

## PROSPECÇÃO ELÉTRICA DE OCORRÊNCIAS DE FERRO NA FAIXA NOVA ERA - ITAMARANDIBA, MINAS GERAIS \*

por

ANDRÉ DAVINO

Departamento de Geologia Económica e  
Geofísica Aplicada

### RESUMO

O método de eletrorresistividade é empregado com êxito na delimitação dos contornos das áreas de formações ferríferas que se estendem ao longo da faixa Nova Era - Itamarandiba, Estado de Minas Gerais. As sondagens elétricas, estudadas aqui criteriosamente, permitem avaliar as ordens de grandeza das espessuras dessas formações. Essa aplicabilidade pouco comum do método de eletrorresistividade se deve à existência de rochas (gnaises) mais condutoras na base das formações ferríferas.

A baixa resistividade do gnaise, por sua vez, se deve à baixa resistividade das águas que impregnam suas fissuras e fraturas. A diminuição da resistividade das águas em profundidade por outro lado, é provocada por sua lenta circulação e consequente enriquecimento em sais..

### ABSTRACT

The electrical method is used with success to evaluate the limits of the areas containing iron formations in the districts of Nova Era - Itamarandiba, State of Minas Gerais. The electrical soundings on the other hand, help in evaluating the thickness of those formations.

This uncommon applicability of the resistivity method is due to the existence of a more conducting weathered gneiss underlying the iron formations. It can be distinguished by means of that technique four "electrical" strata: the soil (low resistivity), iron formations (high resistivity), weathered gneiss (low resistivity) and sound rock (high resistivity).

### INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos sobre a prospecção geofísica por eletrorresistividade das ocorrências de ferro situadas na faixa Nova Era - Itamarandiba, no centro-leste do Estado de Minas Gerais.

O trabalho mais recente sobre a geologia dessa área se deve a Pflug (1965). Esse Autor considera que as rochas gnáissicas que constituem a faixa Nova Era - Itamarandiba pertencem em parte ao Grupo Minas, ou mais particularmente, às fácies Guanhães desse Grupo e, em parte, ao Grupo pré-Minas. Há, no entanto, diversos indícios de que se trata de uma única unidade estratigráfica, possivelmente a fácies Guanhães do Grupo Minas, definida por Pflug.

A faixa Nova Era - Itamarandiba se localiza a leste da parte meridional da Cordilheira do Espinhaço, no centro-leste do Estado de Minas Gerais, aproximadamente entre os meridianos de 43°15' e 42°45' W e os paralelos 17°50' e 19°50' S. Ao sul, situa-se a cidade de Nova Era e ao norte, Itamarandiba, enquanto Guanhães ocupa posição central dentro da faixa considerada. O distrito ferrífero de Itabira, a noroeste de Nova Era, é considerado parte do Quadrilátero Ferrífero.

A área apresenta relevo ocidentado, montanhoso, e é drenada pelos tributários do Rio Doce que deságua no Oceano Atlântico.

Do ponto de vista geológico, a faixa Nova Era - Itamarandiba é pouco conhecida. A maioria das referências, algumas das quais datam do século passado, limita-se descrições locais. Foram en-

(\*) Trabalho feito com auxílio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

saiadas, no entanto, algumas tentativas de correlação estratigráfica regional.

O método de eletrorresistividade, rápido e pouco arenoso, foi empregado para obter novos dados com a finalidade de precisar melhor os limites e as espessuras dos corpos que constituem as jazidas de ferro, complementando as informações fornecidas pela pesquisa magnetométrica.

Convém lembrar que a eletrorresistividade não é *a priori* um método comumente empregado em tais tipos de jazidas. Não se trata de uma aplicação clássica, consagrada pelo uso. Por isso, várias pesquisas preliminares tiveram de ser feitas para, através delas, encontrar-se as condições e os parâmetros que justificassem a aplicação do método.

#### ESTUDOS PRELIMINARES

Um trabalho minucioso foi realizado na Jazida Boa Esperança com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade e as limitações do método de eletrorresistividade na prospecção das jazidas de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba.

Os conhecimentos sobre a litologia e as estruturas da jazida mencionada, graças aos trabalhos de prospecção feitos pela Cia. Vale do Rio Doce, são largamente suficientes para comparação com os resultados das aplicações geotísicas.

*Perfilagens elétricas.* Foram executadas ao longo de poços de pesquisa abertos na área da Jazida de Boa Esperança.

Esses poços, de secção quadrada de 1,2m de lado e uma vintena de metros de profundidade atravessam em geral o solo e os corpos de minério de ferro.

Nas medições, foi utilizado o arranjo de eletrodos Wenner com espaçamento  $a = 1m$  e com um eletrodo de corrente no "infinito". Esse arranjo, também denominado *arranjo lateral* em

diagrafia elétrica, era deslocado verticalmente na parte central de uma das paredes do poço.

A resistividade aparente para cada estação é dada pela relação  $\varrho_{ap} = 4\pi aR$ , onde  $R$  é a resistência elétrica.

Não foi levada em conta a influência das paredes do poço, não só por ser pequena essa influência como também por ter sempre o mesmo sentido.

A figura 1 apresenta os resultados das perfilagens. Para se proceder a uma análise cuidadosa das perfilagens elétricas, é preciso lembrar que a resposta obtida com o arranjo utilizado é assimétrica.

No exemplo da figura 2, uma camada de alta resistividade, (correspondente à formação ferrífera) está contida entre duas outras relativamente mais condutoras (na parte superior, o solo e na parte inferior, o gnaiss decomposto). Quando o eletrodo de corrente  $A$  está dentro do solo e os eletrodos de potencial,  $M$  e  $N$ , estão na camada constituída pelas rochas ferríferas (itabirito, principalmente), pequena diferença de potencial, e consequentemente, pequena resistência elétrica  $R$ , será lida entre  $NM$ , pois, grande parte da corrente elétrica se concentra no solo (condutor), refletindo-se na interface da camada mais resistente. É preciso que  $A$  esteja inteiramente dentro da camada de alta resistividade para que um valor bem próximo da resistividade verdadeira seja alcançado. Quando  $M$  e  $N$  saem da camada de alta resistividade, o potencial elétrico cai bruscamente a um valor que se aproxima muito do valor da resistividade verdadeira do gnaiss decomposto. Na figura representou-se em traço forte a resposta hipotética que seria obtida no caso ideal; em traço leve, a perfilagem elétrica real.

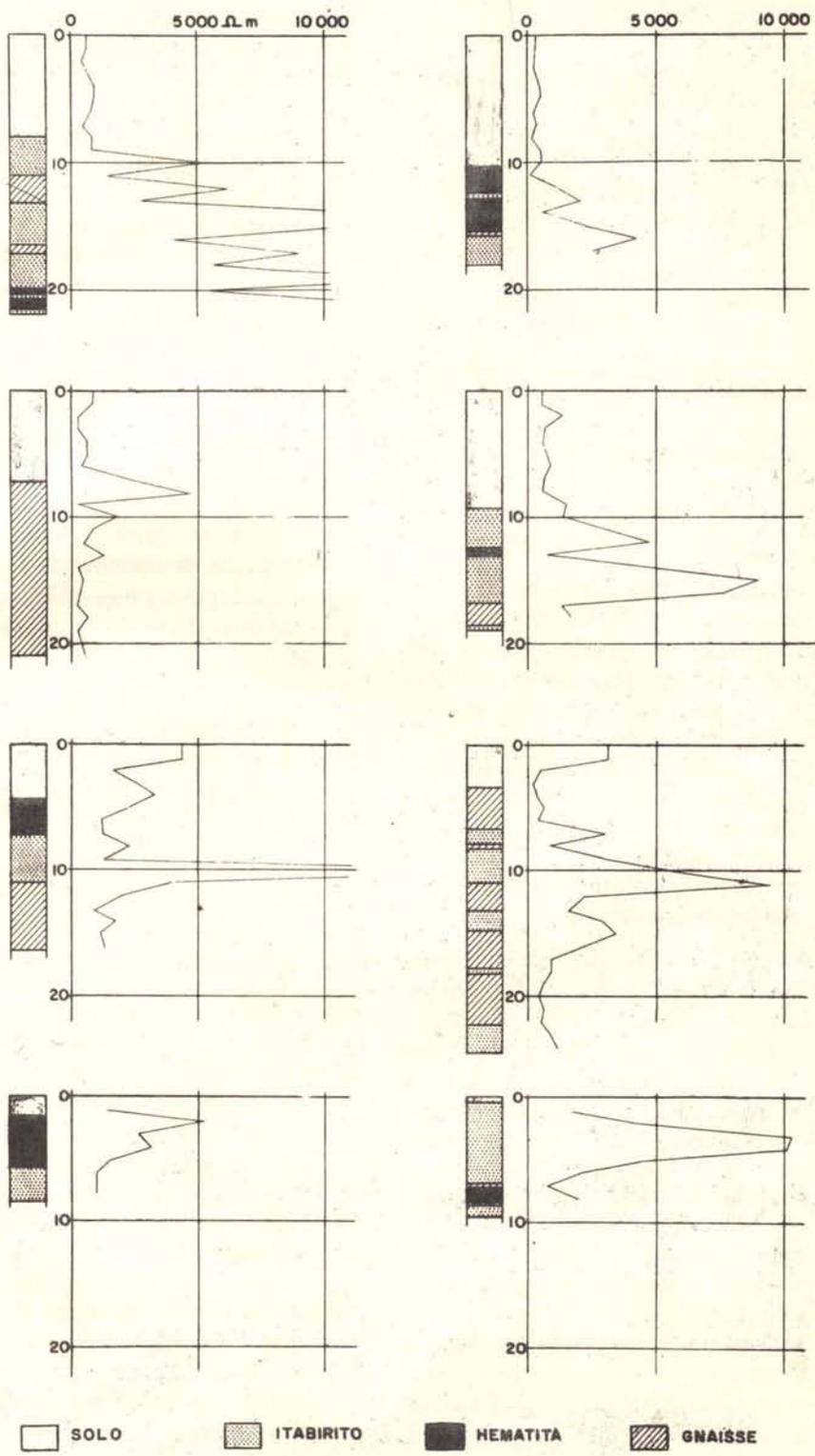


Fig. 1 - Perfilagens Elétricas obtidas na Jazida Boa Esperança.

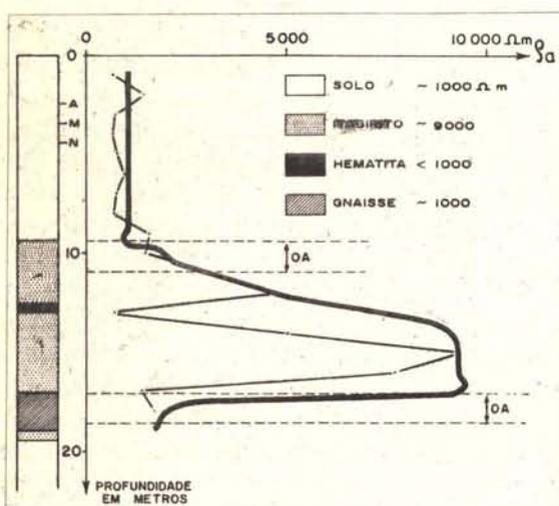


Fig. 2 - Exemplo de interpretação de uma perfilagem elétrica. OA é a distância entre o eletrodo de corrente A e a metade de MN.

As heterogeneidades existentes dentro das camadas (por exemplo, pequenas lentes mais condutoras, constituídas de hematita contendo grande percentagem de magnetita) impõem um zigzagueado à perfilagem elétrica medida, às vezes, impossível de ser interpretado.

É preciso deixar claro que na resposta de um arranjo lateral as camadas mais condutoras têm suas espessuras acentuadas, enquanto as mais resistentes, diminuídas.

As seguintes conclusões podem ser tiradas do exame das perfilagens elétricas:

1) A resistividade do solo na área da Jazida Boa Esperança varia entre 300 e 2.000 ohm.m, excetuando-se os primeiros metros, que dependem das variações de temperatura, da evaporação, da presença e do tipo de vegetação, da ação do homem, etc. Com maior frequência, porém, a resistividade do solo é de 500 a 1.000 ohm.m.

2) As rochas ferríferas apresentam uma larga faixa de variação de resistividade, por causa de sua estrutura em lentes de pequena espessura, muito dobradas, fraturadas e com acentuadas variações litológicas.

As hematitas que contêm grande percentagem de magnetita (às vezes mais de 30%) são mais condutoras que os itibiritos. Observa-se, em quase todas as perfilagens elétricas, picos negativos correspondentes à passagem sobre as lentes de hematitas magnéticas. A magnetita é um mi-

neral condutor, sendo sua resistividade de 6 a 10 ohm.m. Atribui-se a baixa resistividade das hematitas (da ordem de 1.000 ohm.m) ao seu alto conteúdo de magnetita.

Os itibiritos, por outro lado, apresentam valores de resistividade que ultrapassam 10.000 ohm.m São as rochas de maior resistividade na área da Jazida Boa Esperança.

3) Os gnaisses intercalados nas rochas ferríferas apresentam valores de resistividade de 500 a 1.000 ohm.m, porém, os gnaisses que estão na base da formação ferrífera, até uma profundidade, de uns 50 a 100 metros, apresentam valores muito mais baixos de resistividade. Um estudo detalhado dessa camada condutora é feito no item seguinte.

*Resistividade das águas.* A resistividade de uma rocha depende da resistividade e distribuição da água em seus poros e fissuras. De um modo geral, as rochas secas são bons isolantes. Fazem exceção os sulfetos metálicos, a grafita e outros poucos minerais.

A resistividade de  $\rho_r$  de uma rocha, de porosidade  $p$ , saturada com água de resistividade  $\rho_a$  é dada pela relação que traduz a Lei de Archie (1942):

$$\rho_r = \rho_a \frac{a}{pm}$$

onde  $a$  é um coeficiente que varia de 0,81, para os arenitos, até 1, para as rochas compactas fissuradas;  $m$ , denominado fator de cimentação, é considerado constante para uma rocha dada; pode-se adotar um valor médio  $m = 1,5$ .

O fator  $\frac{a}{pm}$  é denominado *fator de formação* pois depende apenas das características físicas das rochas e independe do fluido contido nas mesmas.

A resistividade de uma rocha é diretamente proporcional à resistividade do fluido nela contido, sendo o fator de proporcionalidade o *fator de formação*

Com o objetivo de estudar e comparar a resistividade das águas contidas nas rochas da área da Jazida Boa Esperança e arredores, uma série de medições foi levada a efeito.

Além das amostras de superfícies, foram colhidas amostras nos fundos dos poços de sondagem. Esses poços tem uns 20 metros de profundidade.

Para cada amostra de água, anotou-se a temperatura e o pH na fonte (vide tabela 1). A resistividade foi medida com o resistivímetro "Chauvin Arnoux".

Embora as águas superficiais apresentem larga gama de valores de resistividade, que vão desde 217 ohm.m até 1138 ohm.m, os valores da resistividade das águas coletadas no fundo dos poços são nitidamente inferiores e menos esparsos (de 109 a 175 ohm.m). Esse fato tem uma importância fundamental para a prospecção por eletorresistividade, conforme vai ser esclarecido mais adiante.

TABELA 1  
pH, TEMPERATURA E RESISTIVIDADE DAS ÁGUAS NA ÁREA  
DA JAZIDA BOA ESPERANÇA

Discriminação	Amostra nº	pH	t°C	$\Sigma$ (t) ohm.m
Águas Superficiais	1	5,8	17,0	460
	2	6,0	15,5	364
	3	6,0	15,0	247
	4	6,0	16,0	252
	5	5,9	18,3	403
	6	5,8	15,5	682
	7	5,6	17,0	527
	8	5,6	20,0	552
	9	6,0	15,5	882
	10	6,0	17,0	452
	11	6,1	16,5	625
	12	5,7	20,0	1.138
	13	6,0	17,0	780
	14	5,6	17,0	440
	15	5,8	16,5	586
	16	5,6	20,0	741
	17	5,6	17,0	1.118
	18	5,8	16,0	476
	19	5,6	18,5	673
	20	5,8	20,0	217
Águas dos poços de pesquisa	1	5,6	21,0	137
	2	5,6	21,0	109
	3	5,6	21,0	175

A diminuição da resistividade das águas com a profundidade deve-se à lenta circulação das mesmas e seu consequente enriquecimento em sais, dissolvidos das rochas. Pela quase ausência de circulação, esses sais se acumulam nas fissuras e poros das rochas. Esse fenômeno é bem explicado no trabalho de Cruz e Melo (1968, p. 112).

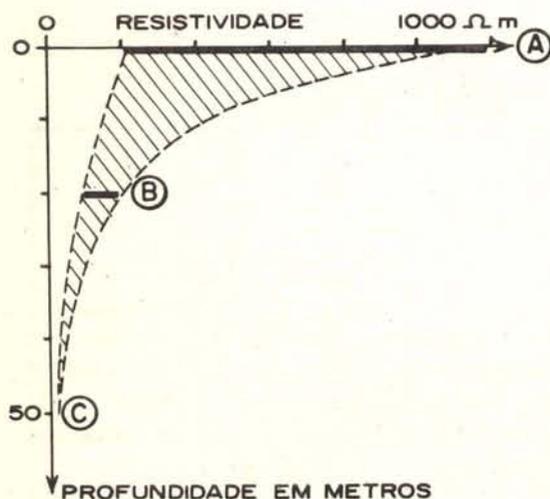


Fig. 3 - Progressiva diminuição da resistividade das águas com a profundidade. (A) resistividades das águas superficiais. (B) resistividade das águas dos polos de pesquisa. (C) resistividade extrapolada para 50 m de profundidade.

Extrapolando-se os valores de resistividade para uma profundidade da ordem de uns 50 metros (figura 3), observa-se que aí eles devem atingir de 5 a 20 ohm.m, valores estes muito baixos em relação à resistividade das águas superficiais. Essa ordem de valores, no entanto, é perfeitamente possível, pois as sondagens elétricas, como será visto mais adiante, indicam que os gnaisses subjacentes às rochas da formação ferrífera são relativamente bons condutores, com resistividade de 300 a 500 ohm.m, o que, de acordo com a Lei de Archie, só pode ser explicado se a água de impregnação ou melhor ainda, o eletrólito, tiver baixa resistividade ou a rocha, alta porosidade. Esta última hipótese é impossível, pois em geral, os gnaisses, mesmo muito fissurados e fraturados, dificilmente possuem porosidade acima de 5%. Os testemunhos de sondagem examinados comprovam este fato.

A figura 4 é a representação gráfica da relação de Archie. Em abscissa colocou-se o fator de formação  $p-m$  e em ordenada, os valores de porosidade (eficaz) da rocha em %. Tem-se uma curva para cada valor atribuído ao fator de cimentação

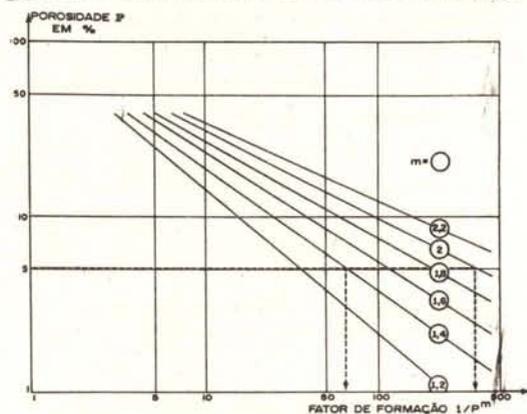


Fig. 4 - Representação gráfica da relação de Archie: variação de  $p$  (porosidade eficaz da rocha) em função do "fator de formação"  $a/p^m$ .

Supondo, para fixar ordens de grandeza, que a porosidade do gnaisse seja 5% e que  $m$  esteja compreendido entre 1,4 e 2,0, obtêm-se, respectivamente, os fatores de formação 65 e 370. Se a rocha apresenta resistividade de 400 ohm.m, isto quer dizer que o líquido que a satura possui de 6,1 a 1,1 ohm.m, correspondentemente.

Em resumo, as águas superficiais apresentam resistividade de ordem, em média, de 500 ohm.m; a 20 m de profundidade, esse valor cai para a ordem de 130 ohm.m e a 50 m, para a ordem de 5 ohm.m. Essas observações serão utilizadas na prospecção elétrica propriamente.

Parkhomenko (1967, p. 120 e 121) em sua extensa monografia sobre as propriedades elétricas das rochas diz que a salinidade das águas naturais e, por conseguinte, sua resistividade, depende da composição e gênese da rocha, das condições climáticas e de relevo dos terrenos.

O significado das análises químicas dos sólidos dissolvidos nas águas naturais é discutido exhaustivamente no trabalho do Hem (1959) numa monografia que contém centenas de referências bibliográficas.

Chebotarev (1955) dá um excelente sumário de um grande número de análises de água. Alguns valores de resistividade das águas contidas em rochas ígneas e metamórficas dados abaixo foram extraídos de trabalho de Chebotarev:

Rochas de onde foram coletadas amostras de água	Número de amostras	Resistividade a 20°C ohm.m		
		média	min.	max.
Rochas ígneas EUROPA	314	7,6	3,0	40
Rochas ígneas ÁFRICA DO SUL	175	11,0	0,5	80
Rochas metamórficas ÁFRICA DO SUL	88	7,6	0,86	80
Rochas metamórficas pré-cambriano da AUSTRÁLIA	31	3,6	1,5	8,6

O valor da resistividade das águas (5 ohm.m em média) nos gnaisses de Boa Esperança, a uma profundidade de 50 m, calculado a partir da resistividade dessas rochas avaliadas pelos métodos expostos nos estudos preliminares empregando a relação de Archie, é da mesma ordem de grandeza dos valores médios encontrados para os mesmos tipos de rochas em outras regiões do mundo, conforme a tabela acima.

Davino (1970) numa síntese dos estudos de centenas de Sondagens Elétricas executadas em rochas cristalinas pré-cambrianas do Estado de São Paulo, agrupou em 3 categorias os fatores a serem considerados quando da interpretação das Sondagens Elétricas: litológico-estrutural, morfológico e repartição de água no solo e sub-solo (água de retenção, capilar e de gravidade). Perfis elétricos em cortes naturais de gnaisses da Serra do Mar mostram que a resistividade cai a valores da ordem de 300 ohm.m na zona saturada em água dos gnaisses.

Ficam, a partir dos estudos preliminares, definidos 4 estratos do ponto de vista da eletrorresistividade:

- 1) Solo de resistividade média mais frequente entre 500 a 1.000 ohm.m
- 2) Formação ferrífera, em conjunto, de resistividade mais frequente entre 5.000 a 12.000 ohm.m. A porosidade dessas rochas é praticamente nula.
- 3) Gnaiss parcialmente decomposto com

fissuras preenchidas por sais dissolvidos das rochas; a resistividade é da ordem de 400 ohm.m. Uma discussão sobre a origem e a natureza dessas dissoluções foge ao escopo deste trabalho.

4) Gnaiss são, sem fissuras abertas, de resistividade elevada, mas não avaliada.

Essa sequência 1, 2, 3 e 4 costuma ser abreviadamente escrita CRC<sup>∞</sup> onde C = condutor, R = resistente e corresponde ao substrato "infinitivamente" resistente ou espesso.

A sequência CRC<sup>∞</sup> fornece sondagens elétricas classificadas pelos geofísicos franceses como "sino-fundo de navio", pois as curvas de resistividade apresentam a forma de uma elevação (sino), seguida de uma depressão, semelhante ao perfil transversal de um casco de navio.

O grande contraste de valores de resistividade, das rochas da formação ferrífera em relação ao estrato subjacente (gnaiss decomposto) e suprajacente (solo), permite prever o emprego do método de eletrorresistividade na prospecção da jazida de ferro Boa Esperança.

#### PERFIS E CARTA DE RESISTIVIDADE APARENTE

Na parte norte do corpo principal da Jazida Boa Esperança foram feitos doze caminhamentos elétricos, 6 de direção E-W, distanciados 200 m uns dos outros e 6, na direção N-S distanciados entre si de 100 e 200 metros, (figura 5). Os caminhamentos elétricos de direção E-W foram executados ao longo das direções dos perfis magnetométricos.

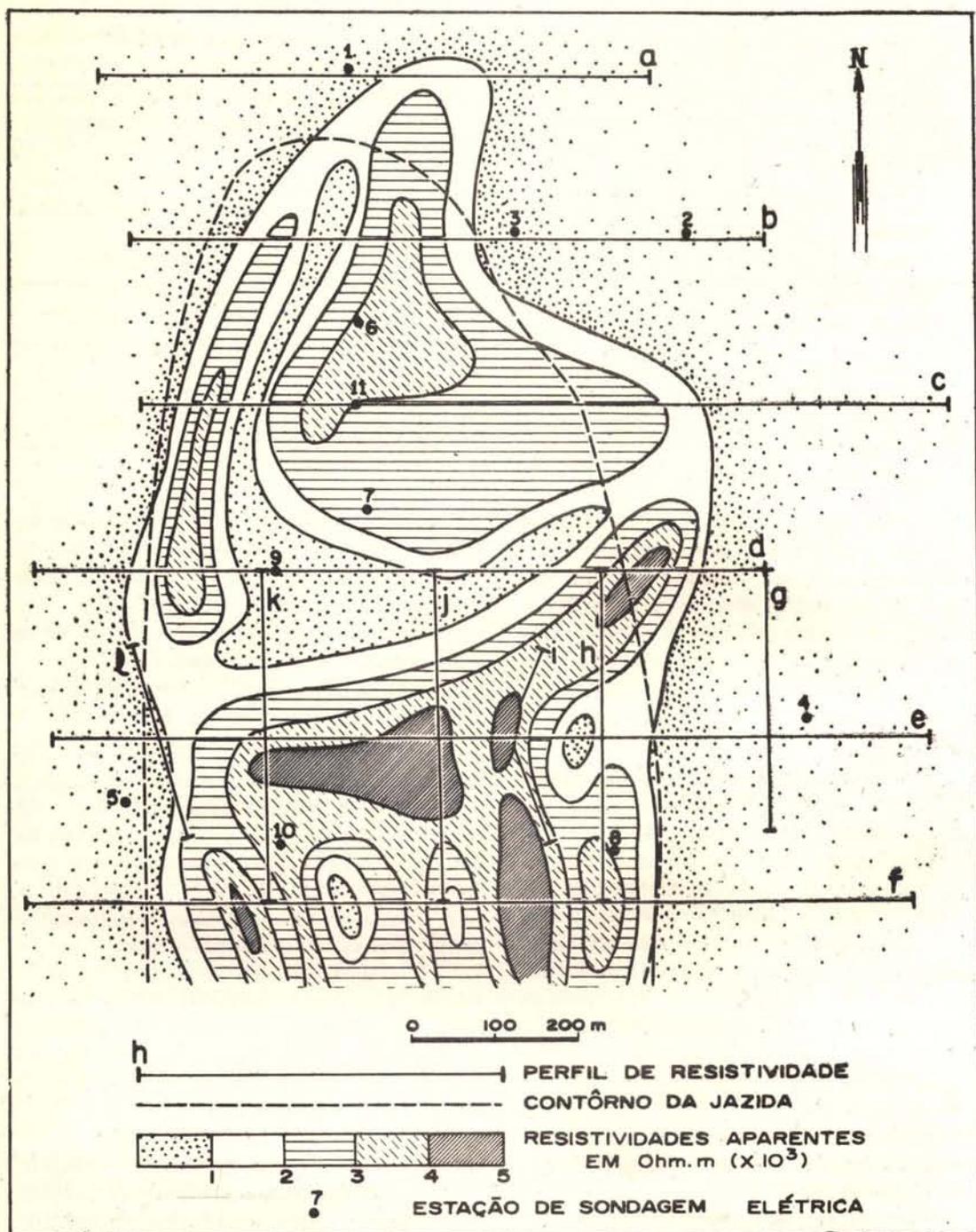


Fig. 5 - Carta (simplificada) de resistividade aparente no corpo principal da Jazida Boa Esperança.

Utilizou-se um tripolo AMN, com um eletrodo B no "infinito". Entre o eletrodo de corrente A e o de potencial M a distância escolhida foi de 15 metros; entre os dois polos de potencial, M e N, foram escolhidas duas distâncias MN = 15m e MN = 30m. A escolha dessas distâncias

baseou-se nos dados sobre as espessuras do solo e da formação ferrífera. O campo elétrico aplicado deve penetrar a maior parte da unidade litológica que se pretende prospectar. Medições com dois intervalos para MN serviriam para melhor interpretar os perfis de resistividade.

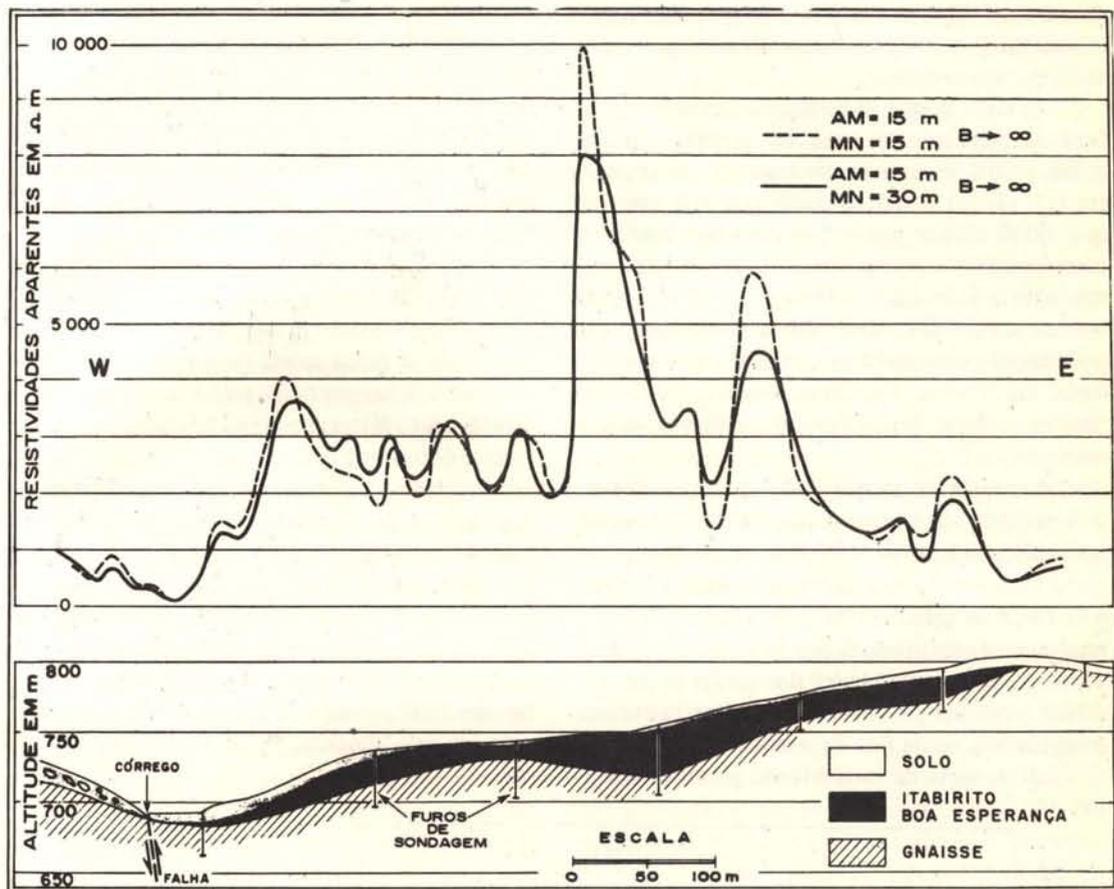


Fig. 6 - Perfis de resistividade aparente

A figura 6 apresenta os perfis de resistividade aparente, para MN = 15m e para MN = 30 m obtidos ao longo da direção e (vide localização na figura 5); em tracejado, representou-se o perfil correspondente à menor profundidade de investigação e, em traço contínuo, o perfil correspondente ao arranjo de eletrodos que permite maior profundidade de investigação. A boa coincidência dos dois perfis demonstra que os intervalos escolhidos para A, M e N são os mais convenientes para o caso particular da área estudada. Se os valores da linha contínua são meno-

res que os valores da linha tracejada, uma parte da corrente elétrica passa pelo gnaísse alterado condutor, o que dá a idéia da extensão em profundidade do corpo da formação ferrífera. O corte geológico ao longo da direção do perfil elétrico e foi traçado com base nas informações obtidas nos furos de sondagens executadas pelo C.V.R.D.

A partir dos perfis de resistividade aparente foi traçada a carta (simplificada) de resistividades aparente para uma profundidade de investigação da ordem de 30 metros (figura 5).

Os perfis e a carta de resistividade aparente podem ser interpretados conforme os seguintes critérios:

a) O solo apresenta em geral menos de 1.000 ohm.m conforme conclusões dos estudos preliminares. Conseqüentemente, os valores da resistividade aparente menores que 1.000 ohm.m devem corresponder à ausência de materiais de alta resistividade até pelo menos 30 m de profundidade, aproximadamente.

b) Sabe-se que as rochas da formação ferrífera apresentam até mais de 10.000 ohm.m. Assim sendo, levando-se em conta o que foi dito em (a), valores de resistividade aparente maiores que 3.000 ohm.m podem ser considerados como correspondentes a uma faixa do subsolo que contém aquela formação. A faixa dos 1.000 a 2.000 ohm.m seria, deste modo, considerada duvidosa; pode ou não corresponder a uma pequena quantidade de rochas ferríferas. Acima dos 5.000 ohm.m pode-se ter certeza da presença dessas rochas.

Na carta de resistividade aparente adotou-se esses intervalos para o traçado das linhas de isoresistividade. Observa-se boa concordância entre o traçado do perímetro da jazida indicado pela carta de resistividade aparente e o traçado resultante da prospecção por furos de sondagens.

c) As irregularidades dos perfis de resistividade aparente indicam um caráter estrutural complexo da jazida Boa Esperança.

d) A carta de resistividade permite visuali-

zar as zonas onde são esperadas maiores espessuras da formação ferrífera.

*Estudos sobre modelos em escala reduzida.* Alguns ensaios sobre modelos em escala foram realizados no laboratório de geofísica aplicada do Instituto de Geociências da USP, tentando reproduzir as condições estruturais da jazida de Boa Esperança.

Para representar os estratos mais condutores, ou seja, o solo e o gnaiss decomposto, utilizou-se uma solução fraca de sulfato de cobre. A formação ferrífera foi representada por uma placa de madeira de dimensões apropriadas. O gnaiss são, por não apresentar interesse para o estudo, não foi representado.

O modelo de madeira é colocado dentro da solução de sulfato de cobre num tanque de 500 litros de capacidade. A espessura da lâmina de solução que se deixa acima do modelo de madeira representa a espessura do solo e a quantidade de solução que resta sob a placa de madeira simula o gnaiss decomposto.

Destacamos duas das experiências efetuadas. Na primeira (figura 7a), utilizou-se como modelo da formação ferrífera uma placa de madeira contínua para simular uma camada em posição horizontal. Na segunda (figura 7b) empregou-se uma placa de madeira descontínua, isto é, contendo frestas a intervalos regulares para representar discontinuidades laterais no corpo considerado, ou seja, diáclise, falhas e variações litológicas.

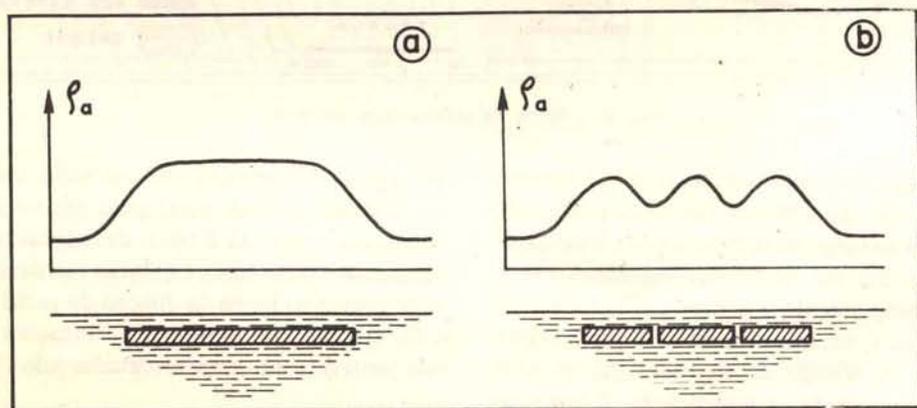


Fig. 7 - Esquema das experiências sobre modelos em escala reduzida. (a) o modelo apresenta uma camada contínua, (b) o modelo apresenta descontinuidades.

Os perfis de resistividade aparente esquematizados na fig.7 foram obtidos com um arranjo de 4 eletrodos segundo o dispositivo simétrico de Wenner.

Observa-se que o perfil de resistividade aparente da fig.7b apresenta resultados muito mais próximos daqueles obtidos realmente no campo.

Esses ensaios tiveram por objetivo não apenas possibilitar a visualização das relações entre o modelo e sua resposta ao método utilizado, como também, resolver, na prática, as limitações à aplicação do método.

#### SONDAGENS ELÉTRICAS

Os estudos preliminares justificam o emprego das sondagens elétricas como método de prospecção da jazida Boa Esperança.

Os quatro estratos existentes — solo, formação ferrífera, gnaiss decomposto e gnaiss — apresentam as condições necessárias exigidas para a aplicabilidade das sondagens elétricas, ou seja, contrastes nítidos de resistibilidade, pequenas espessuras (comparadas com a extensão lateral) crescentes com a profundidade. Deve ser salientado, no entanto, desde já, que não fora o gnaiss decomposto e altamente condutor na base da formação ferrífera, não teria sido possível o emprego dessa técnica de prospecção; esse estrato tem mais de 50 m de espessura e resistividade relativamente constante, da ordem de 400 ohm.m funcionando, por isso, como um substrato condutor “infinito” para as duas camadas sobrejacentes, o que torna possível determinar com relativa facilidade a interface base da formação ferrífera — topo do gnaiss decomposto.

Algumas restrições quanto ao emprego das sondagens elétricas como método de prospecção da jazida Boa Esperança podem ser formuladas *a priori*. Toda a teoria das sondagens elétricas se fundamenta na existência de estratos homogêneos, isotópicos e horizontais, o que não acontece na jazida Boa Esperança. Há variações laterais, muito acentuadas tanto nas espessuras como nos valores da resistividade dos estratos por causa da complexidade das estruturas geológicas da jazida (lentes muito distorcidas e fraturadas, com variações litológicas muito acentuadas). Estas condições se refletem na precisão das interpretações quantitativas das curvas de resistividade.

Na área da jazida Boa Esperança foram executadas 11 sondagens elétricas utilizando-se o dispositivo de eletrodos Schlumberger com comprimento de linha de corrente de 400 a 1.000 m.

Em se tratando de uma área razoavelmente conhecida do ponto de vista geológico pode-se, como primeiro passo para a interpretação, agrupar as curvas de resistividade em 2 categorias (fig. 8), segundo o fato da S.E. ter sido executado fora da área da jazida (fig. 8A) ou sobre a mesma (fig. 8B). Essa separação das sondagens elétricas é muito importante, pois, a interpretação se fundamenta muito mais na *deformação progressiva* das curvas de resistividade vizinhas do que no estudo detalhado das curvas individuais.

Nas curvas da categoria (A) se destaca a forma de “fundo de navio”, correspondente a um estrato bom condutor (o gnaiss decomposto), enquanto a característica principal das curvas (B) é a forma pronunciada de “sino” correspondente à presença de um estrato de alta resistividade (a formação ferrífera). As curvas, tanto, de categoria (A) como (B) têm em comum um ramo terminal ascendente a 45°, correspondente ao gnaiss são, não condutor. As partes iniciais das curvas não são uniformes, pois correspondem aos primeiros metros de solo, cujas resistividades, como já foi dito, variam entre largos limites.

Os valores máximos das resistividades aparentes das curvas da figura 8-A se situam entre 300 e 2.000 ohm.m e nas curvas (B) entre 2.000 e 5.000 ohm.m. Baseando-se apenas nessas observações, poderia haver dificuldades para classificar algumas curvas, ou na categoria (A) ou (B). No entanto, *as forma* das curvas não são idênticas. Os máximos das curvas (A) ficam mais à direita do que os máximos de (B) ou, em outras palavras, os arcos das curvas correspondentes ao gnaiss decomposto acrescentam declive mais suave em (A) e mais abrupto em (B).

Considerando-se o solo como um só estrato (na realidade, ele se desdobra em dois ou mais estratos), pode-se considerar *grosso modo* que 3 estratos formam as curvas da categoria (A) e 4, as da categoria (B).

*Interpretação.* Na interpretação das curvas de resistividade obtidas na área da jazida Boa Esperança foram utilizados principalmente o *método da superposição* combinado com o método do “ponto auxiliar”.

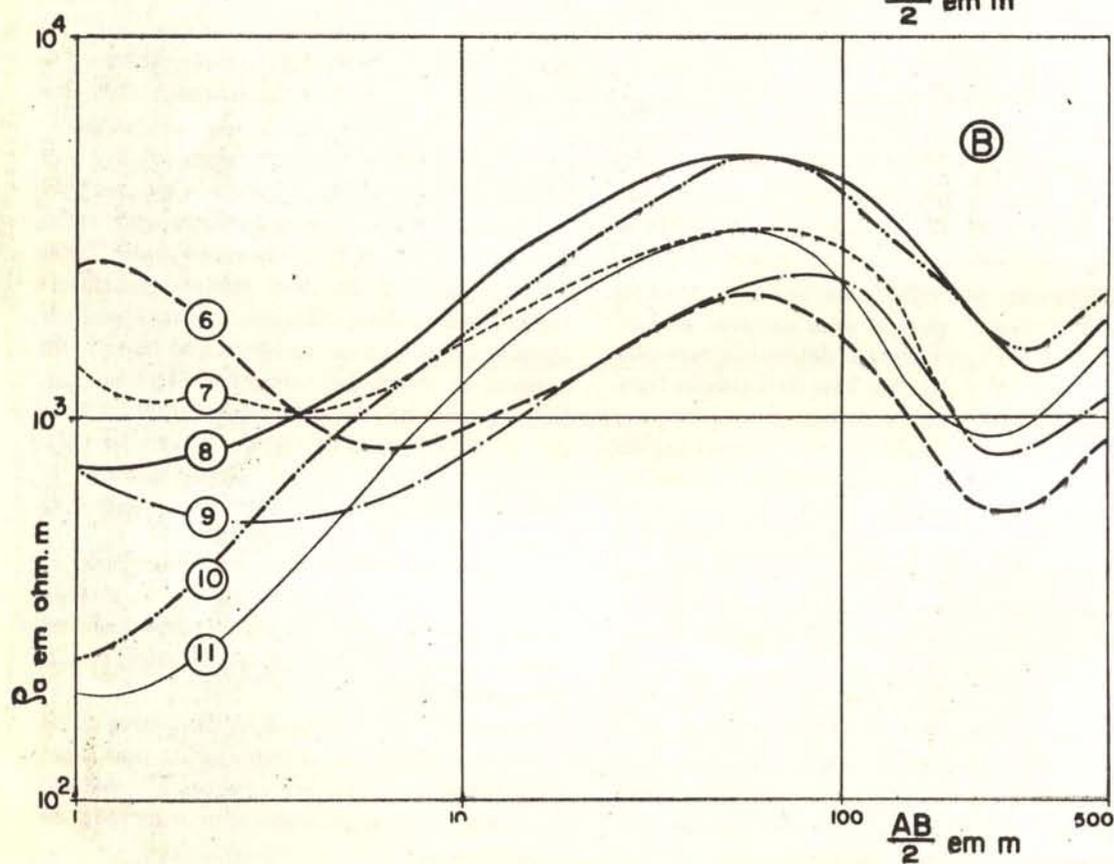
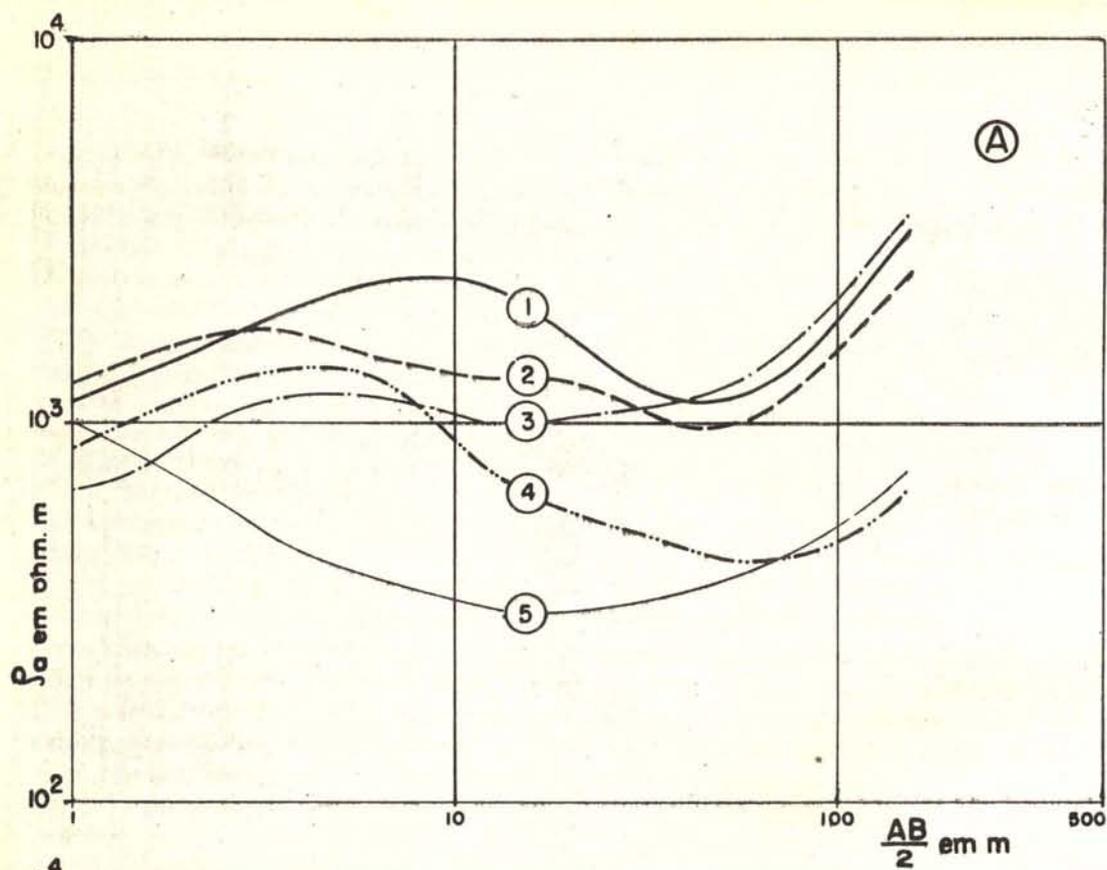


Fig. 8 - Sondagens elétricas típicas obtidas na área da Jazida Boa Esperança.

Para exemplificar o procedimento, dá-se a seguir, detalhes sobre a interpretação de uma curva do grupo (B). Trata-se, portanto, de uma curva de 4 camadas (figura 9).

O método da superposição que consiste em comparar os dados de campo com curvas previamente calculadas é o único de uso geral e baseado em sólida teoria física.

Várias coleções de curvas-padrão foram preparadas nesses últimos 40 anos. São conhecidas as seguintes coleções para o arranjo Schlumberger:

1º) de 720 curvas de 3 camadas editada em 1941 pelo Instituto de Investigações da Indústria de Petróleo da URSS;

2º) de 480 curvas de 3 camadas, calculada pela Compagnie Générale de Géophysique, Paris, e publicada (1955 e 1963) pela European Association of Exploration Geophysicists;

3º) de 72 curvas de 5 camadas, devida a Flathe (1963);

4º) de 1417 curvas de 3 e 4 camadas publicadas por Orellana e Mooney (1966).

As únicas coleções disponíveis são as da Compagnie Générale de Géophysique e as de Orellana e Mooney. A teoria do cálculo das curvas-padrão pode ser vista em Mooney, Orellana, Pickett e Tornheim (1966).

A curva de resistividade (figura 9-A) a ser interpretada, pelo método da superposição apresenta forma de "sino" seguida de um "fundo de navio". Na coleção de Orellana-Mooney (1966), elas são abreviadamente denominadas KH (da nomenclatura russa).

Examinando-se as várias possibilidades chega-se que a curva-padrão que mais se aproxima daquela obtida no campo é a curva "L" da folha KH-4, para a qual as relações de espessuras dos estratos são:  $E_2/E_1 = 5$  e  $E_3/E_1 = 5$  e os valores relativos das resistividades verdadeiras na ordem

$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 : \rho_4$  são  $1:20:0,1:\infty$ . Basta, portanto determinar os valores de  $E_1$  e  $\rho_{1a}$  para ter os demais. Esses valores são dados pela posição da "1a. cruz".

$$E_1 = 4,2 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 850 \text{ ohm.m}$$

A partir desses valores e das relações anteriores, encontra-se:

$$E_2 = 21 \text{ m} \quad E_3 = 21 \text{ m} \quad E_4 = \infty$$

$$\rho_2 = 17.000 \text{ ohm.m} \quad \rho_3 = 85 \text{ ohm.m}, \quad \rho_4 = \infty$$

Embora haja boa coincidência da curva de campo com a curva-padrão escolhida, os parâmetros fornecidos não constituem senão uma das muitas soluções. Isto quer dizer que a estrutura deduzida a partir da curva de campo pode não representar exatamente a realidade, embora a interpretação seja formalmente correta.

Assim, as ordens de grandeza das resistividades das duas primeiras camadas estão de acordo com os resultados dos estudos preliminares, mas, o valor da resistividade da 3a. camada ( $\rho_3 = 85 \text{ ohm.m}$ ) é muito inferior àquele que se conhece dos estudos preliminares (da ordem de 400 ohm.m).

O princípio da equivalência (vide definição em Kunetz, 1966, p. 58) se aplica à 3a. camada, que é condutora e se encontra entre duas resistentes. Segundo esse princípio, uma camada condutora se manifesta nas curvas de resistividade essencialmente por sua *condutância horizontal*, ou pelo produto de sua condutividade ( $\sigma$ ) por sua espessura (E), ou, o que é a mesma coisa, por sua espessura dividida pela resistividade ( $\rho$ ):

$$C_3 = \sigma_3 \cdot E_3 = \frac{E_3}{\rho_3}$$

Usando-se os valores encontrados acima, tem-se:

$$C_3 = \frac{21}{85} = 0,247$$

Sendo o valor da resistividade da 3a. camada da ordem de 400 ohm.m, conforme os estudos preliminares, então:

$$E_3 = C_3 \cdot \rho_3 = 0,247 \times 400 = 98,8 \text{ m}$$

Tem-se, portanto, o seguinte corte geológico:

$E_1 = 4,2 \text{ m}$	$\rho_1 = 850 \text{ ohm.m}$
$E_2 = 21$	$\rho_2 = 17.000$
$E_3 = 100$	$\rho_3 = 400$
$E_4 = \infty$	$\rho_4 = \infty$

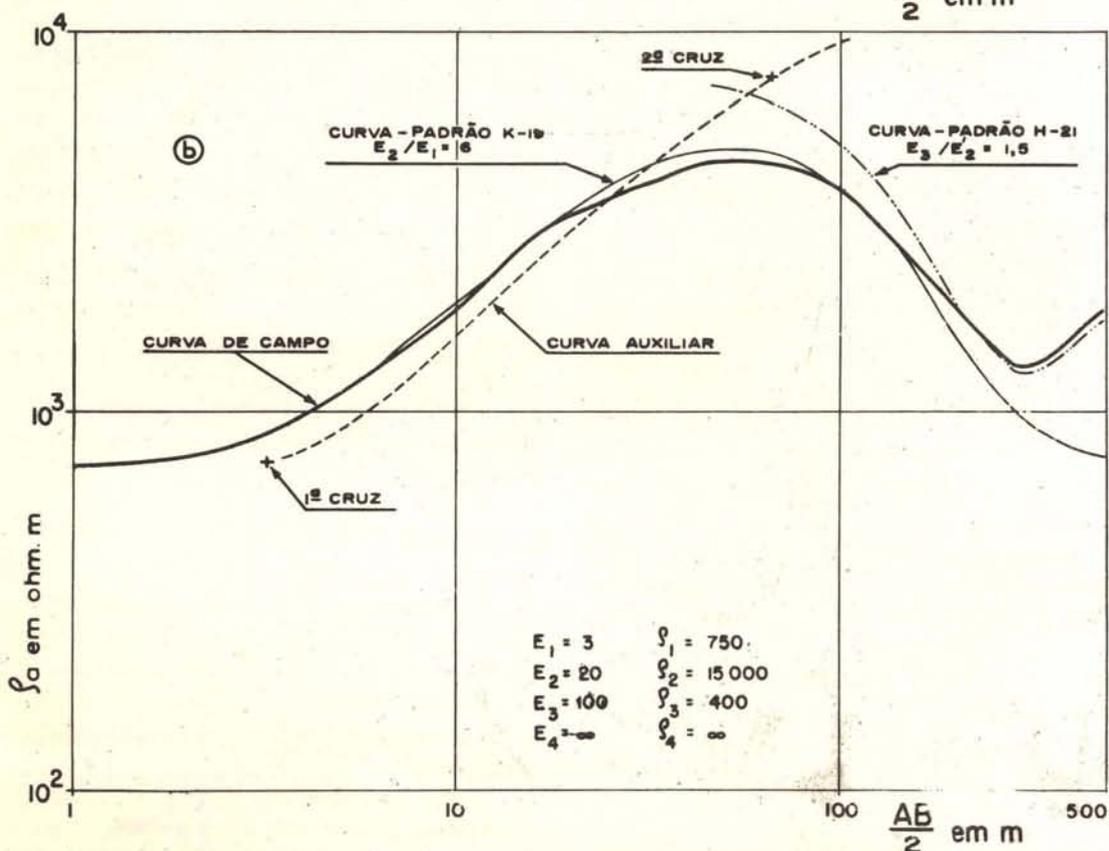
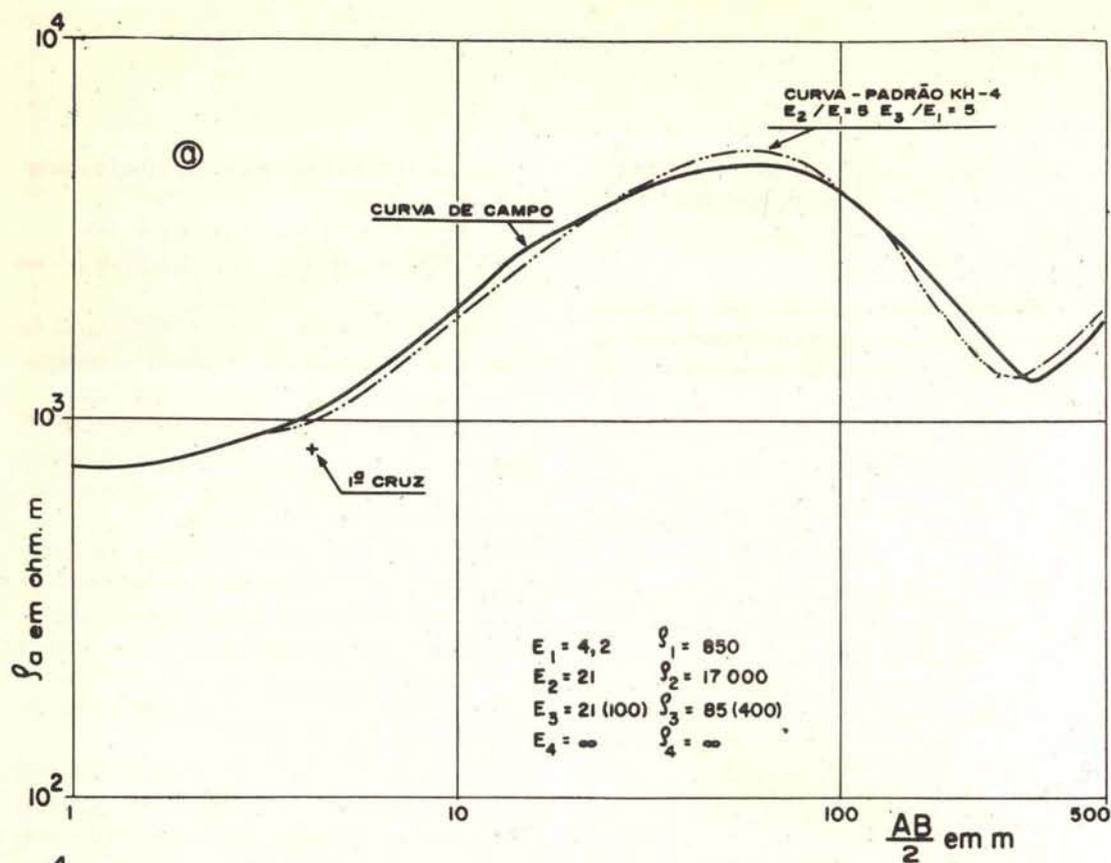


Fig. 9 - Exemplo de interpretação de uma curva de resistividade, (a) pelo uso de curvas-padrão, (b) pelo método de Ebert.

O método de superposição pode ser utilizado em combinação com o chamado *método do ponto auxiliar*. A vantagem desse método é de conseguir uma importante redução do número necessário de curvas-padrão.

Vários métodos foram propostos para reduzir o número de curvas-padrão e desse modo tornar mais rápida as interpretações das curvas de resistividade.

O problema consiste em saber onde colocar a origem (também denominada *cruz*)  $\rho_{ap} = 1$ ,  $AB/2 = 1$  das curvas de duas (e às vezes, três) camadas a fim de obter a melhor assíntota para a curva experimental.

Mais precisamente, esses métodos consistem em determinar, qual a camada única imaginária que melhor substitua as anteriores, de modo a reduzir o problema a um caso de duas (às vezes, três) camadas.

O método do ponto auxiliar foi proposto por Ebert (1943). Kalenov (1957) acrescentou tabelas e gráficos para facilitar o cálculo. Instruções detalhadas sobre o uso do método de Ebert encontra-se em Orellana e Mooney (1966).

O método do ponto auxiliar permite o emprego de curvas-padrão de 3 camadas para a interpretação das curvas de campo de 4 camadas, e inclusive de 5, porém com menor precisão.

Na figura 9-b apresenta-se um exemplo de interpretação segundo esse método.

Em primeiro lugar, procura-se ajustar a parte esquerda da curva de campo a uma curva-padrão de 3 camadas para obter, com uma estimativa de  $\rho_3$ , uma solução para as duas primeiras camadas. A melhor coincidência foi obtida com a curva K-19 da coleção Orellana-Mooney (1966) para a qual a relação de espessura do segundo estrato para o primeiro é  $E_2/E_1 = 6$ . Esta curva indica a posição da "1a. cruz", cujas coordenadas fornecem as unidades de comparação para as espessuras e resistividades verdadeiras de cada camada do terreno:

$$E_1 = 3m$$

$$\rho_1 = 750 \text{ ohm.m}$$

Sendo  $E_2/E_1 = 6$ ,  $\rho_2/\rho_1 = 20$  e  $\rho_3/\rho_1 = 1$ , tem-se ainda:

$$E_2 = 18m$$

$$\rho_2 = 15.000 \text{ ohm.m}$$

$\rho_3 = 750 \text{ ohm.m}$  (este valor é apenas uma primeira aproximação)

A segunda operação consiste em utilizar o gráfico auxiliar de Ebert correspondente às curvas em forma de "sino". Calca-se sobre o papel a curva auxiliar  $\rho_2/\rho_1 = 20$ , com origem na "1a. cruz".

O terceiro passo consiste em procurar a curva-padrão de 3 camadas que melhor se ajuste à parte direita ("fundo de navio") da curva de resistividade. A "cruz", nesse caso, deve situar-se sobre a curva auxiliar traçada de acordo com a última operação. No exemplo que está sendo analisado, a curva escolhida foi a H-21, da coleção Orellana-Mooney (1966) para  $E_3/E_2 = 1,5$ , onde  $E_2$  é o valor da abscissa da "2a. cruz".

Sendo  $E_2 = 67m$ , obtém-se

$$E_3 = 67 \times 1,5 = 100,5m$$

O gráfico auxiliar de Ebert fornece ainda para a "2a. cruz", a relação:  $E_2/E_1 = 7,5$  do que resulta  $E_2 = 22,5m$  (este valor não deve se afastar muito daquele obtido na 1a. operação).

Tem-se para essa terceira operação, novo valor para a resistividade da 3a. camada:  $\rho_3 = 400 \text{ ohm.m}$ , valor esse que também não deve afastar-se muito daquele obtido na 1a. operação.

Em resumo, tem-se o seguinte corte geológico:

$$E_1 = 3m \quad \rho_1 = 750 \text{ ohm.m}$$

$$E_2 = 20 \quad \rho_2 = 15.000$$

$$E_3 = 400 \quad \rho_3 = 100$$

$$E_4 = \infty \quad \rho_4 = \infty$$

$E_2 = 20m$  é a média dos valores obtidos em cada operação;

$E_3 = 400 \text{ ohm.m}$  é um valor mais próximo do real, conhecido dos estudos preliminares.

Os resultados obtidos tanto pelo uso das curvas-padrão como pelo *método do ponto auxiliar* parecem coerentes, no entanto, deve-se frisar que esses não constituem senão uma das soluções possíveis.

Da mesma forma que para a 3a. camada, o *princípio da equivalência* também se aplica à 2a. camada. Obtém-se diagramas praticamente idênticos.

ticas para camadas resistentes de resistividade ( $\rho$ ) e espessura ( $E$ ) diferentes, desde que a *resistência transversal*  $T = \rho E$  permaneça sensivelmente a mesma. Não se conhecendo nem  $\rho$  nem  $E$ , há por conseguinte uma indeterminação.

Supondo-se correto os valores  $E_2 = 20m$   
 $\rho_2 = 15.000 \text{ ohm.m}$   
 tem-se  $T_2 = 300.000 \text{ ohm.m}^2$ . Se  $\rho_2$  variar entre 10.000 e 20.000 ohm.m, ter-se-ia para  $E_2$  respectivamente 30 e 15 m.

Desde que se conheça ou  $E$  ou  $\rho$  fica desfeita a ambiguidade explicada pelo *princípio da equivalência*. Os estudos preliminares tiveram por finalidade encontrar ou  $E$  ou  $\rho$ . Por outro lado, o alto calor da resistência transversal  $T_2$  é uma característica indicadora da existência da formação ferrífera.

As curvas-padrão de resistividades foram calculadas na hipótese de meio homogêneo e isotrópico. Essa hipótese, todavia, nem sempre é verificada nas curvas reais.

Os tipos de rochas existentes na área da jazida Boa Esperança fazem pressupor a ocorrência do fenômeno de anisotropia, pois as rochas gnáissicas, via de regra, apresentam resistividade mais elevada na direção normal à gnaissificação do que paralela à mesma.

O coeficiente de anisotropia  $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}}$  onde  $\rho_t$  e  $\rho_l$  são, respectivamente, as resistividades transversal e longitudinal à gnaissificação, apresentou tendência a valores maiores que 1,5 nos itabiritos e gnaisses da área da jazida Boa Esperança. Comparando-se os resultados da interpretação das sondagens elétricas com as calibrações feitas nos poços de sondagens, chega-se à conclusão de que as espessuras calculadas são sempre maiores do que as espessuras reais. Isto é uma demonstração de que  $\lambda$  é maior que 1.

Estudos efetuados pela Escola Schlumberger (seg. Lasfargues 1957 p. 114) demonstram que uma camada de espessura  $E$ , de resistividade  $\rho$  e anisotropia  $\lambda$  dão, na superfície do terreno, um mesmo potencial elétrico que uma camada isotopa de espessura  $\lambda E$  e de resistividade  $\rho$ . Por conseguinte a influência da anisotropia nos resultados obtido na interpretação da sondagem elétrica, basta dividir as espessuras obtidas por  $\lambda$ . Nas interpretações anteriores, fazendo-se  $\lambda = 1,5$ , ter-se-ia as seguintes espessuras, respectiva-

mente para interpretações, (a) por curvas-padrão e (b) pelo método do ponto auxiliar:

(a)	(b)
$E_1 = 4,2$	$E_1 = 3$
$E_2 = 14$	$E_2 = 13$
$E_3 = 67$	$E_3 = 67$
$E_4 = \infty$	$E_4 = \infty$

Para o solo não foi aplicada a correção da influência da anisotropia.

Os resultados acima parecem estar mais de acordo com os dados dos furos de sondagens realizados nas proximidades da sondagem elétrica analisada. Assim, as 4 sondagens mecânicas ao redor daquela sondagem elétrica revelaram as seguintes espessuras:

para o solo: de 3 a 10m.

para a formação ferrífera: de 10 a 20 m.

#### CONCLUSÕES

Nas ocorrências de minério de ferro tipo-Boa Esperança, graças ao grande contraste de resistividade elétrica entre as rochas da formação ferrífera (itabirito e hematita magnetíticas) e os gnaisses encaixantes, o método de eletrorresistividade fornece, não apenas o contorno da área da formação ferrífera, por meio do procedimento das Cartas de Resistividade, como também permite avaliar ordens de grandeza das espessuras dessa formação pelo emprego do procedimento das Sondagens Elétricas. Os gnaisses que se situam na base das rochas itabiríticas e hematíticas, até a profundidade, de uns 50 metros, e portanto, dentro da zona ainda sujeita a intemperismo, apresenta resistividade ao redor de 400 ohm.m enquanto as rochas de formação ferrífera alcançam valores de ordem de 10.000 ohm.m. A baixa resistividade do gnaisse se deve à baixa resistividade das águas (da ordem de 5 ohm.m) que impregnam suas fissuras e fraturas, de acordo com a relação de Archie. A diminuição da resistividade das águas e profundidade deve-se à sua lenta circulação e conseqüente enriquecimento em sais e reflete de um certo modo a natureza das rochas, as condições climáticas e a morfologia da região.

As cartas de resistividade aparente desfazem as indeterminações consequentes do emprego isolado do método magnométrico, pois que muitas vezes é difícil separar anomalias magnéticas provenientes dos corpos de minério de ferro in situ daquelas advindas dos depósitos de ferro superficiais, principalmente, cangas.

As curvas de sondagem elétrica obtidas na área de Boa Esperança foram agrupadas em 2 categorias. As primeiras se destacam, pela forma de "fundo de navio" correspondente a um estrato bom condutor (o gnaise até 50 metros de profundidade), as segundas se caracterizam pela forma pronunciada de "sino" correspondente à presença de um estrato de alta resistividade (a formação ferrífera), com *resistência transversal*, isto é, produto da resistividade verdadeira pela espessura da formação ferrífera, da ordem de 300.000 ohm.m<sup>2</sup> e coeficiente de anisotropia estimado em 1,5.

Desde que a formação ferrífera não se situe a mais de 20m de profundidade e sua espessura seja da mesma ordem de grandeza da profundidade de seu topo, ela será sempre individualizada pela sondagem elétrica. Mas, se a curva de resistividade não indicar a existência do estrato elétrico correspondente às rochas da formação ferrífera, ou esta realmente não está presente ou é pouco espessa em relação aos estratos sub e sobrejacentes, ou ainda, estaria encaixada em gnaisses são, a profundidade superior a 50 metros. A formação ferrífera do tipo-Boa Esperança possui, contudo, suficiente intensidade de magnetização para que sua presença provoque anomalias mensuráveis na superfície da terra, mesmo a uma profundidade superior a 20 metros.

O emprego dos métodos geofísicos, tanto na fase de reconhecimento (aeromagnetometria) como na fase de detalhes (magnetometria terrestre e eltrorresistividade) proporciona uma redução considerável do tempo, dos custos e dos es-

forços dispendidos na descoberta e prospecção das ocorrências de itabirito e hematita da faixa Nova Era - Itamatandiba. Dependendo das condições do terreno e das facilidades de acesso, em média, podem ser efetuadas por dia de 5 a 10 sondagens elétricas com AB = 500m e de 500 a 1.000 m de perfil de resistividade, com estações de 20 a 20 metros. Consta-se que, na área de Boa Esperança, cerca de 30% dos furos de sondagens elétricas poderiam ter sido melhor aproveitados se a locação desses furos tivesse sido programada com base no levantamento magnométrico prévio.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Professor Pierre René Taltasse, devemos o estímulo durante a elaboração do presente trabalho e sua colaboração direta na coleta e interpretação dos dados de resistividade, temperatura e pH das águas que circulam na área da Jazida Boa Esperança e em Itabira.

Os geólogos e engenheiros da Companhia Vale do Rio Doce — demonstraram invulgar espírito de colaboração, pondo à nossa disposição todos os documentos necessários para elaboração deste trabalho. Os geólogos José Eduardo Machado e Wanderlei de Rui Beisegel, acompanharam e orientaram o autor nos trabalhos de campo diversas vezes. Tivemos oportunidade de conhecer diversos problemas relacionados com a geologia da área estudada em discussão com os Geólogos Domingos Drummond Torres, José Aluísio Vasconcellos, Amílcar Souto Jorge e Ricardo A.C. Figueiredo. O Engenheiro de Minas Guilherme Gasolla forneceu-nos dados concernentes ao trabalho de prospecção da Jazida Boa Esperança.

Os senhores Kiyoshi Kadekaru e Oswaldo R. Obata, alunos do Curso de Geologia da USP, realizaram as experiências de eltrorresistividade em escala reduzida.

## BIBLIOGRAFIA

- ARCHIE, G.E. (1942) - *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Petroleum Technology, Tech. Publ. 1422, vol. 5.*
- CHEBOTAREV, I.I. (1955) - *Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Geoch. Cosmoch. Acta. vol. 8, pp. 52-63, 137-170*
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (1955 e 1963) - *Abaques de Sondage électrique. Geophysical Prospecting vol. 3 supl. 3, 51 pp. Haia.*
- CRUZ, W.B. e MALO, F.A.F. (1968) - *Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil. SUDENE, Divisão de Hidrogeologia, Recife.*
- DAVINO, A (1970) - *Importância do método de eletrorresistividade na determinação da natureza e espessura do manto de decomposição em rochas cristalinas. Bol. Soc. Bras. Geologia, vol. 19, nº 1, São Paulo.*
- EBERT, A. (1943) - *Grundlagen zur Auswertung Geodektrischer Tiefen messungen. Beitrage Ang. Geoph. vol. 10, p. 1-17.*
- FLATHE, H. (1963) - *Five Layer master curves for the hidrogeological interpretation of geoelectrical resistivity measurements above a two-stoney aquifer. Geophysical Prospecting vol.11, pp. 471-490, Haia.*
- HEM, J.D. (1959) - *Study and intepretation of the chemical analyses of natural waters. U.S. Geol. Survey, Water Suplly Papers 1473, GPO Washington, DC. 269 pp.*
- KALENOV, E.N. (1957) - *Interpretasiya Krivikh vertigalnogo elektri cheskogo zondi rovaniya (472 pp). Gosgeoltekhizdat, Moscou.*
- KUNETZ, G. (1966) - *Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. 103 pp. Gehruder Borntraeger, Berlim.*
- LASFARGUES, P. (1957) - *Prospection électrique par courants continus. Masson & Cie., Paris.*
- MOONEY, H.M., ORELLANA, E., PICKETT, H. e TORNHEIM, L. (1966) - *A resistivity computing procedure for layered earth model: Geophysics, vol. 31, pp. 192-203.*
- MOONEY, H. M. (1966) - *Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Interciencia, Madri.*
- PARASNIS, D.S. (1966) - *Mining Geophysics. Elsevier Publishing Company, Amsterdã.*
- PARKHOMENKO, E.I. (1967) - *Electrical Properties of Rocks. Monographs in Geoscience, 314 pp. Plenum Press., Nova York.*
- PFLUG, R. (1965) - *A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais. Bol. 226 da Div. Geol. e Min. do DNPM, Rio de Janeiro.*
- REEVES, R.G. (1966) - *Geology and Mineral Resouces of the Monlevade and Rio Piracicaba Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 341 - E, Washington.*
- SAGE, J.F. (1958) - *Water Analysis. In Subsurface Geology in Petroleum Exploration, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 251 - 264.*