

NÃO CIRCULA

INVESTIGAÇÃO DE CAMADAS AQUÍFERAS POR MÉTODOS  
GEOELÉTRICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO



NELSON ELLERT

TESE DE DOUTORAMENTO APRESENTADA  
À FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS  
E LETRAS DA UNIVERSIDADE DE

SÃO PAULO

1966

DEDALUS - Acervo - IGC



30900008269



## INTRODUÇÃO

Enquanto muitos técnicos e especialistas estão com as suas atenções voltadas para a prospecção de materiais necessários ao estabelecimento e manutenção de indústrias, aparece uma certa lacuna na pesquisa de um importante elemento necessário à indústria e ao homem, a água.

Na análise da história da civilização, percebe-se uma interrelação muito bem definida entre as condições climáticas de uma região e o grau de cultura do povo que aí habita. Nos locais onde a natureza fornece os elementos necessários à subsistência, a técnica para a procura destes elementos praticamente não existe. Porém, em locais onde as condições climáticas são adversas, o homem procura adaptar-se à elas, ou então procura sanar as falhas da natureza. Para isto é necessário um desenvolvimento acentuado das técnicas de proteção e prospecção dos elementos que lhe são carentes.

Em regiões úmidas, o homem dava pouca atenção à água. Como ela estava sempre presente ele concluía que sua existência era um fato óbvio. Em locais onde reinava um clima seco, a água era um fator limitante da atividade do homem. Foi a partir deste fato que técnicas foram desenvolvidas e esforços dispendidos. O primeiro estágio no desenvolvimento da técnica com respeito ao problema da água foi a coleta e armazenamento da água das chuvas. Observando a existência de fontes, verificou que a água deveria existir no sub-solo e que seria acessível por meio de poços. O processo que vêm em seguida foi portanto, a escavação de poços. É nesse estágio que aparecem dúvidas quanto à presença ou não de água no subsolo que justificasse o trabalho de escavações. Para es-



clarecer essas dúvidas desenvolveram-se então atividades especulativas, como a radioestesia, cujo estudo, análise e crítica, pertencem mais ao campo da psicologia do que ao da geofísica ou geologia propriamente dito.

Tendo em vista:

- a - a lacuna existente na pesquisa de água subterrânea
- b - os resultados obtidos por aqueles métodos empíricos de prospecção
- c - a necessidade crescente de água para o abastecimento de centros urbanos e rurais,

é que se procura com o presente trabalho determinar, de uma forma preliminar, porém prática, em que escala os métodos de eletrorresistividade podem ser aplicados à prospecção de água subterrânea numa dada condição geológica.

#### Agradecimentos

A elaboração desta tese teve a contribuição de várias entidades e muitas pessoas. A seu orientador, Prof. Dr. Viktor Leinz, o autor deve a sugestão e estímulo, bem como a crítica deste trabalho. Ao Prof. Dr. Ruldolf Kollert, deve o autor a orientação e programação dos trabalhos de campo, construção do equipamento e a interpretação de dados obtidos. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por meio de sua contribuição permitiu a realização dos trabalhos de campo, a aquisição de equipamento e bibliografia. Ao Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, deve o autor

-/-



muitas informações sôbre as sondagens realizadas no Estado de São Paulo. O Conselho Nacional de Pesquisas permitiu a realização de um estágio na Bundesanstalt für Bodenforschung onde a maior parte das interpretações e conclusões foram realizadas. À secção de Geofísica da Bundesanstalt für Bodenforschung deve o autor a orientação na parte escrita bem como interpretação das curvas de eletrorresistividade. O bom desempenho dos trabalhos de campo foi possível graças a colaboração de ex-alunos do Curso de Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo.

A tôdas as entidades e pessoas, o autor expressa seus mais sinceros agradecimentos.

*Handwritten signature and notes in blue ink, including the name 'L. S. G. de Almeida' and other illegible text.*



## PLANEJAMENTO DO TRABALHO

As finalidades das pesquisas cujos resultados expomos neste trabalho são:

- a - identificar nas curvas de resistividade a camada conhecida como aquífero, estabelecendo a sua espessura, profundidade e comportamento geológico.
- b - até que ponto uma estratigrafia geológica corresponde à uma "estratigrafia geofísica".
- c - verificar se existe uma correlação entre a resistividade de uma camada e a sua permeabilidade (sendo esta medida através da vazão específica dos poços).
- d - verificar a aplicabilidade de métodos elétricos à prospecção de água subterrânea no Estado de São Paulo.

Para alcançar este objetivo foi estudado o comportamento elétrico de diferentes formações geológicas ou unidades litológicas.

Para metodizar os trabalhos, seguiu-se o esquema abaixo que mostra as diferentes seqüências geológicas estudadas.

- 1) Grupo Tubarão (Permo-Carbonífero)  
Embasamento cristalino
  
- 2) Intrusão de diabásio  
Grupo Tubarão (Permo-Carbonífero)  
Embasamento cristalino



- 3) Arenito Botucatu (Eocretáceo)  
Efusivas basálticas (Eocretáceo)
- 4) Arenito Baurú (Neocretáceo)  
Efusivas basálticas (Eocretáceo)
- 5) Efusivas basálticas (Eocretáceo)  
Arenito Botucatu (Eocretáceo)
- 6) Arenito Baurú (Neocretáceo)  
Efusivas basálticas (Eocretáceo)  
Arenito Botucatu (Eocretáceo)
- 7) Pleistoceno (?)  
Embasamento cristalino

Nos sedimentos terciários não foram feitas pesquisas pois a Bacia de São Paulo apresenta uma série de dificuldades para a pesquisa geofísica (áreas industrializadas, tubulações condutoras, etc.) e os sedimentos do Vale do Paraíba já são objeto de estudo por parte de outro pesquisador.



## RESISTIVIDADE

### a) CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aplicação dos métodos elétricos de prospecção , com a finalidade de procurar solucionar problemas geológicos e hidrológicos é possível porquanto é ampla a gama de variações das características elétricas dos materiais da natureza.

A resistividade de um material é expressa pela relação entre a resistência oferecida à passagem da corrente elétrica e as suas dimensões.

Segundo a lei de Ohm

$$R = \frac{\rho L}{S}, \text{ portanto } \rho = \frac{R S}{L} \text{ onde } R = \frac{V}{I}$$

L= comprimento do material

S= área da amostra

À unidade de V= volt e I= ampère, corresponde para R a unidade Ohm. Assim sendo, se as dimensões de L e S forem dadas em metros (m) ou centímetros (cm) ou milímetros (mm), a unidade de  $\rho$  será Ohm.m ou Ohm.cm ou Ohm.mm.

A condutividade, que é o inverso da resistividade, pode ser de dois tipos: eletrônica ou iônica.

A condutividade eletrônica de um material implica na movimentação de elétrons e é chamada de condutividade metálica.

Em soluções de ácidos, bases e sais, a condutividade elétrica é manifestada pela movimentação de ions e é assim denominada de condutividade iônica.

Na natureza, a condutividade elétrica dos materiais apresenta uma gama de variação muito ampla. Em função da con



*resistiv.*  
Condu-  
tividade dos materiais, estes são enquadrados nas seguintes categorias:

- bons condutores  $\rho = 10^{-6} - 10 \text{ Ohm.cm}$
- condutores intermediários  $\rho = 100 - 10^9 \text{ Ohm.cm}$
- maus condutores  $\rho = 10^{10} - 10^{17} \text{ Ohm.cm}$

Os minerais que ocorrem na natureza possuem, em geral, uma resistividade bastante elevada. Por exemplo:

| <u>Mineral</u> | <u>Resistividade em Ohm.cm</u>  |
|----------------|---------------------------------|
| Magnetita      | 0,6 - $5 \times 10^3$           |
| Sal gema       | $3 \times 10^3 - 10^8$          |
| Hematita       | $5 \times 10^4 - 10^7$          |
| Limonita       | $1 \times 10^5 - 10^7$          |
| Calcita        | maior que $10^7$                |
| Feldspato      | maior que $10^7$                |
| Quartzo        | maior que $10^7$                |
| Mica           | $9 \times 10^4 - 9 \times 10^7$ |

(Bentz, 1961)

Quando isoladamente, os minerais que compõem a rocha possuem resistividades elevadas. As rochas formadas por estes minerais podem apresentar resistividade menor.

Um dos fatores, senão o principal, que influencia na condutividade de um sedimento é, além do seu conteúdo em água, a quantidade de eletrólito existente nessa água. A porosidade, o arranjo dos grãos, o conteúdo em argila, a temperatura da rocha também influenciam na condutividade.

Observou-se, frequentemente, em sedimentos estratificados, uma variação na condutividade nas medidas executadas paralela ou perpendicularmente aos estratos. A este efeito dá-se o nome de anisotropia elétrica onde



$$k = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_p}}$$

sendo  $\rho_n$  = resistividade normal às camadas e  $\rho_p$  = resistividade de paralela à foliação, e representa o coeficiente de anisotropia que poderá atingir valores de até 2,5.

Também a temperatura exerce certa influência na condutividade dos materiais. Em geral, um aumento de temperatura de 1°C implica no aumento de certo valor na condutividade. Em trabalhos normais de campo, como a espessura das camadas investigadas não é muito grande, essa variação de condutividade, em consequência do grau geotérmico, está situada dentro da exatidão das leituras e interpretações das mesmas.

*rocha!*

Em rochas sedimentares, variações na resistividade em função da granulometria, podem ocorrer de uma forma linear, quando se considera que não há muita diferença no diâmetro dos grãos (aumento da condutividade com a diminuição da granulação do material e coeficiente de uniformidade (Hazen)).

Não faltaram tentativas no sentido de se procurar estabelecer uma correlação entre a resistividade e o tipo do material bem como a sua porosidade. Ensaio de laboratório permitem representar essa relação que é dada pela fórmula de Archie.

$$\rho = \frac{\rho_w}{\phi^m S_w^2}$$

$\rho$  = resistividade do material

$\rho_w$  = resistividade da solução que satura o material

$\phi$  = porosidade total

m = fator de cimentação (medida de endurecimento)



Sw = saturação

(Bentz, 1961)

Esta fórmula é válida somente para sedimentos i-  
mentos de argila.

Tratando-se de eletrorresistividade aplicada à  
prospecção de água subterrânea, o fator  $S_w$ , dado pela água  
que satura o sedimento, é de capital importância. No entan-  
to, a resistividade da água possui também uma certa gama de  
variação, como se vê na tabela abaixo.

|   |              |
|---|--------------|
| água subterrânea (potável)                        | 80-300 Ohm.m |
| água ligeiramente salobra                         | 20-100 Ohm.m |
| água com 250 mg/l NaCl                            | 9 Ohm.m      |
| água altamente salobra (+de<br>1000 mg/l de NaCl) | 3-9 Ohm.m    |

(Bentz, 1961)

Na prática constatou-se que o fator de cimentação  
varia entre 1,3 para areias soltas e 2,6 para sedimentos bem  
cimentados. Para arenitos duros o seu valor é de 1,8.

Se o sedimento está completamente saturado ( $S_w=1$ ),  
teremos  $\rho = \frac{\rho_w}{\phi^m}$ . Para a relação  $\frac{1}{\phi^m}$  dá-se o nome de  
fator de formação cuja variação numérica é muito grande, va-  
riando de 4 até algumas centenas.

Nota-se, portanto, que o valor da resistividade de  
um material é também função da porosidade.

Pela prática verificou-se igualmente que sedimen-  
tos contendo material argiloso possuem resistividade menor.

|                |   |   |    |       |
|----------------|---|---|----|-------|
| argila         | 3 | - | 30 | Ohm.m |
| marga          | 5 | - | 50 | "     |
| argila arenosa | 7 | - | 60 | "     |

*Superior - v -  
(Mudon)*



|                  |      |   |                           |       |
|------------------|------|---|---------------------------|-------|
| arenito argiloso | 30   | - | 100                       | Ohm.m |
| filito           | 50   | - | 120                       | "     |
| areia, cascalho  | 70   | - | 5000                      | "     |
| calcário, gipso  | 70   | - | 5000                      | "     |
| cristalino       | 500  | - | 10 <sup>5</sup>           | "     |
| anidrita         | 3000 | - | maior que 10 <sup>5</sup> | "     |

(Bentz, 1961)

A presença de argila, por sua vez, diminui sensivelmente a permeabilidade do material. Conclusões sobre a eventual produtividade de um poço, em função da resistividade das camadas, devem ser tiradas com muito cuidado por causa da possível presença de NaCl ou outros sais na água que saturam os sedimentos.

A diminuição da resistividade em argilas é bem acentuada naquelas de origem marinha, onde a condutividade deve ser resultado do alto teor em eletrólitos ligados à água salgada fóssil, aparecendo o mesmo fenômeno pela adsorção da água por parte das ilitas e, ou outros minerais de argila.

## b) ELETORRESISTIVIDADE

### 1 - Introdução

Dos métodos geofísicos de prospecção, a sísmica e a eletrorresistividade são os mais usados na determinação da espessura de camadas dispostas horizontalmente ou de pequeno mergulho.

Enquanto que os métodos sísmicos proporcionam dados quanto a espessura e velocidade de propagação das ondas elásticas nas camadas, o método da eletrorresistividade fornece elementos referentes à espessura e à resistividade ( ou



condutividade) das camadas.

O princípio fundamental da eletrorresistividade consiste na determinação da distribuição das linhas de corrente, por meio de medidas executadas na superfície do terreno em se determinando a posição das linhas equipotenciais cuja posição depende da condutividade das camadas situadas em profundidade.

*ref. 1*

A eletrorresistividade é aplicável quando há diferenças relativamente grandes entre a resistividade das diversas camadas geológicas cuja espessura se quer determinar, e quando a espessura das camadas aumenta com a profundidade. Camadas delgadas situadas a profundidades relativamente grandes podem passar despercebidas. Quando camadas sofrem adelgaçamentos e espessamentos rápidos, podem ser interpretadas como sendo lentes.

## 2 - Distribuição do potencial

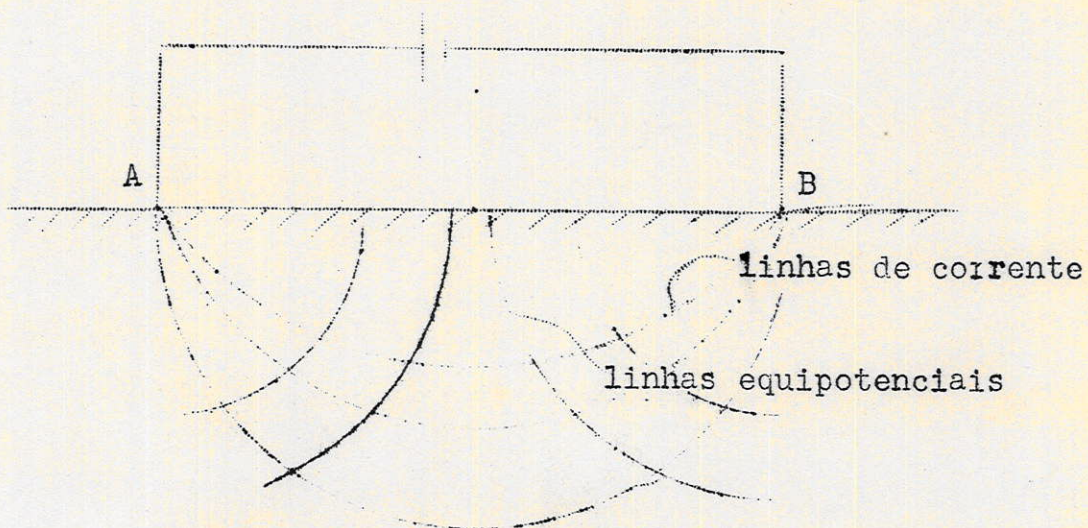


Fig. 1



Ao aplicarmos ao solo uma corrente elétrica de intensidade  $I$  por meio de dois eletrodos A e B, aparecerá um fluxo de corrente elétrica de A para B, cuja distribuição dependerá do meio de propagação. Se o meio fôr homogêneo e isotropo, a distribuição da corrente se fará de uma forma regular, onde o espaçamento entre as linhas de corrente aumenta com a profundidade. Perpendicularmente às linhas de corrente, podemos representar as linhas equipotenciais, que unem os pontos de mesmo potencial.

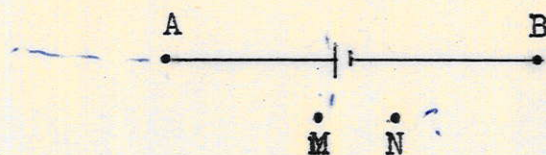
Verificou-se que a distribuição do potencial e o fluxo de corrente em um meio homogêneo, isotropo e contínuo, é análogo à distribuição do potencial e linhas de força em eletrostática, onde as cargas elétricas são substituídas por fontes de corrente e condutividade respectivamente.

Assim, uma carga pontual  $E$  em um meio dielétrico de constante  $k$  produz um potencial  $V = \frac{E}{4 \pi r k}$ , numa distância  $r$ , enquanto que uma corrente  $I$  em um meio de condutividade  $\sigma$  fornece um potencial  $V = \frac{I \rho}{4 \pi r}$

Se tivermos dois eletrodos A e B como fonte da corrente  $I$  ligados a um meio de resistividade  $\rho$ , o potencial em um ponto M será  $V_M = \frac{I \rho}{2 \pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right)$  onde  $r_A$  e  $r_B$  são as distâncias entre o ponto M e os eletrodos de corrente.

Supondo-se agora um ponto N qualquer, o potencial  $V_N$  será:

$$V_N = \frac{I \rho}{2 \pi} \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right)$$



$$AB = L$$

$$MN = d$$

-/-



A diferença de potencial  $\Delta V$  entre  $V_M$  e  $V_N$  será:

$$\Delta V = \frac{I \rho}{2 \pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad (1)$$

A partir da fórmula (1) podemos calcular a resistividade do material onde circula a corrente elétrica

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{2 \pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

onde o segundo membro recebe o nome de fator geométrico e depende da disposição dos eletrodos no terreno.

Portanto

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot k$$

### 3 - Procedimentos de campo

Dependendo dos arranjos entre os eletrodos e os pontos de observação no campo, obtemos procedimentos distintos, que são os seguintes:

- sondagem elétrica
- caminhamento elétrico
- perfil de poço

#### Sondagem elétrica

Se aplicarmos uma corrente elétrica por meio de dois eletrodos, espaçados de  $L$ , numa camada homogênea, isotrópica e de espessura infinita, as linhas de corrente e as linhas equipotenciais distribuem-se normalmente e o valor de resistividade medido na superfície corresponde ao valor da resistividade real da camada.

Imaginemos uma seqüência de duas camadas (1) e (2) com resistividade  $\rho_1$  e  $\rho_2$  respectivamente onde  $\rho_1 \gg \rho_2$ . Enquanto a espessura  $h_1$  da primeira camada for muito maior



que  $L/2$ , as linhas de corrente distribuem-se normalmente e de forma regular. Vamos supor agora que esta segunda camada (de espessura infinita) se aproxime lentamente em direção à superfície até a posição onde a relação  $L/2 = 1$ . Em razão da alta resistividade desta segunda camada, a posição das linhas equipotenciais e linhas de corrente vai lentamente se alterando, em face da concentração das linhas de corrente na 1ª camada. Os valores de  $\zeta_a$  agora medidos na superfície diferem do valor  $\zeta_1$  obtido anteriormente. Em consequência do adernamento sofrido pelas linhas equipotenciais, o valor de  $V$  medido entre M e N torna-se maior.

Mantendo-se os eletrodos em A e B e diminuindo-se a espessura da 1ª camada, numa relação  $L/2 = 2$ , as linhas de corrente sofrem uma concentração maior nesta primeira camada aumentando mais o valor  $\Delta V$ , por conseguinte  $\zeta_a$  medido na superfície (figura 2).

Imaginemos agora que a primeira camada seja de espessura infinitamente pequena  $L/2 \rightarrow h \rightarrow \infty$ . Neste momento as linhas de corrente fluem praticamente todas pela segunda camada. Os valores de  $\zeta_a$  medidos na superfície correspondem praticamente aos valores de  $\zeta_2$ , ou seja, a resistividade da segunda camada.

Na natureza, porém, é possível realizar-se uma tal operação, ou seja manter o espaçamento  $L/2$  constante e alterar a espessura  $h$ . É possível porém, alterar a relação  $L/2/h$  mantendo-se constante  $h$  e variando  $L/2$ . Aumentando-se o espaçamento  $L/2$  entre os eletrodos de corrente efetua-se uma operação equivalente a de aproximar à superfície a camada situada em profundidade (Krajew, 1957).



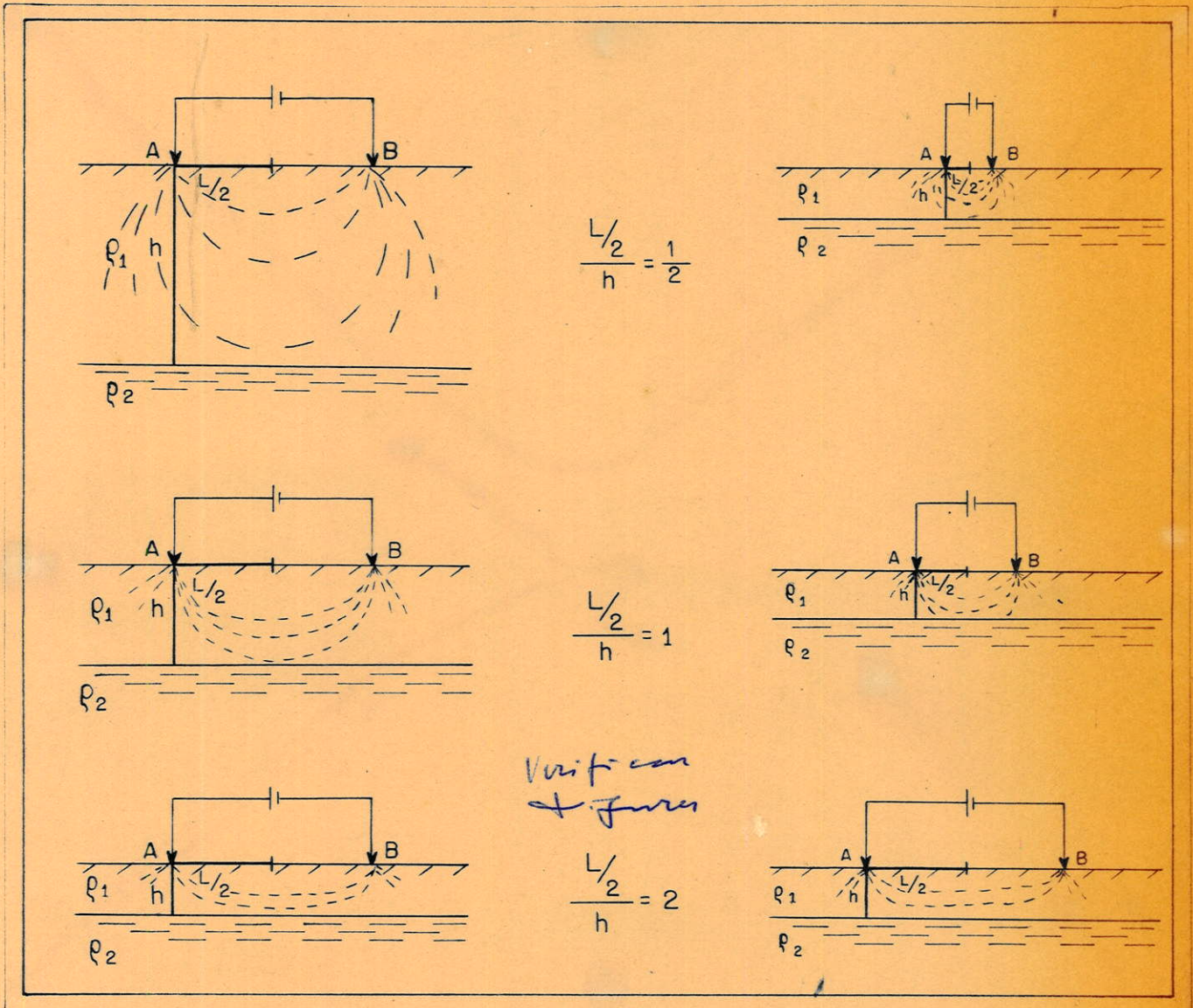


Fig. 2 Esquema da relação  $L/2 / h$



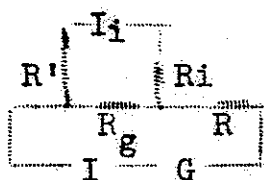
Este procedimento de aumentar o espaçamento entre os eletrodos de corrente e a medida de  $S_a$  na superfície é a sondagem elétrica.

Se fizermos passar uma corrente elétrica por um eletrodo fincado na superfície do terreno, aparecerá uma diferença de potencial entre a superfície do eletrodo e o material onde o eletrodo estiver colocado. Essa resistência é chamada "resistência de contato" e depende, entre outros fatores, da forma e tamanho dos eletrodos, do material formador do solo, da umidade do solo e da presença de ions.

Para determinar a resistividade  $\rho$  segundo:

$$S = \frac{\Delta V}{I} \cdot k, \text{ poderíamos usar somente dois eletrodos A e B.}$$

Se usarmos os mesmos eletrodos para medir a diferença de potencial entre os dois pontos, aparecerá na fórmula o valor da resistência de contato, que altera o real valor da resistividade que se quer medir. A fim de contornar este problema, e portanto, eliminar o erro que a resistência de contato introduz, empregam-se quatro (4) eletrodos, sendo dois para medir a diferença de potencial entre M e N e dois eletrodos para fazer contato entre o solo e a fonte de corrente.



- $R'$  = Resistência de contato
- $R_i$  = Resistência do instrumento
- $R_g$  = Resistência do solo
- $R$  = Resistência do restante do material

$$V_{12} = (I - I_1) R_g$$

$$V_i = I_i R_i$$

$$V = V_g = V_i = IR_g - I_i (R_i + R_g)$$

$$I_i = I \frac{R_g}{R_g + R' + R_i}$$

Fig. 3

( V.Fritsch, 1949) -/-



Os dados de  $\rho_a$  obtidos por meio da sondagem elétrica são representados gráficamente sob a forma de curvas. Estas curvas são traçadas numa escala bi-logarítmica, onde no eixo das abscissas se representa a distância AB/2 (meia distância entre os eletrodos de corrente) e no das ordenadas o valor da resistividade aparente medida no campo.

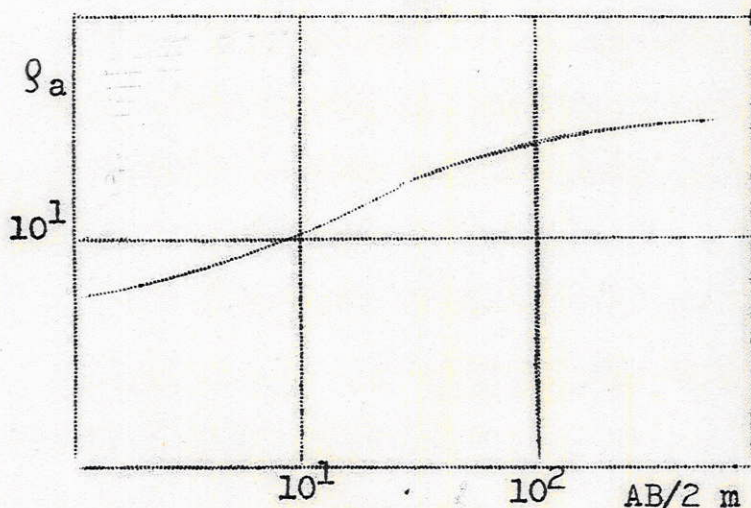


Fig. 4

Os valores de  $\rho_a$  medidos na superfície do terreno, em razão da influência progressiva da camada inferior, fornecem uma curva suave, ausente de picos (Bentz, 1961).

Para se medir o valor de  $\rho_a$ , os eletrodos são dispostos segundo um arranjo qualquer. Sendo plana a superfície do terreno, pode-se representar a posição dos eletrodos segundo um sistema de dois eixos e então calcular-se o fator k.

$$A = x_1 ; y_1$$

$$M = x_3 ; y_3 \quad (z_3)$$

$$B = x_2 ; y_2$$

$$N = x_4 ; y_4 \quad (z_4)$$

A fórmula para o cálculo de k será:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right] - \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}} \right]$$

-/-



No caso de aparecerem diferenças de nível entre os eletrodos de potencial e os eletrodos de corrente teremos:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2\pi} \left[ (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + \rho_3^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[ (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + \rho_3^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[ (x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + \rho_4^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \left[ (x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2 + \rho_4^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

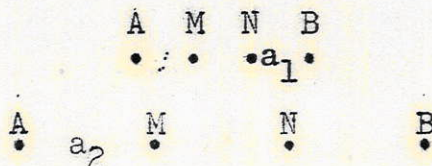
Fig. 5 (V. Fritsch, 1949) ?

Para facilitar não só os trabalhos de campo mas também o cálculo do fator k, procura-se executar, sempre que possível, sondagens elétricas em regiões planas. Os arranjos mais usados são

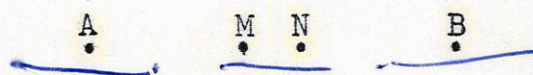
arranjo Wenner

arranjo Schlumberger

Segundo o arranjo Wenner, os eletrodos AMNB estão dispostos de forma linear e onde o espaçamento entre os eletrodos é sempre igual ( $a_1, a_2, a_3, \dots$ )



Pelo arranjo Schlumberger os eletrodos estão dispostos também numa forma linear e onde o espaçamento  $\overline{AB}$  é no mínimo cinco (5) vezes maior que o espaçamento  $\overline{MN}$ .



O espaçamento entre os eletrodos, no início de uma sondagem elétrica, é em geral pequeno, a fim de medir a resistividade das camadas superficiais. Normalmente se inicia



uma sondagem elétrica (p. ex. segundo o arranjo Schlumberger) com espaçamento  $\overline{AB} = 3$  e  $\overline{MN} = 1$ . Depois de feitas as medidas de  $V$  e  $I$ , deslocam-se para fora os eletrodos de modo que  $A_1B_1 = 4m$ . Uma vez determinado o valor de  $\rho_a$  para este ponto deslocam-se os eletrodos para uma nova posição  $A_2B_2 = 5m$  e assim sucessivamente.

Segundo o arranjo Wenner, calcula-se a resistividade de pela fórmula:

$$\rho = 2 \pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Quando se emprega o arranjo Schlumberger a fórmula para a determinação da resistividade será:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{2 \pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad \begin{matrix} r_{AM} = r_{BN} = \frac{L}{2} - d \\ r_{AN} = r_{BM} = \frac{L}{2} + d \end{matrix}$$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot 1.571 \cdot d \left[ \left( \frac{\frac{L}{2}}{a} \right)^2 - 1 \right]$$

Se em lugar de usar a meia distância entre os eletrodos usarmos a distância total teremos:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot 0.785 \overline{MN} \left[ \left( \frac{\overline{AB}}{\overline{MN}} \right)^2 - 1 \right]$$

onde o fator geométrico é facilmente calculado pela régua de cálculo.

As medidas de diferença de potencial  $\Delta V$  entre os eletrodos de potencial  $\overline{MN}$  e a medida da intensidade da corrente  $I$  que circula pelo solo entre os eletrodos  $A$  e  $B$  bem como o fator geométrico  $k$ , permitem calcular o valor da resistividade  $\rho$  nêstes pontos  $A_1B_1, A_2B_2, \dots, A_nB_n$ .



Os valores de resistividade assim obtidos nem sempre correspondem ao valor da resistividade real da camada (depende da relação entre as resistividades das camadas e da relação  $L/2/h$ ), mas sim às resistividades aparentes.

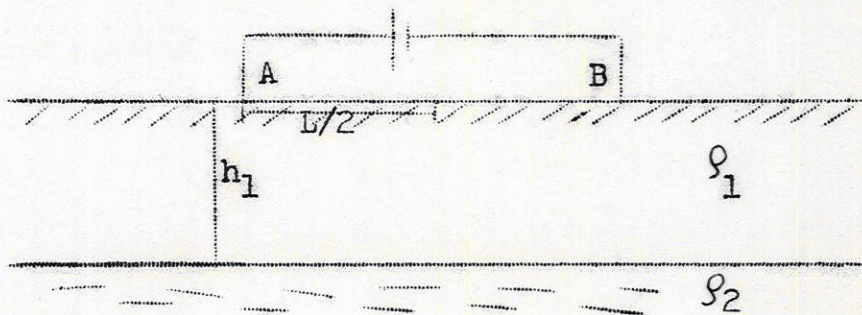


Fig. 6

Se a relação for  $L/2/h \ll 0$ , os valores de  $\rho_a$  obtidos serão os mesmos  $\rho_1$ . Porém, se  $L/2/h=1$ , os valores de  $\rho_a$  obtidos não mais serão iguais à  $\rho_1$ , porque a segunda camada, em função de sua alta ou baixa resistividade, alterará a posição das linhas equipotenciais, determinando assim o aparecimento de um valor  $\rho_a \neq \rho_1$ . Quando  $L/2/h \rightarrow \infty$ , os valores de  $\rho_a \rightarrow \rho_2$ .

Porém se tivermos:

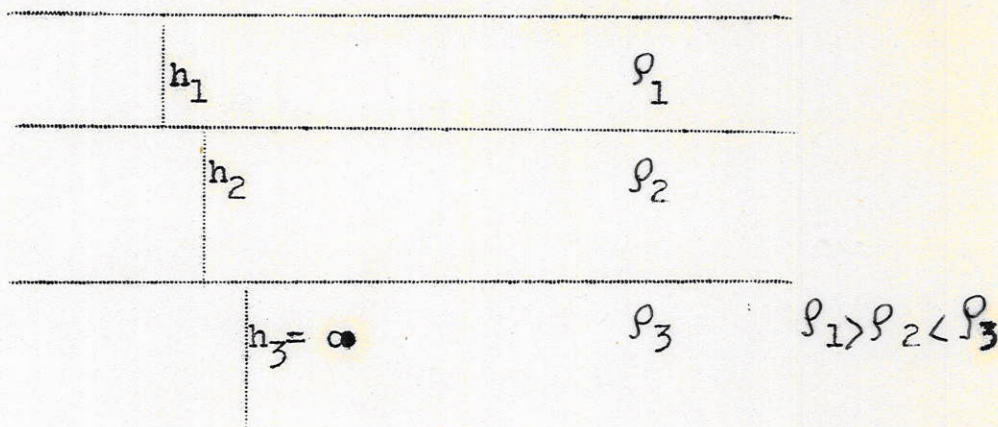


Fig. 7



para uma relação  $L/2/h$  muito pequena, os valores de  $\rho_a$  serão iguais à  $\rho_1$ . Com o aumento no espaçamento  $AB/2$ , portanto  $L/2$ , os valores de  $\rho_a$  obtidos, em consequência da resistividade da segunda camada, tenderão à aproximar-se ao valor

$\rho_2$ . Se a espessura desta segunda camada não fôr muito elevada, os valores de  $\rho_a$  serão diferentes de  $\rho_2$  em face da influência de  $\rho_1$  que persiste e também de uma certa influência de  $\rho_3$  que já começa a aparecer. Se a terceira camada possui uma espessura  $= \infty$ , um aumento no espaçamento  $AB/2$  proporciona valores de  $\rho_{a3}$  que tendem à aproximar-se de  $\rho_3$ .

A forma da curva da sondagem elétrica é função da relação entre as espessuras bem como as resistividades das diferentes camadas que formam o conjunto litológico.

Nos trabalhos de campo realizados para a elaboração deste trabalho, todas as sondagens elétricas foram executadas segundo o arranjo Schlumberger.

Este arranjo foi preferido por apresentar as seguintes vantagens:

- a - menor tempo requerido
- b - menor número de ajudantes
- c - menor interferência por parte das correntes telúricas (mantendo-se o espaçamento MN o menor possível).
- d - material de interpretação calculado para sondagens elétricas executadas segundo esse arranjo.

Na execução de sondagens elétricas, segundo o arranjo Schlumberger, é necessário mudar a posição dos eletro-



dos  $\overline{MN}$ , quando o espaçamento  $\overline{AB}$  atingir um certo valor ( que depende do equipamento empregado) pois a diferença de potencial a ser medida torna-se tão pequena que ultrapassa a sensibilidade do equipamento.

Nas sondagens elétricas por nós realizadas, manteve-se o espaçamento  $\overline{MN} = 1m$  até  $\overline{AB} = 40m$ , quando então o espaçamento  $\overline{MN}$  era ampliado para  $4m$ . Mantendo-se  $\overline{AB} = 40m$  e ampliando-se de  $1$  para  $4m$  o espaçamento  $\overline{MN}$ , verificou-se que os valores de  $g_a$  então obtidos eram diferentes daqueles com espaçamento  $\overline{MN} = 1m$ . Esta diferença nos valores é produto de irregularidades no terreno (superficiais e sub-superficiais).

Para grandes distâncias de  $\overline{AB}/2$  foram empregados espaçamentos  $\overline{MN}$  de  $40$ ,  $80$  e às vezes  $100m$ . Aconteceu, que às vezes, ao empregar-se estes espaçamentos de  $\overline{MN}$ , apareceram sérias dificuldades ligadas à presença das correntes telúricas.

As correntes telúricas são correntes elétricas naturais que circulam pela crosta da terra, sob a forma de lençóis, e podem trazer sérias dificuldades quando se executa uma sondagem elétrica, provocando diferenças de potencial que variam de  $1-100$  mV/km. Assim sendo, para um espaçamento  $\overline{MN} = 100m$  podem ocorrer diferenças de potencial de até  $10mV$ , ou seja, valores superiores àqueles provocados pela corrente aplicada aos eletrodos A e B. A maior dificuldade apresentada pelas correntes telúricas é a sua ação intermitente, variando de intensidade num pequeno intervalo de tempo, tempo este da ordem de segundos.

#### Caminhamento elétrico

Quando o mergulho das camadas atinge um certo valor (da ordem de  $15^\circ$ ) a sondagem elétrica não mais pode ser



usada com a finalidade de se determinar a resistividade e a espessura das camadas. As curvas obtidas em camadas inclinadas não permitem uma interpretação segura porque as curvas padrão calculadas admitem sempre camadas horizontais e de espessura constante. Nestes casos pode-se empregar o caminhamento elétrico.

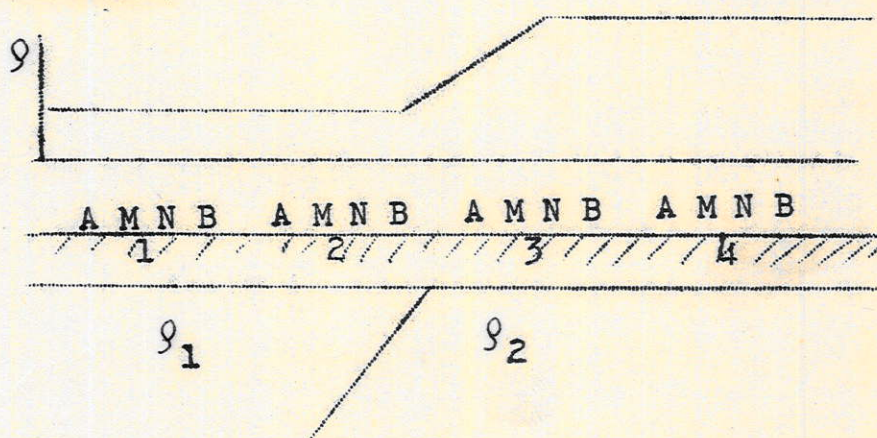


Fig. 8

(Sorokin, 1963)

Por caminhamento elétrico entende-se o processo no qual um sistema de 4 eletrodos AMNB se desloca sobre uma área, cobrindo uma rede de pontos de observação. Em cada ponto determina-se a resistividade. A partir destes dados constroem-se então mapas de isoresistividade ou perfis de resistividade. Nas medidas, o ponto de observação corresponde àquele situado entre M e N.

É de capital importância a escolha do espaçamento entre os eletrodos de modo a alcançar as camadas e obter-se as informações desejadas.

Perfil de poço.

Perfil de poço (well-log, carottage) é o processo no qual um arranjo de eletrodos é introduzido no poço a fim



de, entre outros fatores (potencial espontâneo, eletro-osnose, radiação, etc.), determinar a resistividade real das camadas atravessadas pela sondagem.

Quando se executa uma sondagem elétrica, os valores da resistividade obtidos na superfície correspondem a resistividades aparentes, a menos que a camada tenha uma espessura muito grande. Mesmo assim, este valor é o produto da integração de todos os valores unitários de resistividade correspondentes às pequenas variações litológicas dentro das camadas.

No perfil de poço é possível detectar-se variações na resistividade correspondentes a delgadas variações litológicas.

#### 4- INTERPRETAÇÃO DAS CURVAS

Uma vez determinado o valor da resistividade aparente para um determinado espaçamento  $AB/2$ , este é marcado numa folha dividida bilogarithmicamente. Esta marcação de  $\rho_a$  é feita em função de  $AB/2$ , onde, em ordenadas, é representado o espaçamento  $AB/2$  em metros e, em abcissas, o valor de  $\rho_a$  em Ohm.m.

A finalidade da interpretação das curvas de sondagem elétrica é fornecer a resistividade real da camada e sua espessura num dado ponto.

Para a interpretação de uma curva obtida em medidas executadas num certo local onde temos duas camadas

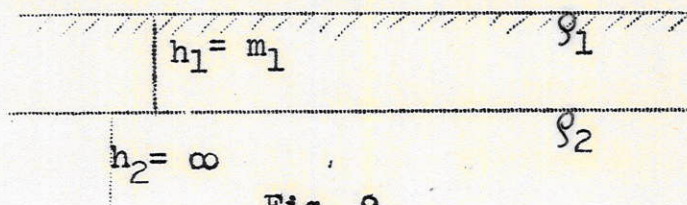


Fig. 9



usam-se curvas-padrão (ábacos) calculados por Schlumberger- (1933-1936 CGG). Estas curvas foram calculadas em função da relação entre as resistividades  $\rho_2/\rho_1$ , onde  $d_1$  e  $\rho_1$  é igual à 1.

A interpretação das curvas medidas no campo, é sempre feita de maneira comparativa. A curva de campo é desenhada em papel transparente sendo então colocada sobre as curvas-padrão, verificando-se qual das curvas-padrão coincide com a curva obtida. A origem do sistema de eixos (cruz) da curva-padrão determina, a espessura na ordenada da curva medida e, na abcissa, a resistividade desta primeira camada. A relação  $\rho_2/\rho_1$  (da curva-padrão) determina o fator de multiplicação pelo qual a resistividade da primeira camada deve ser multiplicada a fim de fornecer o valor da resistividade da segunda camada.

Na natureza, dificilmente se apresenta o caso de uma simples seqüência de duas camadas. Mais comumente se encontram curvas que representam seqüências de três (3) ou mais camadas. Para possibilitar a interpretação destas curvas, foram calculadas diversas curvas-padrão onde se relaciona  $\rho_2/\rho_1$ ,  $\rho_3/\rho_2$ ,  $m_1 = 1, m_2 = x, m_3 = \infty$ . Entre essas curvas pode-se citar o catálogo de curvas calculadas pela Compagnie Générale de Geophysique e publicado pela Geophysical Prospecting (1955).

A interpretação das curvas de três camadas é feita também de maneira comparativa com uma curva-padrão, como acontece com as de duas camadas.

Freqüentemente, aparecem ainda curvas correspondentes a pacotes litológicos constituídos de mais de três camadas



das. Neste caso podem-se usar curvas-padrão de 4 camadas. Estas são de difícil cálculo e muito numerosas em razão do grande número de combinações de seus parâmetros. É mais fácil, nestes casos, interpretá-las com o auxílio de gráficos. Para tal fim existem vários gráficos, entre outros:

- a - gráfico de Cagniard
- b - curvas de Hummel (curvas de mínimo)
- c - curvas para descensão dupla
- d - curvas para ascensão dupla
- e - curvas para o tipo de máximo



## EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

As medidas executadas a fim de coletar dados para a elaboração deste trabalho foram realizadas por meio de equipamentos de corrente alternada e corrente contínua.

### a - CORRENTE ALTERNADA

As determinações de resistividade em amostras de água foram executadas por meio de um equipamento de corrente alternada, pois nessas medidas o emprego de corrente contínua implica no aparecimento de eletrólise e polarização.

O equipamento usado, de procedência sueca, marca "Earth Resistivity, ABEM", fornece uma corrente alternada de 16 cps. A fonte de corrente deste equipamento é um gerador, acionado manualmente por meio de uma manivela. A tensão da saída pode ser de 20V, 200V ou 400V.

As leituras do instrumento fornecem diretamente a relação  $R = \frac{V (MN)}{I (AB)}$

Em face de seu pequeno peso e tamanho, o equipamento tem a vantagem de poder ser transportado para locais de difícil acesso.

Em trabalhos de campo verificou-se que a curva obtida a partir da execução de uma sondagem elétrica em locais onde uma segunda camada de boa condutividade está situada entre uma camada superficial de resistividade relativamente alta e o embasamento cristalino, a curva, na sua parte final, apresenta ângulos com o eixo das abcissas que podem atingir até 60° (lembrando que o ângulo que o ramo ascendente da cur



va correspondente ao embasamento cristalino, faz com o eixo das abcissas, é de  $45^\circ$ ).

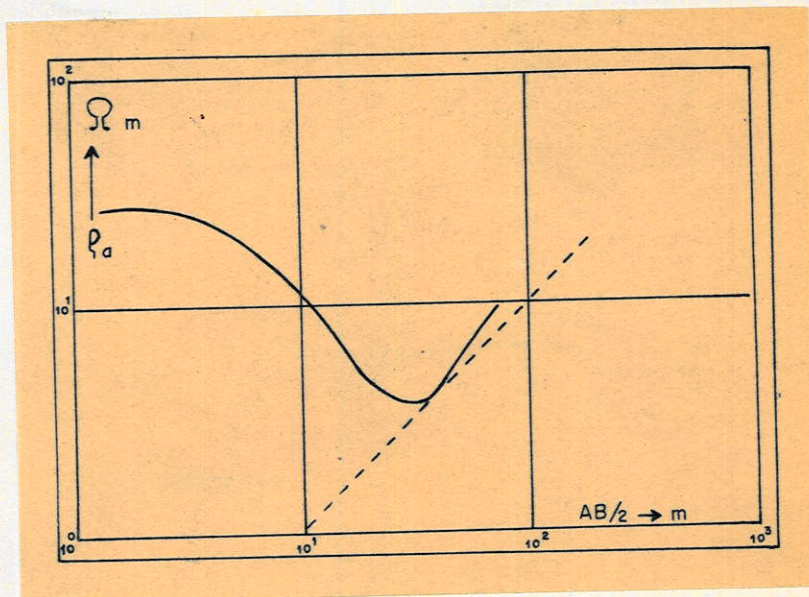


Fig. 10

A aplicação deste equipamento é normalmente limitada por:

- presença de corrente alternada com origem ligada à existência de estradas de ferro, centros urbanos, indústrias, etc.
- quando o fator  $R$  a ser medido é muito pequeno, ou seja, quando há uma camada de resistividade de muito baixa sob camadas de resistividade relativamente alta.

Para elaboração deste trabalho, não foram executadas sondagens elétricas usando-se o equipamento ABEM.

#### b - CORRENTE CONTÍNUA

Nas sondagens elétricas, foi utilizado o resistímetro CC - modelo RK-1962. Este equipamento, construído na Cadeira de Geologia Estrutural e Geofísica Aplicada, pelo Prof. Dr. Rudolf Kollert, consta das seguintes partes:

- Grupo Gerador



- Painel de contrôle
- Potenciômetro
- Amplificador
- Acessórios

### 1 - Grupo Gerador

Para a obtenção de dados sôbre o comportamento geológico elétrico das formações geológicas, foi utilizado, como fonte de corrente, um grupo gerador com potência de 2 kW e 500V de tensão.

O grupo gerador consta de dois geradores Carnos, a coplados à um motor a gasolina, montados numa plataforma de madeira.

O gerador menor, ou seja a excitatriz, possui um ímã permanente e a tensão de saída é de 120 V. A corrente gerada pela excitatriz serve, em princípio, para alimentar o campo magnético do gerador principal. O gerador principal tem uma potência de 2 kW com tensão de saída de 500 V.

### 2 - Painel de contrôle

Esta parte do equipamento tem por função regular a voltagem da corrente a ser aplicada aos eletrodos A e B, bem como permitir a leitura da intensidade da corrente  $I$  que circula pelo solo. O painel está colocado em série entre o grupo gerador e os eletrodos de corrente.

Os trechos iniciais (normalmente até  $AB/2=50m$ ) foram medidos usando-se a excitatriz como fonte de corrente. Um reostato permite a variação na voltagem da corrente a ser aplicada ao solo. Para espaçamentos maiores que  $AB/2=50m$ , ucou-



se como fonte de corrente o gerador principal.

A fim de medir a intensidade  $I$  de corrente que circula pelo solo empregou-se um miliamperímetro 0-10 mA, Engro. A utilização de um "shunt" possibilita leituras até 5 A.

### 3 - Potenciômetro

Esta parte do equipamento tem por finalidade medir as diferenças de potencial entre os eletrodos M e N.

O princípio deste aparelho é baseado sobre a utilização de uma fonte galvânica de corrente, de um galvanômetro, de resistências e de um circuito de compensação.

Quando se aplica uma corrente elétrica aos eletrodos A e B, aparece uma diferença de potencial entre N e M. A presença desta diferença de potencial é acusada pela deflexão sofrida pela agulha do galvanômetro. A fim de eliminar esta deflexão do galvanômetro, e por conseguinte a diferença de potencial entre M e N, é necessário aplicar uma corrente elétrica de mesmo valor e sentido contrário. Esta corrente é proveniente da célula galvânica e o seu valor é determinado pelas resistências do circuito. A construção do equipamento é tal que as leituras são feitas diretamente em milivolts.

Se porém, antes de se aplicar a corrente aos eletrodos A e B, o galvanômetro acusar qualquer deflexão, provocada por polarização, por corrente telúrica, etc. esta deverá ser eliminada. Para eliminar esta diferença de potencial é necessário enviar uma corrente de mesmo valor e sentido contrário que a existente entre os eletrodos M e N. A fonte de corrente para esta operação é outra célula galvânica de 1,5V. Durante as medidas das diferenças de potencial entre M e N é



necessário que esta corrente proveniente do circuito de compensação permaneça no circuito de medida.

O galvanômetro empregado foi um microamperímetro 0-25-0, Engro, de fabricação nacional.

Por meio deste potenciômetro são possíveis medidas de diferença de potencial de 0,1 à 1.000 mV. Nos trabalhos de campo verificou-se que as leituras dos valores de diferença de potencial inferiores à 0,3 mV, são difíceis.

#### 4 - Amplificador

Com o fim de ampliar as correntes provenientes da diferença de potencial entre os eletrodos M e N, tornando mais exatas as leituras e facilitando os trabalhos de campo, foi empregado um amplificador transistorizado com um poder de amplificação de cerca de 30 vezes.

#### 5 - Acessórios

##### - Telefone

A comunicação entre o operador que executa as medidas e os auxiliares encarregados das mudanças dos eletrodos de corrente foi facilitada com o emprêgo de um circuito telefônico, pois, frequentemente, os espaçamentos AB/2 atingiam distâncias superiores à 500 m, não raro 1.000m.

Este circuito telefônico, com volta pela terra, foi construído de maneira a utilizar para as comunicações, o mesmo cabo que leva a corrente aos eletrodos A e B. Para evitar acidentes, foi instalado além de um condensador (entre o telefone e o cabo), uma chave de segurança; um relé proporciona o circuito de chamada.



Mesmo com resistências de contato superiores à 20.000 Ohm verificou-se a perfeita aplicabilidade deste circuito telefônico.

- Cabos

Os cabos empregados na ligação entre a central de medida e os eletrodos, são de número 18, com cobertura plástica.

- Eletrodos

Os eletrodos usados, tanto para as medidas de diferença de potencial, como os eletrodos de corrente, são hastes sextavadas de latão. O comprimento varia de 0,25 à 1,20m com um diâmetro de  $3/4$ ".

Para as medidas de diferença de potencial por meio dos eletrodos M e N com espaçamento 1 m, foram usados sempre os eletrodos de 0,25 m de comprimento, com uma profundidade de enterramento de 0,10 m.

O uso dos eletrodos sextavados foi determinado pela maior facilidade de retirada, mesmo quando enterrados à profundidades superiores a 0,50 m, em solos argilosos.



ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO

a-GRUPO TUBARÃO ( PERMO-CARBONÍFERO)

Seguindo o esquema traçado na programação deste trabalho, as pesquisas de campo tiveram o seu início em locais onde as seqüências estratigráficas são as seguintes.

- Grupo Tubarão
- 1) Embasamento cristalino  
Diabásio
  - 2) Grupo Tubarão  
Embasamento cristalino

*Segue*

As localidades escolhidas para os trabalhos de campo foram: Campinas, Itú (Caiacatinga), Sorocaba (Utinga), Porto Feliz (Jupira), Boituva e Cerquilha. As sondagens elétricas foram executadas nesses locais para a obtenção de dados referentes ao comportamento geoeletrico dos sedimentos do Grupo Tubarão em pontos situados a diferentes distâncias da borda da bacia sedimentar do Paraná.

1) Campinas.

Na Fazenda Experimental "Theodoreto de Camargo" , foram executadas seis (6) sondagens elétricas- (fig. 11 e 12).

Esta Fazenda foi escolhida como área de pesquisa pelas seguintes razões:

- existência de seis (6) poços profundos
- embasamento cristalino à profundidade relativamente pequena
- duas seqüências litológicas diferentes

As curvas ER-1, ER-2, ER-3 e ER-6 (fig. 13) correspondem a sondagens elétricas executadas em locais onde o embasamen-



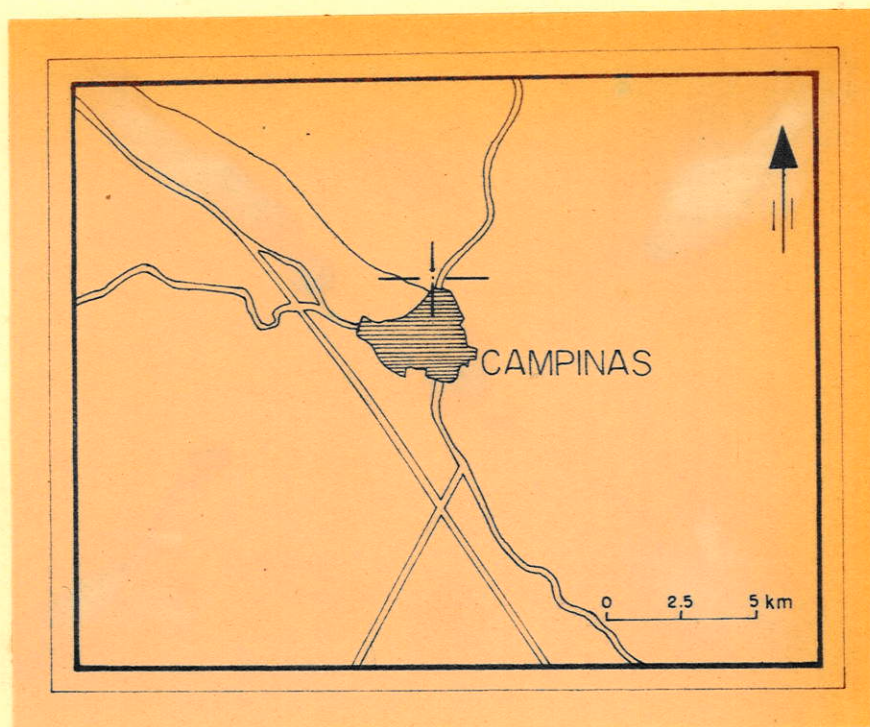


Fig. 11 Mapa de localização da área da figura 12.

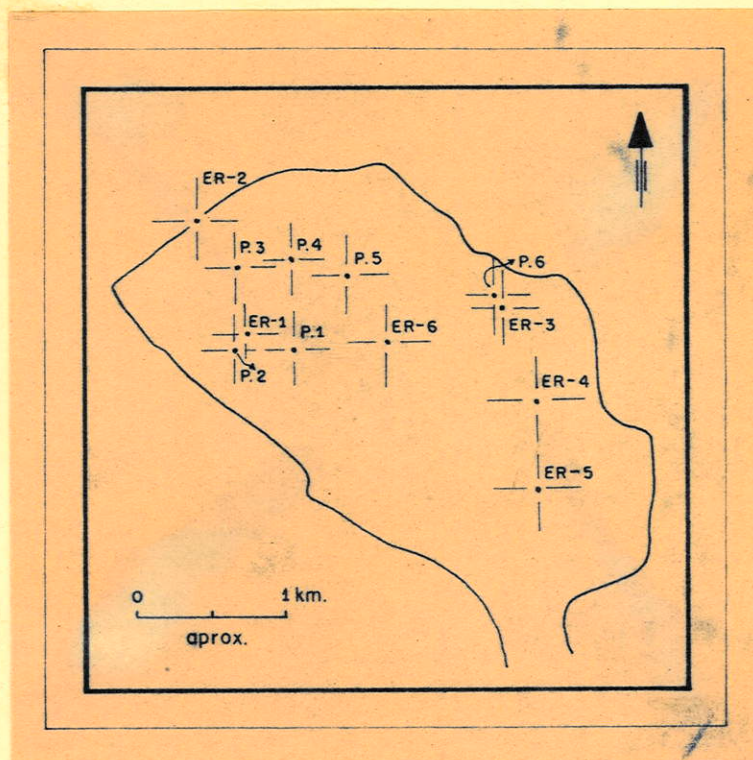


Fig. 12 Mapa esquemático da Fazenda Experimental "Theodoreto de Camargo" com a localização dos poços e pontos pesquisados.



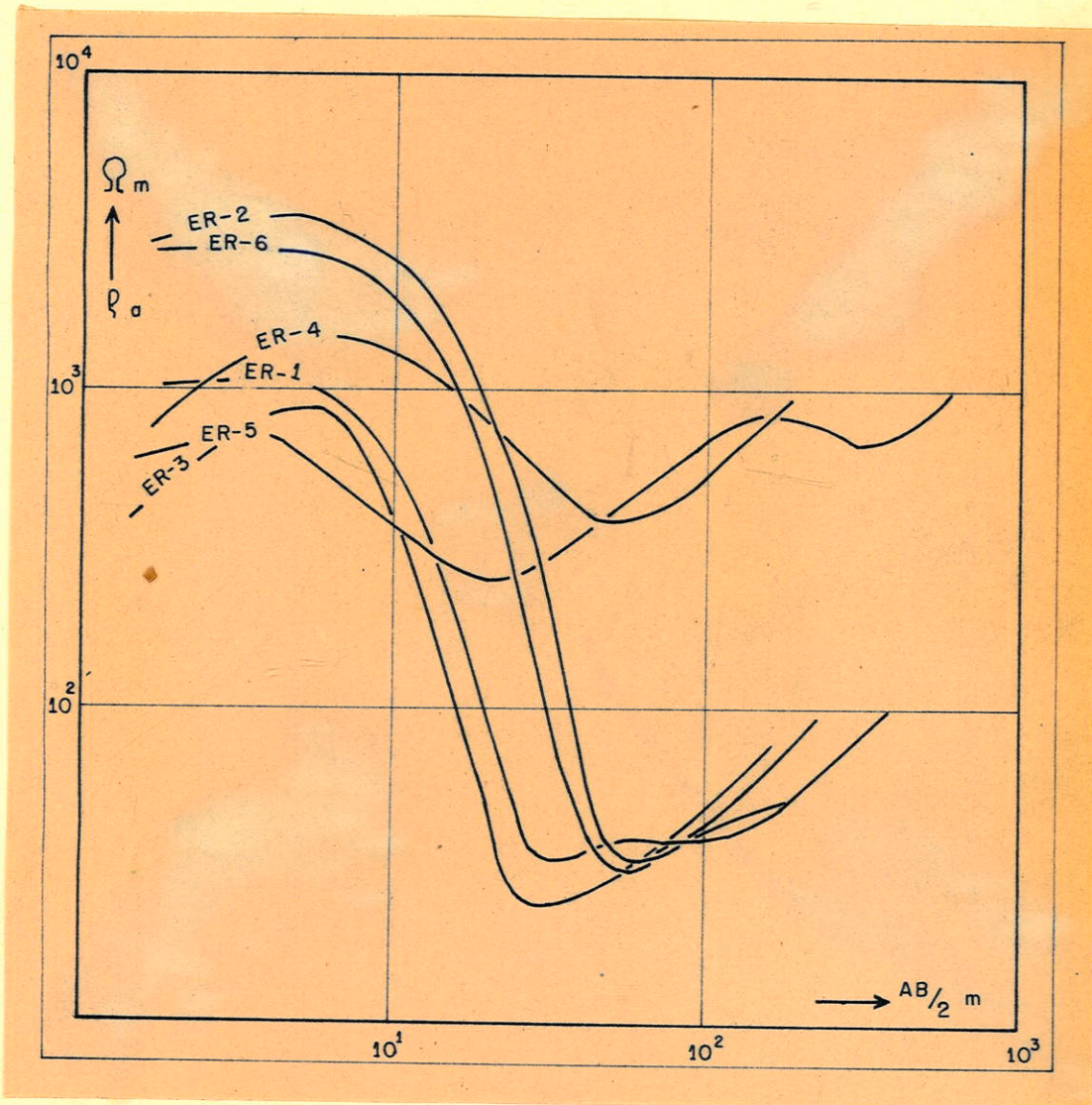


Fig. 13 Curvas ER-1,ER-2,ER-3,ER-4,ER-5,ER-6



to cristalino está coberto pelos sedimentos do Grupo Tubarão.

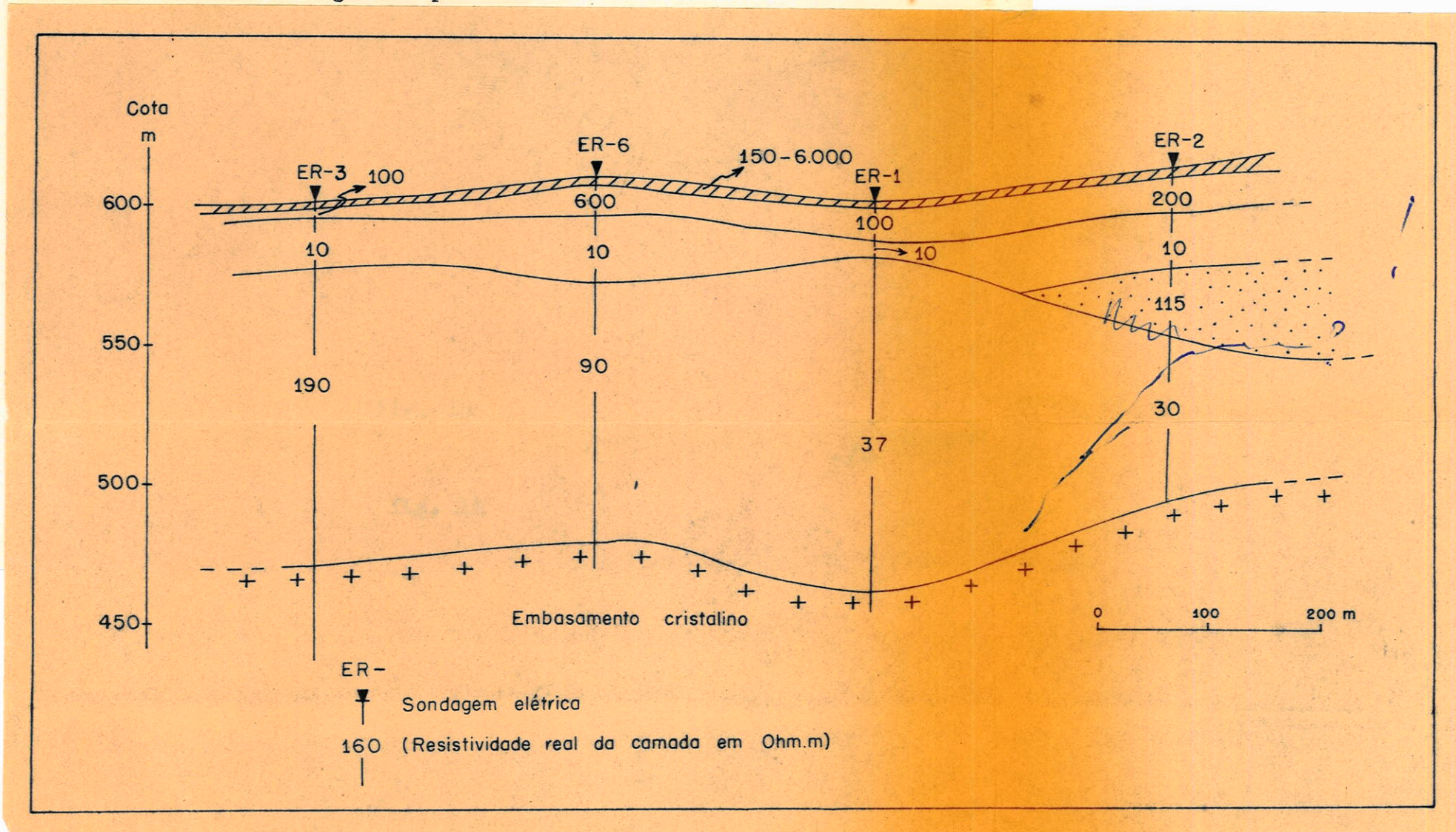
As sondagens ER-4 e ER-5 (fig. 13) referem-se àquelas executadas em locais onde, na superfície, aflora diábasio alterado, seguindo, em profundidade, os sedimentos do Grupo Tubarão sobre o embasamento cristalino.

Pela interpretação das sondagens elétricas são obtidos os seguintes dados:

| ER-1  |          | ER-2     |          | ER-3  |          | ER-6 |          |
|-------|----------|----------|----------|-------|----------|------|----------|
| d     | $\rho$   | d        | $\rho$   | d     | $\rho$   | d    | $\rho$   |
| 1,3   | .900     | 1,0      | 2.500    | 0,7   | .150     | 1,5  | 2.400    |
| 3,0   | 1.350    | 6,9      | 4.600    | 0,7   | 6.000    | 3,3  | 3.600    |
| 8,3   | 100      | 9,0      | 200      | 8,0   | 100      | 8,8  | 600      |
| 4,8   | 10       | 19,0     | 10       | 19,0  | 10       | 25,0 | 10       |
| 120,0 | $\infty$ | 25,0     | 115      | 105,0 | 190      | 91,0 | 90       |
|       |          | 60,0     | 30       |       | $\infty$ |      | $\infty$ |
|       |          | $\infty$ | $\infty$ |       |          |      |          |

Os valores de  $d$  correspondem às espessuras das camadas individuais, em metros. Os valores de  $\rho$  referem-se à resistividade de cada camada em Ohm.m.

Baseados na interpretação das curvas das sondagens elétrica obtemos o seguinte perfil:





Analisando-se o perfil acima, nota-se a existência de uma sucessão de camadas de alta e baixa resistividade. Os valores de  $\rho$  variam de 10 à 6.000 Ohm.m. Os valores baixos correspondem a camadas com alto teor em argila, enquanto que valores altos de  $\rho$  referem-se a camadas da superfície, arenosas e secas.

A curva correspondente à sondagem elétrica ER-3, estabelecida por medidas feitas nas proximidades do poço P-6 (poço executado pelo I.G.G., 1957/58), apresenta a partir de  $AB/2 = 40m$  um ramo ascendente que poderia ser tomado como sendo do aquele que faz um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo das abcissas, ou seja, a camada correspondente ao embasamento cristalino.

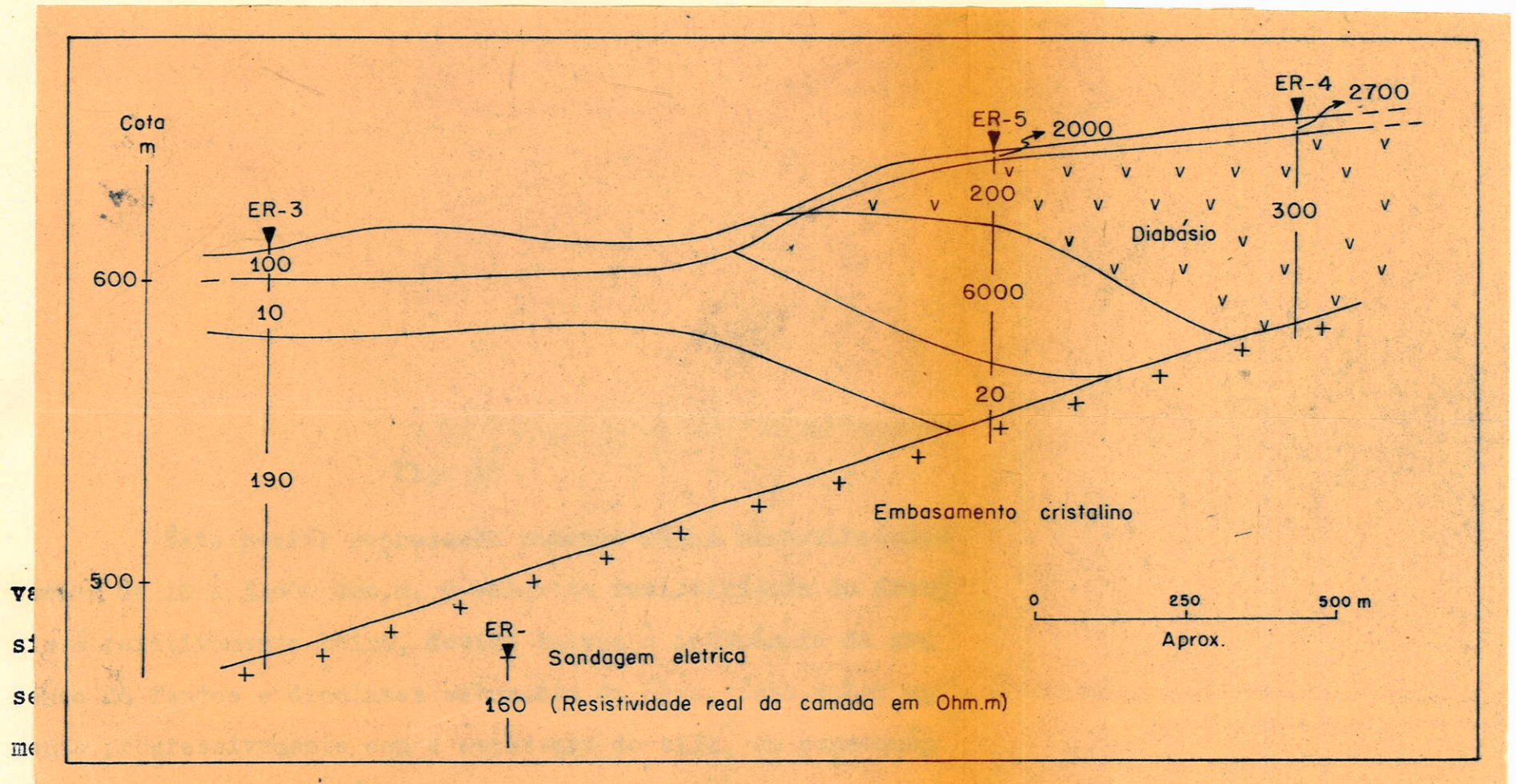
Uma interpretação puramente geofísica forneceria a profundidade do embasamento da ordem de 35 metros, o que, segundo os dados da perfuração, não corresponde à realidade. Como o poço P-6 está revestido, não nos foi possível fazer um perfil de poço para determinar o valor real de resistividade desta camada sobreposta ao embasamento cristalino. Foram assim usadas na interpretação, diferentes curvas-padrão (curvas de duas camadas) até que o valor obtido, correspondente à profundidade do embasamento cristalino, coincidissem com o valor obtido na perfuração. A curva-padrão que satisfêz este requisito foi aquela que atribui o valor de 190 ohm.m à resistividade desta camada sedimentar.

As sondagens elétricas, ER-4 e ER-5 foram executadas em locais onde a superfície do terreno é constituída de diabásio alterado. A interpretação das curvas nos fornece os seguintes dados:



| ER-4 |       | ER-5 |                                       |
|------|-------|------|---------------------------------------|
| d    | ρ     | d    | ρ                                     |
| 0.3  | 300   | 0.4  | 200 solo argiloso                     |
| 4.5  | 2.700 | 1.2  | 2.000 solo argiloso                   |
| 60.0 | 300   | 22.5 | 200 diabásio fresco                   |
|      |       | 46.0 | 3.600 sedimento grupo Tubarão(cozido) |
|      |       | 18.0 | 42 sedimento grupo Tubarão            |
|      | ∞     |      | ∞ embasamento                         |

Com base nos dados obtidos a partir da interpretação das curvas obtemos o perfil abaixo.



cia da diminuição do número de lençóis abertos e saturados.

A sondagem elétrica ER-5 apresenta uma camada sub-

-/-



| ER-4 |       | ER-5 |  |
|------|-------|------|--|
| d    | ρ     | d    | ρ                                      |
| 0.3  | 300   | 0.4  | 200 solo argiloso                      |
| 4.5  | 2.700 | 1.2  | 2.000 solo argiloso                    |
| 60.0 | 300   | 22.5 | 200 diabásio fresco                    |
|      |       | 46.0 | 3.600 sedimento grupo Tubarão (cozido) |
|      |       | 18.0 | 42 sedimento grupo Tubarão             |
|      | ∞     |      | ∞ embasamento                          |

Com base nos dados obtidos a partir da interpretação das curvas obtemos o perfil abaixo.

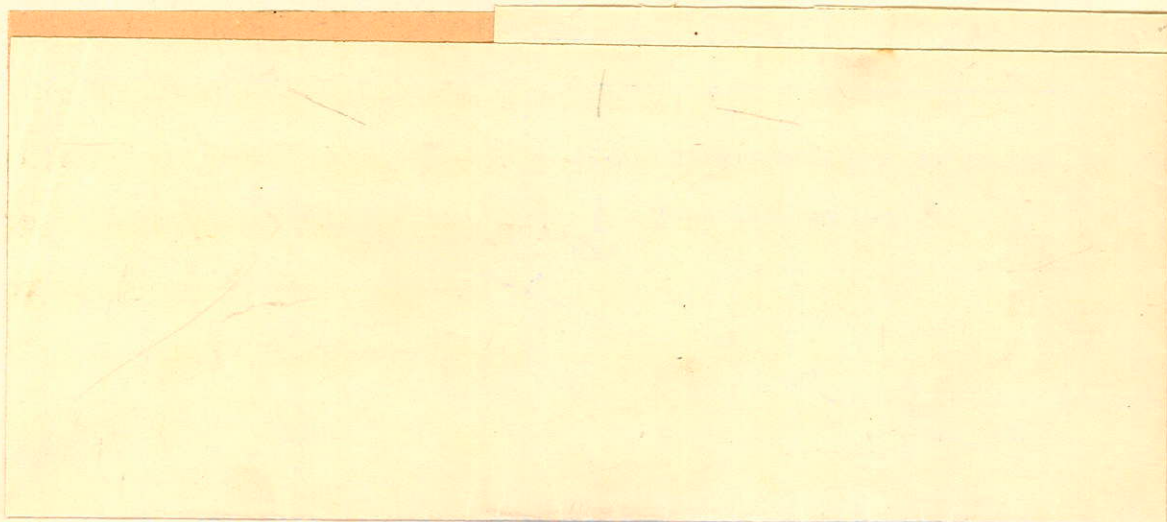


Fig. 15

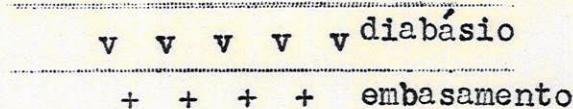
Este perfil representa camadas cujas resistividades variam de 10 à 3.600 Ohm.m. O valor da resistividade do diabásio é relativamente baixo, devido talvez à influência da presença de fendas e diaclases saturadas de água. Este valor aumenta progressivamente com a espessura do sill, em consequência da diminuição do número de fendas abertas e saturadas.

A sondagem elétrica ER-5 apresenta uma camada sub-



jacente ao sill, de diabásio, com resistividade alta (3.000 - 4.000 Ohm.m). Esta camada, em razão da penetração do sill de diabásio, deve ter sofrido um intenso cozimento, elevando assim a sua resistividade.

Na parte sul da Fazenda Experimental aflora o sill de diabásio; nas proximidades da Escola Preparatória de Cadetes do Exército foi executado um poço profundo onde se verificou que o sill de diabásio está em contáto direto com o embasamento cristalino.



Na Fazenda foram também medidos perfis magnetométricos e observou-se que no ponto onde começa o solo proveniente da decomposição do diabásio, não corresponde o início da anomalia magnética. Este fenômeno deve ser produto da intemperização total desta parte do sill. Como as bordas do sill se tornam mais delgadas, a ação do intemperismo intenso alterou completamente o caráter magnético do diabásio.

#### Dificuldades

a: - as correntes telúricas, como já mencionado, são correntes elétricas naturais contínuas, que circulam através da crosta da terra sob a forma de lençóis. Se em uma região existir uma camada de baixa resistividade sobre uma de alta resistividade, as correntes telúricas concentram-se na primeira em face de sua melhor condutividade.

Na região onde foram executadas estas sondagens elétricas, o conjunto sedimentar sobrejacente ao embasamento cristalino possui uma resistividade média entre 30 e 57 Ohm.m



(resistividade média =  $\frac{\sum m_i}{\sum \rho_i}$  Flathe, Geoelectrical investigation on clay deposits, 1960). Como vemos, são camadas muito condutoras em relação ao embasamento cristalino.

Além desta baixa resistividade das camadas pertencentes ao Grupo Tubarão há também uma concentração das correntes telúricas em razão do acunhamento das camadas quando se aproxima da borda da bacia sedimentar

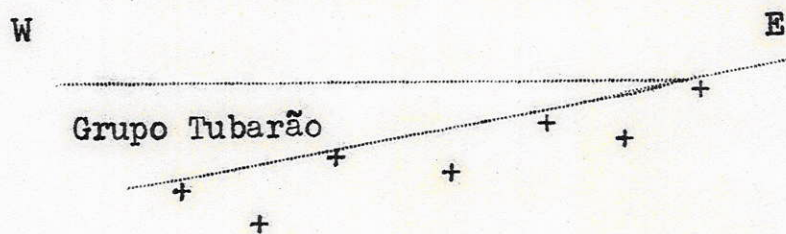
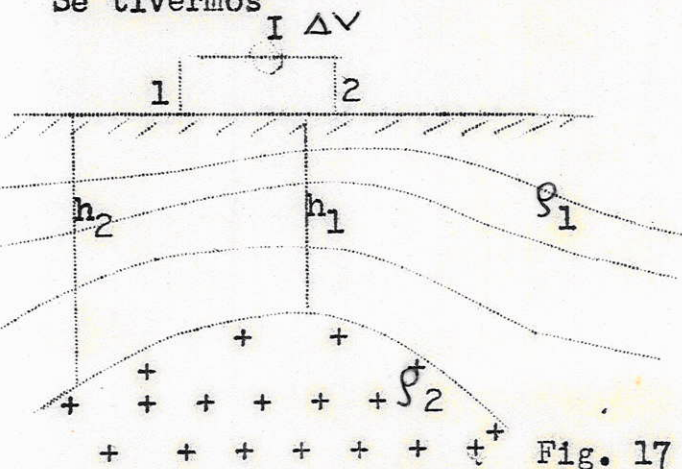


Fig. 16

Se tivermos



$$\Delta h = h_2 - h_1$$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$$

$$I(\Delta V) = f(\Delta h, \Delta \rho)$$

Fig. 17

aparecerão concentrações de correntes telúricas nos pontos onde a camada superior se adelgaça. A diferença de potencial provocada pelas correntes telúricas é função da diminuição da espessura das camadas sobrejacentes.

Como no equipamento empregado, a diferença de potencial, entre os eletrodos M e N é medido segundo o princípio



da compensação, é necessário empregar-se distância relativamente grandes (40,80 m) entre os eletrodos de potencial M e N. Um aumento da distância entre os eletrodos de potencial a carreta um aumento na interferência proveniente das correntes telúricas.

b: - onde a superfície do terreno é constituída de um solo proveniente da decomposição de sedimentos glaciais, com granulação grosseira, aparece uma alta resistência de contato. A uma alta resistência de contato, para uma mesma diferença de potencial entre A e B, corresponde uma baixa intensidade de corrente I que circula pelo solo. Como  $\rho = \frac{\Delta V \cdot k}{I}$ , uma baixa intensidade de corrente I, para um mesmo valor de  $\rho_a$ , corresponde um baixo valor de  $\Delta V$ , medido entre M e N. Como a presença de correntes telúricas é praticamente constante, há a necessidade de se obter um valor  $\Delta V$  entre M e N bem maior que o  $\Delta V$  provocado pelas correntes telúricas. Para tal é necessário que a intensidade da corrente I, que flue pelas camadas, seja bastante elevada. Foi possível obter-se uma diminuição na resistência de contato com o uso dos artifícios abaixo mencionados:

- umedecer com água salgada as vizinhanças dos eletrodos
- empregar 3 eletrodos de corrente em cada ponto A e B, a partir de  $AB/2=50m$ , reduzindo assim de cerca de 50% a resistência de contato.
- enterrar bem os eletrodos no solo (cerca de 1 m).



Verificando-se os perfis litológicos dos poços profundos, observa-se que a região é constituída de uma sequência de argilas, de areias, de tilitos e de conglomerados cujas camadas possuem espessuras que variam da ordem de centímetros a metros. Damos abaixo um resumo da descrição dos testemunhos a fim de mostrar esta variação litológica.

| Poço P-2 |      | <i>explicar</i>     |
|----------|------|---------------------|
| m        | a m  |                     |
| 0,0      | 2,0  | argila              |
| 2,0      | 19,0 | arenito             |
| 19,0     | 26,0 | arenito arcossiano  |
| 26,0     | 33,0 | arenito             |
| 33,0     | 48,0 | tilito              |
| 48,0     | 51,0 | siltito             |
| 51,0     | 57,0 | arenito arcossiano  |
| 57,0     | 88,0 | sedimentos rítmicos |
| 88,0     | 95,0 | tilito              |
| 95,0     | 95,3 | biotita-gnaisse     |

Os poços P-1 a P-5 estão agrupados na forma de uma bateria de poços cujo espaçamento não ultrapassa 500 m. Já o poço P-6 localiza-se a 1.500 m a NE dos restantes. Mesmo com um espaçamento relativamente pequeno entre os poços, é difícil construir uma secção geológica baseada nos dados obtidos a partir dos perfis litológicos dos poços perfurados. Verifica-se que não existe uma definida continuidade lateral das camadas sedimentares com base na granulometria, no conteúdo em argila, na coloração, etc. .



Os valores de resistividade das camadas delgadas com litologias diferentes, situadas em profundidade, são integrados num valor de  $\rho_a$  de todo o pacote sedimentar, ou seja, essas variações de resistividade não aparecem quando se fazem medidas na superfície.

Se por um lado é difícil o reconhecimento de uma camada comum em dois poços espaçados de algumas centenas de metros, por outro lado é relativamente fácil verificar-se essa continuidade lateral das camadas, baseados na interpretação das sondagens elétricas, feitas em pontos igualmente espaçados. Além de se observar esta continuidade, verificam-se frequentemente também variações laterais na resistividade dessa mesma camada.

A variação lateral (ou transversal) da resistividade de uma formação geológica (ou camada) é função de, entre outros fatores:

- variação no conteúdo de ions na solução que satura o sedimento (Na, Cl, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, etc.).
- variação na granulometria (provocando uma variação na porosidade) *granulometria*
- variação no conteúdo em argila.

Foi verificado no campo, que a resistividade da água dos poços P-1, P-2 e P-6 é praticamente a mesma, da ordem de 40 Ohm.m, sugerindo idêntico teor em ions presentes na água desses diferentes poços.

A fórmula de Archie não pode ser empregada, uma vez que a mesma é válida somente para sedimentos isentos de argila.



A variação na granulometria e litologia implica na variação da resistividade como se pode observar na tabela abaixo:

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| margas                         | 0,5-200hm.m.   |
| areia saturada de água salgada | 1 - 40 Ohm.m   |
| areia saturada de água doce    | 8 - 2000hm.m   |
| areia e cascalho com água doce | 20 - 400 Ohm.m |

(Bentz, 1961)

A variação na resistividade das camadas do Grupo Tubarão na região de Campinas é o produto da variação no conteúdo em argila. Um aumento no conteúdo em argila (consequente diminuição na resistividade, em face da diminuição da porosidade e permeabilidade) acarreta uma diminuição de vazão.

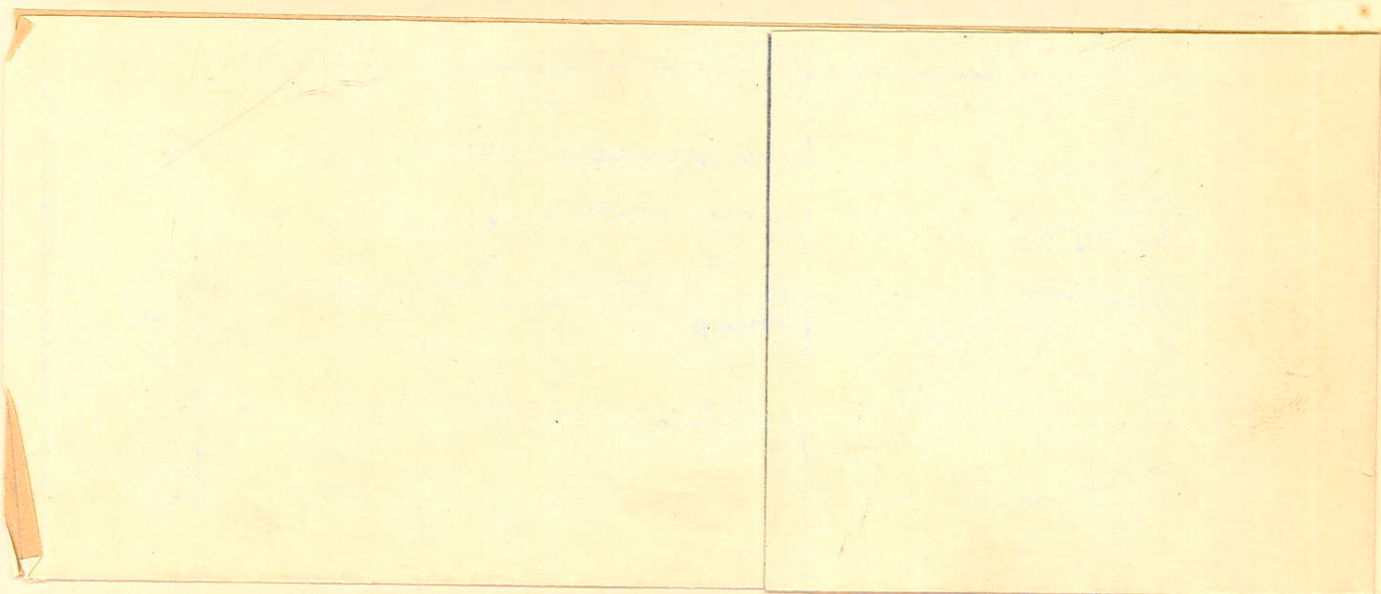


Fig.18 - Secção vertical A

A fig.18 mostra a concordância entre a variação na resistividade das camadas e a consequente variação na vazão dos poços.

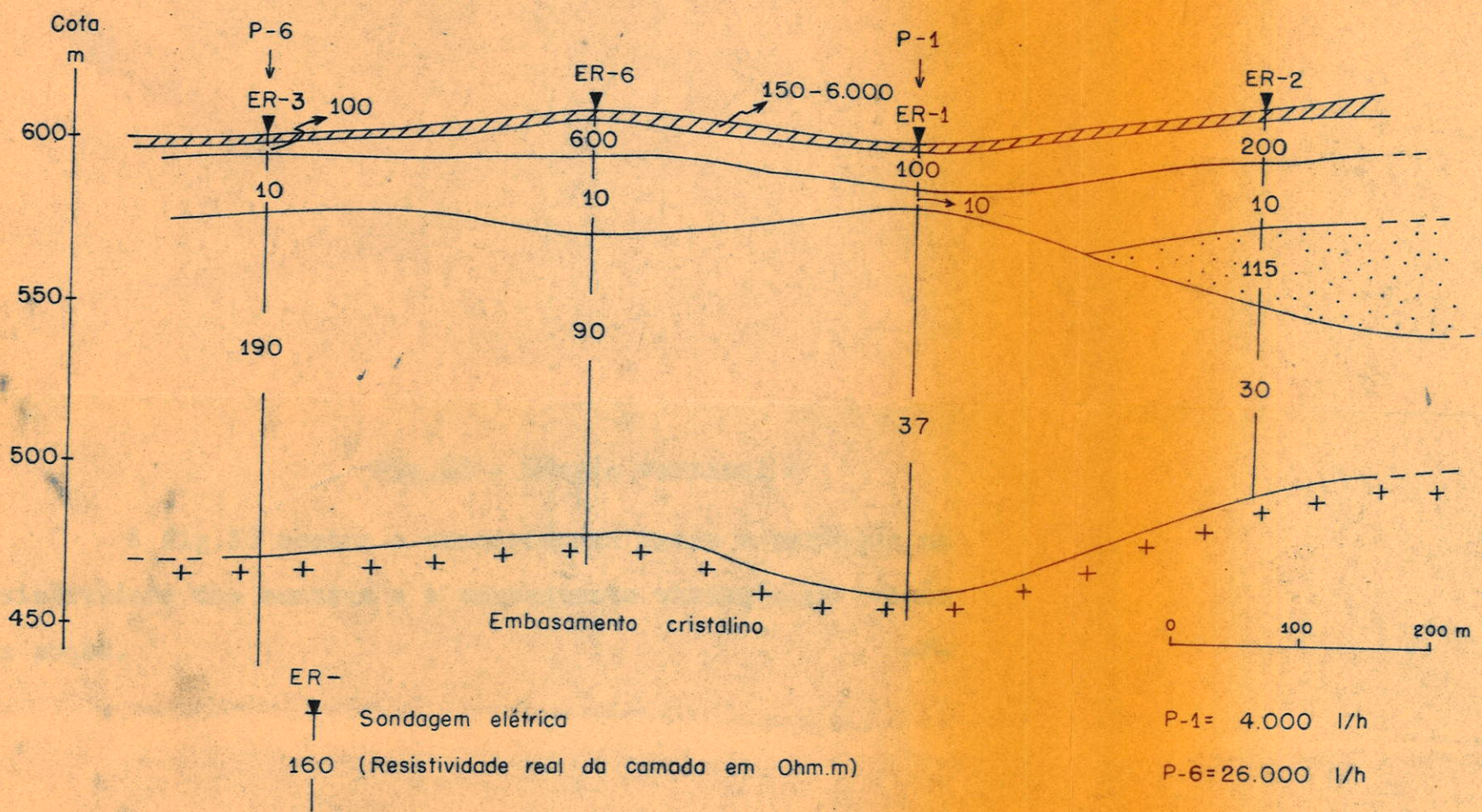


A variação na granulometria e litologia implica na variação da resistividade como se pode observar na tabela abaixo:

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| margas                         | 0,5-200hm.m.   |
| areia saturada de água salgada | 1 - 40 Ohm.m   |
| areia saturada de água doce    | 8 - 2000hm.m   |
| areia e cascalho com água doce | 20 - 400 Ohm.m |

(Bentz, 1961)

A variação na resistividade das camadas do Grupo Tubarão na região de Campinas é o produto da variação no conteúdo em argila. Um aumento no conteúdo em argila (conseqüente diminuição na resistividade, em face da diminuição da porosidade e permeabilidade) acarreta uma diminuição de vazão.





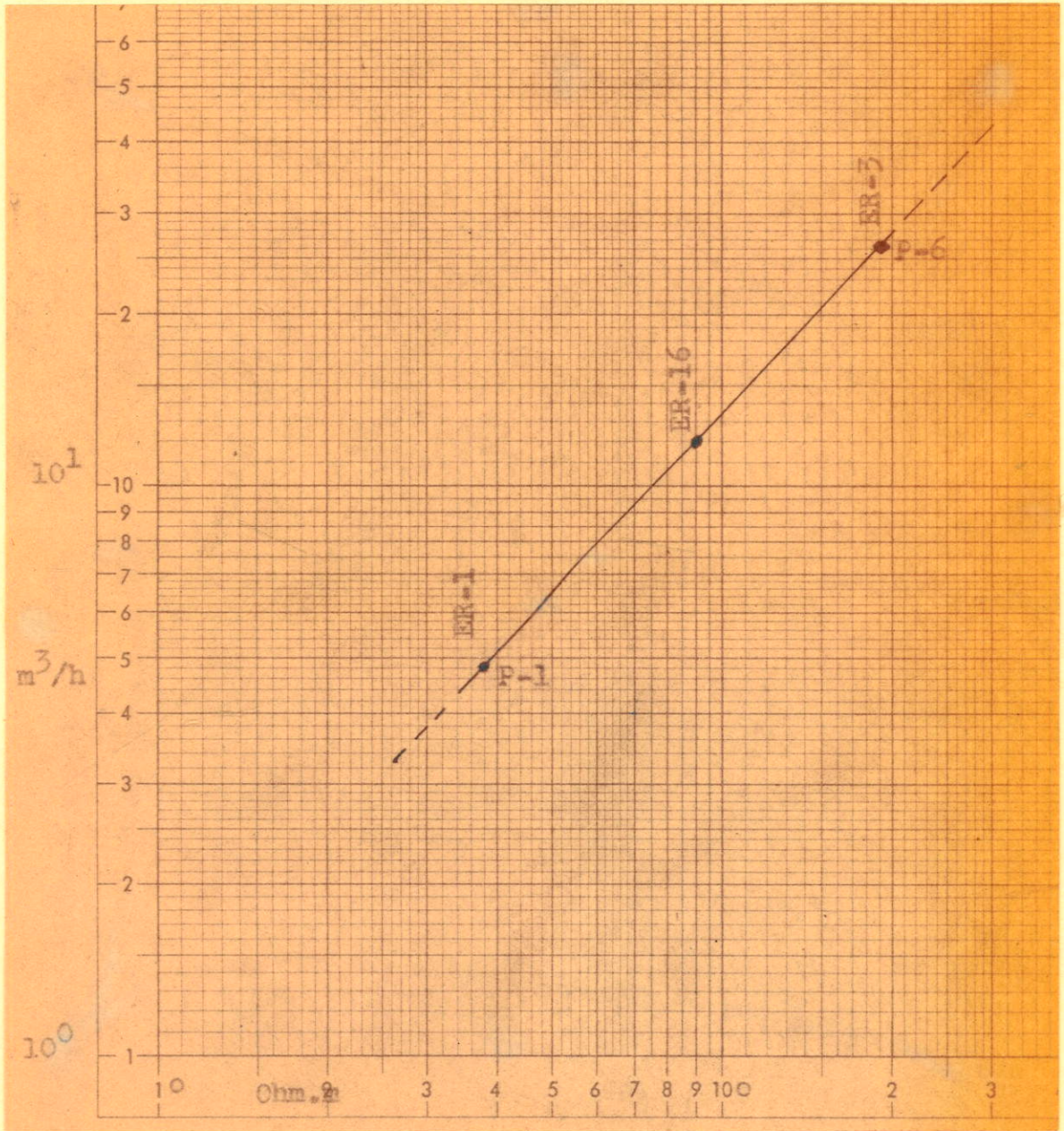


Fig. 19 Gráfico da relação entre a resistividade e a vazão específica.



O gráfico da fig. 19 representa uma tentativa de correlação entre a resistividade das camadas aquíferas e a vazão específica de um poço perfurado nessas camadas. Tendo em vista a exiguidade de dados, a interpretação tem primeiramente um caráter mais qualitativo do que quantitativo e a sua aceitação deve ser feita com certa reserva.

Deve-se observar que, se a resistividade da solução que satura os sedimentos variar ( $\rho_w$ ), considerando-se condições geológicas idênticas, a reta sofrerá um deslocamento paralelo à reta original. Se  $\rho_w$  aumentar, a reta sofrerá um deslocamento para a direita e vice-versa. Verificou-se porém, na prática, que este gráfico tem a forma de uma reta dentro de um certo intervalo de resistividade e vazão. Observações de campo não permitem ainda verificar o ponto a partir do qual o gráfico deixa de ser uma reta.

Em princípio, pode-se esperar que nos sedimentos pertencentes ao Grupo Tubarão, a resistividades elevadas (maior que 100 Ohm.m) correspondem possibilidades de vazão mais elevada ( maior que 10 m<sup>3</sup>/h). ? ?

## 2) Sorocaba ( Utinga )

Na região de Utinga (fig. 20) foi realizada uma sondagem elétrica nas proximidades da borda da bacia sedimentar do Paraná apresentando a seguinte sequência geológica.

Grupo Tubarão

Embasamento cristalino



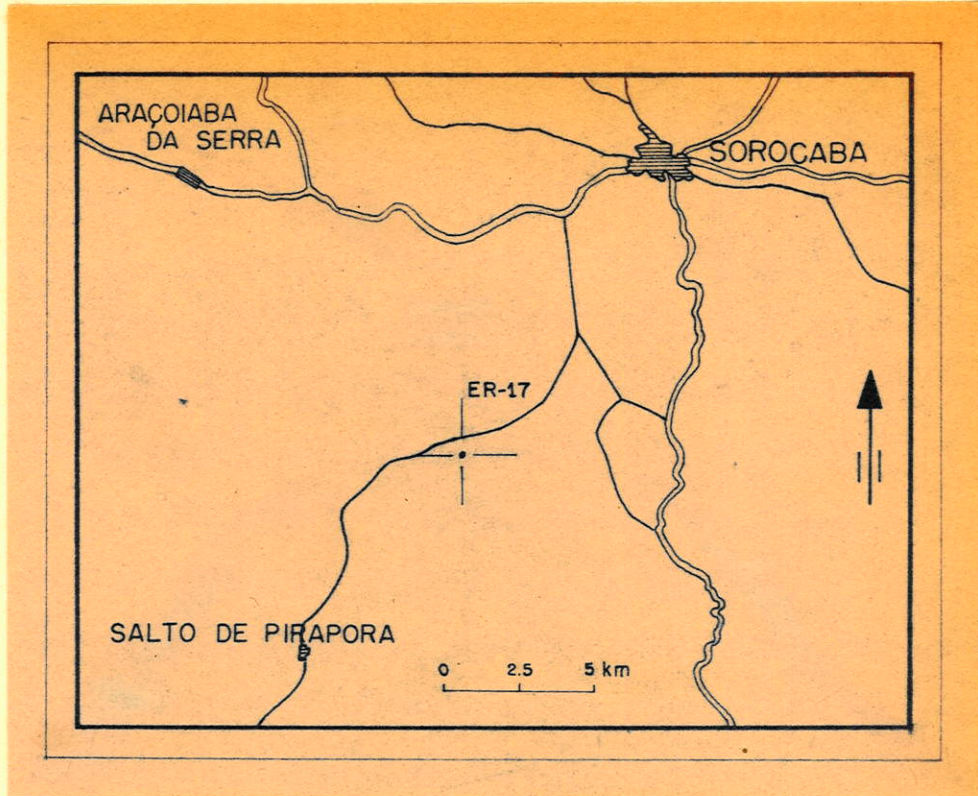


Fig. 20 Mapa de localização da sondagem elétrica.

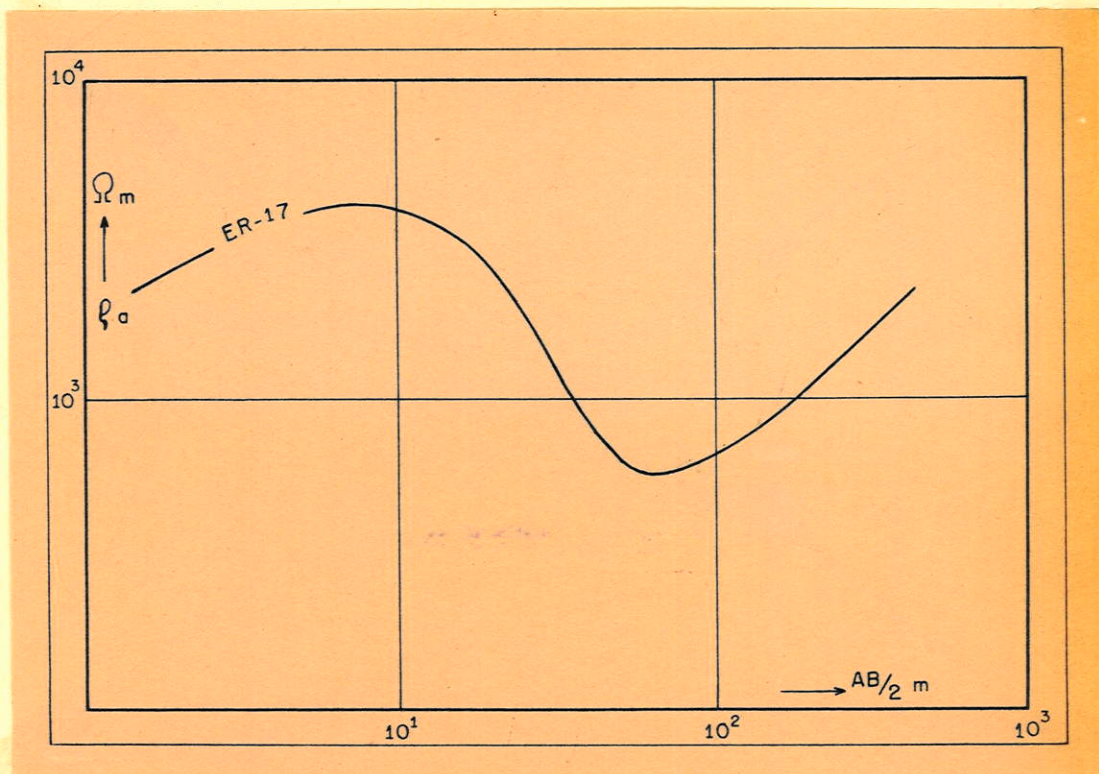


Fig. 21 Curva ER-17



A interpretação da curva ER-17 (fig. 21) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade | espessura | resistividade | litologia                       |
|--------------|-----------|---------------|---------------------------------|
| m            | m         | Ohm.m         |                                 |
| 0 - 2,0      | 2,0       | 2.400         | solo                            |
| 2,0 - 8,5    | 6,5       | 5.500         | sedimento<br>seco               |
| 8,5 - 93,5   | 85,0      | 400           | sedimento<br>saturado<br>d'água |
|              |           | ∞             | embasamen<br>to crist<br>alino  |

Observa-se que nesse local, a camada sobrejacente ao embasamento cristalino possui uma resistividade de cerca de 400 Ohm.m, que representa neste trabalho o valor mais elevado encontrado pelas sondagens elétricas executadas em sedimentos pertencentes ao Grupo Tubarão. A resistência de contato foi da ordem de 1.700 Ohm.

Apesar de localizado próximo a borda da bacia sedimentar, a intensidade das correntes telúricas era bastante reduzida.

A camada sedimentar basal, de alta resistividade, pode ser interpretada como constituída de arenito grosseiro saturado de água.

### 3) Itu (Caiacatinga)

Esta sondagem elétrica foi feita nas proximidades da localidade de Caiacatinga (vide fig. 22), a uma distância de aproximadamente 20 km do contato da bacia sedimentar com o embasamento cristalino.



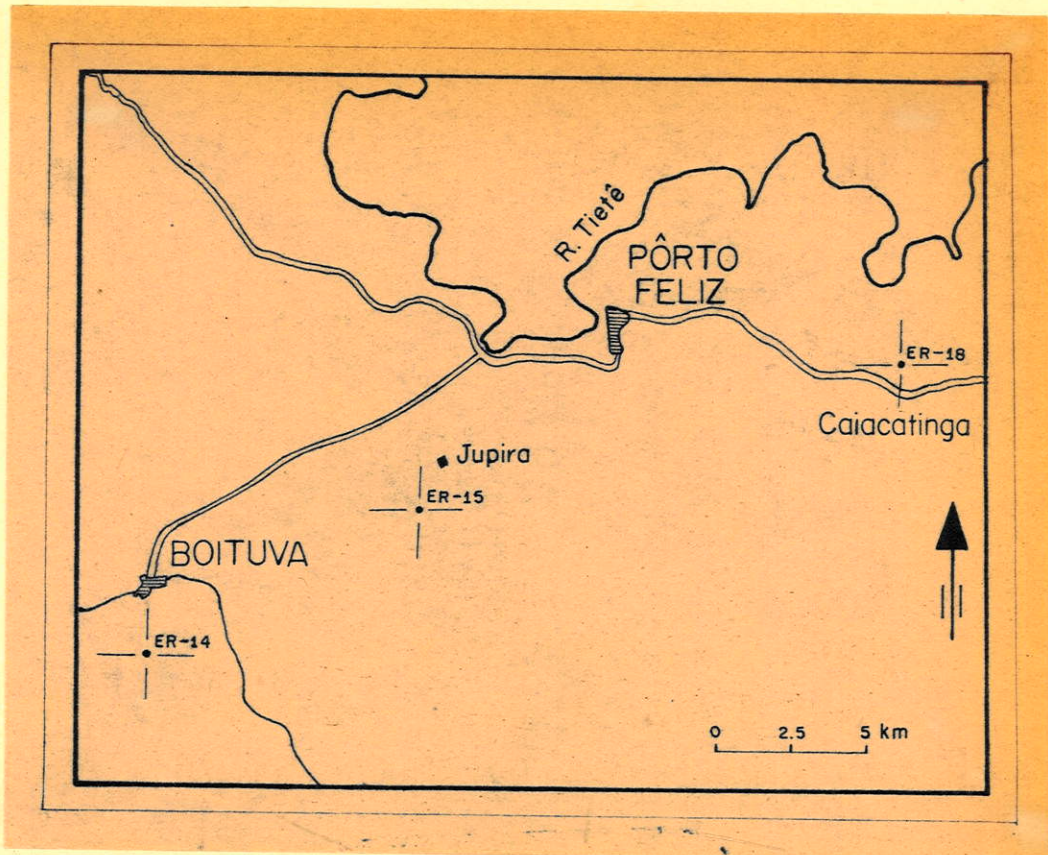


Fig. 22 Mapa de localização das sondagens elétricas.

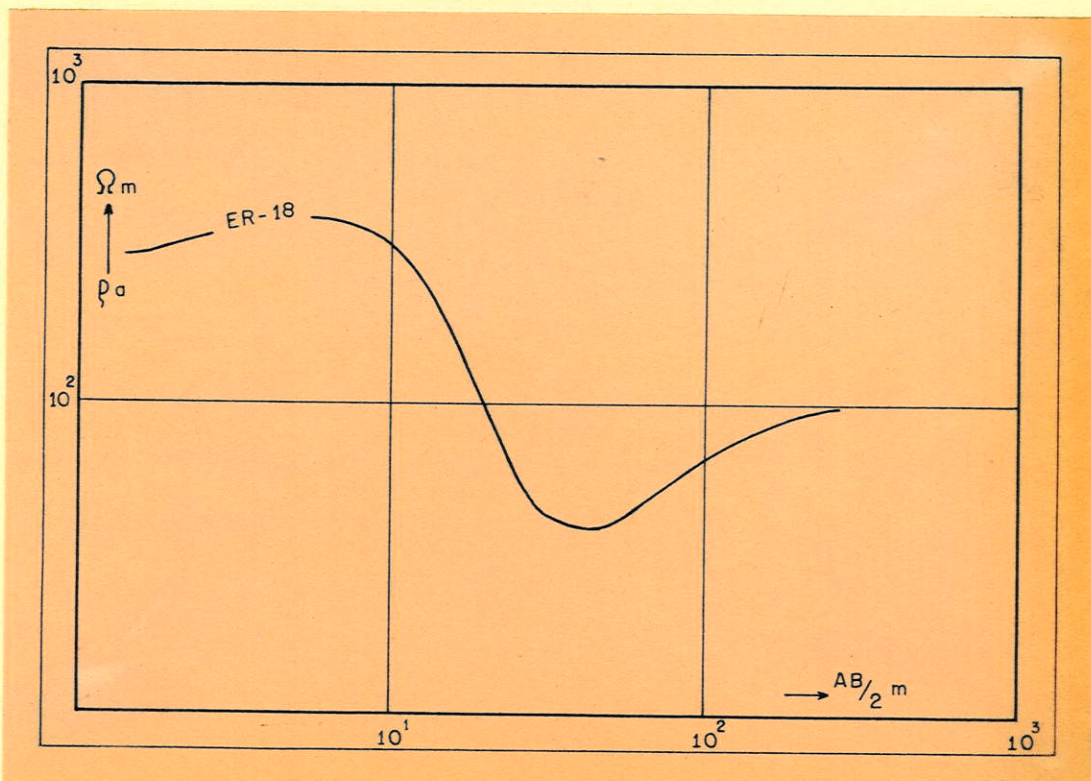


Fig. 23 Curva ER-18



A interpretação da curva obtida (ER-18, Fig. 23 ) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade         | espessura     | resistividade | litologia                     |
|----------------------|---------------|---------------|-------------------------------|
| m                    | m             | Ohm.m         |                               |
| 0 - 1,3              | 1,3           | 260           | solo                          |
| 1,3 - 6,3            | 5,0           | 500           | sedimento sêco                |
| 6,3 - 21,3           | 15,0          | 20            | sedimento (argiloso) saturado |
| 21,3 - maior que 300 | maior que 300 | 100           | sedimento (arenoso) saturado  |

Baseando-se no mergulho do embasamento cristalino estabelecido como sendo de 30 m/km, verificado através de sondagens, deve este encontrar-se numa profundidade da ordem de 600 m. Tendo em vista o espaçamento AB/2 máximo de 500 m, não se atingiu o embasamento cristalino. Não se ampliou mais este espaçamento, pois a intenção foi de obter-se dados quanto ao caráter geológico das camadas que têm interesse para água subterrânea, ou seja a profundidades menores de 300 m.

#### 4) Porto Feliz (Jupira)

Para o conhecimento do comportamento geológico dos sedimentos pertencentes ao Grupo Tubarão, em pontos situados mais para o interior da bacia, foi escolhida a localidade de Jupira, próxima a cidade de Porto Feliz (vide fig. 22). Esta região também apresenta um mínimo gravimétrico (Davino, 1965) que traduz uma maior profundidade do embasamento cristalino.

Observa-se através da curva ER-15 (fig. 24), que foi atingido o embasamento cristalino, uma vez que esta pos-



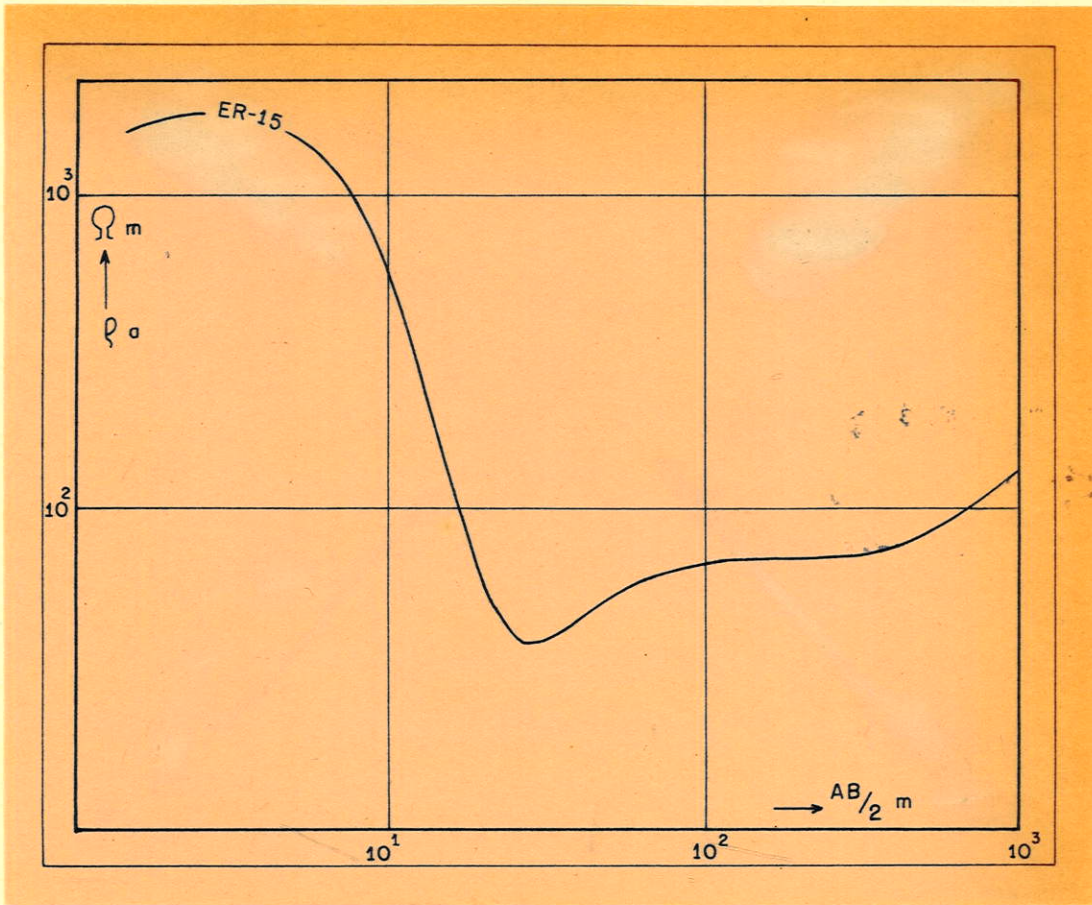
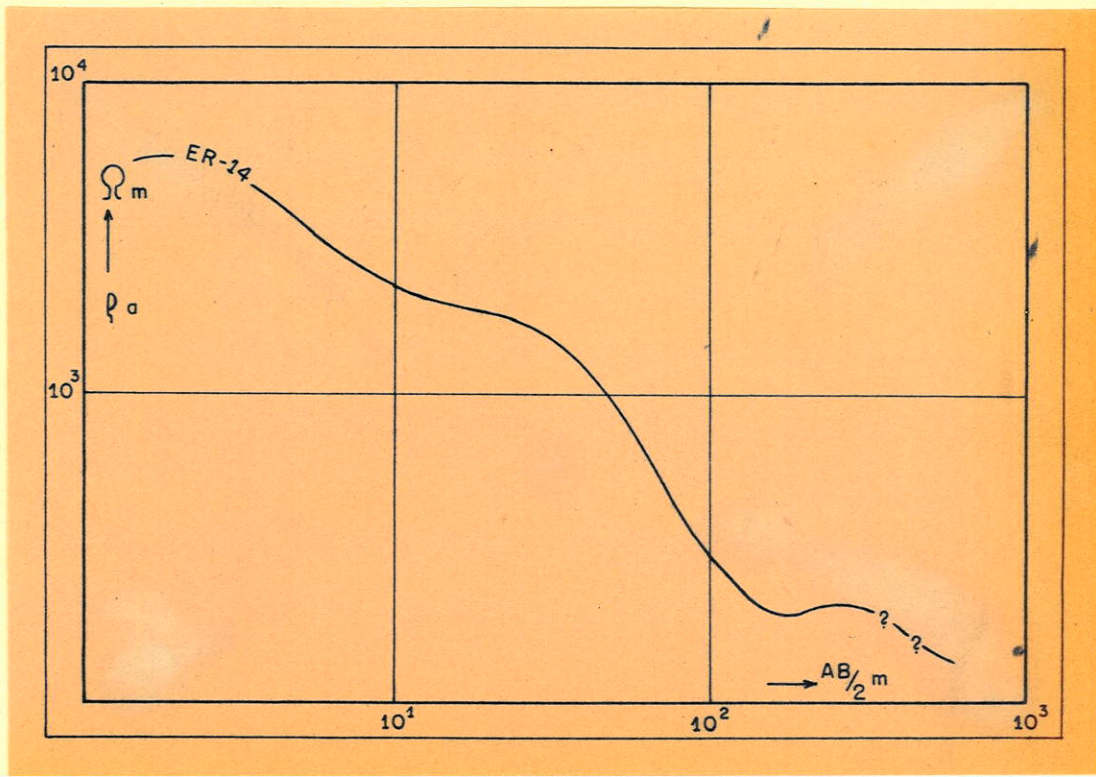


Fig. 24 Curva ER-15





sue um ramo final reto que faz um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo das abscissas.

A interpretação da curva nos fornece os seguintes dados:

| profundidade<br>m | espessura<br>m | resistividade<br>Ohm.m | litologia                     |
|-------------------|----------------|------------------------|-------------------------------|
| 0 - 1,5           | 1,5            | 1.600                  | solo                          |
| 1,5 - 3,0         | 1,5            | 3.600                  | sedimento sêco                |
| 3,0 - 10,0        | 7,0            | 15                     | sedimento (argiloso) saturado |
| 10,0 - 595,0      | 585,0          | 75                     | sedimento (arenoso) saturado  |
|                   |                | $\infty$               | embasamento cristalino        |

Para se obter dados quanto a profundidade do embasamento cristalino que está situado numa profundidade de cerca de 600 m, foi necessário empregar-se um espaçamento  $AB = 2.000$  m.

A interpretação da curva mostra a presença de uma camada de espessura da ordem de 585 m, bastante homogênea e com uma resistividade de 75 Ohm.m.

A resistência de contato foi da ordem de 2.400 Ohm, apesar do solo ser arenoso.

Mesmo empregando-se um espaçamento  $\overline{MN} = 80$  m, não houve dificuldade nas medidas, por interferência das correntes telúricas, pois, estas eram praticamente ausentes.

### 5) Boituva

Esta sondagem foi executada as margens da Estrada do Oeste nos arrabaldes da cidade de Boituva (vide fig. 22).



A sequência geológica neste local é a seguinte:

sill de diabásio

---

Grupo Tubarão

---

Embasamento cristalino

sendo portanto, um local onde a superfície do terreno é constituída por um solo proveniente da decomposição do diabásio.

A interpretação da curva ER-14 (fig. 25) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade  | espessura | resistividade | litologia              |
|---------------|-----------|---------------|------------------------|
| m             | m         | Ohm.m         |                        |
| 0 - 2,0       | 2,0       | 5.300         | diabásio alterado      |
| 2,0 - 28,0    | 26,0      | 1.800         | " " (?)                |
| 28,0 - 153,0  | 125,0     | 140           | sedimento saturado (?) |
| 153,0 - 200,0 | 47,0      | 750           | sedimento saturado (?) |
|               |           | (?)           |                        |

Quando o espaçamento entre os eletrodos de corrente AB atingiu a distância de 800 m ( $AB/2 = 400$  m), em razão da pequena diferença de potencial entre os eletrodos M e N (0,5-1,0 mV), foi necessário aumentar o espaçamento entre os metros de 40 para 80 m. Com este espaçamento a intensidade das correntes telúricas era tão grande que impossibilitou a continuação dos trabalhos, que foram reiniciados no período noturno. Por volta das 20 horas, quando os trabalhos foram reiniciados, verificou-se que apesar da intensidade das correntes ter decrescido de aproximadamente 30 vezes, não foi possível determinar a profundidade do embasamento cristalino.

Com base nos valores da resistividade não se pode estabelecer a sequência litogeológica uma vez que aqueles di



ferem muito dos valores encontrados em outros locais.

A resistência de contato média foi da ordem 9.500 Ohm e o valor mínimo foi de 2.600 Ohm.

6) Cerquilha

Esta região foi escolhida para observar-se o comportamento elétrico das camadas pertencentes ao Grupo Tubarão situadas num ponto bem afastado da borda da bacia sedimentar (vide fig. 26) e também por existir nas proximidades um poço profundo, perfurado pelo I.G.G. do Estado de São Paulo.

Os valores de resistividade obtidos pela sondagem elétrica podiam assim ser relacionados com a vazão do poço, que é da ordem de 12.500 l/h. Os dados de resistividade e vazão específica foram também utilizados na elaboração do gráfico da fig. 19.

A interpretação da curva ER-16 (vide fig. 27) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade     | espessura | resistividade | litologia                     |
|------------------|-----------|---------------|-------------------------------|
| m                | m         | Ohm.m         |                               |
| 0 - 0,6          | 0,6       | 1.000         | sedimento seco                |
| 0,6 - 3,8        | 3,2       | 250           | sedimento (arenoso) saturado  |
| 3,8 - 23,0       | 19,2      | 28            | sedimento (argiloso) saturado |
| 23,0 - maior que | maior que | 95            | sedimento (arenoso) saturado  |
| 300,0            | 300,0 m   |               |                               |

Nota-se nesse local a presença de uma camada com espessura superior a 300 m e resistividade de 95 Ohm.m.



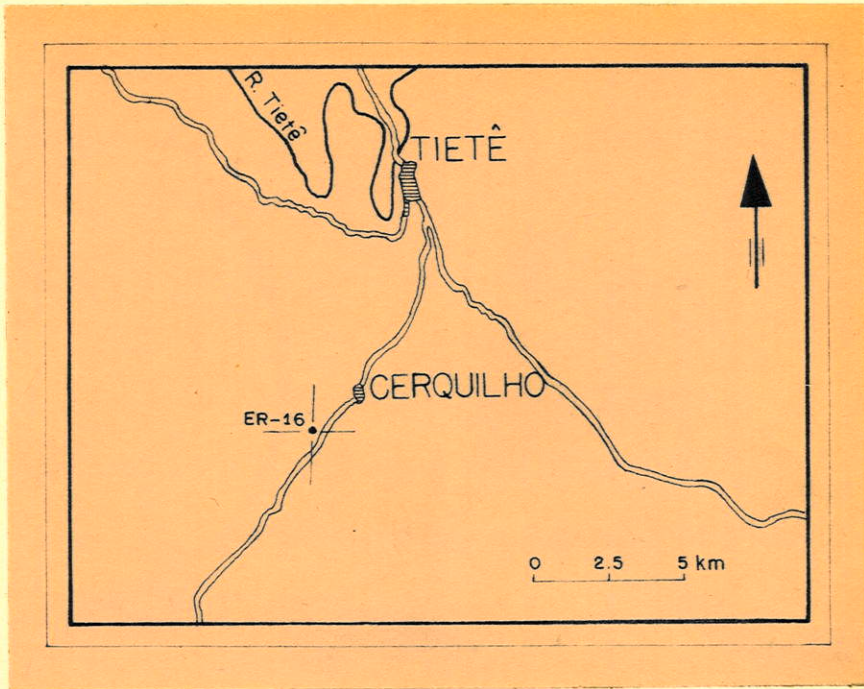


Fig. 26 Mapa de localização da sondagem elétrica.

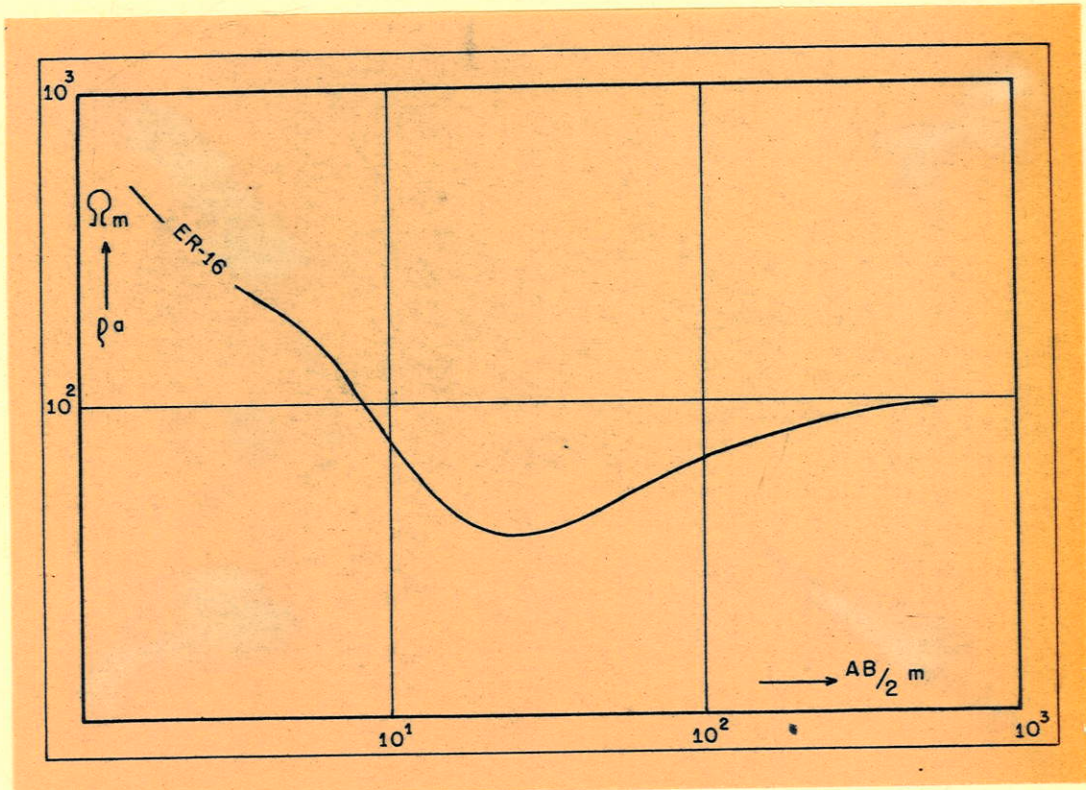


Fig. 27 Curva ER-16



Como o embasamento cristalino deve estar situado numa profundidade superior a 1.000 m, o espaçamento dos eletrodos de corrente AB = 1.000 m não foi suficiente para que o embasamento cristalino exercesse influência na distribuição das linhas de corrente.

b - SÉRIE BAURÚ (NEOCRETÁCEO), FORMAÇÃO BOTUCATU (EOCRETÁCEO)  
DERRAMES DE BASALTO (EOCRETÁCEO)

Outra fase dos trabalhos de campo foi orientada no sentido de se estudar o comportamento geoeletrico dos sedimentos pertencentes à Série Baurú e formação Botucatu, e dos derrames de basalto.

Com base nos dados referentes a perfuração de poços profundos no Estado de São Paulo, verificou-se que os melhores aquíferos são os arenitos pertencentes à Série Baurú e formação Botucatu.

Por outro lado não faltam exemplos no que se refere aos fracços ocorridos quando se tentou atingir, por meio de sondagens, a camada aquífera subjacente aos derrames de basalto. Foi suspensa a perfuração de poços quando a espessura da camada basáltica ultrapassou a metragem prevista, onerando excessivamente a empreitada ou ultrapassando a capacidade da sonda. Em regiões cobertas por derrames de basalto, há casos em que a perfuração do poço foi suspensa quando faltavam, possivelmente, somente alguns metros para atingir o arenito aquífero subjacente, perdendo-se assim completamente o poço.

Para contribuir na resolução destes problemas foram executadas sondagens elétricas nas regiões de São Carlos,



Araraquara e Bálamo.

Os trabalhos de campo visaram:

- a - determinar a resistividade das formações sedimentares e dos derrames de basalto.
- b - executar sondagens elétricas a fim de verificar se os dados obtidos a partir da interpretação das curvas, correspondem ou não <sup>com</sup> a espessura real das camadas.
- c - identificar, a partir da interpretação da curva de eletrorresistividade, a posição da formação geológica mais propícia ao armazenamento de água subterrânea.

Para possibilitar melhores resultados foram executadas sondagens elétricas em locais onde existem as seguintes seqüência geológica:

- 1) { arenito (Botucatu ?) intertrapiano ER-19, ER- 20  
derrames de basalto
- 2) { derrames de basalto ER-10, ER-21, ER-23, ER-28, ER-29, 1  
arenito Botucatu ER-30
- 3) { arenito Baurú ER-22, ER-32  
derrame de basalto
- 4) { arenito Baurú  
derrame de basalto ER-24  
arenito Botucatu (?)  
derrame de basalto

a - ER-19

Essa sondagem elétrica ER-19 (fig. 28) foi realizada ao longo do vale do Ribeirão do Melo, situado na altura do



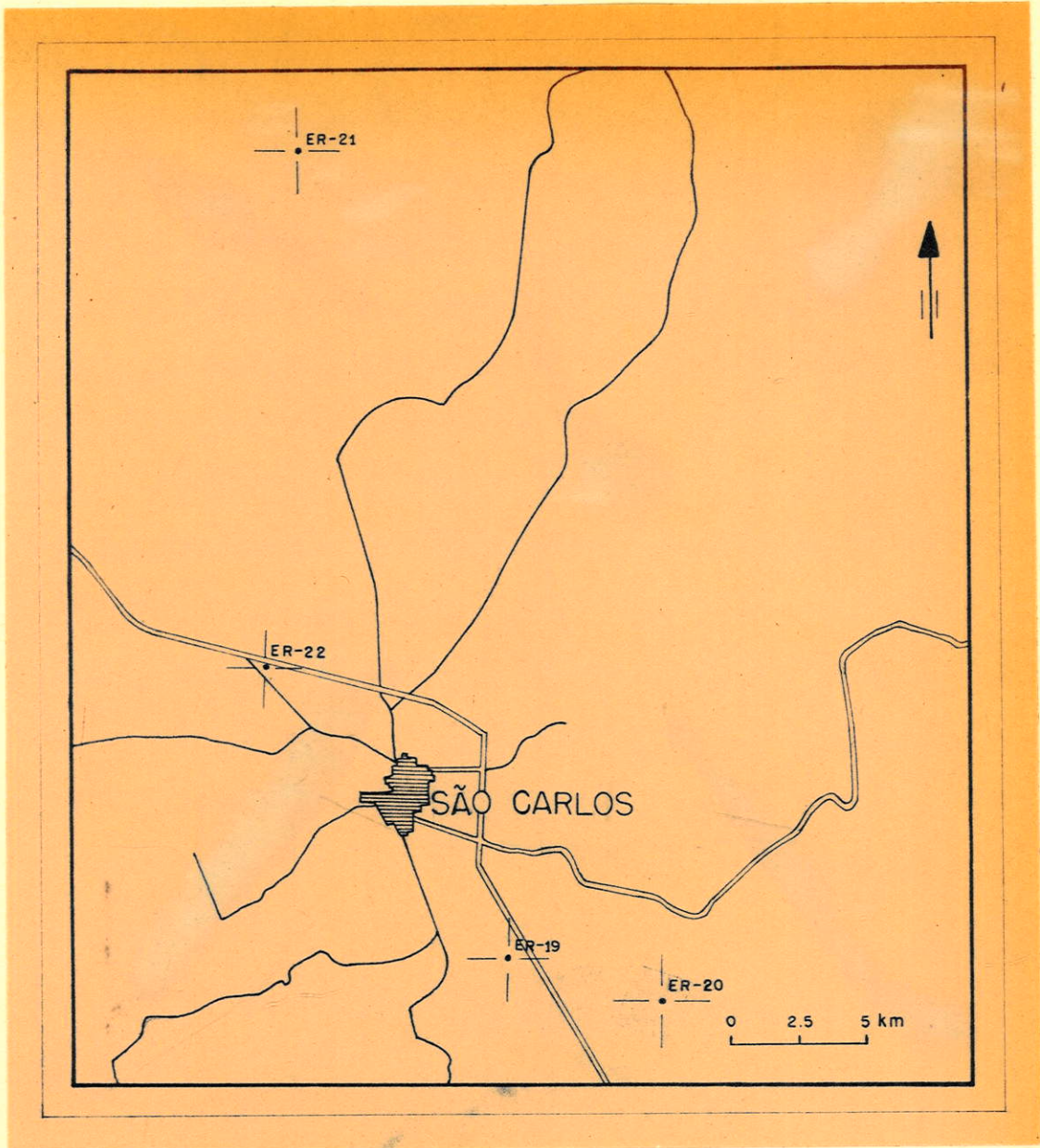
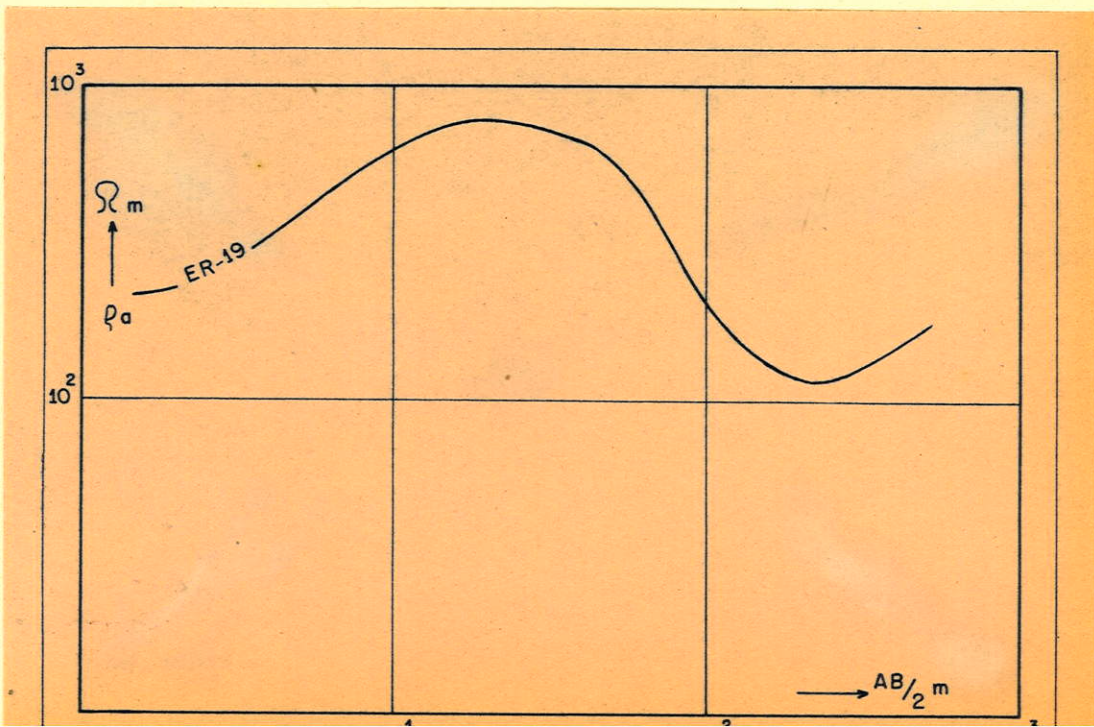


Fig. 28 Localização das sondagens.





km 225 da via Washington Luiz.

A interpretação da curva ER-19 (fig. 29) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade | espessura | resistividade | litologia                  |
|--------------|-----------|---------------|----------------------------|
| m            | m         | Ohm.m         |                            |
| 0,0 - 1,3    | 1,3       | .130          | solo arenoso               |
| 1,3 - 20,0   | 18,7      | 1.200         | sedimento retrabalhado (?) |
| 20,0 - 80,0  | 60,0      | 30            | arenito Botucatu           |
|              |           | 300           | derrame de basalto         |

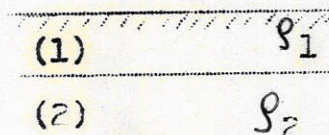
Verifica-se a existência de duas camadas superficiais com resistividade relativamente elevada. Estas camadas, cuja espessura atinge 20 metros, podem ser interpretadas como sendo material aluvionar de origem recente (Bjornberg, 1965).

Apesar deste perfil ter sido executado no vale do rio, a resistência de contato foi de cerca de 2.000 Ohm, por ser a superfície do terreno formada por um solo de areia grossa bem selecionada. Como se trata de material de granulação grossa, o número de grãos que fazem contato com os eletrodos é pequeno, elevando assim a resistência de contato.

b - ER-20

Nesta sondagem elétrica, também executada às margens da referida via, na altura do km 218 (vide fig. 28), não foi possível se obter dados seguros de  $\rho_a$  para distâncias AB/2 superiores à 100 metros. Por esta razão não pudemos determinar a profundidade de contato entre as camadas do arenito Botucatu e do derrame de basalto.

Quando temos



-/-



uma camada (1) com resistividade  $\rho_1$ , sobreposta à uma camada (2) com resistividade  $\rho_2$ , onde o valor  $\rho_1$  é muito maior que  $\rho_2$ , ao aplicarmos uma corrente elétrica aos eletrodos A e B fincados na camada (1), a corrente elétrica flue praticamente só pela camada (2). Uma vez que apenas uma pequena parcela da corrente elétrica passa pela camada (1), a diferença de potencial a ser medida entre M e N torna-se tão pequena que ultrapassa a sensibilidade do equipamento empregado.

Mesmo empregando-se o artifício descrito na pag. 41, não foi possível determinar-se a profundidade do contato entre a camada de arenito e do derrame de basalto, que deve estar situada numa profundidade maior que 30 metros.

A superfície do terreno é constituída por uma camada de areia grossa solta, seca, bem selecionada. Em razão destes fatores a resistência de contato foi da ordem de 15.000 Ohm. Uma vez que a fonte de corrente empregada era o gerador de tensão máxima = 500 V (2 kW), a máxima intensidade de corrente que fluiu pelo solo foi de 50 mA.

A interpretação da curva ER-20 (fig. 30) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade | espessura | resistividade | litologia                 |
|--------------|-----------|---------------|---------------------------|
| m            | m         | Ohm.m         |                           |
| 0,0 - 1,0    | 1,0       | 15.000        | areia solta seca          |
| 1,0 - 6,0    | 5,0       | 45.000        | areia compacta seca       |
| 6,0 - ?      | ?         | 30(?)         | arenito Botucatu saturado |

c - ER-10

Essa sondagem elétrica ER-10 foi feita às margens do Rio Grande, próximo a cidade de Igarapava (fig. 31). A



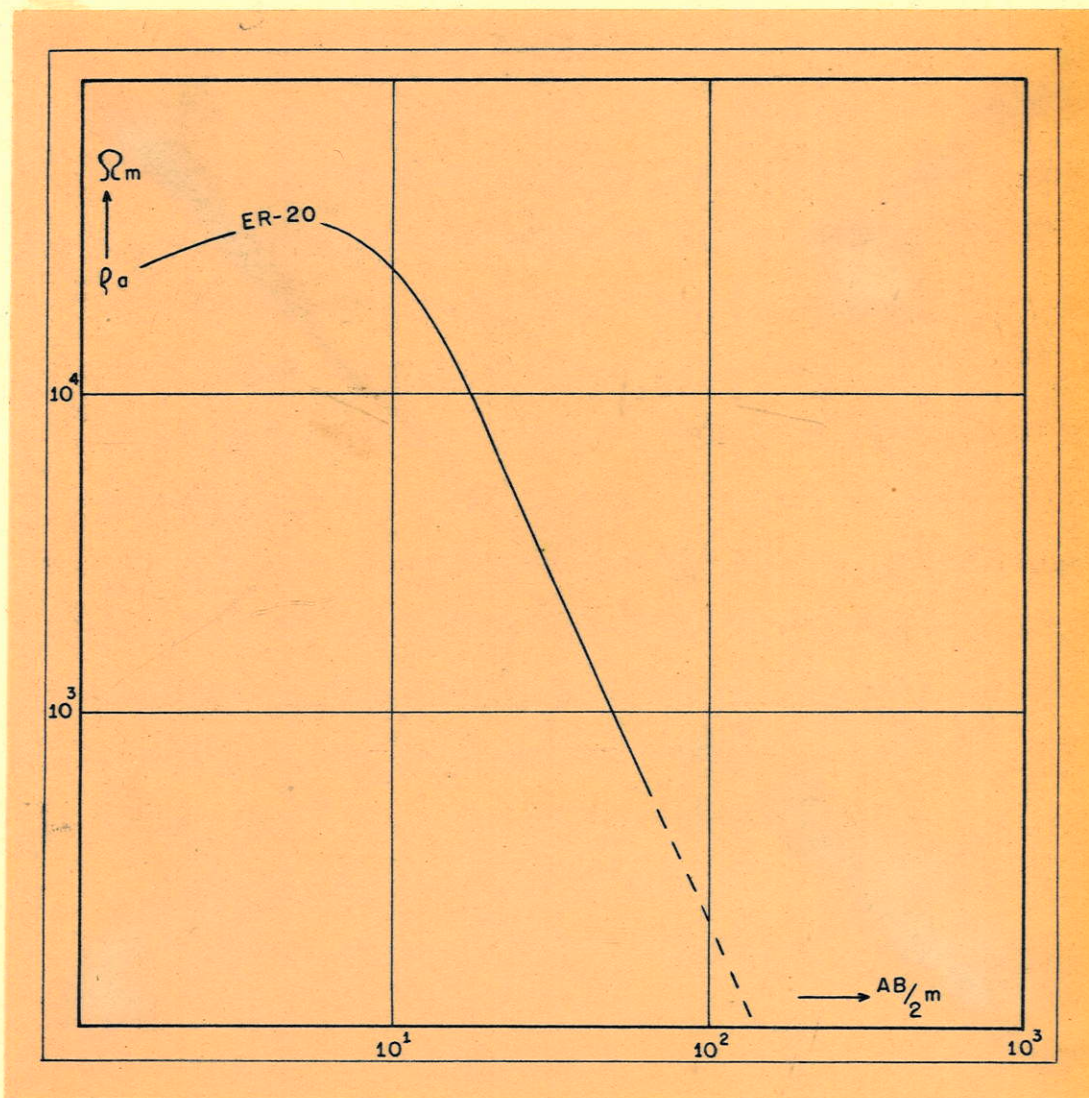


Fig. 30 Curva ER-20



sequência geológica neste local é a seguinte

sill de diabásio

---

arenito Botucatu

Neste local foi executada uma sondagem rotativa, cujos dados transcrevemos em seguida. Esse quadro permite a comparação entre os resultados obtidos da interpretação da curva de resistividade e os da sondagem elétrica.

A partir da interpretação da curva ER-10 obtemos os seguintes dados (fig. 32):

| profundidade | espessura | resistividade | litologia                   |
|--------------|-----------|---------------|-----------------------------|
| m            | m         | Ohm.m         |                             |
| 0,0 - 0,7    | 0,7       | 950           | solo seco                   |
| 0,7 - 1,4    | 0,7       | 230           | solo úmido                  |
| 1,4 - 3,5    | 2,1       | 920           | diabásio alterado           |
| 3,5 - 7,5    | 4,0       | 180           | " "                         |
| 7,5 - 52,5   | 45,0      | 670           | diabásio fresco             |
| maior que    |           | 33            | arenito Botucatu (saturado) |
| 52,5         |           |               |                             |

A sondagem rotativa nos fornece o seguinte perfil

| profundidade | espessura | litologia                  |
|--------------|-----------|----------------------------|
| m            | m         |                            |
| 0,0 - 7,8    | 7,8       | areia fina siltosa         |
| 7,8 - 53,5   | 45,7      | sill de diabásio           |
| maior que    |           | arenito friável (Botucatu) |
| 53,5         |           |                            |

Comparando-se as profundidades, a calculada e a verificada, para o contato entre o diabásio e o arenito Botucatu, nota-se que o erro foi inferior à 2%, que é bem menor que o erro normalmente aceito.



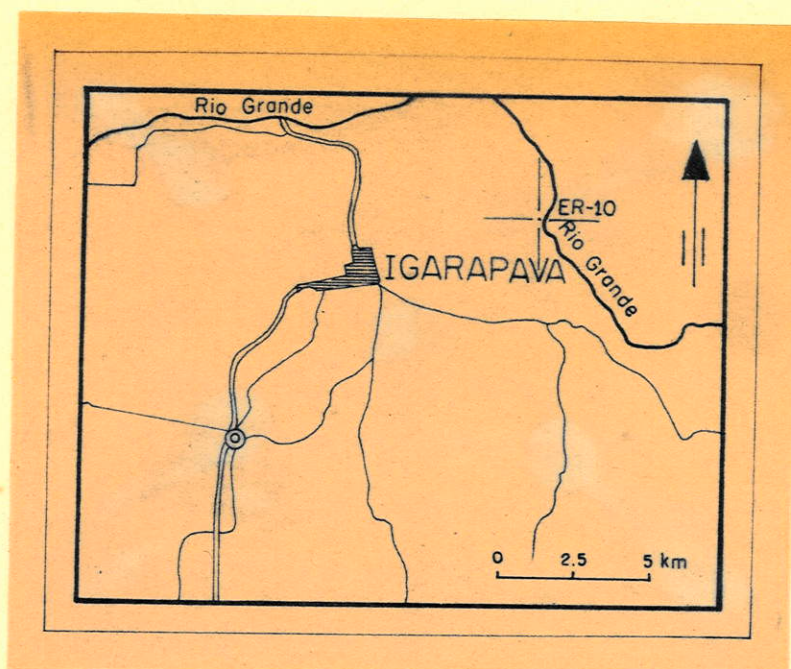


Fig. 31 Localização da sondagem elétrica.

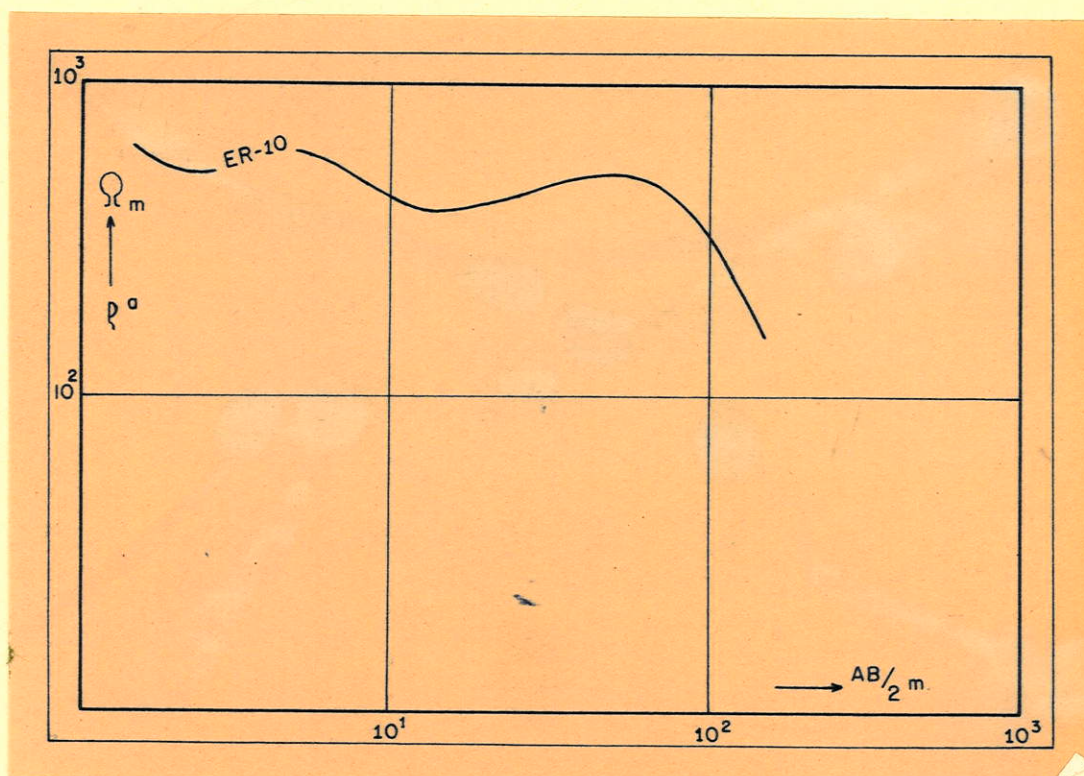


Fig. 32 Curva ER-10



d - ER-21

Essa sondagem elétrica ER-21 foi executada às margens da Estrada de Rodagem que liga São Carlos à Ribeirão Preto, na altura do km 254, na Fazenda Álamo (vide fig. 28).

Esta região é constituída de lavas basálticas capeando o arenito Botucatu.

A interpretação da curva ER-21 (fig. 33) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade   | espessura | resistividade | litologia          |
|----------------|-----------|---------------|--------------------|
| m              | m         | Ohm.m         |                    |
| 0,0 - 8,5      | 8,5       | .650          | solo argiloso      |
| 8,5 - 52,0     | 43,5      | 5.000         | derrame de basalto |
| maior que 52,0 |           | 30            | arenito Botucatu   |

Num levantamento geológico expedito, verificou-se, por meio de um altímetro, que o contato aflorante entre o basalto e o arenito situa-se 50<sup>m</sup> abaixo da cota do ponto onde foi executada a sondagem elétrica. Admitindo-se um contato horizontal, êste deve encontrar-se, no ponto onde foi executada a sondagem elétrica, numa profundidade de 50 metros, o que corresponde muito bem aos dados obtidos pela interpretação da curva de resistividade.

A camada de basalto <sup>pacote</sup> deve ser produto de uma série de derrames. Em face do resfriamento rápido dêstes derrames, apareceriam vesículas e diaclases paralelas às superfícies (superior e inferior). Êste diaclasamento, associado a diaclases verticais, permitiria a circulação da água que provocaria uma intemperização desta zona. Esta intemperização permitiria o aparecimento de zonas argilosas dentro do basalto, zonas essas muito condutoras dentro de um material pouco con



dutor. Aplicando-se uma corrente elétrica na superfície, esta corrente se concentra nestas faixas argilosas, provocando assim uma condutividade horizontal muito elevada em relação à condutividade transversal ao pacote de derrames (anisotropia elétrica). Medidas de resistividade efetuadas na superfície fornecem assim elevados valores de resistividade.

A resistência de contato média foi ao redor de 1.900 Ohm, porém, para distâncias maiores que  $AB/2 = 50$  m, a resistência de contato caiu para 650 Ohm por terem sido utilizados três (3) eletrodos de corrente em cada extremidade.

e - ER-23

A sondagem elétrica ER-23 foi executada numa fazenda localizada na altura do km 255 (vide fig. 35) na rodovia que liga São Carlos à Araraquara.

A sequência geológica neste local é a seguinte:

derrame de basalto

---

arenito Botucatu (intertrapiano)

---

derrame de basalto

A interpretação da curva ER-23 (fig. 34) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade   | espessura | resistividaæ | litologia                        |
|----------------|-----------|--------------|----------------------------------|
| m              | m         | Ohm.m        |                                  |
| 0,0 - 1,4      | 1,4       | 180          | solo argiloso (basalto alterado) |
| 1,4 - 3,0      | 1,6       | 700          | basalto fresco                   |
| 3,0 - 10,0     | 7,0       | 100          | arenito Botucatu (sêco)          |
| 10,0 - 40,0    | 30,0      | 30           | arenito Botucatu (saturado)      |
| maior que 40,0 |           | 600          | derrame de basalto               |



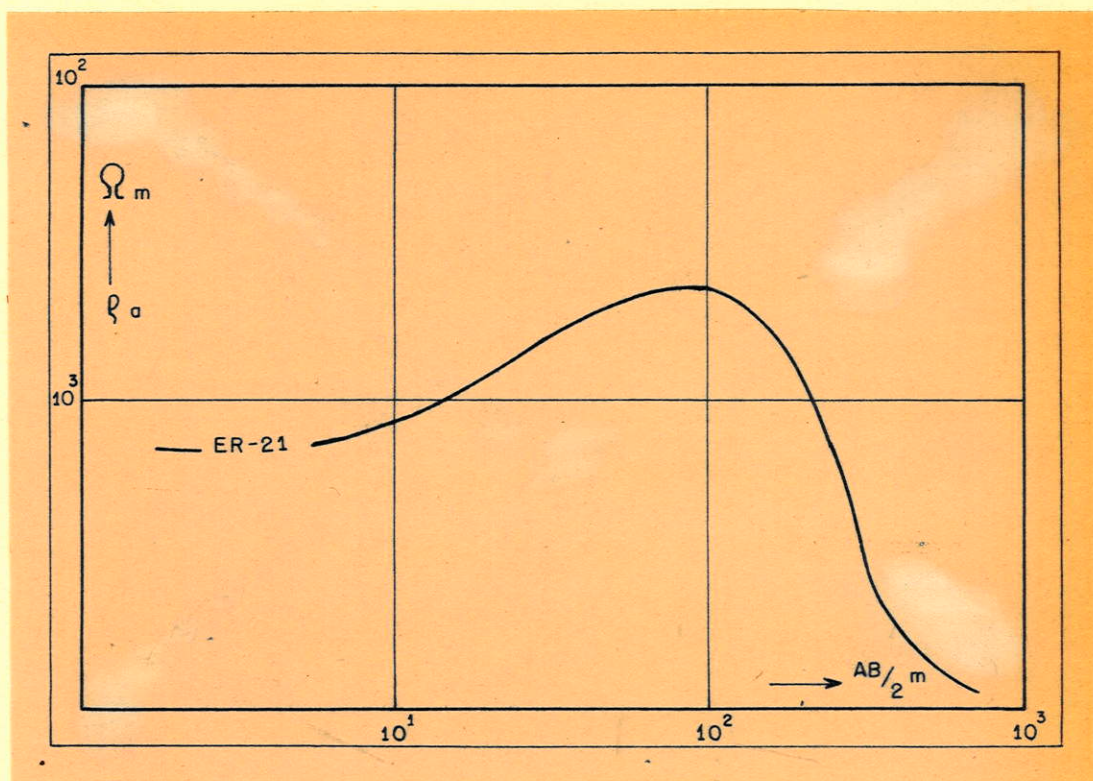
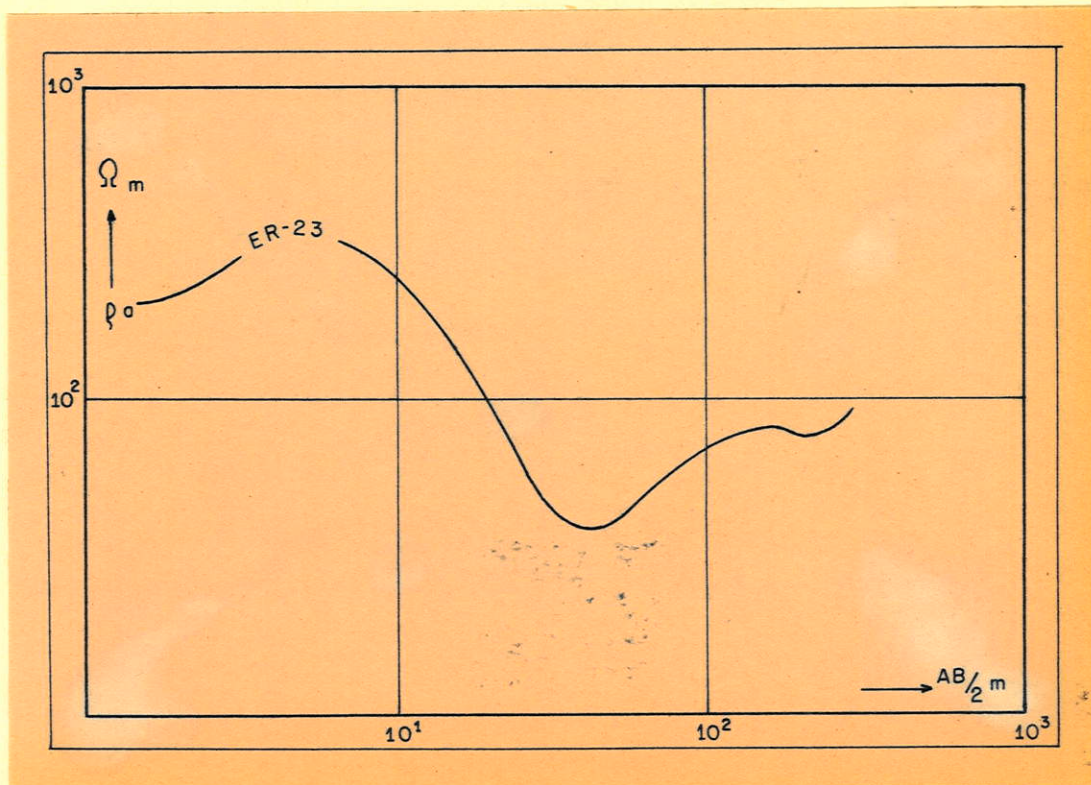


Fig. 33 Curva ER-21





Por meio de um altímetro foi possível verificar que o contato aflorante entre o derrame de basalto e o arenito, situa-se 3 m abaixo do ponto onde foi executada a sondagem elétrica. Admitindo-se um contato horizontal, pode-se admitir que no ponto onde foi executada a sondagem elétrica a profundidade do contato era também de 3 metros. Em um cisterna localizada à cerca de 300 metros deste ponto, verificou-se que o nível freático situa-se 10,5 metros abaixo da cota do ponto da sondagem elétrica, o que corresponde muito bem com a interpretação da curva.

f - ER-8, ER-28, ER-29

As sondagens elétricas ER-8, ER-28, ER-29 foram realizadas em diferentes pontos da Fazenda da Usina de Açúcar Tamoio, em Araraquara (fig. 35).

A sequência geológica nesse local é a seguinte:

derrame de basalto

---

arenito Botucatu (intertrapiano)

---

derrame de basalto

Observando-se as curvas (fig. 36) nota-se uma certa semelhança na forma das mesmas. Destas três, a curva ER-8 é a que melhor mostra a presença de 7 "camadas elétricas". A curva ER-28, se não apresenta nitidamente uma inflexão para cima na altura de  $AB/2 = 15$  m, pelo menos mostra essa tendência. A presença de uma 4ª camada, delgada em relação à profundidade, é responsável pela forma da curva.



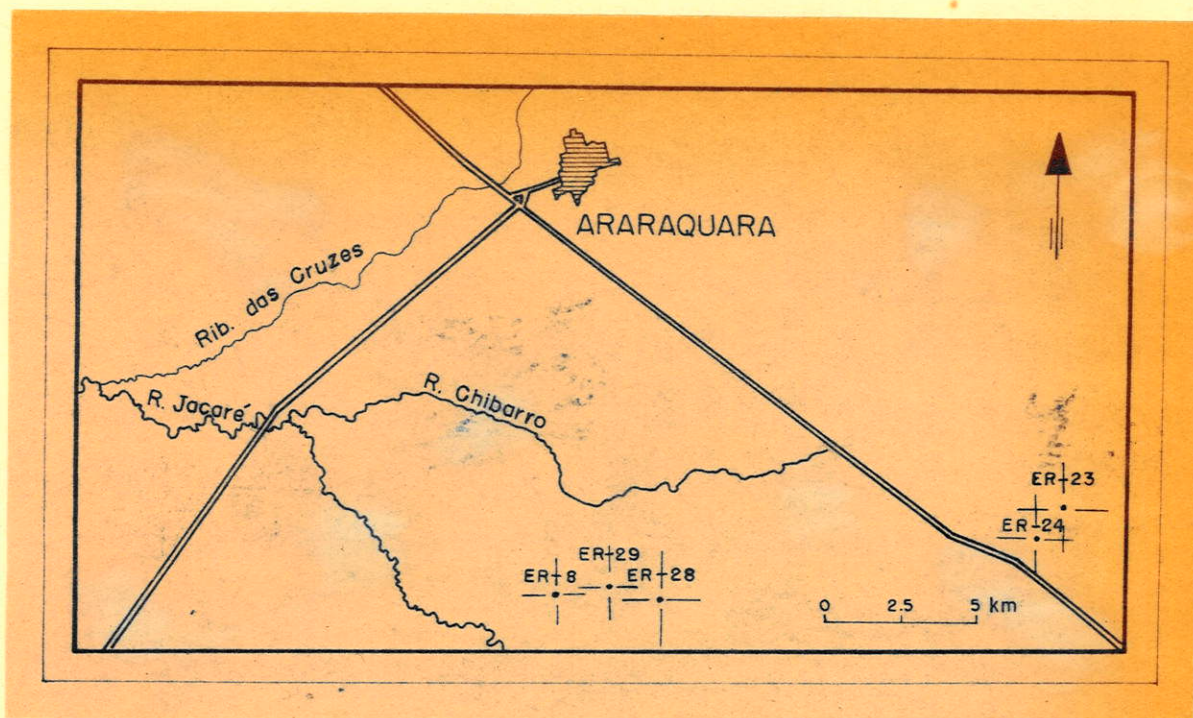


Fig. 35 Localização das sondagens elétricas.

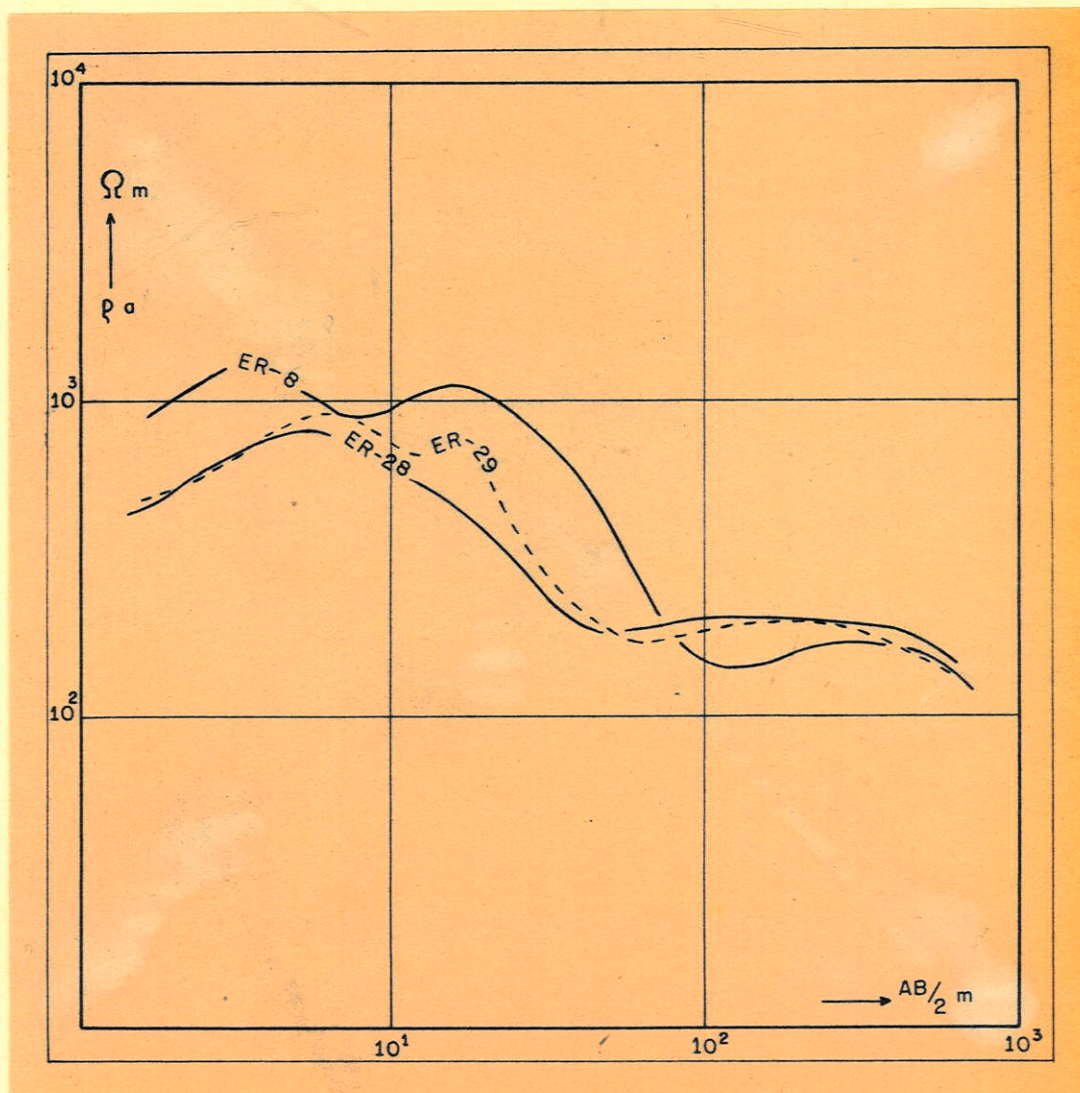


Fig. 36 Curvas ER-8,ER-28,ER-29



A interpretação das curvas ER-8, ER-28 e ER-29 (fig. 36) nos fornece o seguinte quadro:

| ER-8   |         | ER-28  |         | ER-29  |         |
|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| espes. | resist. | espes. | resist. | espes. | resist. |
| 1,5    | .900    | 1,0    | .360    | 1,7    | .450    |
| 1,5    | 6.000   | 1,5    | 2.000   | 2,0    | 1.500   |
| 1,0    | .230    | 2,5    | .230    | ?      | 150     |
| 9,0    | 2.000   | 3,0    | 1.300   | ?      | ?       |
| 30,0   | 60      | 6,0    | 60      | ?      | ?       |
| 180,0  | 200     | 200,0  | 200     | ?      | ?       |
|        | 60 (?)  |        | 60 (?)  | ?      | ?       |

A curva ER-29 não permite interpretação para camadas situadas a profundidades superiores a 6 m, por causa da situação topográfica desfavorável e variações laterais na litologia.

Êstes dados são apresentados neste trabalho com a finalidade de mostrar que não raramente, são necessárias várias sondagens elétricas numa região, a fim de se obter dados quanto as características elétricas das camadas bem como suas espessuras.

A resistência de contato média foi de 800 ohm.

A ausência de sondagens rotativas e contrôles de campo, não permitiu a confirmação dos dados obtidos a partir da interpretação das curvas.

#### g - ER-22

A sondagem elétrica ER-22 foi executada ao longo do acostamento da via Washington Luiz, na altura do km 240, na saída da cidade de São Carlos, rumo à Ibaté (vide fig. 28).

Das curvas obtidas para a elaboração dêste trabalho, é esta a que apresenta a maior gama de variação nos valores



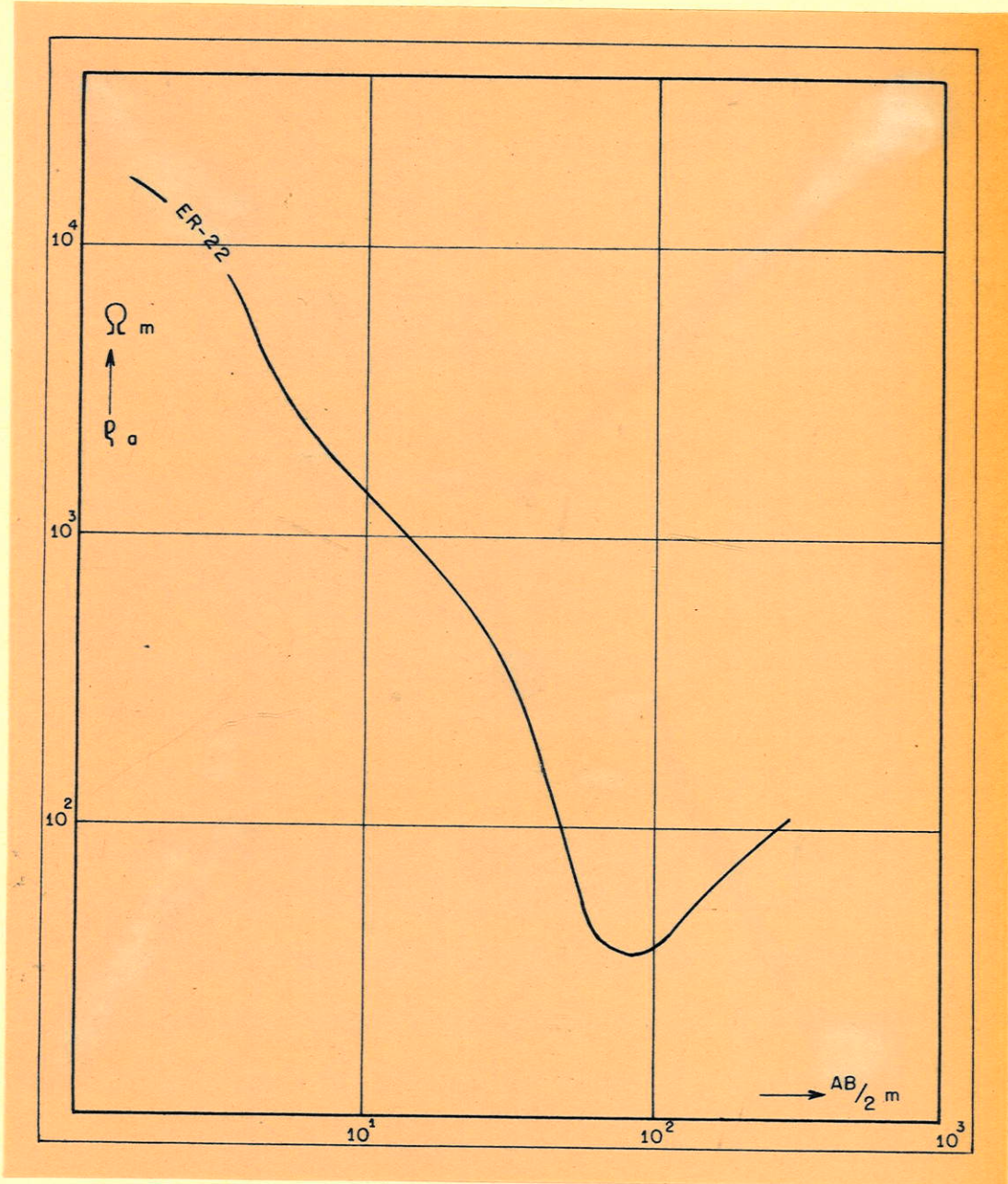


Fig. 37 Curva ER-22



de  $\rho_a$  medidos no campo, ou seja  $AB/2 = 1,5 \text{ m}$   $\rho_a = 17.000$  Ohm.m e para  $AB/2 = 80 \text{ m}$   $\rho_a = 36 \text{ Ohm.m}$

Os seguintes dados são obtidos na interpretação desta curva ( fig. 37 )

| profundidade   | espessura | resistividade | litologia  |
|----------------|-----------|---------------|--|
| m              | m         | Ohm.m         |  |
| 0,0 - 1,3      | 1,3       | 19.000        | camada de solo compacto seco                               |
| 1,3 - 3,6      | 2,3       | 4.000         | areia seca onde a fração argilosa foi retirada (eluviação) |
| 3,6 - 16,0     | 12,4      | 900           | arenito Baurú seco   |
| 16,0 - 60,0    | 44,0      | 20            | arenito Baurú saturado                                     |
| maior que 60,0 |           | 650           | derrame de basalto   |

Nas proximidades do ponto de medida, uma cisterna apresentava, na ocasião da sondagem elétrica, o nível d'água a uma profundidade de cerca de 15 m. Em um ponto situado a aproximadamente 500 m do ponto da sondagem elétrica, foi executada uma sondagem rotativa que atingiu a camada basáltica numa profundidade de 60 m (informação verbal), o que corresponde muito bem à profundidade obtida pela interpretação da curva.

h - ER-24

A sondagem elétrica ER-24 foi executada na altura do km 255, da rodovia que liga São Carlos à Araraquara (fig. 35)

A sequência geológica neste local é a seguinte

arenito Baurú

---

derrame de basalto

---

arenito Botucatu (intertrapiano)

---

derrame de basalto



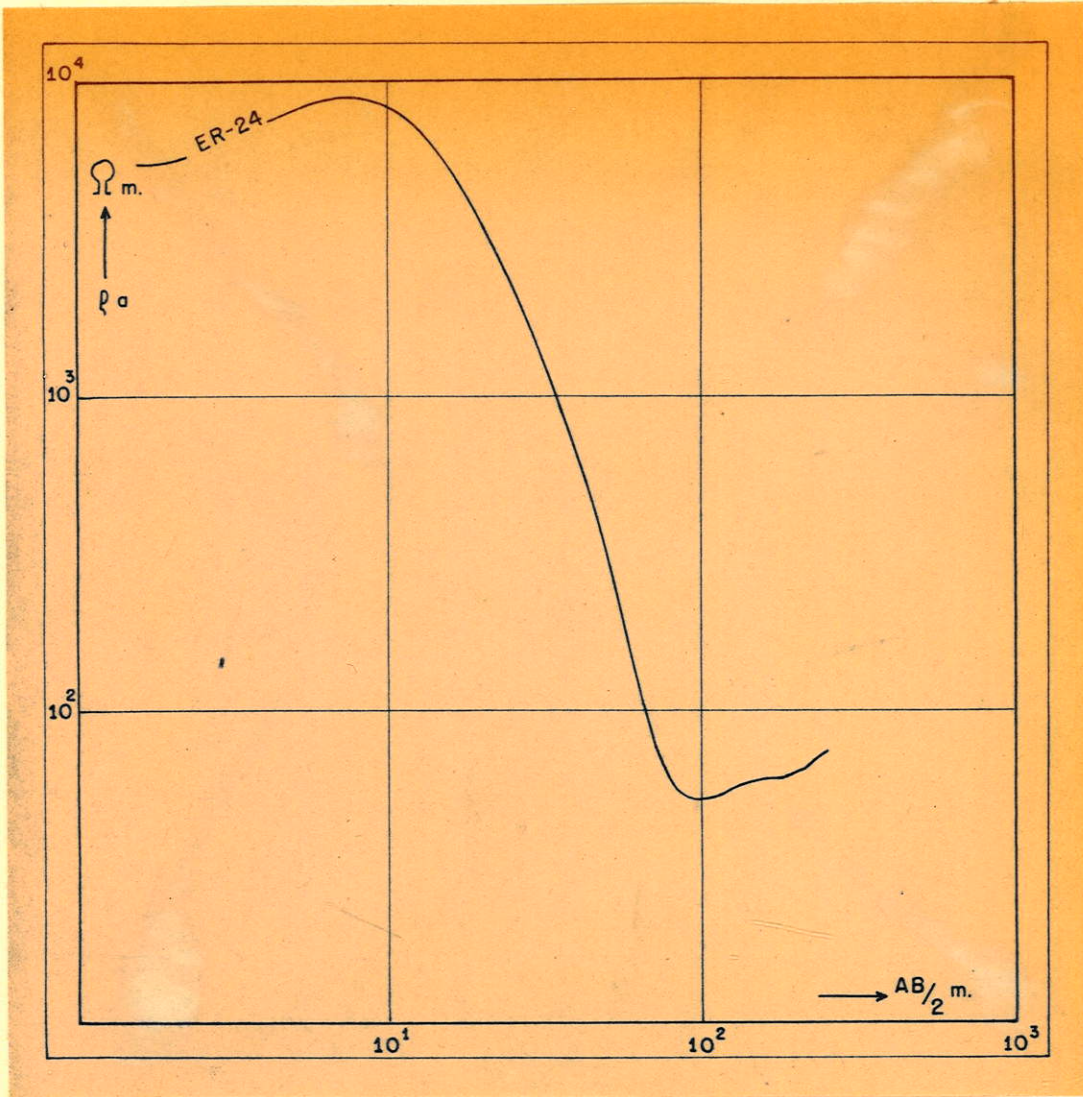
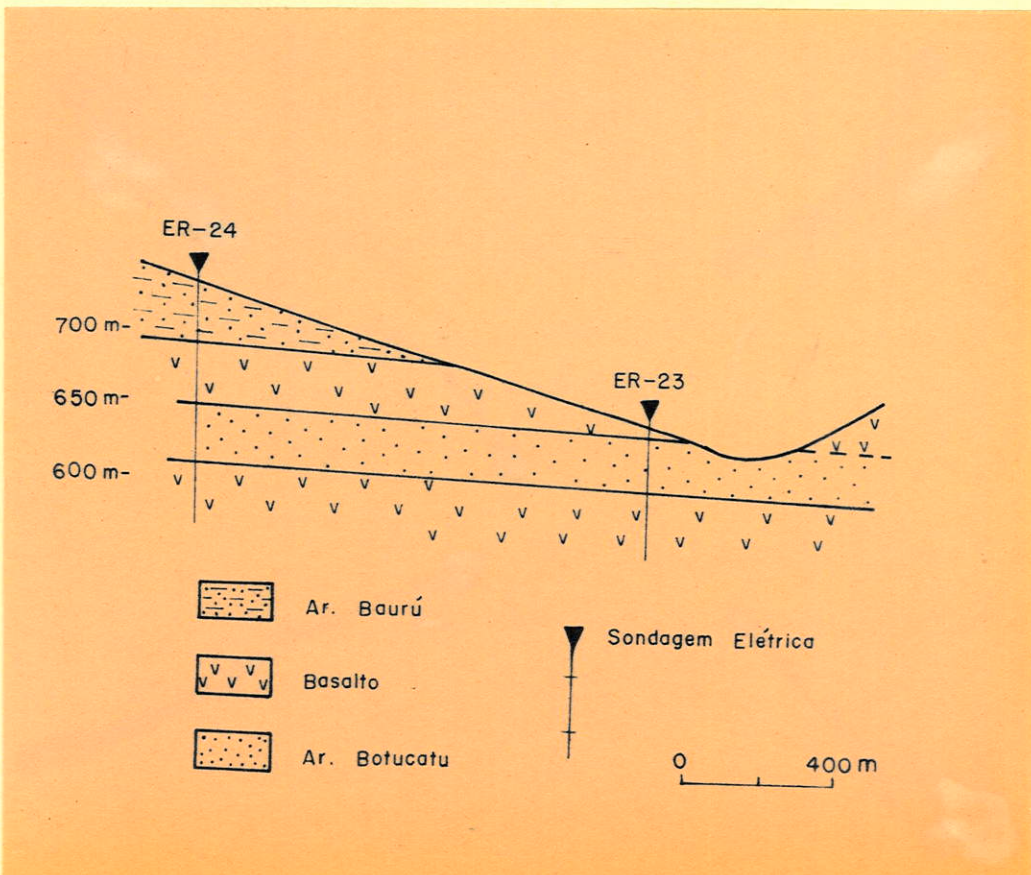


Fig. 37 Curva ER-24





A interpretação desta curva nos fornece os seguintes dados (fig. 38).

| profundidade    | espessura | resistividade | litologia                       |
|-----------------|-----------|---------------|---------------------------------|
| m               | m         | Ohm.m         |                                 |
| 0,0 - 1,5       | 1,5       | 4.800         | camada de solo agrícola         |
| 1,5 - 5,0       | 3,5       | 20.000        | camada arenosa seca sem argila  |
| 5,0 - 21,0      | 16,0      | 600           | camada de arenito Baurú seco    |
| 21,0 - 41,0     | 20,0      | 18            | arenito Baurú saturado d'água   |
| 41,0 - 85,0     | 44,0      | 150           | camada de basalto (fraturado ?) |
| 85,0 - 125,0    | 40,0      | 30            | arenito Botucatu saturado       |
| maior que 125,0 |           | 670           | camada de basalto.              |

A construção de um perfil geológico por meio de um altímetro nos fornece a seguinte coluna:

| espessura | profundidade |
|-----------|--------------|
| m         | m            |
|           | 0,0          |
| 30,0      | 30,0         |
| 40,0      | 70,0         |
|           |              |

arenito Baurú  
derrame de basalto  
arenito Botucatu

A fig. 39 representa a secção geológica obtida entre os pontos ER-23 e ER-24 a partir dos dados obtidos da interpretação das curvas de resistividade e observações de campo.

1 - ER-9

A sondagem elétrica ER-9 executada na rodovia que



passa por Bálsamo (fig. 40), na altura da cidade, foi aí realizada por existirem dois poços profundos, dos quais um estava ainda em fase de perfuração. Neste poço foi executado um perfil de poço a fim de determinar a resistividade real da camada de arenito. Com os dados obtidos, foi possível interpretar a sondagem elétrica, no que se refere à determinação da profundidade do contato entre o basalto e o arenito Baurú sobrejacente.

A interpretação da curva ER-9 (fig. 41) nos fornece os seguintes dados:

| profundidade | espessura | resistividade | litologia                    |
|--------------|-----------|---------------|------------------------------|
| m            | m         | Ohm.m         |                              |
| 0,0 - 1,1    | 1,1       | 130           | solo arenoso saturado d'água |
| 1,1 - 5,0    | 3,9       | 44            | arenito saturado             |
| 5,0 - 40,0   | 35,0      | 18            | arenito Baurú saturado       |
| 40,0 - 230,0 | 190,0     | 29            | " " "                        |
|              |           | 700           | basalto                      |

Uma observação dessa curva permite verificar que ela sofre uma inflexão para cima na altura de  $AB/2 = 50$  m, indicando a presença de uma camada com resistividade mais elevada. Admitindo-se, ao interpretar essa curva, a presença dessa camada de resistividade maior, obtem-se uma profundidade de 230 m para o contato entre o arenito e o basalto, valor este que difere muito do obtido pela sondagem. Segundo informações do Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo, o basalto encontra-se numa profundidade de 140 m. Assim sendo, esta curva se apresenta com essa forma devido a interferências causadas pelas irregularidades topográficas do local.



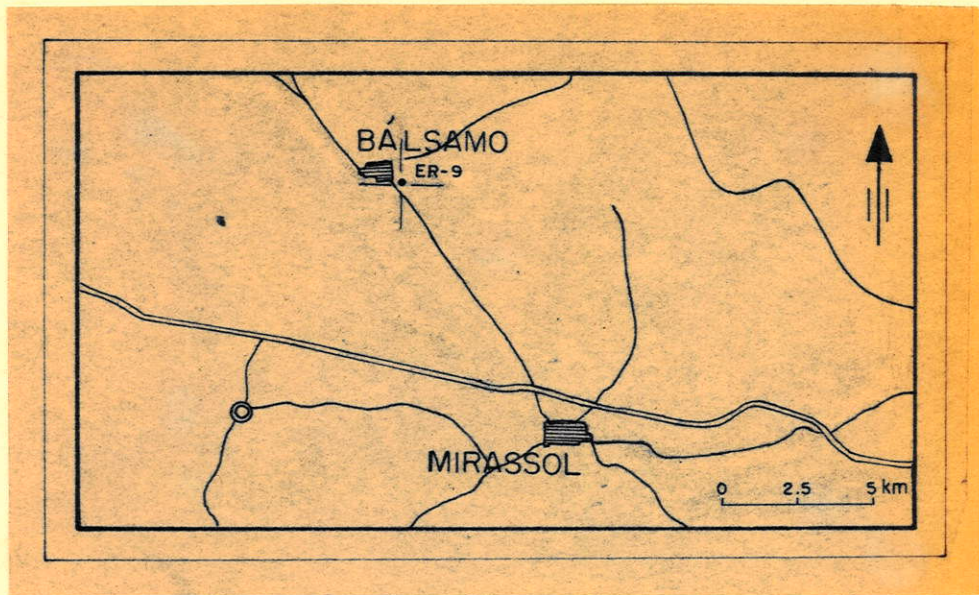


Fig. 40 Localização da sondagem elétrica.

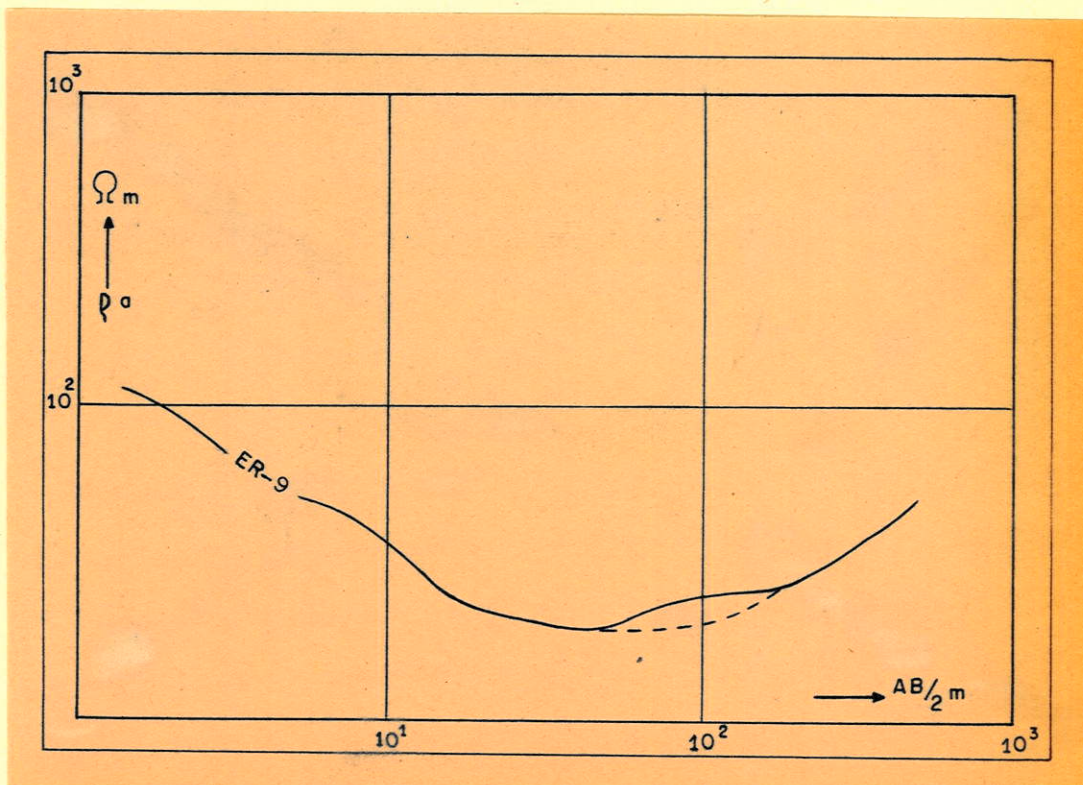


Fig. 41 Curva ER-9



A fim de que a profundidade do contato entre as duas camadas, profundidade essa obtida a partir da interpretação da curva condiga com a realidade, deve-se interpretá-la da seguinte maneira:

| profundidade    | espessura | resistividade | litologia                    |
|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| m               | m         | Ohm.m         |                              |
| 0,0 - 1,1       | 1,1       | 120           | solo arenoso saturado d'água |
| 1,1 - 5,0       | 3,9       | 44            | arenito saturado             |
| 5,0 - 135,0     | 130,0     | 18            | arenito Baurú saturado       |
| maior que 135,0 |           | 670           | basalto                      |

Os dados obtidos pelo perfil de poço executado fornecem uma resistividade real da camada de arenito Baurú de 19,4 Ohm.m o que corresponde muito bem ao valor obtido quando da execução da sondagem elétrica. O valor da resistividade aparente obtido na sondagem elétrica se aproxima muito do valor real em virtude da grande espessura da camada de arenito.

#### 10 - Considerações gerais

a - Dos aquíferos existentes no Estado de São Paulo, são os arenitos da formação Botucatu (cêrca de  $34 \text{ m}^3/\text{h}/\text{poço}$ ). Poços perfurados nesses sedimentos podem atingir vazões específicas de algumas dezenas à mais de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  (p.ex. Serrana =  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ , I.G.G., boletim 44).

Se houver necessidade de se perfurar um poço numa região onde a camada de arenito Botucatu sobrejacente ao derrame de basalto não é muito espêssa, deve-se procurar perfurar nos pontos onde a cota do contato entre as duas camadas seja menor, ou seja nas depressões da superfície do derrame.



Em geral consegue-se determinar facilmente a profundidade da superfície de contato e, portanto a espessura do arenito.

Se a superfície do terreno é formada por um solo de areia solta e seca, os trabalhos de campo devem ser dirigidos de tal maneira que as sondagens elétricas sejam executadas nos vales dos rios, uma vez que o solo seco e arenoso (p.ex. ER-20) apresenta uma resistência de contato muito elevada e onde as areias úmidas diminuem a resistência de contato.

A resistividade do arenito Botucatu saturado d'água é da ordem de 30 Ohm.m. O mesmo arenito, porém seco, apresenta resistividades que variam de 100 à 45.000 Ohm.m.

Nas medidas executadas nos vales dos rios (riachos, baixadas) parece ser possível determinar-se a espessura do material de origem recente ligado à retrabalhamento do arenito Botucatu (ER-19).

b - Sondagens elétricas realizadas em áreas cobertas por sedimentos da Série Baurú permitiram determinar a espessura desses sedimentos, bem como determinar a profundidade da superfície dos derrames de basalto. Frequentemente foi possível determinar-se a profundidade do nível freático.

A resistividade dos sedimentos da Série Baurú quando saturados d'água, é da ordem de 20 Ohm.m, ou seja menor que a dos arenitos da formação Botucatu. Tal fato, muito provavelmente, é produto da presença da fração argilosa nesses arenitos.

c - Se a sequência geológica de um local for  
derrame de basalto  

---

arenito Botucatu



e sendo o arenito Botucatu aquífero, é necessário perfurar a camada de basalto para se atingir o arenito.

Se por um lado é fácil determinar a espessura da camada de basalto, por outro lado, dependendo da topografia e da continuidade lateral da camada, é necessário a execução de uma série de sondagens para se obter dados quanto ao comportamento do contato entre o derrame e a camada de arenito.

Marcante é a variação da resistividade das camadas basálticas. Se por um lado ocorrem resistividades da ordem de 600 - 700 Ohm.m, há locais onde elas atingem valores de 5.000 - 6.000 Ohm.m; a valores altos parece corresponder pacotes constituídos por uma série de derrames, onde em face da alteração ao longo das diaclases, surge uma anisotropia elétrica elevada.

Algumas sondagens elétricas foram executadas com espaçamentos  $\overline{MN} = 80$  m. Mesmo com espaçamentos dos eletrodos de potencial desta grandeza, a intensidade das correntes tellúricas, quando presentes, era em geral muito pequena.

Uma vez que o solo proveniente da decomposição do basalto é argiloso (ou siltoso), a resistência de contato é pequena da ordem de 400 - 800 Ohm.

#### c - BAIXADA LITORÂNEA (PLEISTOCENO (?)), PRAIA GRANDE

A terceira fase dos trabalhos de campo teve por fim estudar uma parte da faixa litorânea do Estado de São Paulo, sendo para tanto escolhida a região compreendida entre São Vicente e Mongaguá, ao longo da Praia Grande.

Estes trabalhos foram feitos visando o seguinte:

- a - obter dados referentes à resistividade das camadas sedimentares.



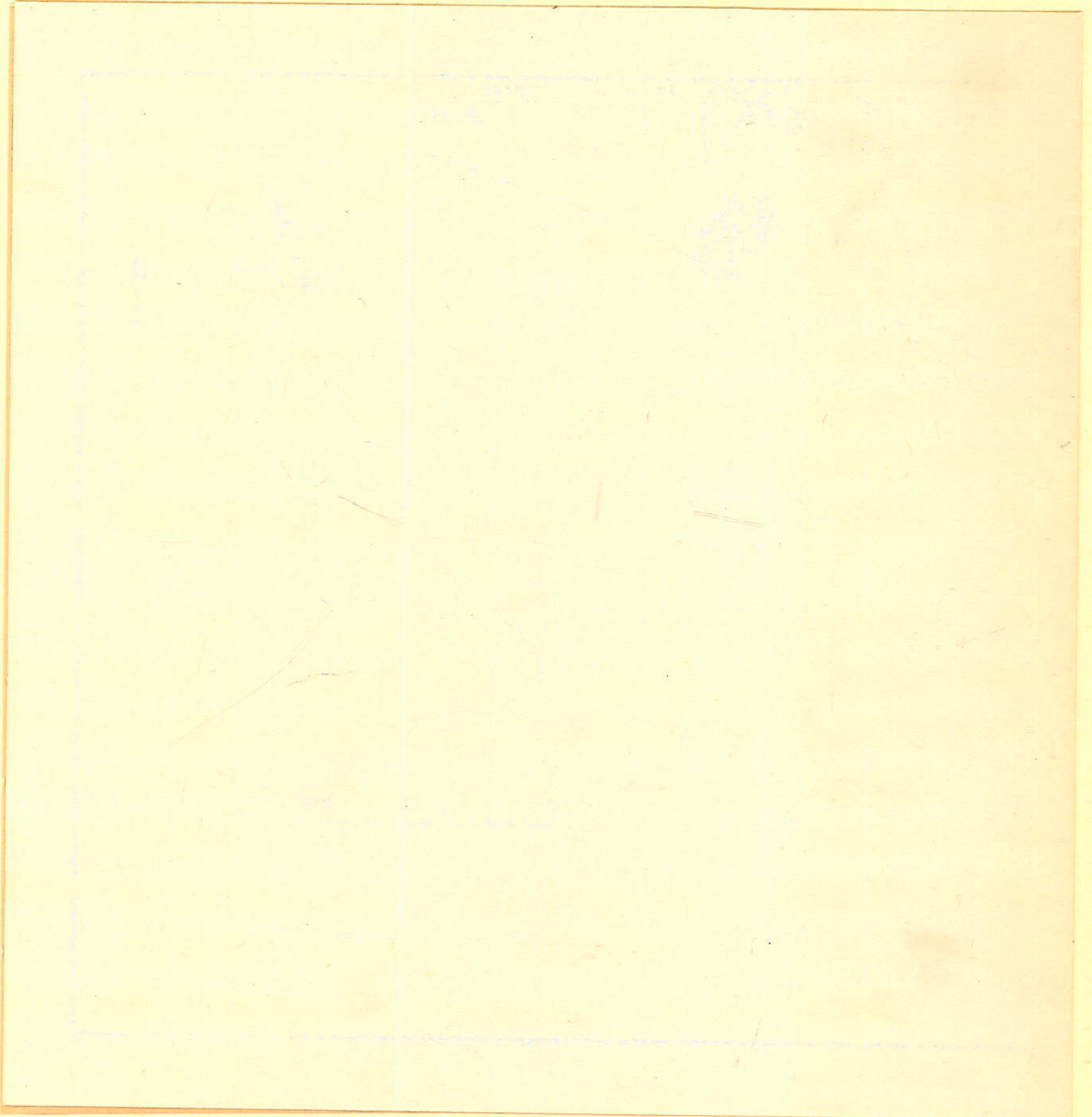


Fig. 42 Localização das sondagens elétricas.



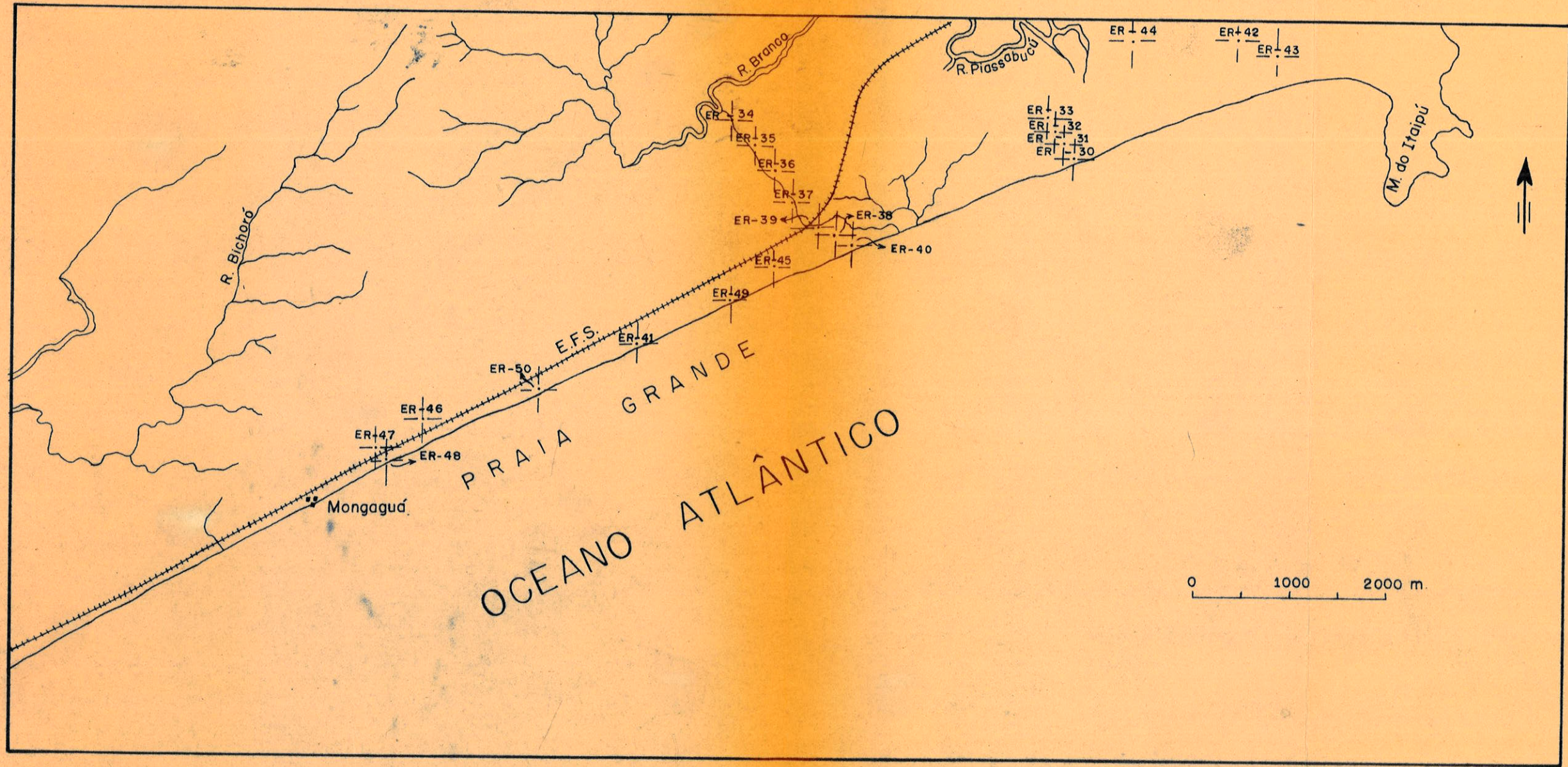


Fig. 42 Localização das sondagens elétricas.



- b - verificar a situação do relêvo da superfície do embasamento cristalino subjacente.
- c - investigar, caso existir, como se comportaria o contato entre a água doce e salgada ( ou salobra) proveniente da penetração da água do mar ou água fóssil prêsna nos sedimentos.

As curvas de eletroresistividade estão agrupadas de modo que a interpretação das mesmas possa fornecer dados que permitam a construção de uma secção vertical.

A localização das sondagens elétricas executadas na área da Praia Grande está representada na fig. 42.

#### 1 - Secção Vertical I ? ?

Esta secção vertical (fig. 45), obtida a partir da interpretação das curvas ER-30, ER-31, ER-32 e ER-33 ( fig. 43), apresenta uma série de camadas sedimentares cujas resistividades variam de 1,6 à 600 Ohm.m. Os valôres baixos de resistividade encontram-se próximos à praia e devem-se à penetração da água do mar.

A presença de uma camada basal, situada imediatamente acima do embasamento cristalino é comum a tôda a secção. Como é também encontrada nas outras secções, podemos concluir que sua presença seja regional, e poderia ser interpretada, em primeira hipótese, como sendo uma camada de material argiloso.

#### 2 - Secção Vertical II (fig, 45)

A interpretação das curvas ER-42, ER-43 e ER-44 (fig. 44) no fornecem dados para a construção desta secção vertical.



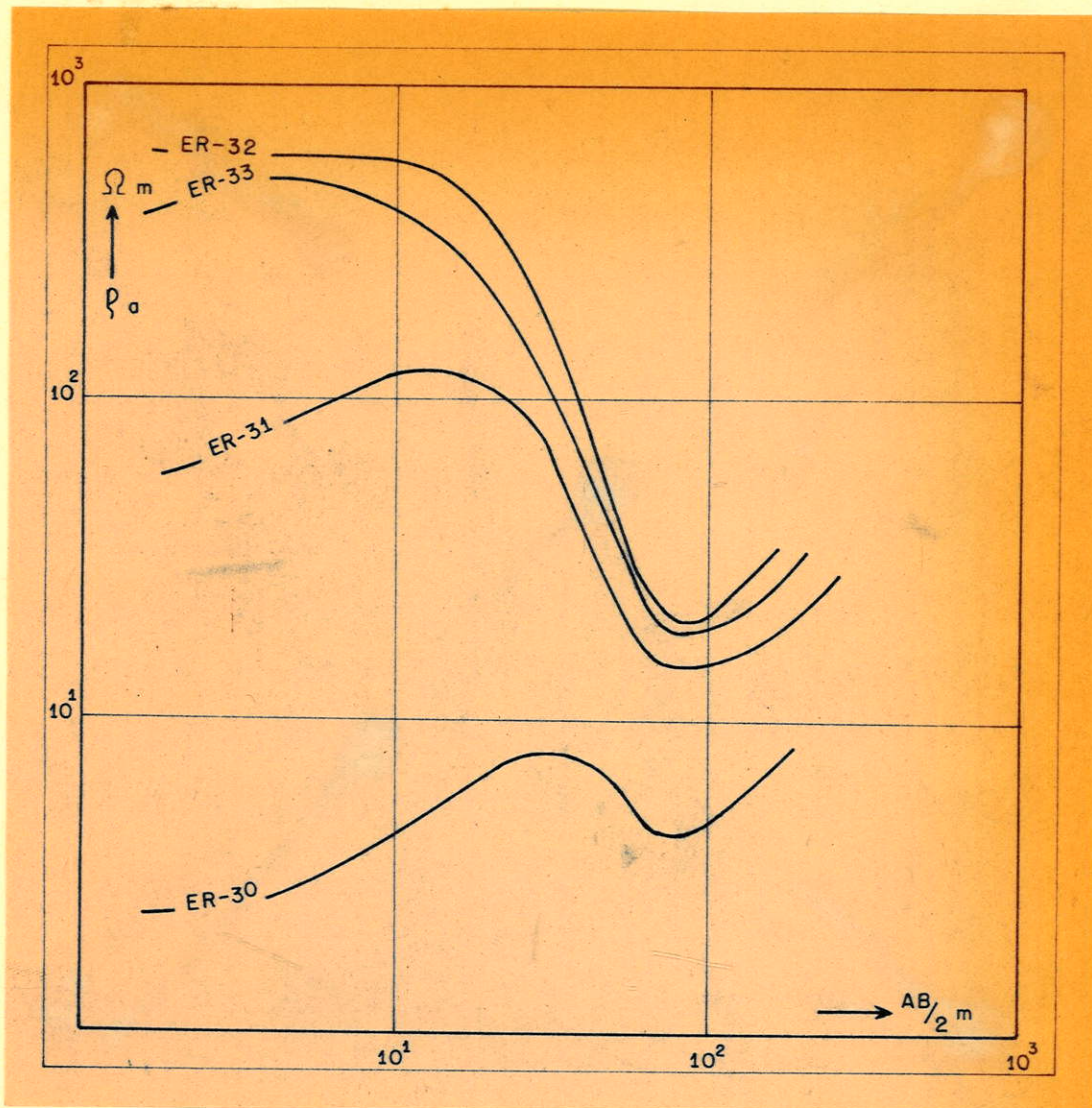
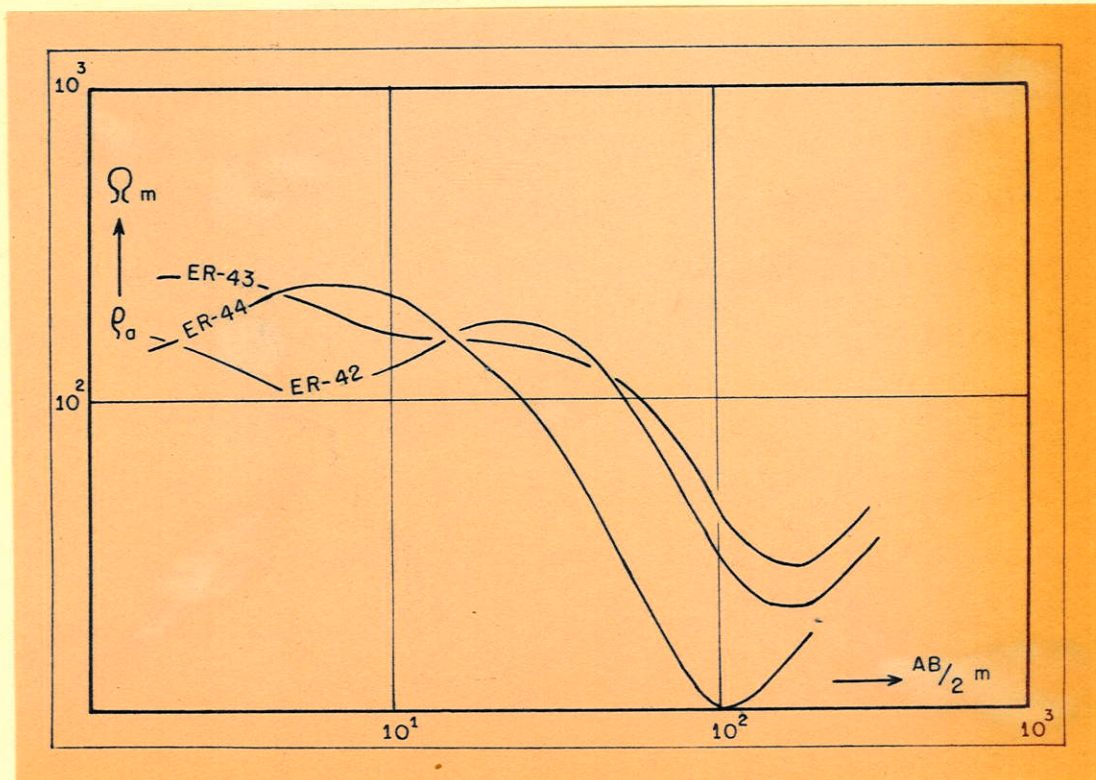


Fig. 43 Curvas ER-30, ER-31, ER-32, ER-33





A camada basal de boa condutividade, já mencionada, está presente nesse perfil. Verificou-se porém que o valor da resistividade desta camada diminui ao aproximar-se do rio Branco. O lençol d'água doce da área compreendida entre o mar e o rio Branco está penetrado pela água do mar tanto do lado deste como do lado do rio no qual a água do mar penetra vários quilômetros adentro. Como o ponto da sondagem elétrica ER-44 está localizado mais próximo do rio Branco do que o ponto ER-42 do mar, a penetração da água salobra é maior diminuindo a resistividade.

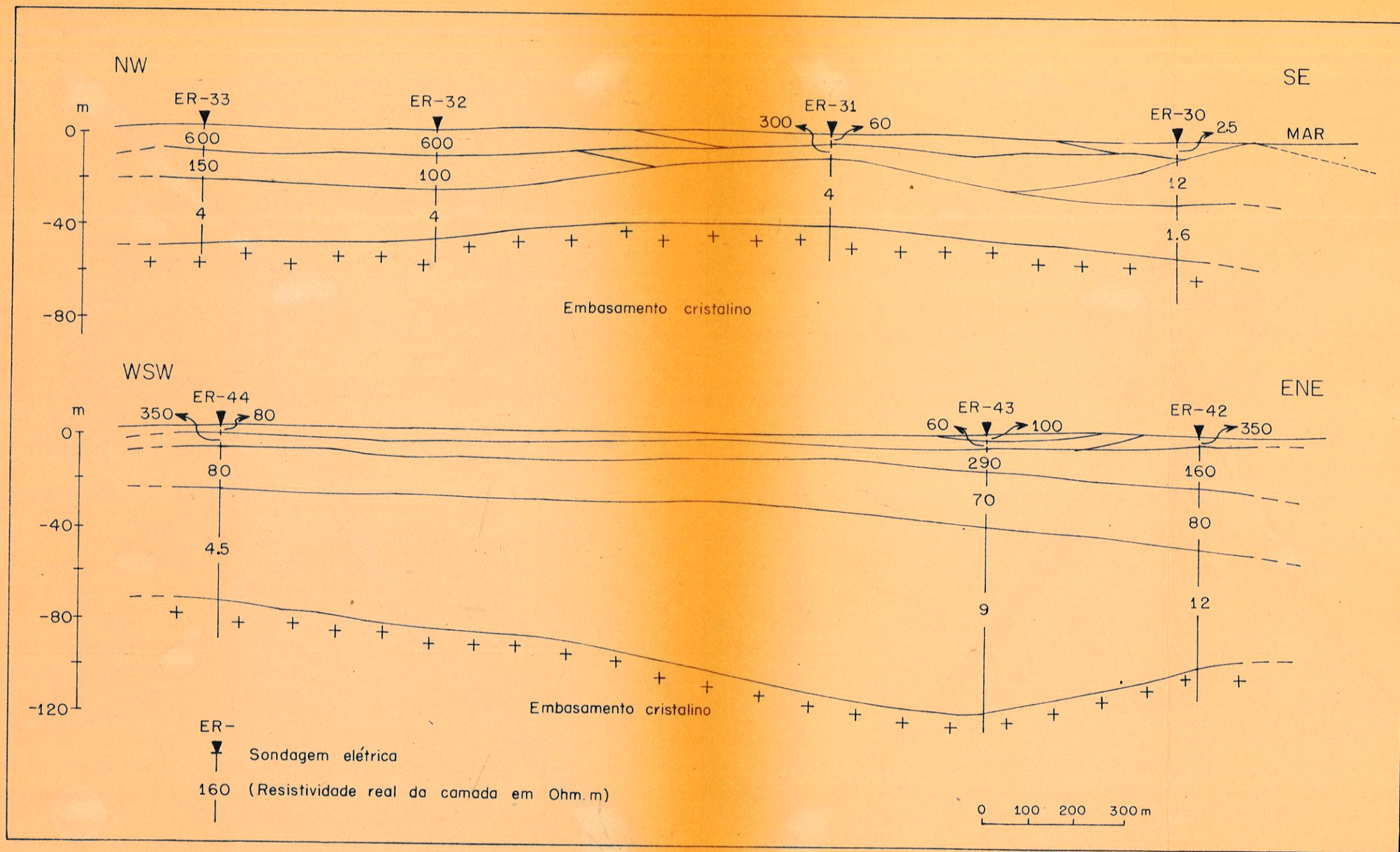
Na área pesquisada, a maior profundidade encontrada para o embasamento cristalino foi de cerca de 120 m e localizada no local onde foi executada a sondagem elétrica ER-43.

### 3 - Secção Vertical III (fig. 48)

As sondagens elétricas ER-47 e ER-48 (fig. 46) foram executadas na área de Mongaguá, para estudar-se a situação das camadas sedimentares no tocante à suas resistividades, numa faixa onde a Serra do Mar se aproxima da praia.

Na secção III (fig. 48), observa-se que apesar da sondagem elétrica ER-47 ter sido executada a cerca de 250 m das primeiras elevações da Serra do Mar, o embasamento cristalino encontra-se numa profundidade superior a 60 m. Observa-se que a camada imediatamente acima do embasamento cristalino, apresenta nesta região uma resistividade de 10 Ohm.m, enquanto que no ponto de ER-48 esta camada apresenta • valor de 1,6 Ohm.m, produto talvez da penetração da água do mar, ou então, como apresentado anteriormente, seja ela uma camada constituída de material argiloso.





SECÇÕES VERTICAIS I e II

Fig. 45 Secções verticais I e II



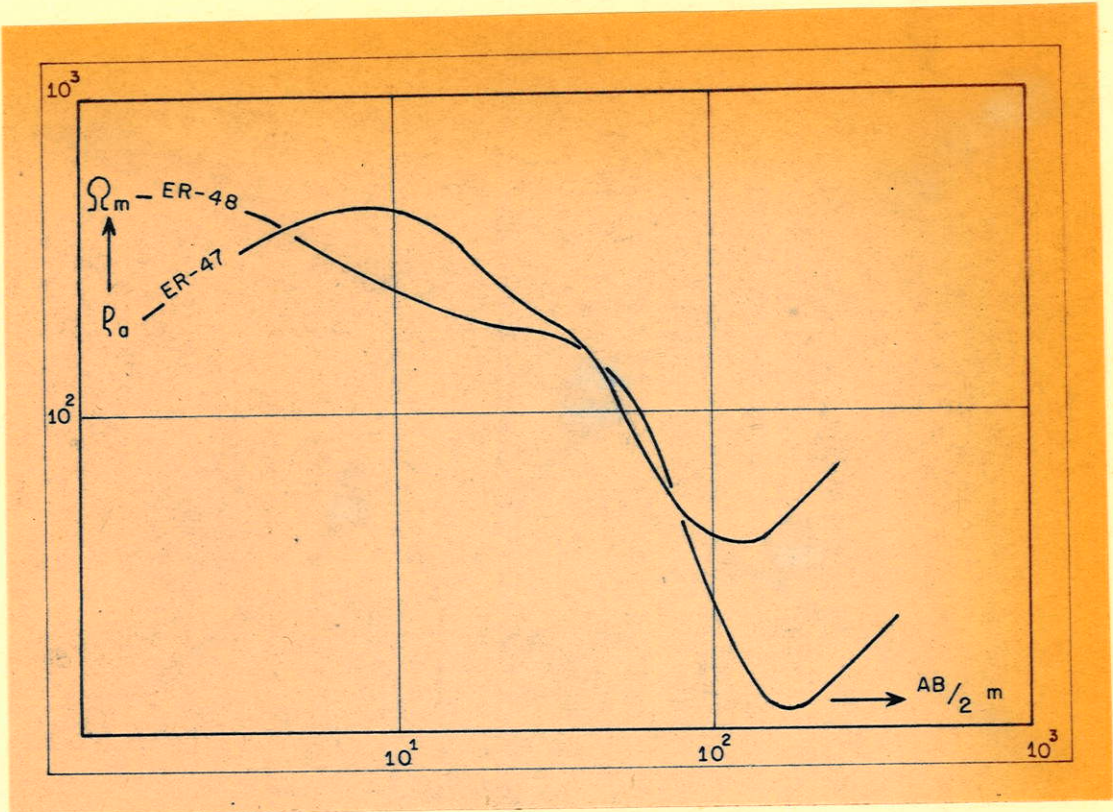


Fig. 46 Curvas ER-47, ER-48

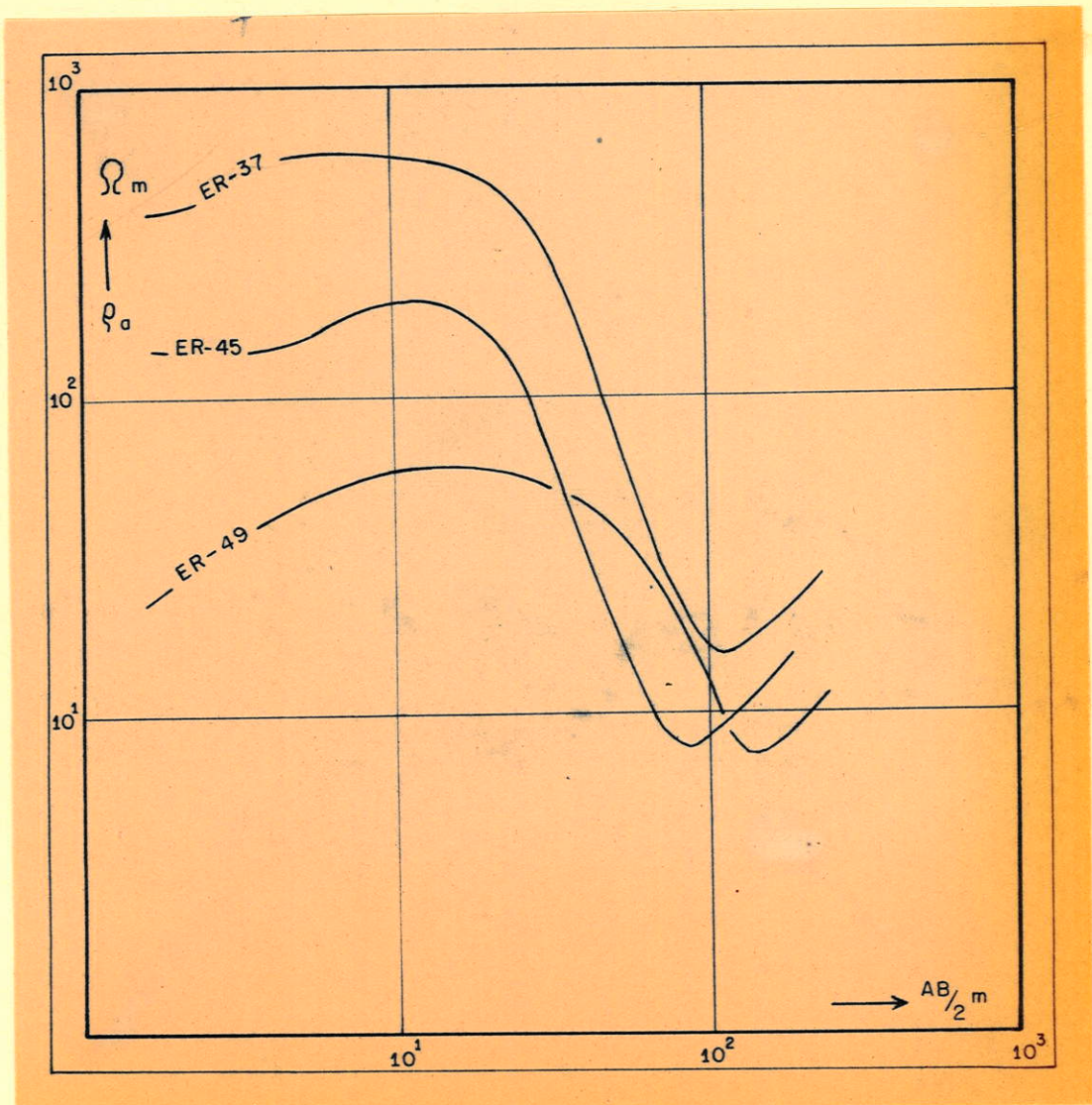


Fig. 47 Curvas ER-37, ER-45, ER-49



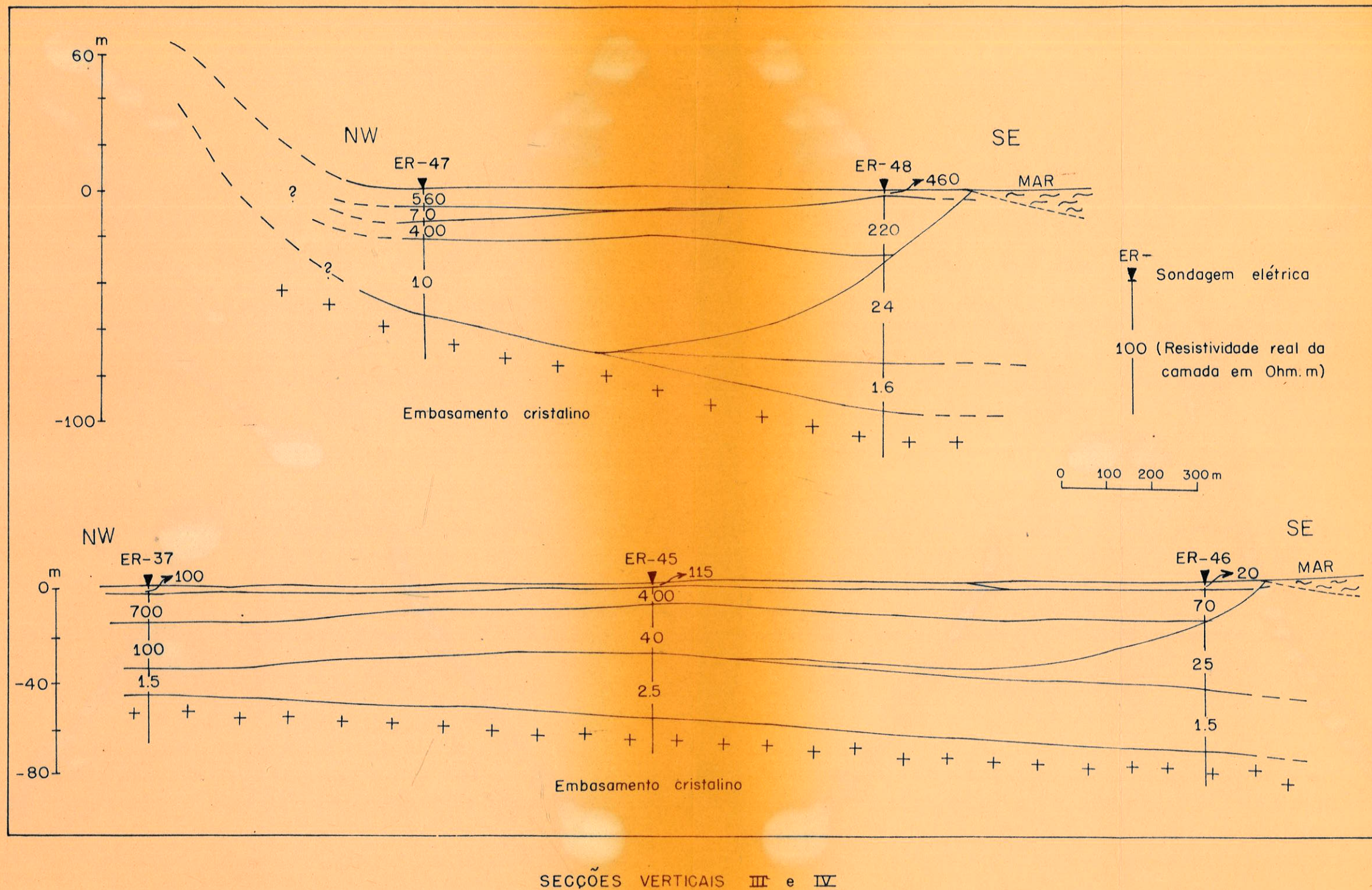


Fig. 48 Secções verticais III e IV



#### 4 - Secção Vertical IV (fig. 48)

Esta secção vertical, obtida pela interpretação das curvas ER-37, ER-45 e ER-46 (fig. 47), mostra que a superfície do embasamento cristalino mergulha suavemente em direcção ao mar. Acima da camada basal existem duas camadas, provavelmente de areia, cujas resistividades aumentam em direcção à Serra do Mar. A resistividade menor na parte próxima da praia deve-se à penetração da água do mar.

#### 5 - Secção Vertical V (fig. 51)

A interpretação das curvas ER-34, ER-35, ER-36, ER-37, ER-38, ER-39 e ER-40 (Fig. 49) fornecem dados para a construção desta secção.

Nesta secção, o pacote sedimentar, constituído de argilas (fluviáteis ou marinhas), areias e cascalho (?), não ultrapassa 60 m de espessura. A superfície do embasamento cristalino apresenta pequenas ondulações, onde a diferença de nível não ultrapassa 20 m. A camada basal se prolonga desde a praia até, pelo menos, o Rio Branco. Sobrejacente à camada basal, existe uma de resistividade relativamente alta, com espessura da ordem de 20 m, que se prolonga desde a praia até ER-35. Esta camada pode ser interpretada como sendo formada por areia contendo o lençol aquífero doce.

#### 6 - Secção Vertical VI (fig. 51)

Ao longo da praia, na direcção NE-SW foram realizadas 7 sondagens eléctricas (fig. 50), para determinar a topografia do embasamento e também detectar a presença ou ausência



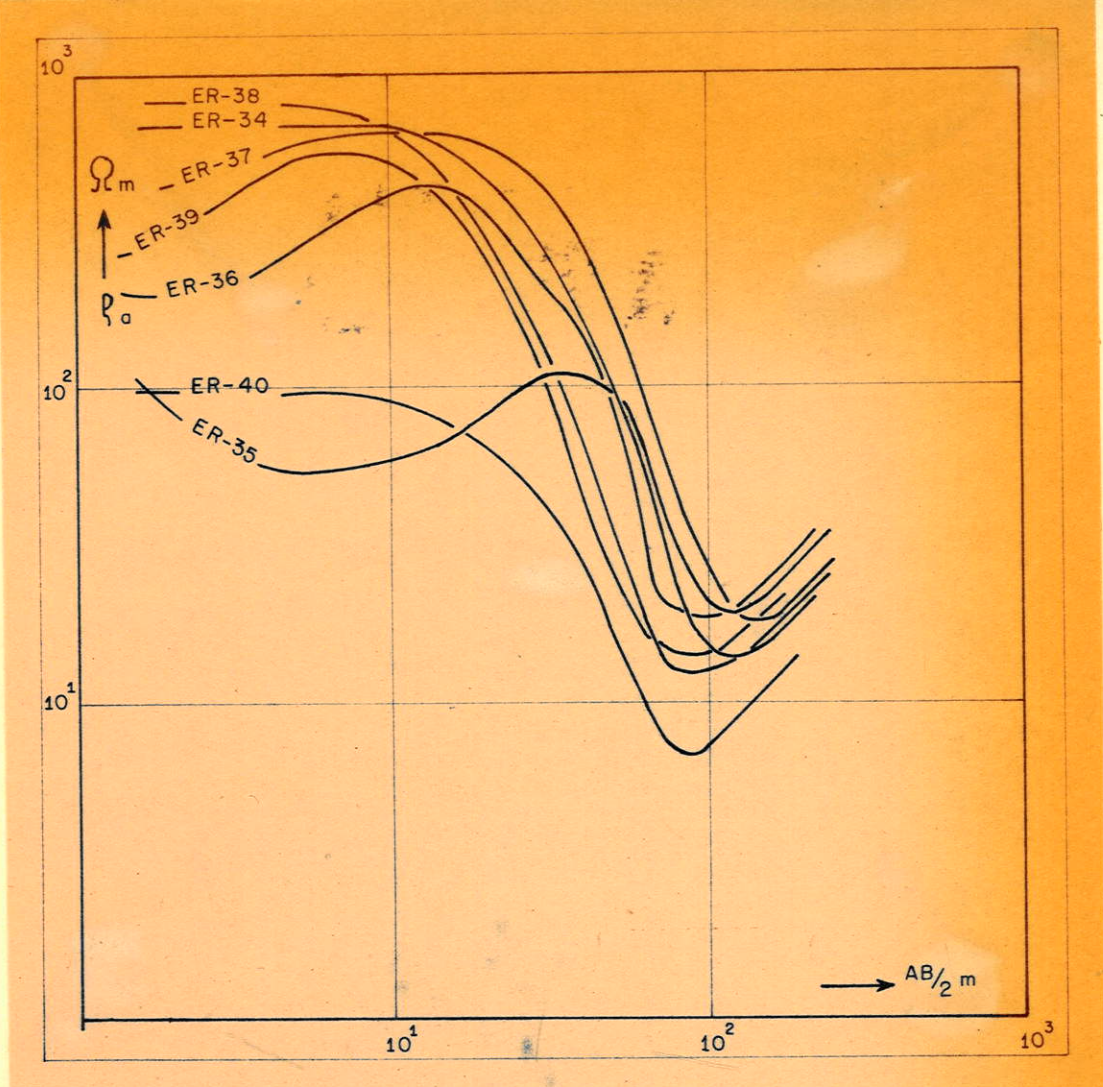
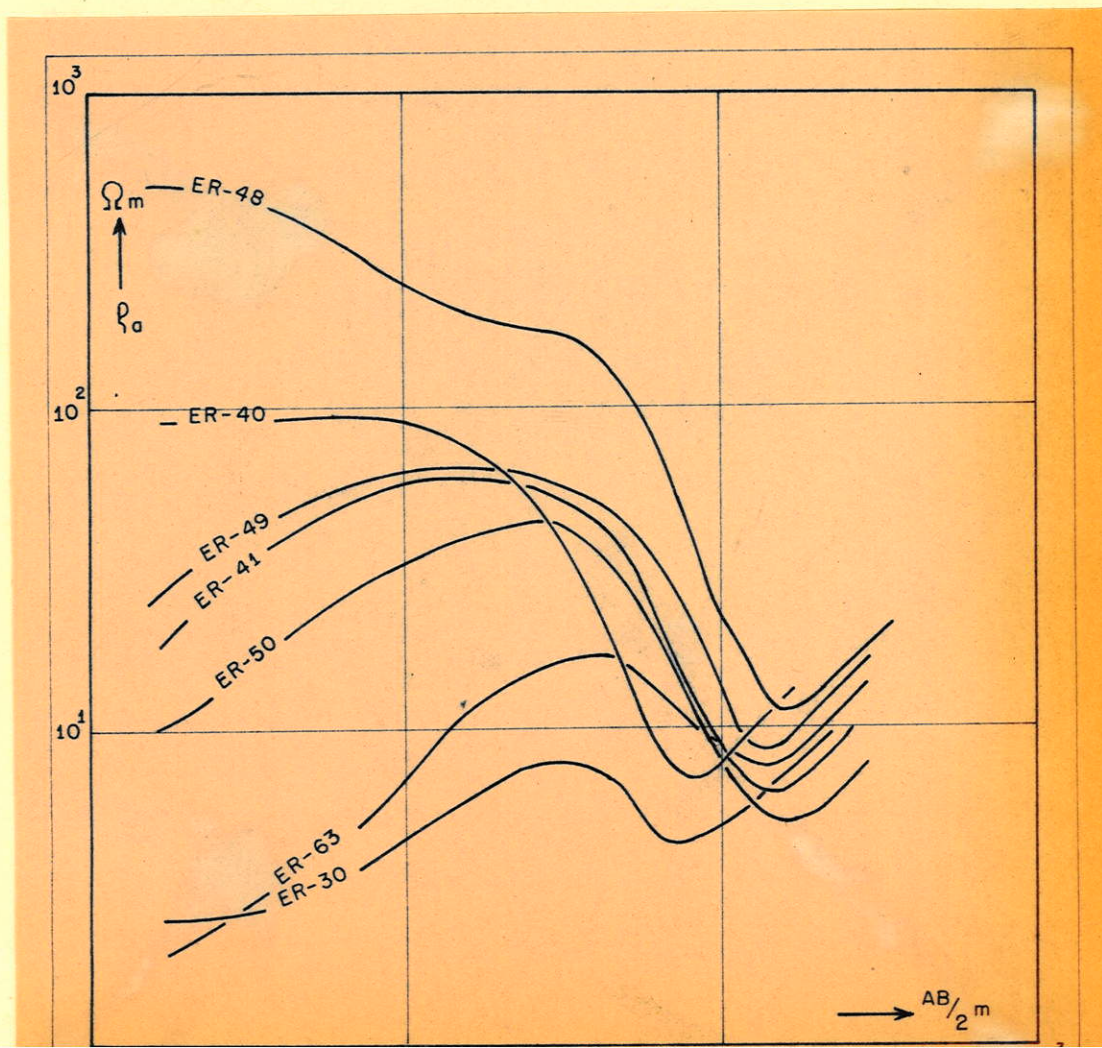
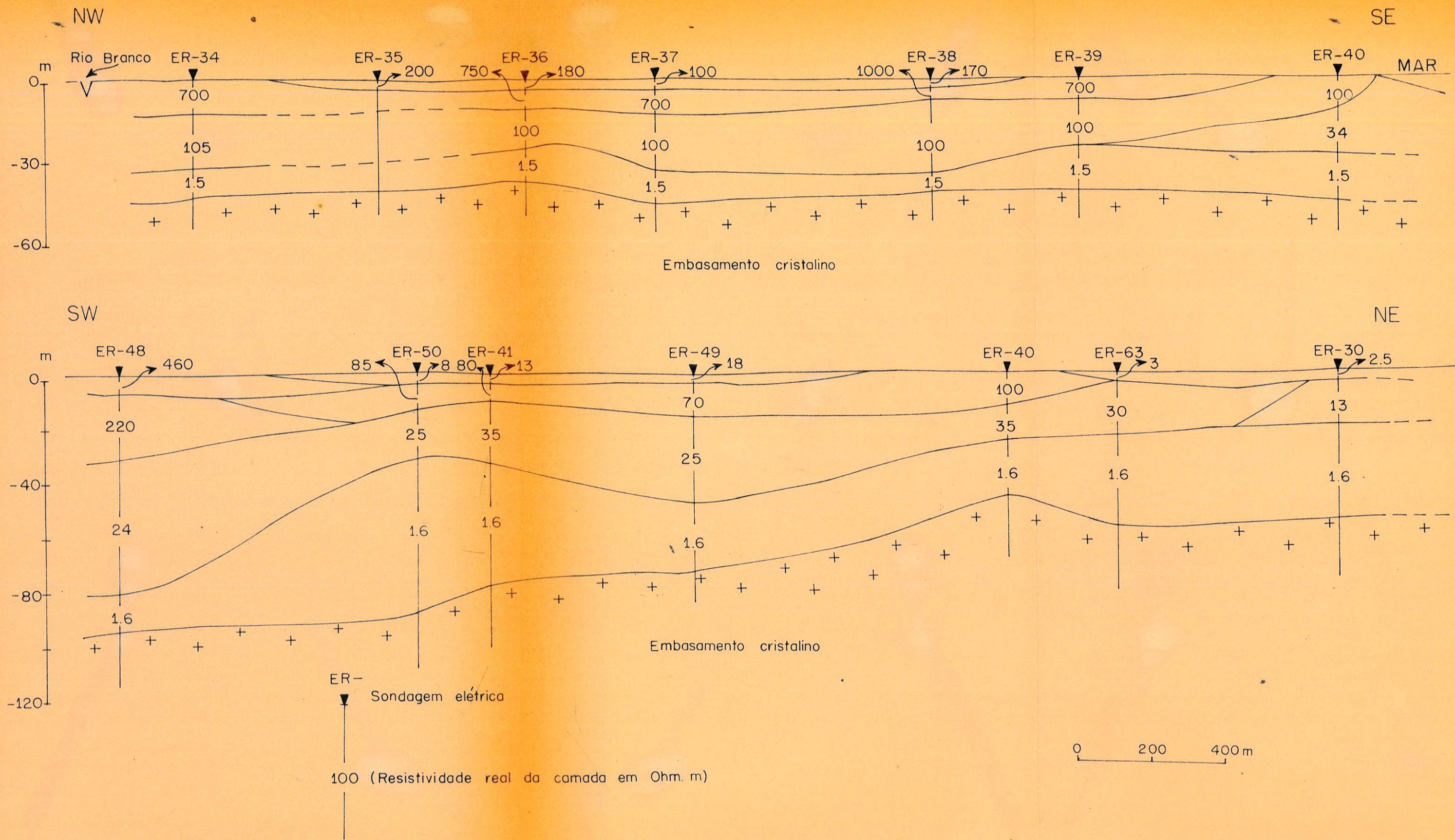


Fig. 49 Curvas ER-34, ER-35, ER-36, ER-37, ER-38, ER-39, ER-40







SECCÕES VERTICAIS V e VI

Fig. 51 Secções verticais V e VI



cia de água doce acima da água salgada.

Nessa região, na direção paralela à praia, a superfície do embasamento cristalino apresenta algumas elevações que alcançam diferenças de nível de até 40 m.

A camada basal é presente em toda a extensão da praia e é em geral bem desenvolvida. As variações da espessura desta camada nos pontos pesquisados pode estar relacionada com o fenômeno de transgressão da cunha de água salgada em função da variação da maré. A cunha transgride na ocasião da maré cheia, aumentando assim a espessura desta camada.

Acima da camada basal aparece uma de resistividade da ordem 20-30 Ohm.m. É bem provável que esta camada seja a mesma que, nos outros pontos pesquisados, apresenta uma resistividade da ordem de 100-200 Ohm.m. A presença de maior quantidade de sais dissolvidos seria responsável pelos valores dos 20-30 Ohm.m obtidos.

#### CONSIDERAÇÕES GERAIS.

As pesquisas de campo executadas na área da Praia Grande permitiram determinar a presença de uma série de camadas sedimentares cobrindo o embasamento cristalino. Estas camadas sedimentares podem ser individualizadas em face de seu caráter elétrico. Se por um lado estas camadas podem ser litologicamente semelhantes, por outro, são distintas elétrica mente em função da resistividade da água (água do mar, água da interface, água doce) que as saturam. Os valores de resistividade das diferentes camadas variam entre um mínimo de aproximadamente 1,5 e um máximo superior a 1500 Ohm.m.



As secções verticais mostram que praticamente em qualquer lugar das zona da Praia Grande, a camada situada imediatamente acima do embasamento cristalino é a camada que apresenta o menor valor de resistividade de todo o pacote sedimentar sôbrejacente.

Em trabalhos executados por Kollert (relatório ao I.G.G., 1963) em Iguape, foi possível verificar a presença dessa camada de baixa resistividade. Uma sondagem executada nessa área ( I.G.G., 1964 ) permitiu constatar que esta camada corresponde a um material argiloso. Um perfil de poço (well-log) dessa sondagem permitiu determinar a resistividade real da camada como sendo igual à 1,5 Ohm.m.

Por outro lado, na área do Guarujá ( Praia de Pernambuco ) foi executado um poço profundo que produz água subterrânea contendo cerca de 1.700 mg/l de NaCl, ou seja uma água altamente salobra ( lembrando que pelo paladar, o limite está localizado entre 250-300 mg/l NaCl).

Assim sendo, esta camada, seja ela, ou argilosa ou saturada de água salgada, é desinteressante como aquífera.

As secções verticais mostram também a presença de camadas mais superficiais com alto valor de resistividade, às vezes mesmo próximo à praia (ER-48). Estas camadas correspondem àquelas saturadas com água de baixo teor em NaCl dissolvido, ou melhor, contendo lençol aquífero doce.

A superfície do embasamento cristalino é ondulada com cotas variando entre -120 a -45 m. Sua origem poderia estar ligada a um dos períodos de isostasia.

Observando-se as secções verticais, nota-se sempre no ponto mais próximo da praia a presença da cunha de água



salgada que penetra rumo ao interior. Os valores de resistividade nesta área variam de 12 a 34 Ohm.m .



## CONCLUSÕES

### a - GRUPO TUBARÃO

- 1a - É relativamente fácil verificar a continuidade lateral de uma camada, já identificada, em função de seu valor de resistividade.
- 2a - Sondagens elétricas realizadas a diferentes distâncias da borda da bacia sedimentar, fornecem curvas semelhantes ( quanto à forma e aos valores ) o que pode ser interpretado como uma constância dos caracteres litológicos dos sedimentos do Grupo Tubarão e da água que os saturam.
- 3a - Os sedimentos do Grupo Tubarão são camadas cujas resistividades apresentam uma grande gama de variação ( 10-6.000 Ohm.m).
- 4a - Próximo a sills de diabásio, a intensidade das correntes telúricas é relativamente grande chegando a impedir a execução de sondagens elétricas ( com distância  $\overline{MN}$  superior à 40 m).
- 5a - Para se configurar o relêvo do embasamento cristalino coberto por sedimentos do Grupo Tubarão, poderá ocorrer a necessidade de se aplicar mais de um método geofísico ( sísmica de refração ), no caso da camada situada imediatamente acima do embasamento cristalino possuir resistividade muito elevada em relação às camadas mais superficiais.
- 6a - Foi possível observar variações laterais na resistivi-



dade do sill de diabásio de Campinas, causadas pela presença de fendas e diaclases saturadas de água.

- 7a - Parece ser possível, dentro de uma certa margem de erro, prever a vasão específica de um poço em função dos valores de resistividade.

#### b - FORMAÇÃO BOTUCATU

- 1b - O arenito Botucatu saturado de água possui uma resistividade da ordem de 30 Ohm.m, permitindo frequentemente determinar a posição do nível freático.
- 2b - Quando a superfície do terreno é formada por areia solta e seca, a alta resistência de contato entre o eletrodo e solo pode impedir a execução da sondagem elétrica.
- 3b - Sondagens elétricas executadas em vales de rios (ou riachos) permitem determinar a espessura da camada de material de origem recente.
- 4b - É possível determinar a espessura desse arenito quando ele jaz sobre o derrame de basalto.

#### c - DERRAMES DE BASALTO

- 1c - A espessura dos derrames de basalto é facilmente determinada, a menos que ocorram variações na topografia ou na continuidade lateral.
- 2c - A resistividade do basalto apresenta grande gama de variação, dependendo do número de derrames que constitui o pacote ( anisotropia elétrica ).



3c - A intensidade das correntes telúricas é em geral bem reduzida.

4c - A resistência de contato, em face do caráter argiloso do solo, é baixa, da ordem de 700-800 Ohm.m.

d - SÉRIE BAURÚ

1d - A espessura dos sedimentos da série Baurú é facilmente determinada quando estes jazem sobre os derrames de basalto.

2d - A resistividade dos sedimentos da série Baurú, quando saturados d'água é da ordem de 18 Ohm.m.

3d - A resistência de contato é menor do que nos arenitos da formação Botucatu ( papel da argila contida nesses sedimentos).

4d - É relativamente fácil determinar a posição do nível freático.

5d - Em alguns casos é possível determinar a espessura da camada superficial, da qual a água de infiltração que abastece o lençol freático, retirou a fração argilosa.

e - PRAIA GRANDE

1e - A região da Praia Grande apresenta uma série de camadas sedimentares cujas resistividades variam de 1,5 a 1.500 Ohm.m ou mais.

2e - Uma camada basal, sobrejazendo no embasamento cristalino, de baixa resistividade é comum a toda a área. Como



os dados são escassos não foi possível determinar se refere a uma camada argilosa ou de material grosseiro saturado de água salgada ( ou salobra ). Sendo, ou material argiloso ou saturado com água de elevado teor em NaCl, é desinteressante como aquífero.

- 3e - As sondagens para captar água subterrânea devem concentrar-se nos locais onde aparece uma camada de alta resistividade ( areia saturada de água doce ) e com espessura relativamente grande.
- 4e - Verifica-se a presença de lençóis de água doce repousando sobre a água salgada mesmo em locais próximos e ao longo da praia.
- 5e - A superfície do embasamento cristalino apresenta-se ondulada com cotas ( absolutas ) variando de -40 à -120m.
- 6e - A intensidade das correntes telúricas aumenta com a proximidade da Serra do Mar ( Mongaguá ), como se podia prever, em consequência da grande diferença de condutividade entre a rocha fresca da Serra do Mar e os sedimentos da praia.



## RESUMO

No Estado de São Paulo, a maioria dos poços profundos perfurados localiza-se em terrenos sedimentares. Assim sendo foi realizado êste trabalho a fim de verificar a aplicabilidade de métodos geofísicos a procura de água subterrânea no Estado.

A água da chuva atingindo a superfície do terreno toma três caminhos a saber: evaporação, escoamento e infiltração. Em face da porosidade, permeabilidade e fôrça da gravidade, a água de infiltração toma o caminho descendente até:

- atingir uma zona permeável ( saturada ou não) e seu fluxo.
- atingir uma rocha sedimentar impermeável ou rocha ígnea sã.
- saturar fissuras existentes em rochas ígneas sãs.

Básicamente que um poço seja produtor de água, é necessária a extração de água acumulada nas seguintes condições:

- 1 - água acumulada em rochas permeáveis saturadas.
- 2 - água acumulada em fissuras de rochas ígneas sãs.
- 3 - água acumulada em depressões existentes ou na superfície de camadas impermeáveis ou na superfície de rochas ígneas ou do embasamento cristalino, coberto por rochas porosas e permeáveis.



Baseado nestas formas de ocorrência de água subterrânea, as pesquisas de campo foram orientadas no sentido de:

- identificar pela interpretação das curvas ou mesmo numa curva de sondagem elétrica, aquela camada aquífera, saturada de água e já conhecida " a priori " como aquífero. Estabelecer a sua profundidade, espessura e comportamento geológico.
- verificar a profundidade do nível freático.
- mapear a superfície do embasamento cristalino, procurando achar nela, depressões causadas por erosões pretéritas.

Procurou-se verificar também:

- até que ponto, em um dado local uma estratigrafia geológica conhecida, corresponde à uma " estratigrafia geofísica " obtida por medidas na superfície.
- determinar a resistividade, ou resistividades, das diferentes formações litológicas.
- procurar correlacionar variações laterais de resistividade de uma certa camada geológica com as variações na sua granulometria e litologia ou sais dissolvidos na solução que a satura.

De um modo geral a eletrorresistividade fornece bons resultados quando aplicada à procura de água subterrânea no Estado de São Paulo.

Nos sedimentos do Grupo Tubarão ( Permo- Carbonífero ) verifica-se uma correspondência entre altos valores de



resistividade e as altas vazões dos poços ( vazão específica).

A "estratigrafia geofísica" obtida corresponde muito bem à estratigrafia geológica.

Espessuras dos derrames de basalto ( Eocretáceo ) , intrusões de diabásio, arenito da Série Baurú ( Neocretáceo), arenito da formação Botucatu ( Eocretáceo ), sedimentos do Grupo Tubarão ( Permo-Carbonífero ) e camadas de sedimentos recentes são facilmente determinadas.

Na região da Praia Grande existem lençóis de água doce sobrejazendo à água salobra e salgada.



BIBLIOGRAFIA

- BENTZ, A. - 1961 - Lehrbuch der angewandten Geologie, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1067 pp.
- BJORNBERG, A.J.S. - 1965 - Sedimentos pós-cretácicos do Estado de São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (Tese para concurso de Livre-Docência), 133 pp.
- DAVINO, A. - 1965 - Estudos geológicos e geofísicos da serra de Aracoiaba e arredores. Tese de Doutorado, inédito.
- DURANTE, A. et al. - 1965 - Estudos e captações de água subterrânea no Estado de São Paulo, feitos pelo Instituto Geográfico e Geológico, Secretaria da Agricultura, Inst.Geogr.Geol., Bol.44, 14pp.
- FLATHE, H. - 1955 - A practical method of calculating geoelectrical graphs for horizontal stratified media, Geoph.Prospec., vol.III, n.3, pp.268-294.
- FLATHE, H. - 1955 - Possibilities and limitations in applying geoelectrical methods to hydrogeological problems in the coastal areas of North West Germany, Geoph. Prospec. vol.III, n.2, pp.95-110.
- FLATHE, H. - 1960 - Geoelectrical investigation on clay deposits, Geoph. Prospec., vol. VIII, n. 1, pp. 76-89.
- FRANGIPANI, A. e PANNUTI, E.L. - 1965 - Estudos hidrogeológicos na bacia de Taubaté entre Jacareí e Quiririm, Secretaria da Agricultura, IGG, bol.n.42, 126pp.



- FRITSCH, V. - 1949 - Grundzüge der angewandten Geolektrik, Manz  
sche Verlagsbuchhdlg, Wien.
- FRITSCH, V. - 1960 - Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 372  
pp.
- HAALCK, H. - 1958 - Lehrbuch der angewandten Geophysik, Gebrüder  
Borntraeger, Berlin, 328 pp.
- HELLAND, C.A. - 1940 - Geophysical Exploration, Prentice-Hall ,  
Inc., N. York, 1013 pp.
- JAKOSKY, J.J. - 1949 - Exploration Geophysics, Trija Publishing  
Company, Los Angeles, 1113 pp.
- KOLLERT, R. - 1963 - Relatório ao Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo, inédito.
- KRAJEV, A.P. - 1957 - Grundlagen der Geoelektrik, VEB, Verlag  
Technik, Berlin, 358 pp.
- LEINZ, V. - 1955 - Água subterrânea na bacia de São Paulo, Bol.  
Soc. Bras. Geol., v. 4, n. 1, pp. 5-22.
- LEINZ, V. e SALLENTIEN, B. - 1962 - Água subterrânea no Estado de São Paulo e regiões limítrofes, Bol.Soc.  
Bras. Geol., v. 11, n. 1, pp. 27-36.
- SOROKIN, L.W. - 1953 - Lehrbuch der geophysikalischen Methoden zur erkundung von Erdölvorkommen, VEB Verlag  
Technik Berlin, 579 pp.
- ZEUNER, F.E. - 1945 - The pleistocene period its climate ,  
chronology and faunal successions, The Ray  
Society, v. 130, Adlard & Son, Ltd., Londres,  
322 pp.



ÍNDICE

INTRODUÇÃO ..... 1

PLANEJAMENTO DO TRABALHO ..... 4

RESISTIVIDADE ..... 6

    a - CONSIDERAÇÕES GERAIS ..... 6

    b - ELETORRESISTIVIDADE ..... 10

        1 - Introdução ..... 10

        2 - Distribuição do potencial ..... 11

        3 - Procedimentos de campo ..... 13

            Sondagem elétrica ..... 13

            Caminhamento elétrico ..... 22

            Perfil de poço ..... 23

        4 - Interpretação das curvas ..... 24

EQUIPAMENTOS EMPREGADOS ..... 27

    a - CORRENTE ALTERNADA ..... 27

    b - CORRENTE CONTÍNUA ..... 28

ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO ..... 33

    a - GRUPO TUBARÃO (PERMO-CARBONÍFERO) ..... 33

        1 - Campinas ..... 33

        2 - Sorocaba (Utinga) ..... 46

        3 - Itú (Caiacatinga) ..... 48

        4 - Porto Feliz (Jupira) ..... 50

        5 - Boituva ..... 52

        6 - Cerquilha ..... 54



b - SÉRIE BAURÚ (NEOCRETÁCEO), FORMAÇÃO BOTUCATU (EO  
CRETÁCEO) DERRAMES DE BASALTO (EOCRETÁCEO)..... 56

a - ER-19 (São Carlos)..... 57

b - ER-20 (São Carlos) ..... 59

c - ER-10 (Igarapava) ..... 60

d - ER-21 (São Carlos) ..... 64

e - ER-23 (São Carlos) ..... 65

f - ER-8, ER-28, ER-29 (Araraquara) ..... 67

g - ER-22 (São Carlos) ..... 69

h - ER-24 (São Carlos) ..... 71

i - ER-9 (Bálsamo) ..... 74

j - Considerações gerais ..... 76

c - BAIXADA LITORÂNEA (PLEISTOCENO (?), PRAIA GRAN  
DE ..... 78

1 - Seccão Vertical I ..... 80

2 - Seccão Vertical II ..... 80

3 - Seccão Vertical III ..... 82

4 - Seccão Vertical IV ..... 86

5 - Seccão Vertical V ..... 86

6 - Seccão Vertical VI ..... 86

7 - Considerações Gerais ..... 89

CONCLUSOES ..... 92

a - GRUPO TUBARÃO ..... 92

b - FORMAÇÃO BOTUCATU ..... 93

c - DERRAMES DE BASALTO ..... 93



d - SÉRIE BAURU ..... 94

e - PRAIA GRANDE ..... 94

RESUMO ..... 96

BIBLIOGRAFIA ..... 99

