3,4	33	1090	55	47	965
20	2	2,6	8	1930	3,55	6	1059	3,5	4,9	878
20	6	2,6	21	1655	3,45	18,4	1093	8	29	743
30	6	5,4	13,8	1193	2,15	4,4	955	13,5	18	623
40	6	10,6	12,4	974	5,65	5,6	825	15	10,2	566
60	6	13	4,6	665	9	2,8	584	13,25	3,6	511
60	20	13	15,4	651	18	19	580	15,5	15	532
80	6	14,8	2,2	496	15,8	1,65	348	36	4,2	390
80	20	14,8	6,4	428	15,6	6	381	36	15,6	480
100	20	11	1,8	255	71,5	11	240	23	4,4	298
140	20	19,2	0,8	127	94	3,8	124	25,5	1,35	162
140	60	19	2,6	134	95	14	144	25,5	4,5	172
200	20	76	0,7	58	122	1,5	77	68	1,15	106
200	60	78	2,4	63	120	4,4	75	73	3,5	98
300	60	90	1	51	95	1,15	57	80	1,45	84
400	60	182	1	46	92	0,55	49	54	0,5	77
500	60				211	0,7	43	188	0,9	62

		SEV 13 07/07/75			SEV 14 30/06/76			SEV 15 19/01/76		
$\frac{AB}{2}$	MN	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ
m	m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m
1	0,6	0,95	535	2680	0,45	495	5236	2	255	606
1,5	0,6	0,95	245	2914	0,4	210	5936	3	275	1035
2	0,6	1	123	2521	0,4	120	6150	3	140	956
3	0,6	0,9	37	1878	0,55	80	6790	2,6	50	898
4	0,6	1,2	23,2	1584	0,3	24	6664	7	7,1	844
5	0,6	1,15	12,5	1413	0,8	40	6500	15	91	788
5	2	1,15	47	1540				15,6	350	845
7	0,6	1,1	5,7	1326	1,15	23	5120	12,2	35	734
7	2	1,1	20,1	1374				12,2	121	747
10	2	1,05	8,2	1218	0,9	22	3813	18,2	78	668
15	2	0,9	3,1	1240	1,7	11	2277	18	31	606
15	6	0,9	12,3	1580				18,3	91	565
20	2	1,15	2,5	1363	3,6	8	1393	18,4	19	647
20	6	1,15	7,7	1372	3,45	27	1604	18,2	52	585
30	6	0,7	1,2	800	3,05	6,2	949	19,2	20,8	505
40	6	0,9	0,6	537	2,2	2	617	19,6	11,6	493
60	6	2,45	0,4	300	8	1,3	305	40	9,6	451
60	20	2,4	1,15	263	8	4,4	302	40	33	453
60	6	4	0,25	2087				40	4,4	367
80	20	2,25	0,35	154	14	1,9	134	36	14	385
100	20	5,2	0,35	105	12	0,9	117	38	7	287
140	20	5,5	0,2	105	14	0,5	109	26	2	235
140	60	5,5	0,6	100	13,5	15	109	26	5,8	218
200	20	7,7	0,1	73				158	3	123
200	60	5,8	0,25	88	23	0,85	75,6	160	7,8	99
300	60	12,8	0,1	44	25	0,25	46,7	170	1,8	49
400	60	16	0,05	31	33	0,1	25,2	164	0,75	38
500	60							194	0,6	40

		SEV 16 29/01/76			SEV 17 21/01/76			SEV 18 05/07/76		
$\frac{AB}{2}$	MN	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ
m	m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m
1	0,6	1	360	1713	4	290	345	2,9	860	1411
1,5	0,6	0,8	140	1977	4,2	140	376	2,4	350	1648
2	0,6	0,8	75	1921	3,2	70	448	2,15	165	1573
3	0,6	0,8	30	1751	4,4	52	551	4,05	125	1297
4	0,6	0,8	15	1550	4,2	34	674	2,75	42	1272
5	0,6	1,2	13	1410	3,6	21	758	3,60	33	1191
5	2	1,2	39	1225	4,4	81	694	3,6	115	1204
7	0,6	1	4	1024	4,2	14	853	3	13,8	1177
7	2	1	14	1055	4	44	829	2,9	42	1092
10	2	1,4	9	1002	4,6	26	881	2,55	14,2	870
15	2	1,2	3,4	997	2,4	6	880	5,4	11,2	730
15	6	1,2	11	1035	2,4	20	941	5,4	35	732
20	2	1,4	2	895	8,4	10	746	3,9	3,9	627
20	6	1,4	6,4	937	8,4	32	780	3,95	12,3	638
30	6	7,6	14,2	872	8	9	525	28	29	483
40	6	8	8	833	9,6	4	347	14,8	7,2	405
60	6	7	2,2	590	25	2,6	195	17,4	3,4	367
60	20	7	6,4	502	31	11	195	17,5	14,8	465
80	6	7,4	0,8	361	40	1,2	100	15	1,3	289
80	20	7,4	2,6	347	41	5,6	135	21,5	8,4	386
100	20	13,2	1,8	212	47	3,4	112	20,5	4,7	357
140	20	15,2	0,6	120	78	2,6	102	26,5	1,7	196
140	60	15	1,6	104	78	8,4	105	26,5	7,1	262
200	20	24	0,25	65	124	1,5	75	24,5	0,35	89
200	60	24	0,8	68	126	5,2	84	24,6	1,3	108
300	60	40	0,6	70	64	0,75	54	23,5	0,3	62
400	60	52	0,4	64	200	1	41	36,5	0,1	27
500	60	34	0,2	76	410	1	31			

		SEV 19 23/01/76			SEV 20 24/01/76			SEV 21 22/01/76		
$\frac{AB}{2}$	MN	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ	I	ΔV	ρ
m	m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m	mA	mV	ohm.m
1	0,6	0,9	170	899	0,8	335	1993	2	250	595
1,5	0,6	1,35	110	920	0,8	185	2613	1,8	120	753
2	0,6	2,6	115	906	0,8	120	3075	1,8	85	968
3	0,6	2,4	40	778	0,6	38	2957	1,6	34	992
4	0,6	2	17	708	1	31	2582	2	25	1041
5	0,6	1,55	8	670	1,4	24	2228	2	18,8	1222
5	2	1,6	31	730	1,4	70	1885	1,8	54	1131
7	0,6	5,4	11	521	3,6	29	2062	1,4	7,8	1426
7	2	5,4	41	572	3,6	82	1717	2,8	47	1265
10	2	4,8	15	487	4,4	42	1489	5,4	49	1415
15	2	8,2	9	386	5,6	20	1257	3	11	1290
15	6	8	30	423	5,6	59	1190	3	36	1356
20	2	14,2	9	397	4,2	7	1045	5,4	9,4	1091
20	6	14,2	26	375	4,2	20	978	5,4	29	1100
30	6	11,6	5,2	209	14	28	934	3,6	6	778
40	6	12,4	1,6	107	6,6	6	757	2,4	1,8	624
60	6	23,6	0,8	63	18,4	5,6	572	9,2	2	408
60	20	23,4	2,8	61	18,4	20	597	9,2	6,2	370
80	06	41	0,6	48	16,4	2	407	11,6	1	287
80	20	40	2,2	54	16,6	7	417	11,2	3,2	288
100	20	37	1,4	59	15	2,4	249	7	1	222
140	20	32	0,6	57	12,2	0,4	100	19,2	1,1	175
140	60	32	2,2	67	12,4	1,2	94	19,8	3,75	185
200	20	68	0,6	55	56	4	44	60	1,45	151
200	70	114	3,4	61	56	1,2	43	62	4,75	157
300	60	146	1,4	45	124	1	37	60	1,35	105
400	60	188	0,9	40	112	4	29	42	35	69
500	60	178	0,4	29	210	4	24	60	0,25	54

