JOSUÉ RABELO DE ARRUDA

**ESTUDOS EM MODELOS REDUZIDOS
DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS
POR ELETRORRESISTIVIDADE**

VOLUME I

DEDALUS - Acervo - IGC

30900007891

Dissertação de Mestrado apresenta-
da ao Instituto de Geociências da
Universidade de São Paulo

Orientador:
Prof. Dr. André Davino

SÃO PAULO
1977

ÍNDICE
VOLUME I

RESUMO	iv
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - HISTÓRICO DA PESQUISA	1
1.2 - HISTÓRICO DA GEOFÍSICA APLICADA	2
CAPÍTULO II	7
2. ESTUDO DE MODELOS DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM LABORATÓRIO POR MÉTODOS GEOFÍSICOS	7
2.1 - INTRODUÇÃO	7
2.2 - RESISTIVIDADE	8
2.2.1 - Campo Elétrico Gerado por Corrente Contínua	8
2.2.2 - Definição	9
2.2.3 - Tipos de Condutibilidade Elétrica	10
2.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DAS ROCHAS	17
2.3.1 - Soluções	17
2.3.2 - Intemperismo	20
2.3.3 - Constituintes Mineralógicos	21
2.3.4 - Relação Sinal-Ruído	22
2.4 - INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS	24
2.4.1 - Litologia	25
2.4.2 - Profundidade	30
2.4.3 - Forma	35

CAPÍTULO III	36
3. DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MODELO REDUZIDO	36
3.1 - INTRODUÇÃO	36
3.2 - MODELOS REDUZIDOS PARA MÉTODOS SÍSMICOS	37
3.3 - MODELOS REDUZIDOS PARA O MÉTODO MAGNETOMÉTRICO	38
3.4 - MODELOS REDUZIDOS PARA MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS	40
3.5 - MODELOS REDUZIDOS PARA O MÉTODO DA RESISTIVIDADE	41
CAPÍTULO IV	47
4. LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA DE RIO CLARO	47
4.1 - EQUIPAMENTO DE MEDIDAS	47
4.2 - MODELOS REDUZIDOS	50
4.2.1 - Rocha Encaixante	51
4.2.2 - Rocha Encaixada	51
4.3 - DISPOSITIVO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS DE ISORRESISTIVIDADE	52
4.4 - ANÁLISE DOS ERROS QUE AFETAM A MEDIDA DA RESISTIVIDADE	53
4.4.1 - Equipamentos Eletrônicos	54
4.4.2 - Cuba Eletrolítica	57
4.4.3 - Solução	59
4.4.4 - Eletrodos	64

4.4.5 - Cabos Isolados	66
4.4.6 - Modelos	67
4.5 - IMPORTÂNCIA DA ESCALA NOS MODELOS REDUZIDOS	69
 CAPÍTULO V	 70
5. EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO	70
5.1 - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGUMAS CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	70
5.2 - APLICABILIDADE DA ANÁLISE DE TENDÊN CIA EM MODELOS REDUZIDOS	71
5.3 - POTENCIAL EXPONTÂNEO	71
 CAPÍTULO VI	 75
6. CONCLUSÕES	75
 CAPÍTULO VII	 76
7. AGRADECIMENTOS	76
 CAPÍTULO VIII	 78
8. BIBLIOGRAFIA	78
 VOLUME II	
ILUSTRAÇÕES	

RESUMO

Objetiva este trabalho, relatar a montagem de um laboratório para estudos geofísicos de estruturas geológicas empregando o parâmetro eletroresistividade e apresentar alguns resultados obtidos com a utilização do equipamento no estudo com modelos reduzidos. Procura mostrar algumas dificuldades encontradas durante o trabalho e ressaltar os cuidados a serem tomados para que sejam evitadas diversas fontes de erros nas medidas experimentais.

Apresenta ainda um apanhado das considerações teóricas que sustentam alguns dos métodos usados em Geofísica Aplicada e, mediante a análise bibliográfica, evidencia comparações feitas entre resultados obtidos com modelos reduzidos e outros resultantes de formulação matemática, estes através do emprego de computadores. Mostra que em muitos casos, os resultados experimentais são mais confiáveis do que os teóricos, mas vezes há em que os segundos são melhores e outras em que os dois se complementam.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 - HISTÓRICO DA PESQUISA

Um dos objetivos visados, quando se resolveu construir o Laboratório de Geofísica Aplicada com modelos reduzidos, em Ribeirão Preto, foi ativar um plano em execução que possibilitaria a existência de um grupo de pesquisadores, no interior deste Estado, com interesse na Geofísica Aplicada.

Para dar prosseguimento à montagem e colocar em funcionamento o referido Laboratório, o autor teve a grata satisfação de ser convidado, tendo nessa ocasião iniciado este trabalho. Mas com o início de suas funções didáticas junto ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho - UNESP, campus de Rio Claro, e levando em conta o tempo dispendido em viagens e seu custo material, optou-se pela montagem de semelhante Laboratório em Rio Claro, a partir da experiência inicial de Ribeirão Preto.

Esta decisão baseou-se, primordialmente, no desejo de melhorar as condições didáticas para o ensino da disciplina de Geofísica Aplicada, devido às facilidades com as quais se passaria a contar para as aulas práticas, principalmente na familiarização com o manuseio dos equipamentos e visualização de importantes conceitos teóricos.

Assim, o Laboratório de Geofísica Aplicada de Ribeirão Preto não sofreu solução de continuidade, graças a interessante pesquisa desenvolvida por Alfio Bogdan e atualmente o Curso de Geologia existente em Rio Claro conta com importante ferramenta para suas atividades didáticas.

1.2 - HISTÓRICO DA GEOFÍSICA APLICADA

Convencionalmente, a Geofísica pode ser dividida em duas partes distintas: Pura e Aplicada. A Geofísica Pura estuda a Terra como um todo e os seus objetivos abrangem estudos de problemas sem atentar para seus aspectos econômicos imediatos. A Geofísica Aplicada estuda partes isoladas da crosta terrestre com objetivos quase sempre de natureza econômica, em busca de bens minerais ou do conhecimento da natureza e condições das rochas de subsuperfície, para orientação dos projetos da Engenharia em obras de médio e grande porte.

Esta divisão da Geofísica se fez necessária apenas nestes últimos anos pois, no início, eram estudados tão somente fenômenos naturais objetivando a aquisição de conhecimentos sobre os mesmos.

CARLSBORG (1963) em PARASNIS (1973) sugere a idéia de que a Geofísica Aplicada teve seu nascimento quando do lançamento do livro "De Magnete" de Willian Gilbert, em 1600, no qual o Autor estabeleceu o conceito de um campo geomagnético geral, com orientação definida em cada ponto da superfície terrestre. Em seguida, por volta de 1640, através da observação de anomalias locais na orientação do campo geomagnético, foi encontrada na Suécia uma ocorrência de magnetita e, no final desse mesmo século, prospecções magnetométricas foram feitas em maior número.

RUST (1938) afirma que a aplicação do método de Resistividade deveu-se a Fred Brown, que em 1883 procurou encontrar depósitos minerais através da medida da resistência da terra entre dois eletrodos. Apesar da simplicidade do método, ele apresenta, segundo RUST (1938), inúmeros defeitos, sendo um deles a contribuição muito grande da resistência do terreno imediatamente próximo ao eletrodo, na resistência total do circuito, indicando que pequenas variações na resistividade desse material

provocam grandes variações nas medidas, exceto quando o material é homogêneo, o que raras vezes ocorre.

SCHLUMBERGER em 1912 e SUNDBERG em 1918 introduziram o método do mapa de potencial que permitiu a representação gráfica dos efeitos das anomalias subsuperficiais, mas com sérias desvantagens por não permitir representação numérica nem cálculos.

Em 1916, WENNER introduziu o arranjo de quatro eletrodos, eliminando os inconvenientes dos procedimentos anteriores.

Assim, embora o início da Geofísica Aplicada date do século XVII, o seu maior desenvolvimento se deu no século atual, graças à procura do petróleo e dos bens minerais para a indústria básica, ou seja, graças à necessidade de energia e de elementos cada vez mais baratos, requisitados pelas indústrias.

No início, bastava um simples reconhecimento geológico para se iniciarem perfurações ou aberturas de galerias, pois as ocorrências minerais apresentavam situações tão favoráveis que eram facilmente encontradas.

Com o tempo, as técnicas petrolíferas (reconhecimento geológico e sondagens mecânicas) tornaram-se muito caras, além de serem demoradas e trabalhosas, necessitando-se portanto de técnicas mais rápidas e baratas para a seleção de áreas mais favoráveis. Por isso, foram desenvolvidos aparelhos cada vez mais complexos e precisos, como aqueles que se utilizam em métodos aeroportados, em sísmica de reflexão, etc..

Por sua vez, a indústria mineira passou gradativamente a trabalhar com teores cada vez menores, além da natural e crescente dificuldade na prospecção de novas jazidas, pois as mais facilmente encontráveis ou com altos teores, não mais atendiam à demanda crescente de minério ou estavam em fase final de lavra.

Assim, os métodos geofísicos passaram a ter importância cada vez maior na seleção de áreas que mereceriam um estudo mais detalhado.

Mesmo os métodos geofísicos tornaram-se, com o tempo, mais onerosos, na medida em que foram sendo utilizadas técnicas e equipamentos cada vez mais requintados. Assim, as técnicas geofísicas não mais puderam ser empregadas sem discriminação, devido ao seu alto custo, mas apenas para a seleção de algumas zonas favoráveis em áreas pré-escolhidas a partir de reconhecimentos geológicos, associados ou não a outras técnicas geológicas.

Portanto, uma seqüência de utilização de técnicas, tanto na prospecção petrolífera como na mineira em geral, foi sendo estabelecida com base no volume de informações possuídas e desejadas (DAVINO, 1971):

Prospecção do petróleo

- Geologia de superfície
- Aerofotogeologia
- Aeromagnetometria
- Gravimetria
- Magnetometria terrestre
- Sondagens elétricas e método das correntes telúricas
- Métodos sísmicos
- Sondagens mecânicas

Prospecção mineira

- Geologia regional e fotogeologia
- Métodos geofísicos aerotransportados (magnetométrico, radiométrico e eletromagnético)
- Geologia de detalhe
- Prospecção geoquímica
- Magnetometria terrestre
- Gravimetria
- Métodos elétricos e eletromagnéticos
- Métodos sísmicos e outros
- Galerias, sondagens mecânicas, etc.

Como as prospecções geofísicas tornaram-se cada vez mais caras, as informações procuradas com esses métodos também deveriam ser mais precisas, completas e rápidas, de modo a se obter uma compensação.

As informações qualitativas obtidas há trinta ou quarenta anos atrás perderam sua importância para as quantitativas, donde novas técnicas e equipamentos terem sido desenvolvidos. Mas com o refinamento das técnicas, novos problemas foram sendo encontrados e às resoluções matemáticas foi atribuída uma pequena importância, visto que sua utilização somente era possível em problemas teóricos simples, dado o grande número de variáveis encontradas:

- todo corpo deve apresentar um tamanho mínimo de acordo com a profundidade em que se encontra, visto que, se possuir dimensões pequenas e profundidade grande, não será encontrado por métodos geofísicos. Portanto, há uma relação constante e mínima entre dimensões e profundidade, abaixo da qual um corpo não será encontrado;

- o contraste entre as propriedades físicas investigadas, do corpo e da rocha encaixante, deve ser tal que seja possível uma distinção clara pelo equipamento utilizado. Por exemplo: dificilmente distinguir-se-á uma margam argilosa de uma argila por métodos elétricos, visto suas resistividades apresentarem campos de variação que se superpõem quase totalmente;

- o contraste entre as propriedades físicas deverá ser tanto maior quanto maior for a profundidade das rochas pesquisadas;

- a forma da curva obtida em uma prospecção geofísica é influenciada pela forma, pelo contraste de propriedades, profundidade e dimensões do corpo, etc..

Com apenas este pequeno número de variáveis pode-se notar que uma resolução matemática seria praticamente impossível e restrita a situações simples.

Por esse motivo, foram desenvolvidas as técnicas dos modelos reduzidos para o estabelecimento de curvas-padrão de várias situações geológicas ideais, para que a análise dos dados de campo possibilitasse a resolução do problema inicial (profundidade, dimensões e natureza do objeto). Esta técnica foi desenvolvida principalmente para os métodos elétricos, visto serem estes os mais utilizados e também pela simplicidade de representação em laboratório. Modelos reduzidos foram idealizados também em sísmica, eletromagnetometria e magnetometria.

CAPÍTULO II

2. ESTUDO DE MODELOS DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM LABORATÓRIO POR MÉTODOS GEOFÍSICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

As técnicas geofísicas envolvem a medida de certos parâmetros físicos das rochas e minerais, diferenciando entre si segundo o parâmetro físico considerado. Interessam apenas aqueles parâmetros que possam provocar ações à distância e de significado compreensível, isto é, susceptíveis de explicação através de uma teoria interpretativa. Variações nesses parâmetros provocam distorções na distribuição de certos campos de força. Estas distorções nos campos de forças são chamadas anomalias e são elas, mais do que os valores absolutos dos campos, de interesse ao geofísico.

Diversos são os parâmetros físicos pesquisados pela Prospeção Geofísica. Dentre eles, destacam-se a densidade, susceptibilidade magnética, cargabilidade (capacidade de polarização), velocidade de propagação das ondas elásticas e eletrorresistividade. Os estudos geofísicos procuram determinar a variação dessas propriedades visando conhecer a forma, a profundidade em que se encontra e constituição mineralógica do corpo que provoca tal variação.

A eletrorresistividade ou mais simplificada, resistividade, muito embora seja uma das propriedades físicas da matéria que mais apresente variação, desperta interesse pela Geofísica Aplicada e será esta a propriedade em estudo nesta monografia, empregando o Método de Eletrorresistividade.

2.2 - RESISTIVIDADE

2.2.1 - Campo Elétrico Gerado por Corrente Contínua

Quando a energia elétrica é aplicada em dois pontos da superfície de um terreno, a corrente elétrica flui entre eles devido à diferença de potencial estabelecida. Se o meio entre os dois eletrodos for homogêneo, a distribuição de corrente e do potencial será regular e poderá ser calculada.

Considerando dois eletrodos A e B, situados na superfície de um terreno homogêneo, entre os quais é estabelecida uma diferença de potencial e um campo elétrico quaisquer, a Figura 1, representando esta situação, mostra a distribuição do potencial e corrente medidos, entre os dois eletrodos, na superfície do terreno, e em planos vertical e horizontal.

A variação da diferença de potencial e intensidade do campo elétrico medidas entre dois eletrodos situados na superfície de um terreno homogêneo apresenta elevado gradiente nas proximidades dos eletrodos, mas tende a zero se for considerado o terço central da distância que separa os mesmos (Figura 1a).

A distribuição do fluxo de corrente em um plano vertical contido em um terreno homogêneo é definida por linhas côncavas devido à repulsão gerada pelos eletrodos (HEILAND, 1968), com a intensidade de corrente aumentando com a profundidade, enquanto que as linhas equipotenciais são semi-círculos somente nas proximidades dos eletrodos (Figura 1b). A Figura 1c mostra a mesma distribuição em um plano horizontal contendo a superfície do terreno.

2.2.2 - Definição

Resistividade (ρ) ou condutibilidade elétrica (σ) é um parâmetro que relaciona a intensidade de campo (E) e a densidade de corrente (j) a que está submetido um material (HEILAND, 1968):

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{j}}$$

Se considerarmos um condutor cilíndrico com comprimento l entre dois pontos a e b e área de seção reta S, podemos escrever que:

$$i = \int j dS \quad \text{e} \quad V_{ab} = - \int_a^b E dl$$

Se o condutor apresentar seção reta constante, sua resistência será:

$$R = \frac{V_{ab}}{i} = \frac{- \int_a^b E dl}{\int j dS}$$

$$R = \frac{E \cdot l}{j \cdot S} \quad \text{ou} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\text{concluindo-se que } \rho = \frac{\Delta V}{i} \cdot \frac{S}{l} \quad (I)$$

A equação I mostra-nos que a unidade da resistividade é a unidade de resistência (ohm), multiplicada pela unidade de comprimento (metro). Em Geofísica Aplicada, além do metro, cos-tuma-se usar também o centímetro, originando assim uma unidade cem vezes menor. Assim, a resistividade pode ser entendida como sendo a medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra ao atravessar um determinado material (ORELLANA, 1972).

Nos trabalhos geofísicos, excetuando algumas situações geológicas nas quais o material investigado apresenta extensas dimensões horizontal e vertical, além de boa homogeneidade elétrica, não é medida a resistividade verdadeira, mas um valor que reflete a influência no campo elétrico estabelecido, não apenas do objeto em estudo, mas também, em maior ou menor intensidade, de outros corpos vizinhos. O valor encontrado nestas circunstâncias é denominado resistividade aparente.

Se for considerado um terreno composto de infinitos materiais com características elétricas diferentes, a resistividade aparente medida na sua superfície através de um determinado arranjo de eletrodos é definida como sendo aquela resistividade obtida em um terreno homogêneo, único e fictício, empregando o mesmo arranjo de eletrodos. Portanto, a resistividade aparente depende da repartição da resistividade em subsuperfície e do arranjo de eletrodos empregado.

2.2.3 - Tipos de Condutibilidade Elétrica

Nos minerais, a condutibilidade elétrica pode ocorrer por meio de processos eletrônicos ou iônicos, admitindo-se no primeiro caso a condutibilidade metálica e a de semicondutores e no segundo, aquela que ocorre em eletrólitos sólidos e líquidos.

Condutibilidade Metálica

Na natureza, poucos são os minerais que apresentam condutibilidade metálica (elementos nativos). Os mais comuns são o cobre e o ouro, embora muito raramente sejam encontrados outros como platina, irídio, ósmio e ferro. Os minerais de outras classes que apresentam este tipo de condutibilidade são mais raros ainda, como, por exemplo, a ulmanita (NiSbS); a grafita é um

caso a parte por apresentar dois valores, conforme seja medida em direção paralela ou perpendicular a sua clivagem.

A condutibilidade metálica pode ser entendida como devida a presença de elétrons de valência que necessitam de energia muito pequena para serem deslocados, podendo ser considerados como sem vínculo a qualquer átomo. A existência de aproximadamente 1.10^{22} elétrons de valência por centímetro cúbico confere a estes materiais uma ínfima resistência elétrica, a qual, porém, é afetada pela temperatura, presença de impurezas e defeitos ou deslocamentos na rede cristalina.

A temperatura provoca uma diminuição na condutibilidade eletrônica devido ao aumento da vibração atômica, dificultando assim a movimentação dos elétrons. A presença de impurezas e defeitos ou deslocamentos na rede cristalina também tende a dificultar a movimentação dessas partículas, acarretando diminuição da mobilidade dos elétrons livres. Assim, condutores eletrônicos homogêneos deverão, pelo menos teoricamente, apresentar resistência nula se possuírem redes cristalinas perfeitas e estiverem a zero graus absoluto.

A Tabela 1 (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966) relaciona a resistividade de alguns metais refinados e minerais que apresentem condutibilidade metálica, medida com corrente contínua.

Semicondutores

Semicondutores são materiais nos quais a condução, por movimentação eletrônica, é em escala menor que nos metais verdadeiros. A menor condutibilidade elétrica não se deve a menor mobilidade dos elétrons, mas a menor quantidade dos mesmos em relação aos metais.

Estes diferem dos metais por necessitarem de uma quantidade de energia muito maior para liberar o movimento dos elétrons. Esta energia suplementar, se oriunda de uma fonte de ca

TABELA 1

RESISTIVIDADE DE METAIS E MINERAIS METÁLICOS (corrente contínua)

METAIS REFINADOS A 0°C (resistividade x 10⁻⁸ ohm.m)

Alumínio	2,5	Lantânio	59
Antimônio	36	Lítio	8,5
Arsênio	35	Magnésio	4,0
Bário	59	Molibdênio	4,3
Berílio	5,5	Níquel	6,3
Bismuto	100	Ósmio	9,1
Cádmio	6,7	Ouro	2,0
Cálcio	4,2	Paládio	10,0
Cério	71	Platina	9,8
Césio	18	Potássio	6,3
Chumbo	19	Praseodímio	62
Cobalto	6,3	Prata	1,5
Cobre	1,6	Rênio	4,5
Crômio	15,3	Rubídio	11,6
Estanho	10,0	Rutênio	11,7
Estrôncio	33	Sódio	4,3
Ferro	9,0	Tântalo	14
Gálio	41	Telúrio	14
Háfnio	29	Titânio	83
Índio	8,5	Tungstênio	5,0
Irídio	5,0	Zinco	5,5
		Zircônio	42

MINERAIS METÁLICOS

Breithauptita	3,0 a 50 x 10 ⁻⁸
Cobre nativo	1,2 a 30 x 10 ⁻⁸
Grafita	36 a 100 x 10 ⁻⁸ (fluxo de corrente paralela à clivagem)
	28 a 9.900 x 10 ⁻⁶ (fluxo de corrente per pendicular à clivagem)
Ulmanita (NiSbS)	9,0 a 120 x 10 ⁻⁸

lor, permite que seja estabelecida uma proporcionalidade entre o número de elétrons livres e a temperatura a que está submetido o semiconductor, de tal forma que a relação é direta.

A relação direta entre a condutibilidade dos semicondutores e a temperatura permite que seja estabelecida outra discrepância entre estes e os metais, visto ser inversa a relação entre quantidade de elétrons livres e a temperatura nestes últimos.

Todos os materiais que não apresentam condutibilidade eletrônica elevada são semicondutores, em maior ou menor grau. Se um material exige uma baixa energia de ativação, poderá ser considerado tão condutor como um metal, sendo este o caso de muitos sulfetos metálicos. Mas se for elevada a energia de ativação, poderá ser considerado um perfeito isolante. Baixas condutibilidades eletrônicas são encontradas em muitos minerais silicáticos e, sob circunstâncias normais, a condução eletrônica pode ser considerada desprezível em comparação à condução iônica.

Os minerais metálicos possuidores deste tipo de condução elétrica apresentam valores de resistividade muito variáveis. Esta variação deve-se não apenas a imperfeições existentes nos cristais ou impurezas que podem torná-los mais ou menos resistentes, mas também à sua forma de cristalização.

ORELLANA (1972) analisando vários trabalhos que relacionam resistividades de minerais metálicos encontrou discrepâncias em valores atribuídos a um mesmo mineral e concluiu que este fato se deve à grande variação apresentada pelos mesmos. Esse Autor cita o exemplo da pirita que, embora seja um mineral com baixa resistividade, pode apresentar-se com variação de até cinco ordens decimais.

Mas considerando a composição química desses minerais, geralmente os sulfetos, arsenietos e teluretos apresentam valores muito pequenos para resistividade, enquanto os óxidos e compostos de antimônio tendem a comportar-se como maus condutores.

Eletrólitos Sólidos

Eletrólitos sólidos são substâncias nas quais a condução de uma corrente elétrica dá-se pela movimentação de íons dentro do retículo cristalino.

Nestas substâncias os elétrons estão presos por forças tão elevadas que a energia necessária para permitir condutibilidade eletrônica seria muito próxima daquela requerida para provocar fusão do material.

ORELLANA (1972) relaciona alguns minerais que apresentam este tipo de condutibilidade elétrica. Dentre eles destacam-se os mais comuns na crosta terrestre: calcita, quartzo, feldspatos, feldspatoides, hornblenda, limonita, micas, olivinas, e piroxênios. Nesta relação de minerais e grupos mineralógicos são encontrados os minerais que originam a grande maioria de rochas da crosta terrestre, sendo devido a este fato os altos valores de resistividade encontrados em rochas secas.

Os minerais formadores de rochas geralmente são complexos agrupamentos de silicatos de alumínio e cátions metálicos, estes substituindo-se mutuamente. Devido à diferença de tamanho entre o silicato de alumínio e os cátions, estes últimos podem movimentar-se de uma posição a outra, dentro da rede cristalina, originando irregularidades chamadas de defeitos de Schottky. Por outro lado, a vibração térmica pode provocar a movimentação de um íon de uma posição a outra, originando os defeitos de Frenkel. Estes movimentos iônicos ao acaso podem ser orientados por um campo elétrico, originando assim uma fraca corrente elétrica. Estes materiais possuem resistividade geralmente superior a 10^7 ohm.m.

Eletrólitos Líquidos

Eletrólitos líquidos são formados pela dissolução de

um sal em um solvente, originando-se, portanto, uma solução. Nesta, os sais encontram-se dissociados, podendo os seus íons movimentarem-se. Ao ser aplicado um campo elétrico essa movimentação orientar-se-á com o campo aplicado, originando uma corrente elétrica.

A movimentação iônica depende da intensidade do campo elétrico aplicado, temperatura, concentração e tamanho do íon. A relação entre a movimentação iônica e a intensidade do campo elétrico aplicado é direta, o mesmo acontecendo com a temperatura, pois o aumento desta acarreta diminuição da viscosidade do líquido permitindo, assim, maior facilidade ao deslocamento dos íons.

A concentração e mobilidade iônicas relacionam-se inversamente, visto que o aumento do número de íons presentes na solução acarretará uma interação maior entre os mesmos, provocando assim uma diminuição de suas respectivas liberdades de movimentação.

Se for considerado um cubo com um metro de lado (um metro cúbico), com uma diferença de potencial unitária entre duas faces opostas, a resistividade apresentada por uma solução em seu interior será:

$$\rho = \frac{1}{F \sum \alpha_i c_i m_i} \quad (II)$$

onde

F = 96487 Coulombs, que corresponde à carga de cada equivalente grama,

α = fator de dissociação, pois nem todas moléculas estão dissociadas,

c = concentração do sal.

m = mobilidade do íon considerado, à temperatura do experimento.

Esta equação permite o conhecimento da resistividade de uma solução, desde que sejam conhecidos os diferentes íons.

A equação II mostra que há uma relação inversa entre a mobilidade iônica e a resistividade de uma solução. Assim, como a temperatura aumenta a mobilidade iônica, pela equação II conclui-se que provocará uma diminuição da resistividade.

A diminuição da resistividade com o aumento da temperatura é indicada pela equação III:

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1+a(T-T_0)} \quad (III)$$

onde ρ_T é a resistividade da solução à temperatura T; ρ_0 é a resistividade à temperatura de referência, sendo geralmente igual a 18° C; e a é um coeficiente aproximadamente igual a 0,022. Esta equação, embora não forneça dados exatos, é válida dentro das temperaturas normais (ORELLANA, 1972).

Embora a equação II possa ser aplicada no estudo da resistividade de águas naturais, visto serem consideradas soluções, sua aplicabilidade é dificultada pela grande quantidade de diferentes sais dissolvidos.

Os íons mais comuns nas águas naturais são o Na^+ e o Cl^- . Este fato permite a determinação da quantidade total de sais dissolvidos em soluções diferentes, através do conceito de equivalente de salinidade.

KELLER & FRISCHKNECHT (1966) definem equivalente de salinidade de uma solução como sendo a quantidade de cloreto de sódio dissolvido, necessária para ser obtida resistividade idêntica à da solução em particular. Este conceito é muito útil por dispensar análises químicas ao se desejar, por exemplo, estudar a resistividade de soluções, podendo ser aplicado a soluções diferentes desde que a mobilidade dos íons não varie muito.

A Figura 2 mostra a variação da resistividade de uma

solução de cloreto de sódio com a temperatura e a concentração do sal, e foi adaptada daquela publicada pela SCHLUMBERGER WELL SURVEYING CORPORATION (1960).

2.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DAS ROCHAS

A maioria das rochas que compõe a crosta terrestre é formada por minerais que apresentam condutibilidades eletrônicas e iônicas muito pequenas, sendo, portanto, consideradas como materiais isolantes. Mas suas propriedades elétricas geralmente são alteradas pela presença de soluções em seus poros, pelo intemperismo e também pelos constituintes mineralógicos.

2.3.1 - Soluções

Soluções estão presentes na maioria das rochas devido à presença de poros e ligações entre eles, favorecendo a condução de corrente elétrica. Essa condutibilidade eletrolítica depende da porosidade e permeabilidade do material da quantidade de água presente e sais dissolvidos.

Os poros são divididos, por KELLER & FRICKNECHT(1966), em poros de armazenagem e de conexão. Os poros de conexão desempenham função mais importante na variação da resistividade da rocha que os primeiros, por serem eles os responsáveis pela distribuição da corrente elétrica na rocha. Exemplo deste fenômeno é encontrado em rochas vulcânicas, visto predominarem os poros de armazenamento.

A relação teórica entre a porosidade e a resistividade de rochas tem sido estudada através de formulação matemática. Mas devido à variação da geometria desses vazios, tal estudo so

mente é possível, na prática, por meio de considerações empíricas.

Importante relação experimental entre a resistividade e a porosidade é dada pela lei de Archie:

$$\rho_r = P^{-m} \rho_a \quad (IV)$$

onde ρ_r é a resistividade da rocha, ρ_a é a resistividade da água presente em seu interior, P é a porosidade e m é chamado de coeficiente de cimentação.

Esta mesma equação, apresentando um coeficiente a que parece depender da textura da rocha e varia geralmente entre 0,5 e 2,5, é chamada equação de Winsauer:

$$\rho_r = a P^{-m} \rho_a \quad (V)$$

O expoente m pode variar de 1,3 para rochas detríticas fracamente cimentadas até 2,3 para calcários e dolomitos de granulação muito fina.

A equação V pode ser relacionada a outra característica das rochas, chamada fator de formação, constante para cada rocha e relacionado com sua porosidade, através da equação:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_a} \quad (VI)$$

que substituído na equação V, estabelece uma relação com a porosidade

$$F = a P^{-m} \quad (VII)$$

A equação VII é importante por permitir a determinação da porosidade de uma rocha sem a necessidade da execução dos ensaios de porosidade, pois o conhecimento das resistividades da rocha e da água contida é obtido mais facilmente. Embora a de

terminação do fator de formação seja simples, o valor obtido não é perfeitamente correto, pois ao ser retirada a água da rocha, permanecerá certa quantidade de sal fazendo com que a resistividade da solução seja diferente da real.

A Figura 3 mostra a relação entre o fator de formação e a porosidade de rochas com diferentes valores de a e m. Na impossibilidade da determinação experimental destes coeficientes, KELLER & FRISCHNECHT (1966) sugerem a adoção de valores unitário para a e dois para m, por não produzirem graves erros quando a porosidade está compreendida entre 10% e 30%, que são as mais comuns em rochas sedimentares.

As equações IV, V, VI e VII são válidas para rochas saturadas de água e sem partículas argilosas. Rochas não saturadas permitem o aparecimento da condução superficial e naquelas com partículas argilosas ocorre o fenômeno chamado ionização dos minerais de argila.

A condução superficial tem como origem a existência de cargas elétricas na superfície dos poros. Essas cargas, de correntes da própria estrutura cristalina, aparecem quando as partículas minerais apresentam diâmetros inferiores ao da argila. Nos minerais silicáticos as cargas são negativas devido à presença dos átomos de oxigênio na superfície do mineral, as quais provocam a orientação das moléculas de água que recobrem a superfície interna dos poros. Assim, rochas insaturadas em água tem os poros revestidos de uma fina camada de moléculas de água orientadas, as quais conferem a esse líquido uma resistividade menor do que a do estado natural, onde não há orientação molecular. Estão adsorvidos também íons, que juntamente com a água originam uma camada condutora com até várias moléculas de espessura. É essa camada que provoca erros nas determinações da porosidade através do fator de formação. Mas se a rocha estiver completamente saturada, este fenômeno provocará uma variação desprezível na condutibilidade total.

Minerais apresentando granulação de argila possuem a

capacidade de adsorver cátions que podem ser trocados por outros existentes na água. Essa troca iônica é mais predominante em minerais de argila dos grupos da Montmorilonita, Vermiculita e Halóisita, entre outros. Como esses íons não tem igual tamanho, forma-se uma camada difusa de cátions, possuindo certa liberdade de movimentação aqueles que estiverem mais distantes da partícula de argila. A água retirada de semelhante rocha também apresentará resistividade maior, devido à retenção da maioria dos cátions junto à partícula argilosa.

O fenômeno de ionização dos minerais de argila apresenta pequena influência quando a solução possui elevada salinidade, visto que a retenção de sais pouco alterará a condutibilidade da água examinada fora da amostra; mas nas rochas que possuem baixa salinidade notar-se-ão os efeitos deste fenômeno.

2.3.2 - Intemperismo

O intemperismo contribui muito para o decréscimo da resistividade das rochas, principalmente ígneas e metamórficas, visto serem as rochas sedimentares menos sensíveis a estes processos, tendo-se em mente o parâmetro resistividade. Essa estabilidade não pode ser estendida às rochas carbonáticas pelo fato de sua permeabilidade aumentar com a dissolução, fenômeno que provoca decréscimo em sua resistividade.

A atuação dos agentes intempéricos nas rochas cristalinas, provocando aumento da sua condutibilidade elétrica, deve-se ao fato de seus minerais serem transformados em argilo-minerais, os quais apresentam maior capacidade de transmissão de corrente elétrica, como foi analisado anteriormente.

A transformação destes minerais originais em argilo-minerais ocorre através de reações químicas que provocam a diminuição da resistividade da solução, visto nessas reações ocorre

rem liberação de cátions e ânions. Essa alteração da condutibilidade elétrica da solução é tão intensa que águas cognatas, presentes em rochas cristalinas, apresentam resistividades variando entre 0,03 e 10 ohm.m. (ORELLANA, 1972).

O fraturamento desempenha importante função não apenas por facilitar a ação dos agentes intempéricos, como também por aumentar a porosidade da rocha. Este aumento da porosidade favorece a percolação da água, o que diminui consideravelmente a resistividade da rocha.

2.3.3 - Constituintes Mineralógicos

As rochas podem conter minerais que diminuem consideravelmente sua resistividade. Muito embora sejam numerosos aqueles minerais que poderiam influenciar a condutibilidade elétrica, somente a magnetita, hematita especular, grafita, pirita e pirrotita o fazem, devido à maior abundância em relação aos outros (KELLER & FRICKNECHT, 1966).

Este fenômeno é encontrado apenas em poucas localidades. Para que tal fato ocorra, desempenha importante papel o hábito mineralógico. A Figura 4 mostra a variação da resistividade de um gabro da região central de Maine (U.S.A.) com o conteúdo em peso de pirrotita e pentlandita dendríticas. Nota-se que até aproximadamente 3% em peso destes minerais não há alteração na resistividade das rochas, mas a partir deste valor o comportamento elétrico do material é tão alterado que aproximadamente 11% em peso é suficiente para diminuir a resistividade inicial a 10 ohm.m.

MURASHOV, citado por ORELLANA (1972), estudou ocorrências com mais de 70% de calcopirita, talvez com hábito granular, sem que a resistividade fosse alterada. Conclui-se, portanto, que o hábito mineralógico desempenha importante função, pois

háb^{it}os dendr^{it}icos contribuem para um decr^êscimo de resistividade de muito maior que o granular.

2.3.4 - Relação Sinal-Ruído

SUMNER (1976) define ruído elêtrico como sendo qualquer diferença de potencial indesejável às medidas executadas, e ruído geolôgico àquele provocado pela interferência de condições geolôgicas estranhas ao objetivo. Sinal é definido, pelo mesmo Autor, como aquela diferença de potencial que traz informações sobre o objetivo em estudo.

As t^êcnicas e equipamentos empregados em estudos geofísicos visam sempre estabelecer uma adequada relação entre sinal e ruído. Relações sinal-ruído unitárias são indesejáveis, pois ambos confundem-se na maioria dos m^êtodos. Portanto, os procedimentos de campo, como os de construção dos equipamentos, visam sempre o uso da maior relação possível, atribuindo-se uma confiabilidade maior aos dados coletados.

O ruído, quer seja decorrente de condições internas ou externas aos equipamentos empregados, não interfere na propriedade em estudo, mas na sua determinação. Assim, a medida de uma propriedade física pode apresentar um erro devido a esta interferência.

Sua origem é variada, podendo ser causada pela atividade humana, condições naturais ou por uma deficiência do pr^oprio equipamento empregado.

Diversas são as soluções adotadas para serem eliminados os ruídos nas medidas de diferença de potencial. A mais empregada é a do compensador, na qual opõe-se uma diferença de potencial de mesma intensidade àquela recebida pelo equipamento. Este procedimento é muito empregado para ruídos constantes e contínuos. Procedimento simplista muito usado nestes tipos de ruídos.

dos é o aumento do sinal enviado pela fonte, muito embora a potência da fonte não possibilite, às vezes, o seu emprego.

Se a diferença de potencial indesejável não for constante, poderão ser necessárias outras soluções, como várias medidas, ou até aquelas onerosas como o emprego de registradores gráficos. Mas se proveniente de uma corrente alternada, o emprego de filtros é recomendado quando a frequência indesejável é diferente daquela empregada pelo equipamento.

Ruído geológico também é frequente nas medidas elêtricas realizadas na superfície do terreno. Heterogeneidades comunis são as crostas lateríticas. A eliminação dessas influências, tanto nas técnicas de sondagem como nas de caminhamentos elétricos é feita movimentando-se alternadamente os eletrodos de corrente e de potencial. Influências superficiais comuns são aquelas decorrentes da presença de materiais isolantes ou muito condutores aflorantes ou em profundidade. Estes materiais impedem a obtenção de sinais relativos às rochas situadas abaixo, embora equipamentos mais potentes às vezes possibilitem a obtenção do sinal desejado.

Equipamentos também provocam ruídos, tanto em decorrência de funcionamento defeituoso como técnica de operação inadequada. Um erro comum apresentado por equipamentos é a polarização dos eletrodos. Este fenômeno tem sua origem na heterogeneidade das condições químicas dos materiais superficiais, pois, ao serem adicionados eletrodos de potencial, metálicos, constrói-se uma pilha eletrolítica natural. A eliminação deste ruído é obtida empregando-se eletrodos não polarizáveis. Ruídos provenientes de mau funcionamento dos componentes eletrônicos são eliminados, geralmente, apenas através da substituição dos mesmos.

Mas em determinadas circunstâncias não há possibilidade de ser diminuído ou eliminado o ruído. Nestas situações, deve ser escolhido um método ou técnica de campo que permita ele

var o sinal captado. Assim, a escolha de um arranjo de eletro dos mais adequado ou o emprego de equipamentos mais sensíveis como um registrador gráfico pode ser útil na determinação do sinal procurado.

Condições topográficas desfavoráveis também contribuem para que haja uma diminuição do sinal recebido, como, por exemplo, uma topografia acidentada, na qual a interferência causada pela percolação da água ou outras fontes de ruídos podem ser maiores que o sinal recebido, visto que a deformação do campo elétrico provocada pela superfície inclinada tenderá a diminuir muito o sinal.

Portanto, as condições de detectabilidade de um corpo não somente dependem de suas características e do método empregado, mas também do instrumento e técnicas de operação, assim como das condições topográficas e geológicas (ORELLANA, 1974).

2.4 - INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

Todas as técnicas empregadas na prospecção de um bem mineral ou mesmo em Geologia Aplicada visam, principalmente, responder três questões importantes: litologia do corpo rochoso, profundidade em que se encontra e sua forma.

O método de resistividade emprega, para tanto, duas técnicas, conforme a variação da condutibilidade dos materiais seja vertical ou horizontal.

A sondagem elétrica é um procedimento com o qual procura-se investigar a variação da resistividade na vertical de um ponto, enquanto o caminhamento elétrico preocupa-se com a variação horizontal.

2.4.1 - Litologia

O método de resistividade empregado na determinação litológica é um pouco falho, pois esta propriedade talvez seja a que mais varia. A Figura 5 (ORELLANA, 1972) mostra a variação mais comum de algumas rochas e minerais. Desta figura conclui-se que o emprego exclusivo desta propriedade física conduz o intérprete a várias conclusões, mais indefinidas, ainda, se o material apresentar-se fraturado, o que intensifica a ação intempérica e com isso, amplia-se o campo de variação e de superposição de vários materiais no gráfico.

Mas, esta incerteza pode ser diminuída e até eliminada, se for conhecida a litologia predominante da área e também a variação da resistividade de alguns tipos litológicos.

O conhecimento litológico regional pode ser obtido empregando as variadas técnicas utilizadas em mapeamentos geológicos. Quanto à determinação da resistividade de alguns ou vários tipos litológicos, pode ser executado "in situ" ou em laboratório.

Assim, em ordem decrescente de confiabilidade poderiam ser utilizadas as determinações superficiais, seguidas das determinações em poços e finalmente os dados obtidos em laboratório, com amostras.

A determinação da resistividade em superfície é a que apresenta maior confiabilidade por envolver considerável volume do material e também pelo fato da medição envolvê-lo em suas condições naturais. Muito embora sejam poucas as situações em que podemos fazer uma determinação sem a influência de materiais estranhos ao corpo, como por exemplo, a influência de rochas adjacentes ou heterogeneidades superficiais, sondagens elétricas permitem a obtenção de bons resultados, embora possa ocorrer alguma ambigüidade relativa à interpretação. Cui

dados especiais devem ser tomados também, pois as condições geoelétricas da rocha aflorante podem ser diferentes daquelas encontradas em profundidade, na mesma rocha.

O conhecimento da resistividade de uma rocha através de uma perfilagem elétrica, embora possa não apresentar o inconveniente da influência de outras rochas, apresenta aquele devido ao pequeno volume de material estudado e principalmente ao custo proibitivo da perfuração e da perfilagem elétrica, além dos erros introduzidos pela lama de perfuração, se não forem compensados.

A determinação da resistividade em amostras no laboratório, embora seja talvez o método mais preciso devido ao fato de poderem ser empregados equipamentos que dificilmente seriam levados ao campo, apresenta inúmeros inconvenientes. O primeiro deles seria a representatividade da amostra, pois esta além de não representar as condições naturais (parte da água pode ter-se evaporado, aumentando a salinidade e conseqüentemente diminuindo a resistividade da amostra) poderá também não representar o grau de intemperismo, composição e associação mineralógica, fatos estes por si sô suficientes para invalidar qualquer determinação. Apesar disso, este método proporciona resultados interessantes e é insubstituível no estudo de fatores que podem afetar a resistividade das rochas, como, por exemplo, o grau de umidade, temperatura, concentração salina, distribuição mineralógica, etc..

Vários são os dispositivos que podem ser empregados na determinação da resistividade de amostras, uns empregando dois e outros quatro eletrodos.

As Figuras 6, 7 e 8 e as Fotografias 1, 2, 3 mostram o equipamento empregado para a determinação da resistividade de amostras usado no Laboratório de Geofísica Aplicada, do Departamento de Geologia, Mineralogia, Física e Matemática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFCL) da Universidade de São Paulo (U.S.P.), de Ribeirão Preto.

A Figura 6 é um corte do dispositivo em escala natural, o qual é constituído por quatro partes:

a) dois reservatórios de solução, cada um contendo dois orifícios para os eletrodos, um para introdução do eletrólito e outro para saída de ar (Figura 6);

b) porta amostras encaixável entre os dois reservatórios de solução (Fotografia 1);

c) grampo de pressão que mantém o conjunto montado (Fotografia 1).

A Figura 7 mostra o molde e o contra-molde vistos em planta e em corte, em tamanho natural, com indicação do anel de guarda feito com tinta de prata, enquanto a Fotografia 2 refere-se ao molde aberto e o contra-molde de plástico com a amostra.

Os equipamentos eletrônicos e a distribuição esquemática dos mesmos visando determinar a resistividade de amostras estão indicados, respectivamente, na Fotografia 3 e Figura 8.

Este dispositivo emprega a equação I de modo a tornar a área da seção da amostra (S) como sendo aproximadamente o dobro do seu comprimento longitudinal, tornando a relação entre estes dois parâmetros igual a dois, o que facilita os cálculos da resistividade das amostras.

Na Figura 9, são mostrados alguns tipos de dispositivos empregados para a determinação da resistividade de amostras. O dispositivo A é encontrado na obra de HEILAND (1968) com o qual o Autor obteve resultados aceitáveis.

KELLER & FRISCHKNECHT (1966) analisam o dispositivo B, mostrado na Figura 9, proposto por MAYPER. Embora este dispositivo tenha sido idealizado com vistas à determinação de fenômenos de polarização induzida em amostras de rochas, seu emprego pode ser estendido para o estudo da resistividade. Os reservatórios dos eletrodos de corrente e de potencial são unidos por um fino tubo cuja função é obter uma redução no fluxo de corrente

através da amostra quando ocorre despolarização dos eletrodos de corrente. O fenômeno de despolarização dos eletrodos, explicado por estes dois Autores, pode ocorrer de duas formas: ao ser interrompida a corrente, íons próximos aos eletrodos de corrente podem combinar-se com os próprios eletrodos, através de fenômenos de oxidação ou redução, ou migrar dos eletrodos para a amostra de rocha. Se o circuito de ligação entre os eletrodos de corrente é completamente interrompido, predominará o fenômeno inicial, visto o segundo requerer um fluxo de corrente para o seu desenvolvimento.

Uma análise das Figuras 8 e 9B leva-nos a concluir pela superioridade do dispositivo empregado em Ribeirão Preto sobre este proposto por MAYPER, pois KELLER & FRISCHKNECHT (1966) acentuam que este sistema apresenta o inconveniente dos ruídos elétricos comuns em laboratórios, o que torna difícil a medida de pequenas diferenças de potencial, devido à resistência elétrica apresentada pelo dispositivo.

Esta dificuldade não existe no equipamento empregado por BOGDAN (1976) talvez porque neste modelo os eletrodos de potencial estejam em contato direto com a solução, o que não ocorre naquele indicado na Figura 6, e a inexistência do ruído deve-se a uma proteção adequada, como a gaiola de Faraday.

No dispositivo 9C, que apresenta menor sensibilidade ao ruído, os fenômenos de polarização de eletrodos são mais intensos (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966). Deve ser considerada, também, a influência da resistência de contato dos eletrodos (se as paredes das amostras não forem planas) e a condutibilidade superficial em presença de umidade.

Os arranjos D e E são encontrados em PARASNIS (1973), que sugere a construção D para amostras retangulares, com a resistividade encontrada pela equação I.

A construção E, sugerida também por PARASNIS, é indicada para a determinação da resistividade de testemunhos de son

dagens. Dentro de um tubo plástico são presas duas fitas metálicas de prata ou cobre, com largura de 1 a 3 mm, uma em cada geratriz diametralmente opostas. Dois furos contidos em um círculo são feitos no tubo para a introdução dos eletrodos M e N.

Neste dispositivo a resistividade será:

$$\rho = \frac{\Delta V}{i} \cdot \frac{b}{K}$$

onde ΔV e i são respectivamente a diferença de potencial e a intensidade da corrente medidas, b é o comprimento das tiras metálicas empregadas como eletrodos de corrente, K é

$$K = \frac{l}{\pi} \ln \frac{1 + \cos \beta}{1 - \cos \beta}$$

e β o ângulo indicado na Figura 10E.

O esquema F indicado na Figura 9, sugerido por PARASNIS (1956) em PARASNIS (1973), permite a obtenção de valores de resistividade de amostras com erros de até 10%, devendo ser evitado que a distância entre os eletrodos de corrente A e B seja maior que a metade do comprimento da amostra ou menor que a largura da mesma.

O emprego dos dispositivos requer cuidados quanto à resistência de contato e polarização dos eletrodos, correntes superficiais e ruídos.

A resistência de contato entre os eletrodos e a amostra pode ser eliminada empregando folhas de estanho ou de alumínio, grafita em pó ou mercúrio, como sugere HEILAND (1968).

As correntes superficiais provocam erros muito variáveis. Sua origem deve-se à presença de umidade na superfície da amostra, a qual constitui um caminho mais favorável à corrente elétrica que a amostra em si. Segundo BOGDAN (1976), a condução superficial foi eliminada empregando tinta de prata, com a qual

foram pintados anéis de guarda nas amostras, como está indicado na Figura 7. O ruído decorrente das instalações elétricas pode impossibilitar a obtenção de dados confiáveis quando se determina a resistividade de amostras, se for empregada corrente alternada com frequência muito baixa. O ruído constatado em medições com corrente alternada de frequência inferior a 0.3 Hz foi eliminado colocando todo o dispositivo dentro de uma gaiola de Faraday.

ORELLANA (1972) sugere que a amostra seja bem maior que as dimensões dos minerais e que, se empregados dispositivos com quatro eletrodos, a distância entre os eletrodos de potencial seja várias vezes superior ao tamanho dos grãos da rocha, para que as determinações representem a rocha e não alguns minerais.

2.4.2 - Profundidade

A profundidade de investigação por eletrorresistividade está diretamente ligada ao arranjo de eletrodos empregado, contraste de resistividade entre os diferentes materiais e às condições superficiais.

Arranjo de eletrodos

Arranjo de eletrodos é o conjunto deles com os quais é estabelecido um campo elétrico em subsuperfície e medidas diferenças de potencial e intensidade de corrente, na superfície do terreno. Os arranjos são compostos por eletrodos de corrente e de potencial.

Os de corrente são barras ou fios metálicos colocados na superfície do terreno e ligados a uma fonte, a qual fornece

corrente elétrica que flue através desses eletrodos com uma intensidade determinada.

Os eletrodos de potencial são colocados na superfície do terreno e são ligados a um instrumento (milivoltímetro, potenciômetro, etc.), que permite determinar a diferença de potencial entre dois pontos. Estes eletrodos podem ser do tipo polarizável ou não polarizável.

O eletrodo polarizável é constituído de uma simples barra metálica, enquanto o não polarizável é formado por um recipiente poroso e permeável (porcelana porosa ou madeira) dentro do qual é colocada uma solução saturada e um fio, ambos do mesmo metal (Figura 10). O sal e metal mais empregados são, respectivamente, sulfato de cobre e cobre metálico.

Os eletrodos de corrente e de potencial podem ser arranjados das mais variadas formas. A Figura 11 mostra os arranjos mais usados.

Diversos pesquisadores tem estudado a profundidade de investigação de diversos arranjos de eletrodos. ROY & APPARAO (1971) estudaram a profundidade atingida por diversos arranjos de eletrodos relacionados na Tabela 2, tomando por base a definição de EVJEN (1938).

EVJEN definiu a profundidade de investigação de um arranjo de eletrodos como sendo aquela em que uma fina camada horizontal contribui com o máximo do sinal medido na superfície do terreno. Esta definição está simbolizada através da curva indicada pela Figura 12.

A Figura 12 mostra que se L for nulo, o sinal recebido também será. Aumentando-se L a intensidade do sinal recebido (i) atinge a um valor máximo, tendendo a zero para grandes valores de L , pois o sinal proveniente da camada dilue-se naqueles provenientes de outras camadas.

Esta definição é importante devido ao fato de mostrar

TABELA 2

VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO EM FUNÇÃO DE L E RESOLUÇÃO VERTICAL DE DIVERSOS ARRANJOS

	PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO		RESOLUÇÃO VERTICAL
Dipolar	0,35	L	1/8,4
Duplo dipolo equatorial($\theta_1=\pi/4$) ou azimutal ($\theta_1=\pi/4$)	0,25	L	1/5,05
Duplo dipolo perpendicular ($\theta_1=\pi/4$)	0,20	L	1/3,8
Duplo dipolo polar ($\theta_1=0$) ou radial ($\theta_1=\pi/4$)	0,195	L	1/3,45
Duplo dipolo paralelo($\theta_1=\pi/4$)	0,18	L	1/3,1
Dipolar modificado	0,18	L	1/4,35
Laterolog superficial($0_10_2=0,1L$)	0,17	L	1/4,35
Laterolog superficial($0_10_2=0,2L$)	0,135	L	1/4,05
Schlumberger	0,125	L	1/2,45
Wenner	0,11	L	1/2,25

que os conceitos profundidade de investigação e de penetração são diferentes. ROY & APPARAO (1971) estabelecem esta diferença de vido ao fato de dois arranjos recíprocos um do outro, ou seja, arranjos cujas posições dos eletrodos de corrente e de potencial estão trocadas, embora apresentem a mesma profundidade de investigação, possuirão correntes de penetração em diferentes graus. Isto se deve ao fato de que a corrente de penetração é função somente das posições dos eletrodos de corrente, enquanto que a profundidade de investigação é determinada tanto por estes eletrodos como também pelos de potencial (MUSKAT & EVINGER, 1941).

Em seu trabalho, ROY & APPARAO relacionam as profundidades teóricas de investigação, bem como as resoluções verticais de diversos arranjos os quais compõem a Tabela 2. Estes pesquisadores definiram resolução vertical como sendo o inverso da largura da curva que define a profundidade de investigação do arranjo, no ponto onde o valor máximo é a metade.

Os valores indicados na Tabela 2, obtidos através de considerações teóricas, mostram que o arranjo dipolar apresenta a maior profundidade de investigação, mas a menor resolução vertical. A maior profundidade de investigação deste arranjo é confirmada pela Figura 13, que mostra diversos caminhamentos elétricos executados com o arranjo dipolar modificado ou laterolog superficial, dipolar e WENNER em um tanque, dentro do qual simboliza-se um veio condutor. A superioridade do arranjo dipolar confirma as informações teóricas, pois embora L seja metade dos outros dois arranjos, a anomalia medida ainda é a mais intensa.

A intensidade do sinal recebido, que está relacionada à profundidade de investigação, de acordo com a definição de EVJEN (1938), depende também da orientação do arranjo de eletrodos. JAIN (1974) através de cálculos teóricos, concluiu que a sensibilidade de arranjos paralelos às estruturas ou caminhamentos elétricos com o arranjo disposto perpendicularmente à direção de movimentação, são mais sensíveis à variação lateral da resistividade; isto porque todos os eletrodos encontram-se no mes

mo meio. Concluiu também que a forma da curva com o primeiro é mais simples que aquela construída empregando-se a segunda configuração de eletrodos.

A Figura 14, obtida por JAIN (1974) empregando arranjo Wenner com a distância entre os eletrodos extremos (L) 1,5 vezes maior que a espessura de um dique aflorante, ilustra esta conclusão.

Contraste de Resistividade

O contraste de resistividade entre os diversos materiais é importante no estudo da profundidade de investigação de qualquer arranjo de eletrodos, fato mostrado quando são considerados os dois casos extremos: uma camada perfeitamente condutora ou isolante. Esta camada comporta-se-á como uma barreira, impedindo que informações abaixo dela sejam obtidas. Nestes casos a profundidade de investigação será a mesma para qualquer arranjo por mais que seja aumentada a separação entre os eletrodos (EVJEN, 1938).

Embora, teoricamente, o contraste de resistividade entre os vários materiais não requeira muitas considerações, exemplos sugerem que materiais cujas resistividades estejam fora de uma adequada relação não são distinguidos, pois são confundidos com o ruído.

Assim, quanto mais distantes da superfície do terreno estiverem os materiais investigados, maior deverá ser o contraste de resistividade entre eles, para que ambos sejam determinados.

2.4.3 - Forma

O conhecimento da forma do corpo que provoca uma anomalia medida na superfície do terreno, requer o estabelecimento de vários pontos ou perfis de investigação, além de conhecimento adequado sobre a geologia local.

A escolha adequada do procedimento de campo, arranjo e orientação dos eletrodos, baseiam-se na forma esperada do corpo. Assim, corpos condutores aproximadamente esféricos não são determinados com arranjo de eletrodos Wenner se estiverem a profundidade superior ao seu próprio raio (VAN NOSTRAND, 1953).

CAPÍTULO III

3. DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MODELO REDUZIDO

3.1 - INTRODUÇÃO

Modelo reduzido, como o próprio nome diz, significa uma cópia em escala menor de um objeto com grandes dimensões, para que possa ser manipulado em laboratório. A aplicação deste conceito é muito útil, permitindo o estudo detalhado do objeto sem grandes investimentos.

Este conceito é empregado em Geofísica Aplicada na interpretação dos dados coletados em trabalhos de campo. O emprego de modelo reduzido tem por finalidade obter curvas-padrão referentes a uma estrutura particular, as quais, comparadas às curvas reais, permitem a identificação da estrutura em estudo, ou então orientação de campanhas geofísicas (UTZMANN, 1954).

As curvas-padrão, geralmente, são obtidas empregando cálculos matemáticos, graças ao advento dos computadores eletrônicos. A versatilidade destes é exemplificada por HILL (1972) ao sugerir o uso de tubos de raios catódicos acoplados a computadores eletrônicos, com intenção de serem obtidas interpretações mais condizentes com a provável estrutura, visto possibilitar que o intérprete compare modelos com os dados obtidos, e os vá modificando até ocorrer adequada concordância entre ambos.

Os cálculos matemáticos são mais difundidos que a técnica de modelos reduzidos por serem mais rápidos e, às vezes, mais precisos e baratos (COGGAN, 1971).

Mas alguns estudos, de acordo com SNYDER (1976), são quase impossíveis de serem executados pela técnica matemática,

devido à limitação da memória dos computadores ou aos gastos excessivos com os mesmos. Conclusão análoga é dada por MUFTI(1976) ao sugerir o emprego de modelos bidimensionais em cálculos matemáticos em vez de tridimensionais, como solução para não serem utilizados modelos reduzidos no estudo de estruturas com o parâmetro resistividade.

Modelos reduzidos são úteis portanto, não somente por preencher a lacuna deixada pelo procedimento matemático, mas também por ser uma técnica que, segundo UTZMANN(1954), possibilita o conhecimento de todas as estruturas geológicas.

UTZMANN sugere ainda que modelos reduzidos permitem a construção de um catálogo de curvas-padrão tão completo quanto se desejar, além da possibilidade de modificar os modelos até que adequada concordância entre os resultados coletados em laboratório e sobre o terreno seja obtida.

Existem, portanto, dois procedimentos - cálculos matemáticos e modelos reduzidos - que se completam. O emprego simultâneo alia a versatilidade dos modelos reduzidos com a precisão dos cálculos matemáticos, porque os dados experimentais são corrigidos para a obtenção de curvas isentas de erros.

3.2 - MODELOS REDUZIDOS PARA MÉTODOS SÍSMICOS

O emprego da simulação de estruturas geológicas em laboratório, embora forneça curvas-padrão precisas, nem sempre satisfaz as condições de rapidez e baixo custo, o que provocou um desinteresse pela técnica (CAGNIARD & NEALE, 1957). Mas atualmente podem ser desenvolvidas técnicas tanto simples e baratas como complexas e onerosas. As técnicas de maior custo geralmente são aquelas empregadas em métodos sísmicos, onde há necessidade de equipamento aprimorado para serem produzidas, recebidas e registradas as vibrações elásticas.

DANIEL & MARINO (1971), empregando uma câmara fotográfica Craz-Schardim operando a velocidade de 200.000 exposições por segundo, em modelos constituídos por duas camadas birrefringentes, estudaram o comportamento de ondas refletidas e refratadas; FITZPATRICK (1973) utilizando holografia sísmica analisou as respostas obtidas com diferentes objetos imersos em um cubo de concreto com 1830 mm de lado. Estas pesquisas exemplificam o emprego de delicados e onerosos equipamentos em modelos reduzidos, para estudos sísmicos.

A pesquisa executada por KOEFOED, VAN EWYK & BAKKER (1958), os quais utilizaram, entre outros equipamentos, gerador de onda quadrada, osciloscópio e filtro de ruído, ligados em modelos reduzidos simbolizados por faixas de plexiglass, exemplifica o uso de equipamentos baratos na investigação de ondas refletidas.

3.3 - MODELOS REDUZIDOS PARA O MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

Os modelos reduzidos utilizados no método magnetométrico geralmente são mais simples e baratos que os usados nos métodos sísmicos, devido à maior facilidade em produção e registro dos sinais desejados.

As anomalias magnéticas podem ser facilmente estudadas empregando modelos compostos de uma mistura de gesso e magnetita em pó ou de argila de modelagem, magnetita em pó, óleo de linhaça e glicerina, como aconselha PARASNIS (1973). Este mesmo Autor sugere que o uso de um par de bobinas de Helmholtz, para criar um campo magnético uniforme, e um magnetômetro de saturação, aliados a estes modelos, compõe uma útil simulação em laboratório para a investigação de anomalias de campo total.

DAVINO (1974) ilustra a facilidade de serem estudadas anomalias magnéticas verticais com auxílio de modelos reduzidos,

ao empregá-los com o intuito de obter maior volume de dados às interpretações de uma campanha magnetométrica, executada na faixa Nova Era-Itamarandiba, em Minas Gerais.

Para tanto, foram construídos dois dispositivos, sendo que no primeiro o magnetômetro era móvel e, no segundo, fixo, como indica a Figura 15.

A Figura 16 (DAVINO, 1974) reproduz um perfil magnetométrico obtido sobre um modelo em escala reduzida e um perfil real obtido na ocorrência de Curriolã. Da comparação dos dois perfis, esse Autor conclui que o estudo em modelos reduzidos permite visualizar o fenômeno em estudo e, portanto, orientando a interpretação.

GAY Jr. (1963) também afirma que a construção de modelos reduzidos é muito útil, devido à incapacidade da formulação matemática responder, adequadamente, todas as questões formuladas pelo intérprete durante a análise das informações coletadas com o método magnetométrico.

Esse pesquisador sugere um conjunto para experiências em laboratório, composto de uma armação de madeira que sustenta modelos constituídos de mistura de cimento, areia e magnetita, em proporções adequadas, e um magnetômetro Askania GFZ com posição fixa.

GAY Jr. (1963) afirma que foram necessários três dias e dois indivíduos para serem coletadas as informações desejadas, estando incluída também a montagem de todo o conjunto. Com isto, o Autor mostra claramente a facilidade com que é possível empregar modelos reduzidos com o intuito de solucionar questões relativas ao método magnetométrico, dificilmente respondidas pelas formulações matemáticas.

3.4 - MODELOS REDUZIDOS PARA MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Os métodos eletromagnéticos utilizam uma bobina ou uma combinação de bobinas para produzir um campo eletromagnético e uma outra similar, ou uma combinação, para detectar o campo resultante. Muitas orientações transmissor-receptor são possíveis de serem empregadas.

Embora a aplicabilidade destes métodos seja extensa, HOHMANN (1971) sugere que a falta de soluções teóricas para campos dispersos por heterogeneidades tem sido uma das maiores barreiras na difusão do método, falta essa devido as soluções analíticas resolverem apenas situações que envolvam corpos geométricos simples, como esferas ou cilindros.

HOHMANN indica o emprego de modelos reduzidos para estabelecer curvas-padrão, com o intuito de preencher a lacuna deixada na impossibilidade de utilização de modelos matemáticos.

GAUR, VERMA & GUPTA (1972) concordam com HOHMANN(1971) com respeito à grande utilidade dos modelos reduzidos para os métodos eletromagnéticos, tanto no estudo detalhado como também no controle minucioso de variáveis e outras condições experimentais simbolizáveis em laboratório.

Mas a representação de estruturas geológicas em laboratório, com o intuito de serem investigadas com métodos eletromagnéticos é aparentemente simples, por ser necessário que no modelo e estrutura real, o produto $\sigma\omega\mu l^2$ seja o mesmo, onde σ é a condutividade em mho.m^{-1} , ω é a frequência angular do campo eletromagnético empregado, μ é a permeabilidade magnética para o espaço livre e l uma dimensão linear do condutor.

GUPTA, SARMA & MARU (1971) enumeram algumas dificuldades no emprego desta técnica, devido à impossibilidade, por razões práticas, de ser obtida igualdade nos produtos acima mencionados:

- limitação na condutibilidade do material que representará a rocha encaixante;
- condutores sólidos dificilmente apresentam a variação de condutibilidade necessária à simulação de corpos de minério condutores;
- dificuldade na obtenção de uma fonte muito potente ou receptor adequadamente sensível para que sejam empregadas bobinas transmissora e receptora na mesma escala do experimento.

A remoção destes obstáculos, segundo os mesmos autores, reside no emprego de uma adequada frequência para tornar a igualdade possível e os erros introduzidos pelas dimensões das bobinas podem ser desprezadas desde que o tamanho delas seja muito menor em relação à distância que as separa. Já CONEY(1976) por empregar modelos reduzidos que utilizam como princípio básico de registro de dados o Geonics EM-16, fabricado pela Geonics Limited, sugere a mudança na condutibilidade, visto este equipamento empregar frequência na faixa de VLF, o que restringe sua variação.

SPIES (1976) sugere, quando possível, o emprego da relação entre as amplitudes dos campos secundário e primário, visto não depender das dimensões do modelo.

Os conjuntos de simulação em laboratório, empregados em estudos eletromagnéticos, geralmente utilizam, como rocha encaixante, o ar ou uma solução condutora. Os modelos podem ser de vários materiais condutores, como chapas metálicas (HEDSTRÖM & PARASNIS, 1958) ou placas de grafita (GAUR, VERMA & GUPTA, 1972).

3.5 - MODELOS REDUZIDOS PARA O MÉTODO DA RESISTIVIDADE

A técnica de simulação de estruturas geológicas em laboratório também comporta-se como importante ferramenta na in-

interpretação de dados colhidos com o Método da Resistividade, visto que mesmo formas simples como veios e camadas não aflorantes são dificilmente analisadas através de formulação matemática (APARAO, ROY & MALLICK, 1969).

Em sondagens elétricas, este procedimento tem restrito interesse visto importantes conjuntos de curvas-padrão já terem sido estabelecidos através de cálculos matemáticos. O mesmo não ocorre quando é considerada a técnica de caminhamento elétrico, visto que as dificuldades apresentadas pela formulação matemática (segundo ORELLANA, 1972), inclusive no estudo de heterogeneidades com forma regular, tem contribuído para o emprego mais frequente de modelos reduzidos.

Experimentalmente empregam-se mais comumente, três tipos de modelos reduzidos:

a) modelos com papel condutor: é a técnica mais simples na investigação de estruturas condutoras com auxílio de modelos reduzidos. Consiste em empregar pedaços de papel estanho ou alumínio e construir, em escala, a estrutura em análise ou pintá-la sobre papel condutor com amalgama de prata. Utilizando-se papel condutor, usa-se como cola, tinta chinesa incongelável quando as resistividades são pequenas e a cola de Filchakov quando grandes (BLOKH em ORELLANA, 1972).

Segundo ORELLANA (1972), esta técnica é válida para estruturas bidimensionais e os resultados obtidos não podem ser relacionados diretamente a situações naturais, pois enquanto na natureza o potencial é inversamente proporcional à distância, em modelos reduzidos utilizando-se papel condutor o decréscimo é logarítmico.

b) ensaios efetuados no terreno, escavando um buraco e preenchendo-o com materiais sólidos, como areia, argila ou cimento, dispostos de modo a compor, em dimensões reduzidas, a estrutura que se deseja estudar.

c) experimentação usando tanque com uma solução, den-

tro do qual, através de modelos confeccionados de vários materiais, são simbolizadas e analisadas quaisquer estruturas. Este procedimento é o mais empregado, embora apresente algumas dificuldades de ordem experimental, entre as quais a escolha de materiais com a resistividade desejada é a mais importante.

Esta última técnica comporta a simulação de outros procedimentos elétricos além da sondagem e caminhamento elétricos, como o do potencial induzido e da perfilagem elétrica.

AIKEN, HASTINGS & STURGUL(1973) indicam as três técnicas para o estudo de fenômenos de potencial induzido com auxílio de modelos reduzidos. No caso de ser utilizado o tanque, os modelos são constituídos de esponja plástica porosa com gelatina salgada no seu interior e imersas em água.

ROY & APPARAO (1976) exemplificam um conjunto para simulação de perfilagem elétrica em laboratório, analisando o parâmetro resistividade em um tanque. A Figura 17 mostra esquematicamente um corte longitudinal e transversal do tanque com o modelo. Este último é constituído por uma mistura de areia e cimento.

A importância do modelo reduzido na prospecção elétrica é mostrada por UTZMANN (1954). O autor montou na Compagnie Générale de Géophysique (CGG), um conjunto para experimentação com posto de cuba eletrolítica, ponte rolante para colocação e movimentação dos modelos dentro da solução e um sistema de coordenadas para posicionamento dos eletrodos em relação aos modelos.

Com esse conjunto experimental e empregando o arranjo de eletrodos Schlumberger, UTZMANN executou, no período de 1957 a 1959, várias sondagens e caminhamentos elétricos sobre estruturas complexas, possibilitando à CGG compor, sob a direção de BERTIN, J., em 1970, valiosa coleção de curvas. Essa coleção é formada por 260 pranchas, das quais 195 são de sondagens elétricas e 65 de caminhamentos elétricos.

As Figuras 18 e 19 representam sondagens e caminhamentos elétricos executados sobre um cilindro condutor e as Figuras

20 e 21 sobre um muro resistente cilíndrico, as quais ilustram a diversidade na forma dos modelos utilizados por UTZMANN.

CAGNIARD & NEALE(1957) sugerem o uso de uma placa de acrílico tocando a superfície da solução da cuba, a qual é perfurada segundo uma malha regular que possibilita facilidade maior na localização dos eletrodos, como indica a Figura 22.

Esses autores sugerem este procedimento como uma alternativa daquele empregado por UTZMANN(1954), embora seja muito trabalhosa a confecção dos furos, os quais não permitem maior liberdade de posicionamento do arranjo de eletrodos em relação ao modelo.

ESTEVES (1966) empregou modelos reduzidos no estudo de estruturas geológicas verticais por sondagens elétricas, utilizando o conjunto experimental sugerido por CAGNIARD & NEALE(1957) e outro no qual o meio era formado por areia, sendo que a estrutura, um dique vertical, por argila. Os conjuntos possibilitaram confirmar curvas teóricas, embora o emprego do segundo apresente dificuldades na obtenção de materiais com a resistividade desejada (1 a 1.000 ohm.m) e principalmente, problemas de manuseio.

UTZMANN (1954) após estudar vários materiais concluiu pelo uso de um cimento especial chamado "Daro", enquanto APPARAO, ROY & MALLICK (1969) optaram pelo uso de modelos feitos com uma mistura de cimento e grafita em pó.

O cimento portland constitui um excelente material para o fabrico de modelos reduzidos, desde que alguns cuidados sejam observados, visto seu endurecimento ocorrer através de reações químicas que persistem ainda depois de transcorrido seis meses de confeccionado o objeto (BASÍLIO, 1972). Portanto, qualquer substância que altere essas reações pode fazer com que ele comporte-se como uma pilha natural.

A Associação Brasileira de Cimento Portland(ABCP,1975) recomenda tratamentos especiais em cimentos portland expostos a sulfatos, visto estes provocarem desagregação: silicato de sódio,

fluor-silicato de magnésio ou de zinco, óleos secantes, cumar, vernizes e tintas, tintas com base de betume ou alcatrão de hulha, alcatrão e breu. Esses tratamentos não são aconselhados a modelos reduzidos por alterarem a composição da solução, como o silicato de sódio, ou por torná-los infinitamente resistentes, como os vernizes e tintas.

BASÍLIO(1976) recomenda também o uso de cimento portland resistente a sulfatos (tipo "Alto Forno, EB-208" ou o "moderada resistência a sulfatos"), além de outros cuidados quando se deseja obter um material resistente à ação de compostos ativos: baixo fator água-cimento, amassamento perfeito, adensamento e cura adequados (ABCP, 1969).

O fator água-cimento (fator a/c) está diretamente ligado à permeabilidade do cimento, pois a água não incorporada às reações químicas tende a evaporar-se, deixando vazio o espaço por ela ocupado. BASÍLIO(1972) recomenda o uso de fator a/c menor que 0,50 se for desejado um cimento impermeável, embora o fator a/c de 0,25 seja o indicado.

O perfeito amassamento é recomendado para evitar as porções heterogêneas no modelo. O adequado adensamento é necessário para que as bolhas de ar sejam eliminadas, melhorando a homogeneidade da pasta de cimento.

O tempo utilizado na cura do cimento portland desempenha função primordial tanto na sua permeabilidade como para evitar reações químicas. A ABCP (1969) recomenda um período mínimo de sete dias com o objeto imerso em água, se os modelos apresentarem poucas dezenas de quilogramas de peso.

Assim, como vulnerabilidade do cimento portland é atribuída à sua permeabilidade, alcalinidade e capacidade de seus componentes hidratados suportarem as indesejáveis reações químicas, o uso de um material resistente a sulfatos aliado a baixo fator a/c e grande tempo de cura, torna satisfatórios os resultados obtidos com seu emprego em modelos reduzidos.

A variação da permeabilidade do cimento portland com o fator a/c, pode sugerir que haja uma interessante variação da sua resistividade com a permeabilidade. BASÍLIO (1972) fundamentando-se em dados experimentais, sugere que tal variação é mais significativa considerando-se a porcentagem de umidade presente.

Estes fatos recomendam o uso de modelos reduzidos saturados com a solução existente na cuba, para que sua resistividade não varie durante as experiências.

Por outro lado, o cimento portland pode ser empregado somente na construção de modelos com resistividades baixas, pois uma argamassa com aproximadamente 10% de umidade apresenta resistividade em torno de 200 ohm.m (BASÍLIO, 1972).

CAPÍTULO IV

4. LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA DE RIO CLARO

A montagem de um laboratório para a execução de experiências com modelos reduzidos com a finalidade de investigar o parâmetro resistividade, envolve a resolução de dois problemas: equipamento de medidas e modelos reduzidos, sendo o primeiro o mais facilmente solucionado.

4.1 - EQUIPAMENTO DE MEDIDAS

O equipamento de medidas é formado por dois conjuntos, sendo um deles composto pelos diversos aparelhos eletrônicos e o outro pelas partes não eletrônicas.

Os aparelhos empregados no Laboratório de Rio Claro foram os seguintes:

- resistivímetro modelo AD-71 (Fotografia 4), composto de bateria de 12 volts, a qual alimenta um conversor cc/cc de 12 volts de entrada e saída de até 500 watts com 0,5 ampere de corrente; e receptor, com circuito eletrônico baseado no potenciômetro de Schlumberger, para medidas de diferenças de potencial de 0,01 a 1100 milivolts.

- multímetro eletrônico modelo PM 2403/03 fabricado pela Philips.

- osciloscópio PM 3200 fabricado pela Philips.

As partes não eletrônicas usadas no Laboratório são a cuba eletrolítica, os eletrodos e os cabos isolados.

A cuba eletrolítica usada é uma caixa d'água de cimen

to-amianto, comumente usada como depósito de água, com capacidade para um metro cúbico, com as seguintes dimensões externas: 1460 mm de comprimento, 1260 mm de largura e 660 mm de altura.

Dentro da cuba (Fotografia 5) foram instalados três conjuntos: um para movimentação dos eletrodos, outro para sua fixação e o terceiro para fixação dos modelos reduzidos.

A Fotografia 6 mostra a disposição dos elementos que compõem o conjunto de movimentação dos eletrodos:

- volante de ferro fundido com 490 mm de diâmetro;
- duas caixas de ferro fundido para rolamento de 25,4 mm (1 polegada) de diâmetro;
- uma barra de ferro trefilado de 35 mm (1 3/8 de polegada) de diâmetro com rosca de 11 fios em cada 25,4 mm (1 polegada) e extremidades torneadas para 25,4 mm (1 polegada) para serem encaixadas nos rolamentos;
- uma barra de ferro trefilado de 35 mm (1 3/8 de polegada) de diâmetro;
- quatro peças de latão para receber o conjunto de fixação dos eletrodos;
- uma escala de madeira com um metro de comprimento e subdivisões em milímetros;
- uma haste de latão de 9,5 mm (3/8 de polegada) de diâmetro, para marcar na escala o deslocamento sofrido pelo conjunto de fixação dos eletrodos.

A Fotografia 7 mostra o conjunto de fixação dos eletrodos, onde podem ser vistos:

- placa de acrílico, em posição superior, com 267 mm de comprimento, 236 mm de largura e 10 mm de espessura, parafusada nas quatro peças de latão;

- placa de acrílico inferior, substituível, dotada de furos de acordo com a técnica a ser empregada. A mais utilizada, com furos de 5,6 mm (7/32 de polegada) de diâmetro com centros dispostos sobre uma malha regular com 30 mm de lado, mede 370 mm de comprimento, 337 mm de largura e 10 mm de espessura;
- 4 parafusos de latão de 9,5 mm de diâmetro (3/8 de polegada) com rosca em ambas as extremidades, para fixar a segunda placa à primeira e possibilitar o seu deslocamento vertical conforme as necessidades.

A Fotografia 6 mostra ainda a disposição e as partes que compõem o conjunto de fixação dos modelos reduzidos:

- peça de madeira em forma de "T" invertido, com as dimensões de 620 mm X 60 mm X 65 mm na sua parte horizontal e 350 mm X 80 mm X 40 mm na parte vertical. Esta possui um rasgo com 12 mm de largura paralelo à maior dimensão, com a finalidade de permitir movimentação vertical e inclinação dos modelos reduzidos. A parte horizontal possui dois furos de 21 mm (7/8 de polegada) de diâmetro permitindo um deslocamento horizontal do conjunto todo; esses furos possuem uma "flange" de 21 mm (7/8 de polegada) de diâmetro, de cada lado, impedindo que a madeira sofra dilatação com a água e impeça a movimentação do conjunto;
- duas barras de ferro redondo trefilado, com 16 mm (5/8 de polegada) de diâmetro, embutidas em canos de PVC rígido de 16 mm (5/8 de polegada) de diâmetro interno, as quais estão presas à cuba através de "flanges" de 21 mm (7/8 de polegada) internas e externas. A Fotografia 8 mostra um detalhe dos canos fixados externamente com as barras de ferro trefilado no interior.

Na Fotografia 9 são vistos os componentes deste con junto e um modelo resistente horizontal fixado.

Os eletrodos empregados nos experimentos foram do ti po polarizável, visto não ter sido obtido sucesso na construção de eletrodos não polarizáveis. Cada eletrodo é composto por um pedaço de 56,5 mm de pipeta 0,1 ml, marca Assistant, com um fio de cobre de 0,9 mm de diâmetro (Fotografia 10). Alguns experi mentos foram executados utilizando-se fio de platina com 0,5 mm de diâmetro substituindo os de cobre, visando comparar estes dois elementos metálicos.

Apoiado na placa inferior do conjunto de fixação atra vês de um pedaço de borracha que o envolve, cada eletrodo apre senta a extremidade inferior tocando a solução, de modo a origi- nar um menisco. Deste modo, faz-se que todos os eletrodos este jam à mesma profundidade na solução (Figura 23).

Os cabos empregados (marca Pirelli, nº 18) podem ser substituídos por outros mais finos (número 24) visto serem utili zados pequenos valores de intensidade de corrente e diferença de potencial.

4.2 - MODELOS REDUZIDOS

Os trabalhos de campo em Geofísica Aplicada, na pes quisa de porções determinadas da crosta, encontram situações que podem ser facilmente reunidas em dois grupos: rochas encaixadas e encaixantes. Portanto, no Laboratório somente utilizam-se es tes dois elementos, procurando representar as diversas situações naturais e manter os contrastes do comportamento elétrico de ca da elemento.

4.2.1 - Rocha Encaixante

Para representar a rocha encaixante, em modelo reduzido, costuma-se usar uma solução aquosa de um sal. Nos experimentos foi tentado o uso de cloreto de sódio dissolvido em água comum (de torneira), mas devido a alguns problemas surgidos optou-se pelo sulfato de cobre comercial.

A resistividade da solução de sulfato de cobre sempre foi inferior a 50 ohm.m, em alguns casos próxima de 10 ohm.m.

4.2.2 - Rocha Encaixada

A rocha encaixada é simbolizada com modelos das mais variadas formas e empregando diversos materiais.

Visando facilitar uma representação mais adequada dos modelos eles podem ser agrupados segundo os valores de suas resistividades em modelos condutores (resistividade inferior a 1 ohm.m), modelos intermediários (resistividade variando entre 1 ohm.m e 1000 ohm.m) e modelos resistentes (resistividade superior a 1000 ohm.m).

Os modelos condutores foram confeccionados com chapa galvanizada de 2 mm de espessura com as seguintes dimensões: 660 mm X 400 mm X 65 mm para simbolizar um corpo com resistividade nula, visto que a chapa apresenta resistividade de 10^{-8} ohm.m (Fotografia 11).

Nas experiências realizadas no Laboratório de Ribeirão Preto foi utilizado um modelo condutor análogo, mas com dimensões de 400 mm X 300 mm X 40 mm.

Os modelos resistentes foram confeccionados de madeira, com as dimensões de 600 mm X 300 mm X 37 mm, visando repre

sentar camadas com as seguintes inclinações: 0° , 30° , 45° , 60° e 90° . Após a confecção foram pintados para se obter corpos com resistividade infinita (Fotografia 12).

Os modelos resistentes utilizados em experimentos no Laboratório de Ribeirão Preto, também confeccionados de madeira, são menores do que os empregados no Laboratório de Rio Claro. O modelo para representar inclinações de 0° e 90° apresenta dimensões de 380 mm X 310 mm X 38 mm, enquanto os representativos dos ângulos 30° , 45° e 60° possuem 403 mm X 330 mm X 38 mm.

4.3 - DISPOSITIVO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS DE ISORRESISTIVIDADE

Visando obter informações para a composição de uma carta de isorresistividade com modelos reduzidos, foi construído o dispositivo mostrado na Fotografia 13. Seu emprego só possibilita a execução de caminhamentos elétricos paralelos à maior dimensão da cuba, pois os ortogonais são impedidos pelo conjunto de movimentação dos eletrodos, como pode ser visto nessa Fotografia.

Analogamente aos materiais instalados na cuba eletrolítica, este dispositivo pode ser dividido em três conjuntos: movimentação e fixação dos eletrodos e fixação dos modelos reduzidos (Fotografia 14). Este último conjunto é o mesmo já descrito anteriormente.

O conjunto de movimentação dos eletrodos, mostrado na Fotografia 15, foi construído empregando-se:

- duas barras de ferro perfilado em "T", com 1420 mm de comprimento e 2,5 mm de espessura, soldadas nas extremidades em dois pedaços 50 mm de cantoneiras de ferro. Essas duas barras estão separadas de 42 mm.

- um carrinho como é visto na Fotografia 15 feito com lâmina de ferro de 24 mm de largura e 4 mm de espesura. No centro existe um rasgo com parafuso para a introdução e fixação do conjunto portador dos eletrodos.

O conjunto de fixação dos eletrodos visto na Fotografia 16, é composto de:

- uma lâmina de ferro pintada, de 35 mm de largura, 4 mm de espessura e 197 mm de comprimento que permite o deslocamento vertical de todo o conjunto;
- uma placa de acrílico com 250 mm, 110 mm e 9 mm com a finalidade de ligar os cabos elêtricos aos eletrodos, para que estes últimos não sofram inclinação;
- uma outra placa de acrílico, colocada em posição inferior, com dimensões variáveis de acordo com o arranjo de eletrodos; a placa em uso mede 346 mm X 107 mm X 9 mm, com furos a cada 15 mm.

O dispositivo mostrado na Fotografia 17 permite que a placa inferior tenha movimentos de rotação e translação relativos à placa superior. Estes movimentos possibilitam que os eletrodos tenham as mais variadas orientações em relação à estrutura em estudo.

4.4 - ANÁLISE DOS ERROS QUE AFETAM A MEDIDA DA RESISTIVIDADE

Os erros introduzidos nos valores de potencial devido a uma distorção do campo elêtrico, podem ser agrupados de acordo com a origem: equipamentos eletrônicos, cuba eletrolítica, solução, eletrodos, cabos e modelos.

A Figura 24 representa um caminhamento elêtrico, no qual o único erro notado deve-se ao nível de ruído variável. Eses

ta Figura é tida como modelo para as seguintes, nas quais não se rá representada a parte inferior de cada gráfico. A dimensão d_2 do modelo representará o tamanho do lado mais próximo da superfície da solução.

4.4.1 - Equipamentos Eletrônicos

Os equipamentos de campo para a determinação dos valores de resistividade aparente, podem ter os mais variados circuitos eletrônicos. No Laboratório, os equipamentos utilizados devem ser mais precisos e sensíveis, pois as diferenças de potencial e intensidades de corrente a serem medidas são pequenas. Devido a esse fato o resistivímetro empregado no campo nem sempre satisfaz às condições exigidas pelos experimentos em Laboratório.

Assim, o resistivímetro usado no campo pode ser substituído por vários equipamentos, inclusive por aqueles que empregam corrente alternada de baixa frequência, visando com isso minimizar os efeitos eletroquímicos muito comuns quando é empregada corrente contínua.

Por outro lado, os equipamentos podem introduzir erros, desde aqueles devidos a defeitos em seus componentes até os causados por condições externas.

Portanto, foram testados alguns resistivímetros, objetivando escolher o que melhor se adaptasse às exigências dos experimentos:

- resistivímetro R-50 Stratameter DC fabricado pela Soiltest (Fotografia 18);
- resistivímetro ER-300 fabricado pela Multitron- Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos S.A. (Fotografia 19);
- resistivímetro modelo AD-71 (Fotografia 4).

O resistivímetro R-50 Stratameter é composto de uma bateria de 12 volts que alimenta um conversor cc/cc com 12 volts de entrada e saída de até 112,5 watts com 0,01 a 0,15 amperes e receptor com sensibilidade de 1 a 10.000 milivolts em fundo de escala, com leitura direta.

O resistivímetro Stratameter não pode ser utilizado em laboratório, visto seu conversor apresentar seis teclas, das quais a primeira já correspondendo a uma intensidade de corrente da ordem de 100 mA; esse valor já é elevado se comparado aos 5mA geralmente tidos como elevada intensidade de corrente.

O resistivímetro ER-300 é composto de bateria de 12 volts que alimenta um conversor cc/cc de 12 volts de entrada e saída de até 80 watts, com um ampere de intensidade de corrente; o receptor é para leituras diretas de 3,16 a 1000 milivolts, em fundo de escala. Este aparelho foi empregado no Laboratório de Ribeirão Preto e comportou-se muito bem durante os experimentos.

O resistivímetro AD-71, de grande potência, apresenta alta sensibilidade no seu circuito potenciométrico, permitindo o seu emprego em laboratório. Mas tal não ocorreu satisfatoriamente devido a problemas eletrônicos. Tais problemas consistiram em:

- o conversor, além de apresentar instabilidade na intensidade de corrente produzida, dificultando as leituras de intensidade de corrente e diferença de potencial, pode mostrar erros negativos superiores a 30%, se comparado ao valor lido em um multímetro eletrônico;
- no receptor foram constatados problemas de oxidação em suas chaves, devido ao longo tempo que o instrumento permaneceu inativo. Além desse fato constataram-se erros nas medidas de diferença de potencial, atribuídos a erro de cálculo quando da montagem do aparelho, devido à baixa qualidade das resistên

cias empregadas na montagem das três décadas (os valores marcados nas resistências podem variar de até 10%). Um teste executado constatou a existência de erros positivos variando entre 4% e 10% entre as diferenças de potencial lidas no receptor e em um multímetro eletrônico.

Por outro lado o resistivímetro AD-71, em termos de construção, apresenta uma grande vantagem: seu amplificador operacional possui quatro transistores (dois deles BC 108 e dois AC 184) facilmente encontráveis para substituição caso apresentem alguma irregularidade. Além deste fato, um potenciômetro garante um perfeito equilíbrio entre esses componentes, pois tais transistores nem sempre possuem características idênticas.

Um erro muito comum nas medições feitas em laboratórios é causado pela umidade, visto provocar variações no comportamento físico dos componentes eletrônicos. Sua eliminação é simples, bastando acondicionar os equipamentos em um armário com aquecimento interno.

Erro também comum evidenciado por equipamentos que utilizam corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência, é devido à influência das instalações elétricas do laboratório, a qual pode ser eliminada ligando um fio terra do aparelho ao polo negativo da instalação elétrica ou então ligando-o a um polo terra construído com cuidado.

O Laboratório de Geofísica Aplicada de Ribeirão Preto emprega equipamentos eletrônicos muito sensíveis, para os quais foi necessário enterrar profundamente uma barra de cobre imersa em cloreto de sódio comercial, visando com isso obter um polo terra adequado. Além disso, parte do equipamento encontra-se dentro de uma gaiola de Faraday.

Os ruídos notados nas medidas não podem ser atribuídos unicamente ao mau funcionamento de um componente eletrônico do equipamento em operação. Isto porque a intensidade da corren

te utilizada desempenha função importante na precisão dos dados coletados. Experimentos mostraram que devido ao elevado nível de ruído existente em laboratório, o sinal enviado pelo resistivímetro também deve ser elevado, para que a diferença de potencial medida represente adequada relação sinal-ruído, embora o receptor possua circuito para compensar diferenças de potencial pré-existent.

A Figura 25 representa dois caminhamentos elétricos, executados com o modelo condutor na horizontal e situado a 120 mm de profundidade, utilizando-se arranjo Wenner ($AM = 30$ mm). A curva 1, obtida usando 0,7 mA de intensidade de corrente, apresenta uma variação maior que na curva 2, para a qual empregou-se intensidade de corrente variando em torno de 3 mA, mostrando assim a importância deste fato.

As Figuras 26 e 27 representam quatro caminhamentos elétricos que evidenciam a somatória de duas fontes de erros: equipamento defeituoso e baixa intensidade de corrente. Uma bateria comum de automóvel utilizada como fonte para o conversor, apresentou um vaso defeituoso, não fornecendo os 12 volts necessários, enquanto a intensidade de corrente utilizada situou-se em torno de 1,2 mv. A Figura 28 mostra dois caminhamentos elétricos executados nas mesmas condições, mas sem a presença das citadas fontes de erros.

4.4.2 - Cuba Eletrolítica

A cuba eletrolítica é outro componente que provoca distorções no campo elétrico estabelecido, devido suas paredes serem isolantes.

Essas distorções são proporcionais não apenas à proximidade dos eletrodos à parede, mas também ao seu espaçamento, ao seu ângulo com a parede, dependendo também da resistividade da parede e da sua forma.

GOUDSWAARD (1957) analisou teórica e experimentalmente os efeitos causados pelas paredes de uma cuba em experimentos. A Figura 29 mostra a influência de paredes isolantes e condutoras nas medidas de resistividade. Empregando arranjo de eletrodos Wenner, perpendiculares à parede da cuba, e dois espaçamentos, constatou que paredes isolantes tendem a influir com maior intensidade que as condutoras.

Em seu trabalho o autor conclui que uma parede de "perspex" coberta por uma tela de latão (malha quadrada com 2 cm de lado, construída com fio de latão de 4,55 mm de espessura) produz efeitos desprezíveis à distância superior a 50 mm, mesmo empregando espaçamento de 100 mm entre dois eletrodos consecutivos.

A cuba empregada no Laboratório de Rio Claro possui paredes teoricamente isolantes, com ondulações para aumentar a sua resistência física às tensões existentes quando está cheia. Tal fenômeno deve provocar uma distorção ainda mais irregular no campo elétrico.

Visando determinar a influência das paredes, foram executadas algumas experiências. A Figura 30 mostra os resultados obtidos empregando-se arranjos Wenner e Schlumberger perpendiculares e paralelos à parede menor da cuba, para os quais foram consideradas distâncias médias, ou seja, aquela que seria obtida se a parede não apresentasse as citadas ondulações.

A análise desta Figura indica que os arranjos são tanto mais sensíveis aos erros introduzidos pela cuba, quanto maior for o espaçamento entre os eletrodos e quanto mais próximos da perpendicular à parede, estiverem os eletrodos.

A Figura 31 mostra uma sondagem elétrica executada no Laboratório de Rio Claro com o intuito de investigar a influência das paredes da cuba nos dados experimentais.

Fato interessante é obtido ao serem comparadas as formas das curvas relativas ao arranjo Wenner nas Figuras 29 e 30. Constata-se que a cuba empregada no Laboratório de Rio Claro

apresenta um comportamento intermediário, talvez devido ao abaixamento da resistividade do cimento-amianto em presença do sulfato de cobre na parede (coloração azulada vista na Fotografia 6). É evidente que esta parede não pode ser comparada àquela obtida por GOUDSWAARD ao combinar o material isolante com a malha metálica, o que lhe confere superioridade sobre o cimento-amianto.

A Figura 32 mostra um caminhamento elétrico no qual a influência das paredes não é notada.

A Figura 33 mostra um caminhamento elétrico no qual a influência das paredes é notada somente nas porções externas da curva, não havendo portanto erros nos valores de anomalia.

4.4.3 - Solução

A representação da rocha encaixante é muito importante visto ser ela o suporte para o estabelecimento do campo elétrico. Este material deve apresentar algumas características:

- a) fácil manuseio, pois serão colocados outros materiais em seu interior que representarão a rocha encaixada, em posições espaciais pré-estabelecidas. Além deste fato, deve ser considerado o contraste elétrico entre as duas rochas que deverão ter um valor determinado. Assim, o uso desse material deverá facilitar tanto a obtenção do contraste elétrico desejado como também a colocação da rocha encaixada em seu interior.
- b) Permitir a obtenção de um meio isótropo para que qualquer variação de resistividade seja decorrente da presença do modelo.
- c) Apresentar um perfeito contato elétrico com o modelo em seu interior.

d) Tornar desprezível a resistência de contato e a polarização dos eletrodos.

e) Custo relativamente baixo.

Assim, foi preferido o emprego de uma solução aquosa. À primeira vista, seria a água destilada o solvente mais adequado, e como soluto, algum sal com satisfatória pureza química. Mas tal fato não ocorre, pois, com o tempo, as impurezas do ar, das mãos do operador e do próprio tanque, vão tornando a solução impura. Aliada a estas desvantagens deve ser considerado o alto custo de qualquer soluto quimicamente puro e a demora de obtenção de tal quantidade de água destilada. Portanto, optou-se pela água de torneira como soluto e de algum sal comercial como cloreto de sódio ou sulfato de cobre, também porque diversos Autores obtiveram bons resultados.

No Laboratório de Ribeirão Preto foi empregado com bons resultados o sulfato de cobre, mas no início do funcionamento do Laboratório de Rio Claro, foi experimentado o cloreto de sódio.

Este soluto não permitiu a obtenção de bons resultados devido à polarização dos eletrodos e ao ruído de fundo, favorecidos pela baixa resistividade da solução preparada. A Figura 34, exemplificando estes fatos, representa um caminhamento elétrico sem modelo imerso, empregando eletrodos com fio de platina de 0,5 mm de diâmetro e uma solução de cloreto de sódio. Esta Figura mostra também a tendência de aumento da resistividade aparente medida, causada possivelmente pela parede da cuba em um meio tão condutor.

Como em experiências realizadas no Laboratório de Ribeirão Preto empregou-se sulfato de cobre, optou-se pelo seu uso também no Laboratório de Rio Claro para serem mantidas condições análogas.

Para tanto, foram executadas medidas com um condutivímetro, modelo E 382 fabricado pela Metrohm, para determinar a va

riação da resistividade da solução com a temperatura e quantidade de sulfato de cobre dissolvido, cujos resultados permitiram a construção da Figura 35. Na preparação das soluções, com as quais obtiveram-se os dados necessários para traçar as retas, empregou-se sulfato de cobre comercial e água da rede pública de distribuição.

A resistividade da solução é um importante fator em modelos reduzidos, não tanto por seu valor absoluto, mas principalmente sua homogeneidade. Experiências mostraram que alguns cuidados devem ser observados para que a homogeneidade no valor da resistividade da solução, dentro da cuba, seja obtida:

- a) não permitir o estabelecimento de um gradiente térmico, através da montagem da cuba num local onde não fique exposta ao sol e longe de qualquer equipamento que gere calor;
- b) evitar contaminações da solução por óleos, por que estes formam uma película superficial que induz erros. Portanto, devem ser tomados cuidados durante a lubrificação do conjunto de movimentação dos eletrodos para evitar essa fonte de erros;
- c) não permitir que se forme película de poeira sobre a superfície da solução, o que também produz erros nos valores obtidos;
- d) filtrar a água antes de colocá-la na cuba, para retirar partículas em suspensão (argilas e outras substâncias), as quais afetam a homogeneidade do valor da resistividade;
- e) impedir a circulação de ar dentro do Laboratório, a qual provoca movimentação da superfície do líquido e instabiliza as leituras de diferença de potencial.

Durante os experimentos, foram constatados alguns fa

tos:

- a) após o decurso de um período de 14 a 16 horas, há formação, na superfície da solução, de uma película vítrea azulada, possivelmente de sulfato de cobre, originada pela evaporação da água. Este fenômeno foi notado todas as manhãs ao serem iniciados os trabalhos. A retirada desse material, necessária porque provoca erros nas medidas, é obtida passando, na superfície do líquido, um pedaço de madeira. O precipitado aderido à madeira é retirado facilmente pela água corrente da torneira;
- b) no fundo da cuba nota-se a formação de um precipitado de cor verde-musgo. Esse material deve ser proveniente da reação do sulfato de cobre com os sais presentes na água canalizada, fato notado no esvaziamento da cuba e conseqüente limpeza, pois durante seu reenchimento e adição de sulfato de cobre ocorre um leve turvamento da solução. A este precipitado deve ter se juntado a poeira caída dentro da cuba;
- c) com o passar dos dias, a resistividade da solução aumenta, tendo sido constatados valores superiores a 100 ohm.m em soluções cuja resistividade inicial era aproximadamente 10 ohm.m. Esta diminuição da condutibilidade deve-se, talvez, à precipitação do sulfato de cobre junto com a poeira e sais e à formação da película superficial. BOGDAN (1976) já encontrou valores superiores a 800 ohm.m;
- d) ao ser acrescentada água de torneira para aumentar a resistividade da solução, notou-se que o aumento é pequeno, mesmo que metade do volume da solução seja substituído pela referida água. Ao ser feita a substituição, a solução deve ser agitada para se obter a homogeneização, ocasião em que se verifica

a movimentação do precipitado existente no fundo da cuba. Como a resistividade da solução sofre alteração muito pequena, supõe-se que parte do precipitado seja dissolvido, elevando a condutibilidade.

Outra fonte de erro que deve ser considerada é a existência de objetos metálicos no interior da solução. Isto ocorre devido ao fato da solução ser um meio adequado a reações químicas, pois o sal dissocia-se em um ácido e uma base. Esta dissociação química torna-se mais complexa devido à água de torneira utilizada, que além dos sais normalmente contidos em uma água potável comum, ainda carrega traços dos produtos químicos usados no seu tratamento.

Portanto, um objeto metálico colocado na solução, normalmente reage com ela. Exemplo desse fato, ocorrido no Laboratório de Ribeirão Preto, é visto na Fotografia 20, na qual são notadas as barras de alumínio, sobre as quais movimentam-se os suportes dos modelos, com evidentes sinais de oxidação.

Para evitar esta oxidação, que dificulta a movimentação das hastes de fixação dos modelos reduzidos, as barras metálicas devem ser colocadas dentro de tubos plásticos, o que foi executado quando da montagem do Laboratório de Rio Claro, como é visto na Fotografia 9.

A Figura 36 mostra três caminhamentos elétricos executados no Laboratório de Rio Claro, utilizando-se arranjo de eletrodos Wenner com três espaçamentos, sem a presença de modelos reduzidos. Evidencia-se a homogeneidade elétrica da solução e a nãoconstatação de erros introduzidos pelo conjunto de fixação dos modelos reduzidos, embora sejam notados efeitos do ruído nos valores medidos.

4.4.4 - Eletrodos

Os eletrodos utilizados em experimentações com modelos reduzidos podem ser do tipo polarizável, embora seja aconselhável o uso do tipo não polarizável, pois os primeiros podem apresentar alguns inconvenientes como polarização e eletrólise do metal.

Inicialmente pretendeu-se construir eletrodos não polarizáveis, com o intuito de eliminar os efeitos citados, utilizando uma caneta hidrocolor, que é fabricada em série, o que as torna razoavelmente iguais (Fotografia 21).

Tal construção não obteve sucesso face ã alta permeabilidade da pena, impedindo que a solução permanecesse dentro do recipiente além de vinte minutos. Visando impedir o escoamento da solução, impermeabilizou-se parcialmente a pena com vaselina, sem obter melhora sensível nas condições de trabalho.

Assim, decidiu-se pelo uso de eletrodo polarizável, o qual apresenta os já referidos inconvenientes da eletrólise e polarização.

Os primeiros experimentos realizados no Laboratório de Ribeirão Preto evidenciaram os erros introduzidos nas medidas provocados pelo desgaste dos eletrodos metálicos e uso de intensidade de corrente superior a alguns miliamperes como é visto na Figura 37.

Os desgastes dos eletrodos são causados pela eletrólise dos fios metálicos originada pela corrente contínua. Assim, após alguns ensaios, o eletrodo A (polo positivo) apresenta-se menor que o B; e transcorridos mais alguns ensaios, o eletrodo M (polo positivo) também apresenta-se menor que o N.

Esta diminuição gradativa dos eletrodos resulta em redução da intensidade de corrente e conseqüente diminuição da diferença de potencial, alterando as condições experimentais com

a introdução de erros.

A diminuição gradativa pode ser acelerada com o emprego de intensidades de corrente superiores a alguns miliamperes, além de ser iniciada eletrólise da água. Na eletrólise, as bolhas de gás comportam-se como materiais isolantes, envolvendo os eletrodos de corrente e provocando variações nas intensidades de corrente, originando, assim, erros nas determinações da resistividade aparente.

Estas duas fontes de erros - eletrólise da água e diminuição dos eletrodos - podem ser eliminadas com a utilização de intensidades de corrente suficientemente baixas para que não ocorram, mas tão elevadas para que a relação sinal-ruído permaneça adequada.

Experimentações indicaram que a intensidade de corrente adequada varia proporcionalmente com a resistividade da solução e, principalmente, com as dimensões do arranjo utilizado, como também do nível de ruído, o qual é variável durante o experimento. Assim, para as resistividades da solução compreendidas entre 10 e 50 ohm.m e arranjos de eletrodos Wenner com distâncias entre dois eletrodos consecutivos variando entre 30 e 100 mm, obtiveram-se bons resultados com o uso de 2,0 a 4,5 mA.

Como o nível de ruído oscila, não é desejável o emprego de intensidades de correntes inferiores a 2 mA, sob pena de serem obtidas informações que representem uma somatória da variação do ruído e da resistividade aparente, enquanto valores superiores a 4,5 mA provocam eletrólise da água e dos eletrodos.

A Figura 38 representa um caminhamento elétrico executado, para o qual a intensidade de corrente adequada foi aproximadamente 4 mA.

Assim, no início das experiências no Laboratório de Rio Claro, foram construídos eletrodos polarizáveis com fio de platina visando eliminar completamente os erros introduzidos pela eletrólise do fio de cobre. Mas o emprego da platina é desa

conselhável visto ser a polarização e ruído captado muito elevados, podendo atingir, somando-se ambos, valores superiores a 1500 mv, enquanto com o cobre registrou-se um máximo de 300 mv.

OGILVY, AYED & BOGOSLOVSKY (1969) agitando eletrodos metálicos em água destilada e medindo a diferença de potencial obtida, encontraram para cobre, prata e platina, respectivamente, 26 mv, 33 mv e 95 mv. Estes valores confirmam, portanto, a conclusão de não ser aconselhado o emprego de eletrodos de platina e corrente contínua.

Em experiências de laboratório constatou-se que as diferenças de potencial medidas com eletrodos sem ponta são menores que com ponta. Este fenômeno patenteou-se pela impossibilidade de ser executado um caminhamento elétrico com arranjo Schlumberger ($AB = 300$ mm, $MN = 20$ mm) com os eletrodos sem ponta. Esta impossibilidade ocorreu devido ao fato de intensidades de corrente superiores a 5 mA provocarem diferenças de potencial abaixo da sensibilidade do equipamento empregado (1 milivolt). Mas com eletrodos com 1 mm de ponta, este experimento pode ser realizado com intensidade de corrente em torno de 2 mA.

Constatou-se também que eletrodos com até 2 mm de ponta não provocam erros nas medidas, desde que os comprimentos das pontas sejam aproximadamente iguais, pois experimentos realizados por UTZMANN (1954) sugeriram que erros de 0,5 mm no aprofundamento dos eletrodos na solução provocam variações de 1% nas resistividades aparentes medidas.

A Figura 39 mostra dois caminhamentos elétricos executados sob as mesmas condições, mas a curva 1 obtida com eletrodo sem ponta e a 2 com os eletrodos apresentando 1 mm de ponta.

4.4.5 - Cabos Isolados

Os cabos isolados devem ser de boa qualidade quando

usados no campo, para que não ocorra fuga de corrente ou rompimento, visto que são arrastados no chão.

No laboratório o isolamento dos cabos é mais importante, pois estes são usados próximos de um meio condutor. Assim, qualquer defeito no isolamento plástico pode provocar erros nas medidas.

4.4.6 - Modelos

A resistividade dos modelos foi dividida em três grupos, conforme o contraste de sua resistividade com a solução seja inferior, igual ou superior à unidade.

Os modelos com resistividade menor que a da solução são aqui chamados de condutores, enquanto aqueles cuja resistividade é mil vezes maior que a da solução é chamado de isolante.

Os modelos isolantes podem ser construídos com madeira, plásticos em geral ou isopor, em virtude das seguintes vantagens:

- resistividade praticamente constante. No caso de madeira, basta revesti-la de algumas camadas de tinta a óleo para que sua resistividade não varie quando introduzida na solução;
- fácil manuseio e aquisição do material;
- baixo custo(principalmente).

A madeira, representando modelos resistentes, não apresenta inconveniente algum, excetuando a pintura requerida para que sua resistividade seja constante. Este cuidado deve ser tomado visto que suas permeabilidade e porosidade não são homogêneas, existindo zonas nas quais a solução penetrará mais, provocando variação da resistividade em partes do modelo.

Esta heterogeneidade na variação de resistividade do modelo poderá ser desprezível se a madeira for relativamente homogênea e o modelo pequeno.

Além deste caso extremo (modelo resistente ou resistividade infinita) pode ser estudado o outro extremo, modelo condutor (resistividade nula), feito de metais. O uso de chapas de ferro galvanizado, devido ao baixo custo e excelente condutibilidade, é recomendado.

A chapa de ferro galvanizado, assim como qualquer outro metal, reage com a solução, mais ainda quando submetida a um campo elétrico gerado por corrente contínua. O modelo condutor visto na Fotografia 11 apresenta zonas mais claras que ilustram portanto o fenômeno de interação química modelo-solução, enquanto a Figura 40 mostra o efeito dessa interação química nas medidas de resistividade aparente.

Para evitar semelhante inconveniente seria necessário o emprego de metais não reativos como o ouro, platina ou em último caso o cobre. O emprego destes metais é problemático devido aos custos dos materiais e confecção dos modelos, principalmente considerando os dois primeiros.

Entre estes contrastes extremos de resistividade podem ser intercalados infinitos valores, variando não somente a resistividade dos modelos através do emprego de vários materiais, como também variando o conteúdo de sulfato de cobre na solução, o que provocará variação na resistividade da mesma.

Além de metais e madeira, outros materiais podem ser usados, como o gesso e o cimento.

APPARAO, ROY & MALLICK (1969) experimentaram vários materiais, obtendo sucesso empregando uma mistura de cinco partes de cimento e seis de grafita. Modelos constituídos dessa mistura apresentaram resistividade de 0,18 ohm.m se embebidos totalmente por solução com 16 ohm.m.

Estes Autores afirmaram que experimentos com gesso não permitiram a obtenção de bons resultados. Nas experiências realizadas no Laboratório de Ribeirão Preto por BOGDAN, A., sugeriram que gessos especiais podem ser usados com sucesso, principalmente aqueles utilizados para modelagem de dentaduras. Esse pesquisador concluiu também que a porosidade e a permeabilidade do gesso relacionam-se diretamente à quantidade em peso de água utilizada para sua hidratação, constituindo 30% em peso a quantidade de água ótima para esse fim. Mas esses gessos especiais tem como inconveniente o alto custo.

4.5 - IMPORTÂNCIA DA ESCALA NOS MODELOS REDUZIDOS

Estudos geofísicos com auxílio de modelos reduzidos podem ser executados e estendidos às situações naturais desde que as dimensões dos modelos, configurações de eletrodos e os contrastes de resistividade entre os materiais representados no laboratório sejam proporcionais àqueles encontrados em situações reais.

Essa redução implica numa incerteza em manter as relações corretas, incerteza que ao redor de 5% pode ser negligenciada por ser inferior àquela normalmente encontrada em prospecções no campo (UTZMANN, 1954).

Além dos erros experimentais, deve ser considerada a escala de representação dos dados. Esta permite uma tolerância maior nas incertezas experimentais ou então um rigor maior. É necessário, portanto, adequar as escalas de redução do conjunto experimental com a de representação gráfica dos dados obtidos, visto haver uma relação direta entre os custos na montagem de todo laboratório e a precisão desejada.

O conjunto experimental instalado no Laboratório de Rio Claro devido ao custo e dimensões reduzidas pode ser considerado como uma representação na escala de 1:5.000.

CAPÍTULO V

5. EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO

Algumas experiências foram executadas com o intuito de analisar diversos modelos e equipamentos, bem como para determinar a aplicabilidade dos mesmos. Assim, foram estudados alguns modelos resistentes visando comprovar experimentalmente algumas considerações teóricas e testar o dispositivo para o levantamento da carta de isorresistividade, além de ensaios para emprego de modelos reduzidos no estudo de fenômenos de polarização exponencial.

5.1 - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGUMAS CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

JAIN (1974), utilizando formulação teórica, concluiu que o arranjo de eletrodos Wenner disposto perpendicularmente à direção do caminhamento, apresenta maior sensibilidade para as variações de resistividade e a curva resultante é mais simples do que aquela obtida com o paralelo, supondo que o caminhamento elétrico é executado perpendicularmente à direção geral das estruturas. Esta conclusão foi verificada através da experimentação com modelos reduzidos.

A Figura 41 mostra que a superioridade atribuída por JAIN (1974) ao primeiro procedimento não é tão marcante como vista na Figura 14, devido o modelo não estar aflorando na superfície da solução.

A Figura 42 representa a mesma situação e evidencia que corpos não aflorantes não provocam muita diferença nos dados obtidos com os dois procedimentos, exceto na forma das curvas.

Evidencia também que essa diferença marcante deve ocorrer somente para corpos aflorantes, visto que corpos mais profundos contribuem apenas na obtenção de anomalias mais amplas quando os eletrodos estão paralelos à direção de movimento.

Outra experiência foi executada com o objetivo de verificar se corpos condutores são mais facilmente determinados que os isolantes. A comparação entre as Figuras 42 e 43 evidencia que a proposição é válida somente para corpos situados a profundidades inferiores à sua espessura, visto que em profundidades maiores as amplitudes de ambas as curvas tendem a igualar-se.

5.2 - APLICABILIDADE DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA EM MODELOS REDUZIDOS

Dentre os experimentos executados, destaca-se aquele com a finalidade de verificar a aplicabilidade da análise de tendência aos dados obtidos na cuba. Esta experiência, executada a pedido de BOGDAN, A., mostrou resultados interessantes, indicando que esta análise é aplicável aos dados coletados no laboratório.

Para tanto, foram utilizados modelo resistente horizontal à profundidade de 40 mm, arranjo de eletrodos Wenner (AM = 60 mm) e o dispositivo para carta de isorresistividade. Os dados obtidos, processados por BOGDAN, compõem as Figuras 44 e 45.

5.3 - POTENCIAL EXPONTÂNEO

Na natureza podem-se apresentar diferenças de potencial entre dois pontos, geradas por fenômenos eletroquímicos, embora as teorias existentes não expliquem satisfatoriamente o processo de origem (ORELLANA, 1972). Valores anômalos medidos têm como origem tanto a movimentação da água como a presença de cor

pos sulfetados.

As diferenças de potencial originadas pela movimentação da água são estudadas com finalidades diversas. Os valores anômalos de potencial, utilizados em perfilagens elétricas para a determinação da porosidade das rochas, baseia-se na movimentação diferencial apresentada pelos íons, quando dois fluxos de água com composições químicas diferentes entram em contato.

Diferenças de potencial são também originadas pela movimentação da água em subsuperfície, a qual provoca tais diferenças em decorrência da eletro-filtração. Este fenômeno tem origem na retenção dos ânions junto às partículas que compõem as rochas e movimentação dos cátions com a solução. Como este fenômeno é tanto mais intenso quanto maior for o fluxo da água subterrânea, conclui-se que materiais com alta permeabilidade favorecem o aparecimento de elevadas diferenças de potencial. Os potenciais de eletrofiltração são empregados com sucesso na determinação de pontos de fuga de água em barragens.

As diferenças de potencial naturais, de maior interesse na mineração, são aquelas encontradas próximas a corpos sulfetados. Diversos pesquisadores tem estudado o fenômeno, mas a hipótese mais aceita atualmente é a de SATO & MOONEY (1960), a qual explica que o potencial natural encontrado em corpos sulfetados deve-se a existência de reações diferentes na rocha encaixante acima e abaixo do nível freático, entre as quais o corpo de minério sulfetado comporta-se como condutor de elétrons. Devido às diferentes condições físico-químicas existentes acima e abaixo do nível do lençol freático, na parte superior as substâncias dissolvidas captam elétrons do corpo de minério e na inferior essas soluções cedem os elétrons ao corpo.

A interpretação das informações obtidas pelo método de polarização espontânea, geralmente é feita através de cálculos matemáticos. Visando estudar a aplicabilidade dos modelos reduzidos como ferramenta nas interpretações, foram executadas

experiências objetivando a montagem de um dispositivo para a de terminação de curvas-padrão.

Inicialmente foi preparada uma solução relativamente condutora (10 ohm.m) que serviria como meio para a criação do campo que representaria o potencial espontâneo medido na rocha encaixante.

Como primeiro teste foi imersa, na solução, uma pilha comum de rádio tipo AAA. Não foi obtido sucesso pelo fato da corrente elétrica escoar-se através da blindagem metálica, fato evidenciado pela deposição de um precipitado, alguns minutos após ter sido mergulhada.

Visando permitir que apenas os polos negativo e positivo ficassem em contato com a solução, a pilha foi colocada dentro de um tubo de PVC rígido com 47 mm de comprimento e 16,2 mm (5/8 de polegada) de diâmetro interno e empregando-se cola plástica polimerizada (Araldite) para evitar a entrada de solução. Também não foi obtido sucesso no experimento.

Um terceiro teste foi executado ligando-se os polos da pilha a cada lado do modelo condutor, intercalando-se uma resistência em série no circuito para diminuir a corrente a um máximo de 1 mA, impedindo assim que a pilha se descarregasse rapidamente. A Figura 46 mostra os dados coletados. O modelo construído representa um polo negativo superficial.

A análise desta Figura estabelece que a curva deveria apresentar uma amplitude de variação muito maior que a obtida, considerando-se que o polo era superficial e sua diferença de potencial era de 1500 mv, esta bem maior do que as encontradas na natureza.

O resultado obtido talvez deva-se ao fato do modelo possuir resistividade nula, se comparada à da solução, contraste esse que favorece a passagem dos elétrons pelo modelo, ao invés dos mesmos deslocarem-se pela solução.

Ficou evidente, porém, que há possibilidade de aplicação deste método na construção de curvas-padrão para aplicação em casos reais, onde a análise matemática não tenha obtido sucesso (ORELLANA, 1972).

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

As informações obtidas com modelos reduzidos podem ser aplicadas a situações reais análogas, devido à proporcionalidade entre ambas. Essa proporcionalidade atribui à técnica de simulação experimental a função de preencher a lacuna constatada na análise matemática — que freqüentemente não responde questões muitas vezes simples — como também verificar a validade de conclusões teóricas.

A montagem do conjunto experimental, embora simples, requer cuidados especiais quanto a fatores que podem se comportar como origens de erros. Esses fatores, eliminados durante a construção e pela escolha dos equipamentos, possibilita a obtenção de um conjunto experimental com elevada precisão, embora a principal dificuldade esteja na escolha de materiais que possibilitem o contraste de resistividade desejado.

CAPÍTULO VII

7. AGRADECIMENTOS

O A. cumpre com satisfação o dever de registrar a valiosa colaboração que recebeu de pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

O Professor Doutor André Davino, na posição de orientador, forneceu valioso aprendizado ao autor, com o qual foi possível realizar esta dissertação.

Os Professores Dr. Osmar Sineli, Dr. Adonis de Souza e Alfio Bogdan, pertencentes ao Departamento de Geologia, Mineralogia, Física e Matemática da FFCL da USP no campus de Ribeirão Preto, muito colaboraram não somente com valiosas informações e incentivos quando o autor trabalhou no Laboratório de Geofísica Aplicada de Ribeirão Preto, como também durante a montagem e funcionamento do Laboratório de Rio Claro, fornecendo alguns aparelhos de medidas com os quais este trabalho foi concluído. Agradecimentos também devem ser feitos ao técnico em eletrônica Hêlio de Almeida Prado, pelas valiosas sugestões dadas enquanto trabalhou no referido Departamento.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) forneceu verba para a compra dos equipamentos empregados no Laboratório de Ribeirão Preto.

Os geólogos Victor Luiz de Oliveira Meyer, responsável pela Seção de Geofísica Aplicada, e Niza Silva Jardim, responsável pela Seção de Documentação, ambas seções pertencentes à Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas S. A. (I.P.T.), muito colaboraram possibilitando empréstimo de bibliografia indispensável à execução deste trabalho.

O Instituto de Geociências e Ciências Exatas, da UNESP, Campus de Rio Claro, forneceu preciosa verba para a aquisição e montagem da cuba eletrolítica e dos modelos reduzidos e o Departamento de Física desse Instituto emprestou equipamentos eletrônicos importantes aos experimentos. Os docentes do Curso de Geologia do referido Instituto muito contribuíram incentivando o autor em seu trabalho, enquanto ali desenvolveu atividades de docência e pesquisa. Dentre eles destacaram-se os Professores Dr. Paulo Milton Barbosa Landim, Dr. Nivaldo J. Bôsio, Dr. Jorge S. Bettencourt, Dr. Eberhard Wernick, Dr. Paulo C. Soares e Alberto Pio Fiori.

O Professor Doutor Nelson Ellert forneceu valiosa orientação a este trabalho, quando da ausência do orientador em viagem ao exterior.

O geólogo Yushiro Kihara, responsável pelo Laboratório de Mineralogia da Associação Brasileira de Cimento Portland forneceu importante bibliografia e orientação nos assuntos relativos à resistividade de pasta de cimento.

A todos os que ajudaram, pessoas e entidades, mesmo aqueles involuntariamente não mencionados, o autor externa sua profunda gratidão.

CAPÍTULO VIII

8. BIBLIOGRAFIA

- AIKEN, C.L.; HASTINGS, D.A. & STURGUL, J.R. - 1973 - *Physical and computer modeling of induced polarization* - Geophysical Prospecting, v.21, nº4, pp.763-782
- APPARAO, A.; ROY, A. & MALLICK, K. - 1969 - *Resistivity model experiments* - Geoexploration, v.7, nº1, pp.45-54
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - 1969 - *Concreto impermeável* - Bol. nº 71, 2^a Ed., São Paulo, 6 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - 1975 - *Efeito de várias substâncias sobre o concreto: Tratamentos protetores* - Bol. nº 55, 2^a Ed., São Paulo, 8 p
- BASÍLIO, F.S. - 1972 - *Durabilidade dos concretos: permeabilidade, corrosão eletrolítica* - 2^a Ed., ABCP, São Paulo, 48 p
- BASÍLIO, F.S. - 1976 - *Cimento portland* - 3^a Ed., ABCP, São Paulo, 34 p
- BOGDAN, A. - 1976 - *Comunicações verbais*
- CAGNIARD, L. & NEALE, R.N. - 1957 - *Technique nouvelle de modèles réduits pour la prospection électrique* - Geophysical Prospecting, v.5, nº 3, pp. 259-271
- COGGON, J.H. - 1971 - *Eletromagnetic and electrical modeling by the finite element method* - Geophysics, v.36, nº1, pp. 132-155
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GEOPHYSIQUE - 1970 - *Recueil de diagrammes électriques et trainés consécutifs relatifs à des structures complexes-mesures en baignoire*
- CONEY, D.P. - 1977 - *Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting* - Geoexploration, v.15, nº1, pp. 19-35
- DANIEL, I.M. & MARINO, R.L. - 1971 - *Wave propagation in a layered model due to point source loading in a high - impedance medium* - Geophysics, v.36, nº3, pp.517-532

- DAVINO, A. - 1971 - *Prospecção geofísica: conceituação, métodos e campo de aplicação* - Mineração e Metalurgia, v.54, nº 324, pp 251-252
- DAVINO, A. - 1974 - *Estudos sobre a prospecção magnetométrica das ocorrências de ferro na faixa Nova Era-Itamarandiba, Minas Gerais* - Bol. Inst.Geoc., v.5, pp.1-16
- ESTEVES, J.M. - 1966 - *Contribuição para a prospecção de estruturas geológicas verticais por sondagens geoelétricas* - Técnica, v.28, nº 356, pp.325-341, Lisboa, I.S.T.
- EVJEN, H.M. - 1938 - *Depth factors and resolving power of electrical measurements* - Geophysics, v.3, nº2, pp.78-95
- FITZPATRICK, G.L. - 1973 - *Laboratory model studies in seismic holography (abstr.)* - 42nd Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Anaheim, California
- GAUR, V.K.; VERMA, O.P. & GUPTA, C.P. - 1972 - *Enhancement of electromagnetic anomalies by a conducting overburden* - Geophysical Prospecting, v.20, nº 3, pp.580-604
- GAY Jr., S.P. - 1963 - *Standard curves for interpretation of magnetic anomalies over long tabular bodies* - Geophysics, v.28, nº 2, pp. 161-200
- GOUDSWAARD, W. - 1957 - *On the effect of the tank wall material in geo-electrical model experiments* - Geophysical Prospecting, v.5, nº 3, pp.272-281
- GUPTA SARMA, D. & MARU, V.M. - 1971 - *A study of some effects of a conducting host rock with a new modelling apparatus* - Geophysics, v.36, nº 1, pp.166-183
- HEDSTRÖM, E.H. & PARASNIS, D.S. - 1958 - *Some model experiments relating to electromagnetic prospecting with special reference to airborne work* - Geophysical Prospecting, v. 6, nº 4, pp.322-341
- HEILAND, C.A. - 1968 - *Geophysical exploration* - 2^a Ed., Hafner Publishing, New York, 1013 p
- HILL, D.G. - 1972 - *A laboratory investigation of electrical anisotropy in precambrian rock* - Geophysics, v.37, nº 6, pp. 1022-1038

- HOHMANN, G.H. - 1971 - *Electromagnetic scattering by conductors in the earth near a line source of current* - Geophysics, v.36, n°1, pp.101-131
- JAIN, S.C. - 1974 - *Theoretical broadside resistivity profiles over an outcropping dyke* - Geophysical Prospecting, v.22, n° 3, pp.445-457
- KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. - 1966 - *Electrical methods in geophysical prospecting* - International Series of Monographs in Electromagnetic Waves, 10, Pergamon, New York, 517 p
- KOEFOED, O.; VAN EWYK, J.G. & BAKKER, W.T. - 1958 - *Seismic model experiments concerning reflected refractions* - Geophysical Prospecting, v.6, n° 4, pp. 382-393
- MUFTI, I.R. - 1976 - *Finite-difference resistivity modeling for shaped two-dimensional structures* - Geophysics, v.41, n°1, pp.62-78
- MUSKAT, M. & EVINGER, H.H. - 1941 - *Penetration in direct current prospecting* - Geophysics, v.6, n°4, pp.397-427
- OGILVY, A.A.; AYED, M.A. & BOGOSLOVSKY, V.A. - 1969 - *Geophysical studies of water leakages from reservoirs* - Geophysical Prospecting, v.17, n°1, pp.36-62
- ORELLANA, E. - 1972 - *Prospeccion geoelectrica en corriente continua* - Paraninfo, Madrid, 523 p
- ORELLANA, E. - 1974 - *Prospeccion geoelectrica por campos variables* - Paraninfo, Madrid, 571 p
- PARASNIS, D.S. - 1973 - *Mining geophysics (Methods in geochemistry and geophysics, 39)* - Amsterdam, Elsevier, 356 p. (2^a Ed.)
- ROY, A. & APPARAO, A. - 1971 - *Depth of investigation in direct current methods* - Geophysics, v.36, n°5, pp.943-959
- ROY, A. & APPARAO, A. - 1976 - *Laboratory results in resistivity logging* - Geophysical Prospecting, v.24, n°1, pp.123-140
- RUST Jr., W.M. - 1938 - *A historical review of electrical prospecting methods* - Geophysics, v.3, n°1, pp.1-6

- SATO, M. & MOONEY, H.M. - 1960 - *The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials* - Geophysics, v.25, n°1, pp. 226-249
- SCHLUMBERGER WELL SURVEYING CORPORATION - 1960 - *Graficos para interpretacion de perfiles* - Houston, Texas
- SNYDER, D.D. - 1976 - *A method for modeling the resistivity and induce polarization response of two-dimensional bodies* - Geophysics, v.41, n°5, pp.997-1015
- SPIES, B.R. - 1976 - *The derivation of absolute units in electromagnetic scale modeling* - Geophysics, v.41, n°5, pp. 1042-1047
- SUMNER, J.S. - 1976 - *Principles of induced polarization for geophysical exploration* - Developments in Economic Geology, n°5, Elsevier, New York, 277 p
- UTZMANN, M.R. - 1954 - *Prospection életrique et tellurique. Études sur modèles réduits* - Bull.Assoc.Franç.Techn. Pétrole, n° 107, Paris, 61 p
- VAN NOSTRAND, R.G. - 1953 - *Limitations on resistivity methods as inferred from the buried sphere problem* - Geophysics, v.18, n°2, pp.423-433.