

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

**“MÉTODOS DA ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO  
INDUZIDA APLICADOS NOS ESTUDOS DA CAPTAÇÃO E  
CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA ABORDAGEM  
METODOLÓGICA E PRÁTICA”**

**Antonio Celso de Oliveira Braga**

Tese apresentada ao concurso público para obtenção do título de Livre-Docente na disciplina “Métodos Geométricos Aplicados à Hidrogeologia” do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.

Rio Claro, 2006

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS .....	2
1.3. METODOLOGIA DA PESQUISA .....	3
<b>CAPÍTULO 2. GEOFÍSICA APLICADA E A HIDROGEOLOGIA .....</b>	<b>4</b>
2.1. GEOFÍSICA APLICADA .....	4
2.2. HIDROGEOLOGIA .....	8
<b>CAPÍTULO 3. PRINCIPAIS MÉTODOS GEOELÉTRICOS E TÉCNICAS DE CAMPO .....</b>	<b>14</b>
3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS .....	14
3.2. MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE .....	17
3.3. MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA .....	24
3.4. TÉCNICAS DE CAMPO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS .....	28
3.4.1. Sondagem Elétrica Vertical - SEV .....	29
3.4.2. Caminhamento Elétrico - CE .....	38
3.5. PARÂMETROS E FUNÇÕES DE DAR ZARROUK .....	41
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGIA GEOELÉTRICA APLICADA NA HIDROGEOLOGIA .....</b>	<b>47</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	47
4.2. METODOLOGIA GEOELÉTRICA ADEQUADA .....	47
4.2.1. Objetivos Gerais e Geologia Local .....	49
4.2.2. Objetivos Específicos e Critérios de Análises .....	51
4.3. PROGRAMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS GEOELÉTRICOS .....	53
4.3.1. Sondagem Elétrica Vertical - Schlumberger .....	53
4.3.2. Caminhamento Elétrico – Dipolo-Dipolo .....	67
<b>CAPÍTULO 5. MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....</b>	<b>69</b>
5.1. ROCHAS SEDIMENTARES .....	69
5.1.1. Aquíferos Granulares .....	70
5.1.2. Aquíferos Cársticos .....	77
5.1.3. Estimativa de Parâmetros Hidráulicos .....	78
5.2. ROCHAS CRISTALINAS .....	81
5.2.1. Aquíferos Fraturados .....	82

---

5.2.2. Rochas Basálticas e Diabásios.....	86
<b>CAPÍTULO 6. MÉTODOS GEOELÉTRICOS NOS ESTUDOS DA CONTAMINAÇÃO DE SOLOS, ROCHAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>88</b>
6.1. ROCHAS SEDIMENTARES.....	88
6.1.1. Mapa Potenciométrico.....	89
6.1.2. Identificação e Delimitação de Plumas de Contaminação .....	91
6.1.3. Aplicação dos Parâmetros de Dar Zarrowk.....	102
6.2. ROCHAS CRISTALINAS.....	109
6.2.1. Identificação e Delimitação de Plumas de Contaminação .....	110
<b>CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>113</b>
7.1. MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NA HIDROGEOLOGIA.....	113
7.1.1. Considerações Metodológicas .....	113
7.1.2. Tratamento dos Dados e Produtos Obtidos .....	114
7.2. CONCLUSÕES.....	116
<b>BIBLIOGRAFIAS REFERENCIADAS E CONSULTADAS .....</b>	<b>117</b>

# “MÉTODOS DA ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA APLICADOS NOS ESTUDOS DA CAPTAÇÃO E CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA E PRÁTICA”

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Geofísica, cujas metodologias ao longo dos anos têm sido aperfeiçoadas e adaptadas em função da solicitação crescente nos mais variados campos de atuação, tem nas questões relacionadas às águas subterrâneas, um papel de extrema importância, tanto em estudos visando à captação para abastecimento, como estudando e solucionando problemas decorrentes de contaminações através de fontes variadas.

Tradicionalmente empregados nos estudos hidrogeológicos, os métodos geoeletricos, apresentaram uma evolução na obtenção e tratamento dos dados, tanto na parte instrumental, como no desenvolvimento de softwares visando à inversão dos dados de campo para obtenção de modelos mais precisos e confiáveis.

Inicialmente esses métodos tiveram como objetivos maiores, a identificação de camadas promissoras para captação de águas subterrâneas, visando o abastecimento de um modo geral. Hoje em dia, além desses objetivos, e considerando a crescente contaminação em subsuperfície através dos mais variados tipos de contaminantes, atuam em investigações, relativamente rasas, procurando identificar e mapear contaminantes em solos, rochas e águas subterrâneas, envolvendo as fases de: (1) *investigações preventivas*, na caracterização da geologia, identificando áreas vulneráveis a contaminantes, e, (2) *investigações confirmatórias, remediação e monitoramento*, estudando as possíveis alterações no meio geológico, frente aos contaminantes.

A introdução de alguns tipos principais de contaminantes no subsolo, altera significativamente os valores naturais dos principais parâmetros geoeletricos dos materiais geológicos, dos quais os métodos geoeletricos se utilizam (por exemplo, a resistividade elétrica e cargabilidade). Levantamentos pela eletrorresistividade, efetuados em refinarias de combustíveis, procurando delimitar plumas de contaminação de derivados de hidrocarbonetos através de vazamentos de gasolina e óleo diesel, obtêm excelentes resultados, podendo estimar inclusive a variação temporal das contaminações.

Outra questão a ser levantada, diz respeito a pouca utilização, em nosso país, dos parâmetros de Dar Zarrouk. Tais parâmetros têm se revelado de extrema utilidade, contribuindo, em algumas situações, de maneira decisiva na definição dos objetivos propostos. São parâmetros simples de serem utilizados, não envolvendo acréscimos nos custos e prazos finais de uma campanha.

De um modo geral, os métodos geoeletricos apresentam ainda, uma particularidade em relação a outros métodos geofísicos, ou seja, englobam vários métodos, técnicas de campo e uma infinidade de arranjos possíveis de serem utilizados. Dessa maneira podem ser adaptados em função da área a ser estudada. Entretanto, existem destaques dentro dessa vasta metodologia, que devem ser priorizados em relação às demais

## **1.2. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS**

A utilização inadequada de técnicas geofísicas e/ou arranjos de campo, em função da geologia e dos objetivos que se propõem alcançar em um determinado projeto, pode levar a erros graves na definição final do modelo geoeletrico da área estudada. Portanto a escolha da metodologia geofísica, constitui o primeiro passo para o sucesso ou fracasso da campanha como um todo.

Vários casos comprovados de resultados incorretos obtidos por levantamentos geoeletricos, atribuídos à “ineficiência da Geofísica”, foram resultados do emprego de técnicas inadequadas em função dos objetivos esperados e da geologia local. Portanto, a programação correta de uma campanha geofísica não é simples nem deve ser “automática”.

Ressalta-se também, que poucos autores e trabalhos técnicos utilizam os parâmetros de Dar Zarrouk nas definições dos modelos geoeletricos finais. Constata-se, que quando são utilizados, em alguns casos, o são de maneira incorreta. O emprego adequado de tais parâmetros pode ser decisivo em várias situações, contribuindo no entendimento do modelo geral da área estudada.

Considerando o exposto anteriormente, a pesquisa tem como objetivos gerais à aplicação dos métodos geoeletricos na hidrogeologia, visando: (1) estudos para captação de águas subterrâneas para abastecimento em geral; e, (2) estudos das contaminações de solos, rochas e águas subterrâneas, envolvendo as fases de investigação preventiva, confirmatória, remediação e monitoramento.

Como objetivos específicos, através da aplicação dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, utilizando-se das técnicas de campo da sondagem elétrica vertical – arranjo Schlumberger e caminhamento elétrico – arranjo dipolo-dipolo, e dos parâmetros de

Dar Zarrouk, tem-se uma discussão e proposição metodológica e prática, em função da geologia local, sobre os produtos obtidos por essa metodologia, tais como: caracterização geológica na identificação de *aquíferos promissores* e investigação de *áreas contaminadas e/ou sujeitas à contaminação*.

### 1.3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A seqüência metodológica adotada na presente pesquisa é apresentada na Figura I-01. Após o estabelecimento do tema da pesquisa com justificativas e objetivos, tem-se uma conceituação teórica básica da Geofísica Aplicada e Hidrogeologia, com destaque na utilização dos métodos geoeletricos – eletrorresistividade e polarização induzida, técnicas de campo da sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE) e parâmetros de Dar Zarrouk (DZ).

A seguir discutem-se as aplicações dessa metodologia na Hidrogeologia, considerando as atuações nos estudos visando à captação de águas subterrâneas e envolvendo contaminações dos materiais geológicos em subsuperfície, em função da geologia local, definindo a(s) metodologia(s) adequada(s). Dessa maneira conclui-se sobre a interpretação dos dados e produtos resultantes considerando o tema proposto, e casos históricos de aplicação.

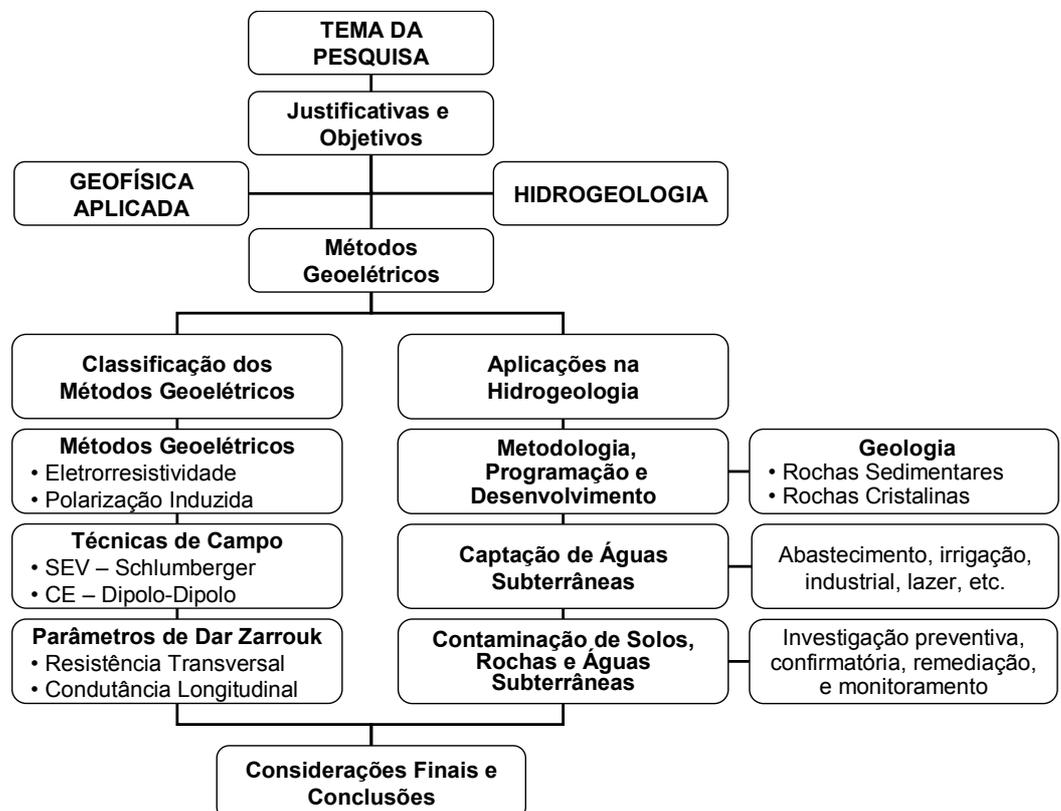


Figura I-01 - Fluxograma metodológico da pesquisa.

## CAPÍTULO 2. GEOFÍSICA APLICADA E A HIDROGEOLOGIA

### 2.1. GEOFÍSICA APLICADA

A origem da Geofísica Aplicada data de muitos anos atrás, sendo baseada em um conjunto de técnicas físicas e matemáticas, cujo início e desenvolvimento foi relacionado à exploração do subsolo, procurando localizar e estudar estruturas favoráveis à acumulação de substâncias úteis para a sociedade humana, tais como, petróleo, águas subterrâneas, minerais, etc..

A aplicação da Geofísica em estudos ambientais, envolvendo a contaminação de solos e rochas e as águas subterrâneas, através de contaminantes inorgânicos e orgânicos, tais como os resultantes de resíduos de aterros sanitários e/ou vazamentos de combustíveis, tem sido freqüente e despertado a atenção de pesquisadores.

Geofísica pode ser definida, como: “*a ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização nesta, de corpos delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando medidas tomadas na sua superfície, interior de furos de sondagens e levantamentos aéreos*” (modificado de Orellana, 1972).

É uma ciência que apresenta uma íntima relação com a Física e a Geologia, procurando resolver, a partir da Física, problemas colocados em termos geológicos. Tanto o geofísico como o geólogo, estudam a parte sólida da Terra, e apesar de utilizarem instrumentos de trabalho diferentes, seus objetivos convergem em uma mesma direção. É importante destacar a necessidade do geólogo na programação dos trabalhos geofísicos, pois o conhecimento deste profissional contribui para a definição das metodologias geofísicas adequadas e também suas modalidades de aplicação, bem como na formulação do modelo final interpretado.

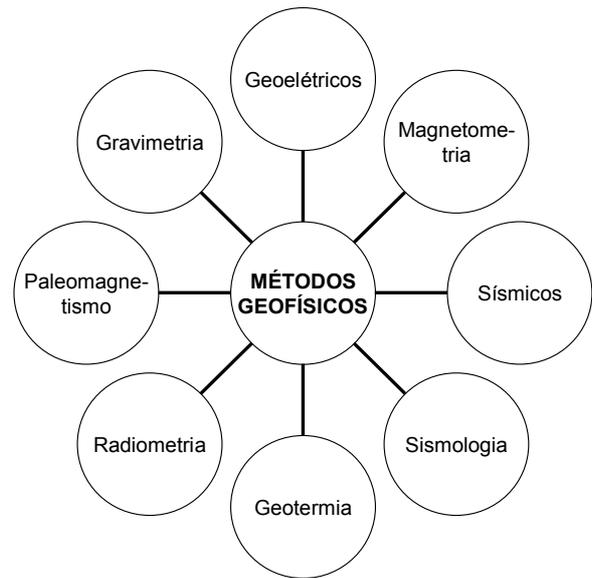
Os principais fenômenos físicos que ocorrem no interior da Terra (Figura II-01), nos quais a Geofísica se baseia, estão ligados ao: *campo magnético terrestre; fluxo geotérmico; propagação de ondas sísmicas; gravidade; campos elétricos e eletromagnéticos; correntes telúricas, e; radioatividade*. Em função do parâmetro físico estudado, a Geofísica pode ser dividida em quatro grupos de destaque, que podem ser denominados de *métodos maiores: gravimétrico, magnetométrico, geoeletricos e sísmicos*.

Os métodos da gravimetria e magnetometria, são de campo natural, estudando as perturbações que determinadas estruturas ou corpos produzem sobre campos preexistentes. Os métodos geoeletricos (exceção do potencial espontâneo e magnetotelúrico) e os sísmicos são

artificiais, ou seja, o campo físico a ser estudado é criado por meio de equipamentos apropriados.

Os fundamentos teóricos desses métodos geofísicos baseiam-se na determinação de propriedades físicas que caracterizam os diferentes tipos de materiais que se encontram no ambiente geológico, e nos contrastes que estas propriedades podem apresentar.

Ressalta-se o fato de que uma eventual intervenção do homem neste ambiente pode gerar mudanças nos vários campos físicos e nas suas propriedades.



**Figura II-01 - Principais métodos geofísicos.**

Várias definições podem ser encontradas na literatura para definir os campos de atuação da Geofísica, tais como, Geofísica Básica ou Geofísica da Terra Sólida: *...área da Geofísica que estuda a estrutura, composição e evolução da Terra em grande escala, envolvendo as camadas mais profundas do planeta, sua origem e evolução. Normalmente estes estudos visam aprofundar os conhecimentos sobre o planeta, e são desenvolvidos nas grandes Universidades e centros de pesquisa, assumindo assim um caráter tipicamente acadêmico...*; e ainda Geofísica Aplicada: *...área da Geofísica que lida com a busca de minerais, petróleo, água subterrânea ou auxilia grandes obras de engenharia civil, determinando parâmetros geofísicos e estruturais...<sup>\*1</sup>.*

Ainda existem algumas tais como, Geofísica Pura: *investiga as propriedades físicas da Terra e sua constituição interna a partir de fenômenos físicos ligados a ela*; e, Geofísica Aplicada: *estuda as ocorrências ou estruturas geológicas, relativamente pequenas, localizadas na crosta terrestre<sup>\*2</sup>.*

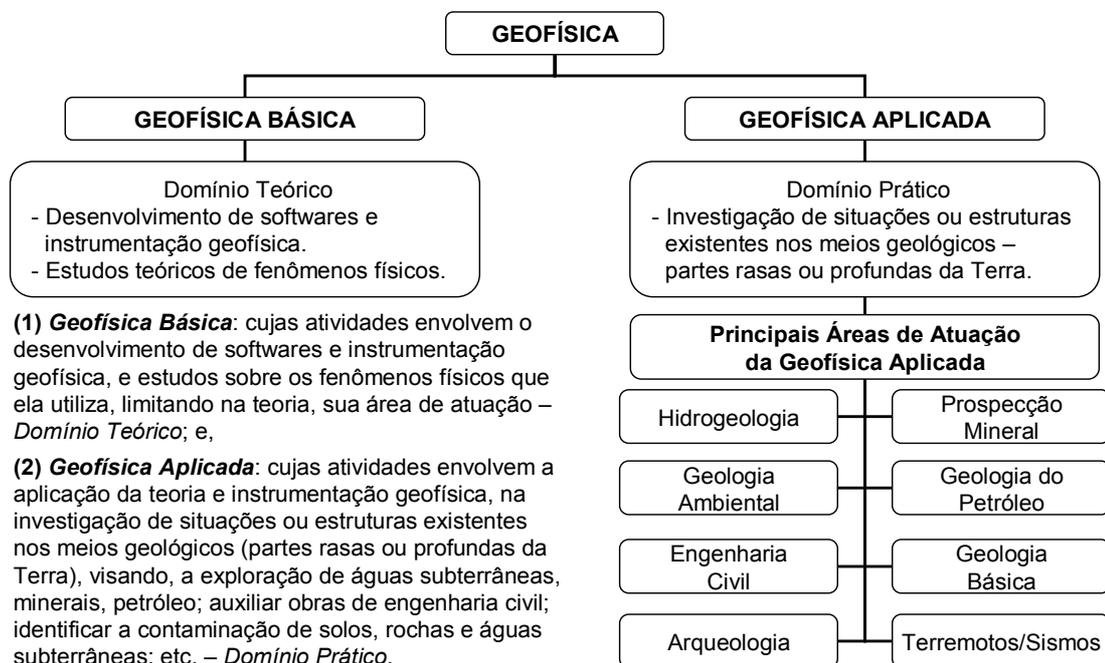
Em outra definição, têm-se as divisões de Geofísica da Terra Sólida e Geofísica de Exploração: *...Tectônica de placa, o estudo da estrutura interior da terra, e tais áreas relacionadas como processos globais e regionais são coletivamente conhecidas como Geofísica da Terra Sólida. A subdisciplina conhecida como Geofísica de Exploração, envolve*

<sup>\*1</sup> <http://www.iag.usp.br/siae98/geofisica/geofisica.htm>, acessado: 11/04/2005.

<sup>\*2</sup> [http://www.igc.usp.br/geologia/geofisica\\_aplicada.php](http://www.igc.usp.br/geologia/geofisica_aplicada.php), acessado: 26/07/2005

o uso de teoria geofísica e instrumentação, para localizar petróleo e outras fontes minerais. Diferentemente da Geofísica da Terra Sólida, a Geofísica de Exploração, geralmente se concentra em achar heterogeneidades laterais em uma parte relativamente pequena da crosta da terra...<sup>\*3</sup>

Entretanto, mesmo estudos em “grande” (sic) escala , acadêmicos ou envolvendo a constituição interna da Terra, podem ser aplicados a alguma atividade, por exemplo, Geologia do Petróleo. A separação de atividades em função do tipo de campo utilizado (natural ou artificial), resolução e profundidade de investigação, parece não ser a mais adequada, resultando em sobreposições. A Figura II-02, define portanto, as principais atividades da Geofísica, de um modo geral.



**Figura II-02 – Geofísica Aplicada – principais áreas de atuação.**

A interface entre essas duas atividades nem sempre é clara, podendo haver uma sobreposição, como por exemplo, o desenvolvimento de um instrumental geofísico com finalidade específica para uma área de atuação, por exemplo, Hidrogeologia.

A bibliografia disponível sobre Geofísica Aplicada é vasta, com inúmeros trabalhos desenvolvidos para os mais variados fins. Vários métodos geofísicos têm sido utilizados em estudos aplicados à Hidrogeologia, Geologia Ambiental, Prospecção Mineral, Geologia de Engenharia, etc.. Destacam-se as possibilidades da Geofísica Aplicada, no controle das alterações provocadas pelo homem no meio ambiente geológico, a qual seria baseada nas

<sup>\*3</sup> <http://seg.org/you-geo/definition.shtml> - acessado: 26/07/2005

investigações das deformações dos campos físicos e propriedades da litosfera, sob impacto das atividades do homem. As observações geofísicas, de forma geral, não afetam o ambiente geológico, podendo ser, se necessário, executadas várias vezes em uma mesma área.

Nos levantamentos geofísicos de campo, não deve ser descartada “a priori” a possibilidade de se efetuarem algumas perfurações por sondagens mecânicas. Estas sondagens, ainda que, normalmente, mais onerosas que os métodos geofísicos, fornecem dados seguros e exatos sobre o subsolo, os quais servem para auxiliar na interpretação geofísica, ajustando o modelo inicial.

Entretanto, em função dos custos elevados de uma perfuração, é preferível e mais adequado cobrir uma determinada área, com levantamentos geofísicos, e programar as sondagens mecânicas em função desses resultados. Deve-se lembrar que, os resultados da Geofísica não devem ser encarados como definitivos, mas sim, como dados complementares para o geólogo responsável decidir qual é o melhor caminho a ser seguido para solucionar os problemas expostos.

Outra consideração que pode ser destacada, diz respeito ao fato de que, com freqüência, se recorre aos métodos geofísicos somente quando as perfurações fracassam, devido, por exemplo, às complexidades geológicas locais. Nestes casos, investigações que poderiam ser realizadas economicamente por métodos geofísicos, com cobertura contínua e espacial da área, aliados a perfurações de apoio, resultam muito onerosas e com prazos inadequados. Em vários trabalhos desenvolvidos, por exemplo, na locação de poços tubulares profundos, visando à captação de água subterrânea, comprovou-se esta realidade, sendo a Geofísica Aplicada solicitada após perfurações sem sucesso.

Merece destaque ainda, o fato que diz respeito aos cuidados que se deve ter na escolha da metodologia geofísica adequada. Em nosso país, cujas condições geológicas e geotécnicas são diferentes dos países europeus e norte-americanos, têm-se espessas camadas de solo e material alterado, portanto, os métodos e equipamentos geofísicos devem ser escolhidos considerando nossas condições.

Entre os principais métodos geofísicos, os métodos geoeletricos, com suas diversidades de modalidades, são muito utilizados no mundo inteiro, atuando nas mais variadas áreas de conhecimento. Esta atuação abrange desde levantamentos puramente acadêmicos, até levantamentos procurando atender solicitações mais práticas e de interesse imediato da população, tais como: na Geologia de Engenharia, Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia Ambiental, etc.. Neste Grupo, destacam-se os métodos da *eletrorresistividade*,

polarização induzida e radar de penetração no solo, como sendo os mais utilizados e importantes.

## 2.2. HIDROGEOLOGIA

A água existente na natureza faz parte de um sistema circulatório conhecido como o ciclo hidrológico (Figura II-03). Conceitualmente, o ciclo hidrológico pode ser definido como sendo uma sucessão de fases percorridas pela água ao passar da atmosfera ao solo e vice-versa: evaporação do solo, do mar e das águas continentais; condensação para formar as nuvens; precipitação; acumulação no solo ou nas massas de água, escoamento direto ou retardado para o mar e re-evaporação.

Da precipitação então, a água:

- (a) retorna à atmosfera: evaporação das superfícies das águas e do solo ou transpiração das plantas (Evapotranspiração);
- (b) regressa aos oceanos sob a forma de *escoamento superficial* ou "Run-off" (sobre a superfície do solo); e,
- (c) penetra no subsolo: *infiltração*.



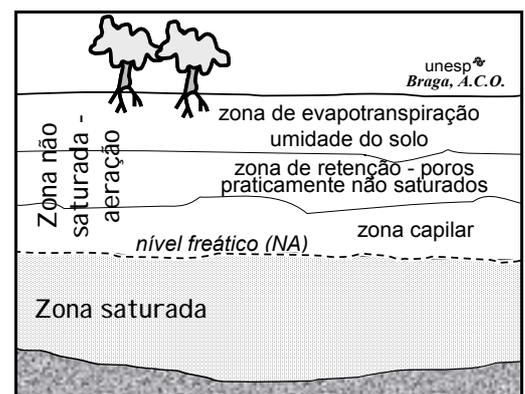
Figura II-03 – Ciclo hidrológico.

A Hidrogeologia é o ramo da geologia que trata da água subterrânea e, especialmente, de sua ocorrência. Pode ser definida como o estudo da origem, distribuição, escoamento e avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, envolvendo o estudo das recargas, reservas totais, volumes explotáveis e suas condições de exploração e a proteção das águas subterrâneas. Os materiais geológicos na subsuperfície podem ser divididos, esquematicamente, em duas partes principais: zona não saturada e zona saturada (Figura II-04).

A zona não saturada pode ser subdividida em:

- (1) zona de evapotranspiração, onde se tem a umidade retida pelas plantas e a evaporação;
- (2) zona de retenção, onde se tem muito pouca água; e,
- (3) zona capilar, com a umidade próxima da saturação.

Água subterrânea é a massa da água contida,



principalmente, na zona saturada. O limite de separação entre estas duas zonas principais é conhecido como nível d'água subterrânea ou nível freático (NA).

#### **Figura II-04 – Distribuição das águas no solo.**

A crosta terrestre é um vasto reservatório subterrâneo constituído de rochas com numerosos interstícios ou vazios, que variam em formas e dimensões (de cavernas a muito pequenas). Geralmente, os interstícios são interligados, permitindo o deslocamento das águas infiltradas. Quando não são interligados, impede a circulação da água.

A água subterrânea, quando presente, ocorre em extensas áreas. Se esta ocorrência coincide com áreas de demanda, não há necessidade de sistemas de distribuição, pois o aquífero pode ser acessado diretamente por poços. O crescimento da demanda é atendido com a perfuração de mais poços, respeitando a capacidade do aquífero prospectado.

Os custos de implementação de poços profundos, geralmente, são inferiores aos sistemas superficiais, pois não envolvem custos com indenizações, barragens, adutoras e estações de tratamento; a captação de águas subterrâneas, independe de períodos de estiagens prolongados para recarga, não está sujeita ao intenso processo de evapotranspiração e não provoca impacto ambiental como, por exemplo, inundações de grandes áreas.

Entretanto, a avaliação final, em termos de atendimento à demanda requerida e custos da implantação das obras de captação, será efetuada em função das relações *oferta/demanda* obtidas através de estudos envolvendo, tanto a disponibilidade hídrica superficial quanto a disponibilidade hídrica das águas subterrâneas.

Os estudos hidrogeológicos têm a finalidade de estabelecer o conhecimento de numerosos dados para a estimativa dos recursos hídricos subterrâneos, de forma racional de exploração e conservação. Referem-se às estruturas hidrogeológicas; características hidrogeológicas da rocha armazenadora; fatores que condicionam o movimento das águas subterrâneas; características físico-químicas das águas subterrâneas; características técnicas e econômicas das obras de captação; balanço; e, reservas e recursos. A partir destes dados, é possível estabelecer normas de exploração, proteção e conservação dos recursos das águas subterrâneas.

Os materiais geológicos naturais, podem ser classificados em quatro grupos, de acordo com a menor ou maior facilidade de armazenar e liberar as águas subterrâneas:

- a. **Aquíferos**: materiais porosos, saturados, que armazenam água e permitem sua circulação, são verdadeiros reservatórios de águas subterrâneas. São constituídos por solos, sedimentos

e rochas sedimentares com porosidade granular, maciços rochosos com porosidade de fraturas e rochas com porosidade cárstica.

- b. **Aqüicludes**: materiais porosos, saturados, que armazenam água mas permitem a circulação apenas de forma muito lenta, com velocidades insuficientes a proporcionar um abastecimento apreciável a um poço ou a uma fonte. São essencialmente argilosos, onde a água está firmemente fixada em poros de pequenas dimensões por pressões moleculares e tensões superficiais.
- c. **Aqüitardos**: materiais porosos que, apesar de armazenarem água, permitem a circulação da água com velocidade muito reduzida, em comparação a um aquífero. São constituídos de argilas siltosas ou arenosas.
- d. **Aqüífugos**: materiais impermeáveis, com baixíssimo grau de porosidade, sem interstícios interconectados, incapazes, portanto, de absorver ou transmitir água. São constituídos por rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas, sem fraturamento ou alteração.

A quantidade ou volume de água subterrânea que se pode dispor em uma determinada área, depende das características hidrogeológicas dos aquíferos e da capacidade de infiltração ou recarga. Os principais tipos de aquíferos, são denominados de:

- **Aquíferos Livres**: as águas neles contidas estão como se estivessem em um reservatório ao ar livre (submetidas, apenas, à pressão atmosférica); e,
- **Aquíferos Confinados**: as águas neles contidas se encontram entre camadas impermeáveis, sob pressão superior à atmosférica.

Em função das características principais dos materiais geológicos que o compõe os aquíferos e forma como as águas são armazenadas, podem-se destacar os tipos:

Rochas	Aquíferos	Descrição
Sedimentares	Granulares	Compostos por materiais granulares (solos, rochas sedimentares, etc.), em que a água ocorre ocupando os espaços intergranulares.
	Cársticos	Compostos por rochas duras ou materiais granulares, em que a água ocorre ocupando os espaços vazios formados pela dissolução do material original.
Cristalinas	Fraturados	Compostos por rochas compactas, em que a água ocorre ocupando fissuras, fendas ou fraturas dessa rocha.

Alguns parâmetros na Hidrogeologia, são de fundamental importância na caracterização dos aquíferos. Dentre esses, pode-se citar a condutividade hidráulica e a transmissividade.

A *condutividade hidráulica* ou coeficiente de permeabilidade (K), pode ser definido, como uma propriedade de um meio poroso combinada à do fluido escoando-se nesse meio saturado e que determina a relação, chamada lei de Darcy, entre a descarga específica e o gradiente hidráulico que a origina (ANA, 2001). O termo K, possui dimensão de uma

velocidade (m/s). Essa propriedade, considera as características do meio, incluindo: porosidade; tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas; e, as características do fluido que esta escoando (viscosidade e massa específica).

A *transmissividade* (T) é um parâmetro importante nos estudos visando à captação de águas subterrâneas, permite avaliar, a capacidade de transmissão dessas águas, pelo meio geológico, através de toda sua espessura saturada. Pode ser determinada pelo produto da condutividade hidráulica da formação, por sua espessura:  $T = K \cdot E$  (m<sup>2</sup>/s).

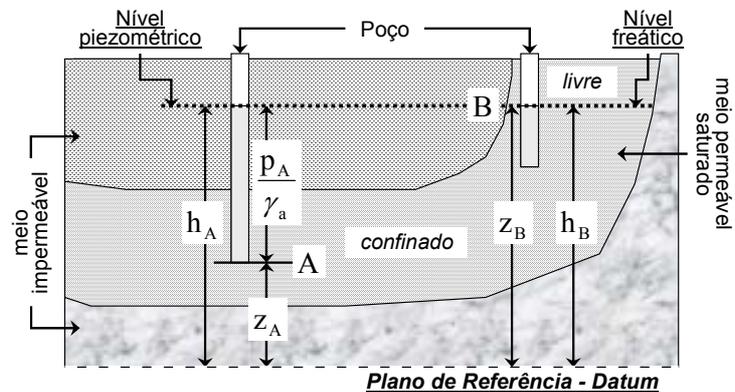
Quanto ao movimento, as águas subterrâneas, de um modo geral, escoam lentamente no subsolo, com velocidade relativamente pequena devido ao atrito nas paredes dos capilares e dos poros. Numa areia a água movimenta-se com a velocidade de cerca de 1 m/dia; e nas argilas o movimento é praticamente nulo. Nas rochas muito fraturadas a velocidade pode ser muito rápida.

As águas que circulam os meios naturais (considerada um fluido perfeito, com viscosidade nula e em fluxo permanente) apresentam energia total (h) conforme a equação:

$$h = z + \frac{p}{\gamma_a} + \frac{V_p^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad \text{II-01}$$

onde: **h** = carga de energia total em cada ponto do meio; **z** = carga de elevação – referência a um datum;  $v^2/2g$  = carga de velocidade;  $p/\gamma_a$  = carga de pressão; **v** = velocidade de percolação intersticial; e,  $\gamma_a$  = peso específico da água.

Como pode ser observado na Figura II-05, em cada ponto de um meio saturado (fluido em equilíbrio) existe uma pressão na água (aquífero livre = pressão atmosférica, aquífero confinado =  $p/\gamma_a$ ).



**Figura II-05 – Potencial hidráulico em meio saturado.**

Porém, nos fluxos em meios porosos, o termo que representa a carga de velocidade ( $v^2/2g$ ) é muito pequeno, podendo ser desprezado na equação II-01. Se os pontos A e B estão associados a um plano de referência (z) – *nível do mar* (cota), a carga de energia total ou nível piezométrico (h) corresponde ao **potencial hidráulico**, e é dado por:

$$h_A = z_A + \frac{p_A}{\gamma_a} \quad (\text{m}) \quad \text{II-02}$$

$$h_B = z_B \quad (\text{m}) \quad \text{II-03}$$

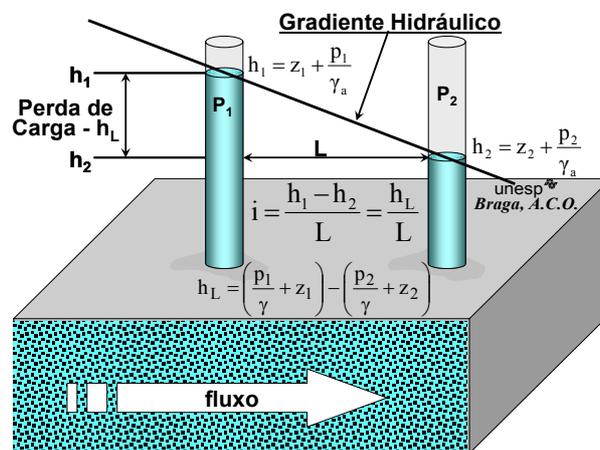
## aquíferos confinados

## aquíferos livres

As diferenças de potencial hidráulico (*perda de carga*) resultantes do gradiente hidráulico, são indispensáveis para o escoamento através de um meio poroso. Só existe movimento das águas subterrâneas quando ocorrem variações no potencial hidráulico (Figura II-06).

O fluxo se dá dos pontos de maior para os de menor potencial hidráulico (não no sentido das menores pressões hidrostáticas).

As águas podem escoar de zonas de baixa pressão para zonas de alta pressão – se a diferença do potencial hidráulico for favorável.

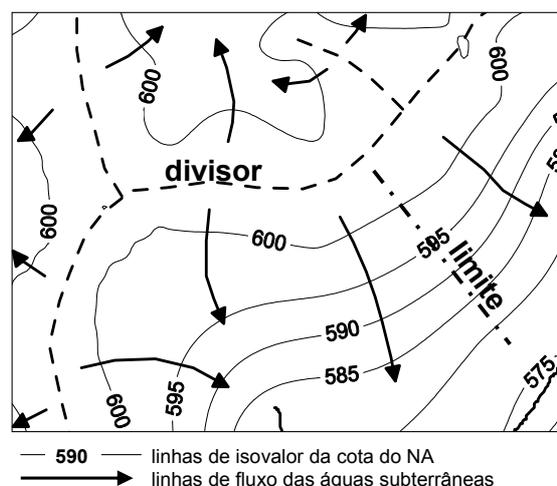


**Figura II-06 – Fluxo d'água subterrâneo.**

Portanto, em um determinado meio, conhecendo-se o nível piezométrico em vários pontos podem-se traçar mapas de isopotencial hidráulico, os quais são denominados de Mapas Piezométricos ou **Mapas Potenciométricos**. A confecção desses mapas permite estabelecer o padrão do fluxo subterrâneo, expressando, o comportamento geral do escoamento subterrâneo, evidenciado pelas redes de fluxo, que possibilitam a determinação do sentido e da direção do fluxo.

Através desses mapas (Figura II-07), é possível determinar os *limites* de uma bacia hidrogeológica, os quais são as extremidades laterais de uma determinada área, a partir das quais os fluxos subterrâneos não mais se direcionam para o interior.

Se ao longo destes eixos os fluxos são divergentes, ou seja, apresentam a mesma direção mas sentidos opostos, estes correspondem ao *divisor* de águas subterrâneas.



**Figura II-07 – Mapa potenciométrico.**

Esses mapas permitem ainda, definir os gradientes hidráulicos, onde os limites e divisores da bacia hidrogeológica são eixos, ao longo dos quais, as cargas hidráulicas são máximas, relativamente às áreas adjacentes, e se relacionam, normalmente, às áreas de recarga, ou seja, são porções do terreno onde ocorre a alimentação do aquífero pela infiltração das águas de superfície.

Áreas de menor carga hidráulica correspondem às áreas de descarga, para as quais convergem as linhas de fluxo. Estas áreas podem estar associadas aos elementos de drenagem superficial (rios, fontes, lagos, etc.), ou a elementos de drenagem artificial ou profunda dos maciços (drenos em obras civis, escavações subterrâneas, cavernas em calcário, etc.).

Os mapas de fluxo das águas subterrâneas, são de extrema importância em estudos ambientais, envolvendo fases pré e pós-emprego, tais como locais com aterros, tanques de combustível, refinarias, etc., indicando zonas de concentração, direção e sentido de eventuais plumas de contaminação. Esses mapas auxiliam a locação de poços de monitoramento e/ou coleta do contaminante. Cabe ressaltar que, só tem sentido a confecção dos mapas potenciométricos, quando os aquíferos são sedimentares – livres ou confinados, e não quando são fraturados.

A Hidrogeologia tem como suas principais aplicações os estudos das características de solos e rochas, envolvendo o fluxo de fluidos em meios porosos, visando, principalmente, a captação de água subterrânea para as mais variadas finalidades. Uma de suas atuações importantes, hoje em dia, diz respeito aos estudos envolvendo a contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas, onde contaminantes, resultantes de aterros, vazamentos de combustíveis, etc, tem degradado e comprometido suas qualidades.

Portanto, nesse trabalho as aplicações dos métodos geométricos em estudos hidrogeológicos, deverão contemplar a:

- 1- Captação de água subterrânea: para abastecimento público, doméstico, industrial, agricultura, lazer, etc.; e,
- 2- Estudos ambientais: para diagnóstico e monitoramento de solos, rochas e águas subterrâneas frente a contaminantes.

Uma outra atuação da Hidrogeologia que cabe ser destacada, envolve a execução de obras civis e mineiras, sistemas de culturas agrícolas, instalação de equipamentos públicos e privados, etc., onde , por exemplo, é necessário o rebaixamento do lençol freático para a execução das obras.

## CAPÍTULO 3. PRINCIPAIS MÉTODOS GEOELÉTRICOS E TÉCNICAS DE CAMPO

### 3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Uma questão importante quando se discute, não só os métodos geoeletricos, mas a Geofísica como um todo, diz respeito à identificação de suas várias modalidades existentes. É comum, encontrar profissionais ligados a esta área, ou até mesmo, os que dela se utilizam como uma ferramenta de apoio, apresentarem certas confusões sobre as denominações das modalidades em uso.

Os termos métodos, técnicas e arranjos, são utilizados algumas vezes de maneira inadequada, trazendo, principalmente ao usuário leigo sobre o assunto, dificuldades no entendimento da Geofísica como aplicação. Como citado anteriormente, os métodos geoeletricos aplicados possuem inúmeras modalidades de uso, contribuindo para aumentar essas confusões.

Em várias oportunidades, pode-se comprovar na prática, essa situação, onde o usuário da Geofísica, solicitava determinada *técnica de campo* inadequada aos objetivos propostos, quando na realidade, estava-se pensando no *método*. Mesmo, alguns geofísicos experientes, quando solicitam a utilização do método da eletrorresistividade, por exemplo, estão “pensando”, no emprego da técnica da sondagem elétrica vertical, ou vice-versa.

Como exemplo, pode-se citar Cetesb (1999), no Capítulo 4 na determinação de pluma inorgânica na água subterrânea (íons e sais dissolvidos), tem-se: *...Para a determinação desses contrastes de condutividade, o método eletromagnético indutivo é mais indicado que a eletrorresistividade, principalmente pela rapidez de execução do levantamento e pela precisão na determinação de variações laterais...* Esta clara, na afirmação citada que os autores devem se referir às técnicas de campo e não aos métodos. Ressalta-se porém que, o método da eletrorresistividade, desenvolvido pela técnica do caminhamento elétrico – arranjo dipolo-dipolo, permitindo estudar uma faixa vertical e lateral em subsuperfície, é bem mais rápido e preciso que o levantamento eletromagnético, no qual, normalmente a profundidade de investigação é rasa.

Algumas obras da literatura internacional, procuram apresentar uma classificação para os métodos geoeletricos, tentando normalizar estas denominações. Iakubovskii & Liajov (1980), apresentam uma classificação baseada em características, tais como: sistema de excitação e medição do campo elétrico (Tabela III-01).

**Tabela III-01. Classificação dos métodos geoeletricos - Iakubovskii & Liajov (1980).**

<b>A. Métodos de Campo Constante (frequência 0)</b>	A-1. Método do campo natural A-2. Método da resistividade – caminhamento e sondagem elétrica A-3. Método de carga A-4. Método de linhas equipotenciais A-5. Método de relação de potenciais
<b>B. Métodos de Campo Variáveis de Baixa Frequência e não estacionários (frequência <math>10^{-2}</math> a <math>10^4</math> Hz)</b>	B-1. Métodos do potencial induzido B-2. Método do campo magnetotelúrico (sondagem e caminhamento magnetotelúrico) B-3. Sondagem eletromagnética de frequência B-4. Sondagem do campo em processo de formação (tempo do processo de formação $10^0$ a $10^2$ s) B-5. Métodos indutivos de baixa frequência (variantes terrestre, aérea e de poço) B-6. Método dos processos transitórios (tempo do processo de formação $10^{-3}$ a $10^{-2}$ s)
<b>C. Métodos de Campo Variáveis - Frequências Radiofônicas (<math>10^5</math> a <math>10^7</math> Hz)</b>	C-1. Métodos de radiografia C-2. Caminhamento com ondas radiofônicas C-3. Método rádio comparativo

Ainda segundo os autores referidos, em função da natureza dos campos eletromagnéticos investigados, se diferenciam os métodos de campo natural e métodos de campo artificial. O segundo grupo é mais numeroso, o que está relacionado com a diversidade dos métodos de excitação do campo. Em relação com a situação da fonte do campo e dos pontos de observação, se diferenciariam em: superficiais, profundos, marinhos e aéreos.

Orellana (1972), apresenta uma classificação (Tabela III-02), também baseada no campo eletromagnético criado: *natural* ou *artificial*, acrescentando outro critério, relacionado à atribuição em subsuperfície, da informação obtida, ou seja, na vertical a partir de um ponto, variando com a profundidade ou, então, ao longo de um perfil na superfície do terreno com profundidades aproximadamente constantes (respectivamente, sondagens e caminhamentos). Este autor referido, também considera se o campo eletromagnético é constante (corrente contínua) ou varia com o tempo (métodos de campo variável).

**Tabela III-02. Classificação dos métodos geoeletricos – Orellana (1972).**

<b>A. Métodos de Campo Natural</b>	A-1. Método do potencial espontâneo A-2. Método de correntes telúricas	A-3. Método magneto-telúrico (sondagens e caminhamentos) A-4. Método AFMAG
<b>B. Métodos de Campo Artificial</b>	B-1. Métodos de Campo Constante	B-1-1. Método das linhas equipotenciais e do corpo carregado (mise-a-la-masse) B-1-2. Sondagens Elétricas (simétricas, dipolares, etc.) B-1-3. Caminhamentos elétricos (várias modalidades)
	B-2. Métodos de Campo Variável	B-2-1. Sondagens de frequência B-2-2. Sondagens por estabelecimento de campo (transitórios) B-2-3. Caminhamentos eletromagnéticos (métodos de inclinação de campo, Turam, Slingram, etc.) B-2-4. Método “Radio-Kip” B-2-5. Método de radiografia hertziana
	B-3. Método da Polarização Induzida	

Entretanto, essas classificações propostas ainda não são as mais adequadas, podendo apresentar certas confusões para o usuário leigo, misturando parâmetros físicos medidos com procedimentos de campo.

Uma classificação proposta para os métodos geoeletricos, é baseada apenas em três critérios: *métodos geoeletricos*, *técnicas de investigação* e *arranjos de desenvolvimento de campo*. Essa classificação, procura revelar os métodos geoeletricos para qualquer tipo de usuário, tornando simples o entendimento de suas várias modalidades existentes, e conseqüentemente, seus empregos adequados em função dos objetivos e geologia a serem estudadas.

Método nos leva a identificar as características dos diferentes materiais, pelas quais alcançamos determinado fim ou objetivos, pode-se considerar uma forma de se chegar à natureza de um determinado problema, quer seja para estudá-lo, quer seja para explicá-lo. Os diferentes materiais geológicos apresentam, determinadas propriedades físicas características, as quais definem os métodos geofísicos. Portanto, considera-se como **método geoeletrico**, aquele decorrente do parâmetro físico obtido, através de equipamentos apropriados. O método visa levar a uma caracterização e identificação dos diferentes materiais geológicos, procurando atingir os objetivos da pesquisa.

O método geoeletrico, se faz acompanhar das **técnicas de campo**, que são o suporte prático de *desenvolvimento*, são os instrumentos que o auxiliam para que se possa chegar a um determinado resultado. Para se estudar as variações do(s) parâmetro(s) físico(s) obtido(s) dos materiais geológicos, tanto no campo como em laboratório, podem-se assumir três formas práticas de *investigação*:

- (a) investigações das variações do(s) parâmetro(s) físico(s) em profundidade, a partir de um *ponto fixo na superfície* do terreno (**sondagens**);
- (b) investigações laterais a partir de *pontos não fixos na superfície* do terreno, com uma ou mais profundidades constantes (**caminhamentos**); e,
- (c) investigações no interior de furos de sondagens mecânicas (**perfilagens**).

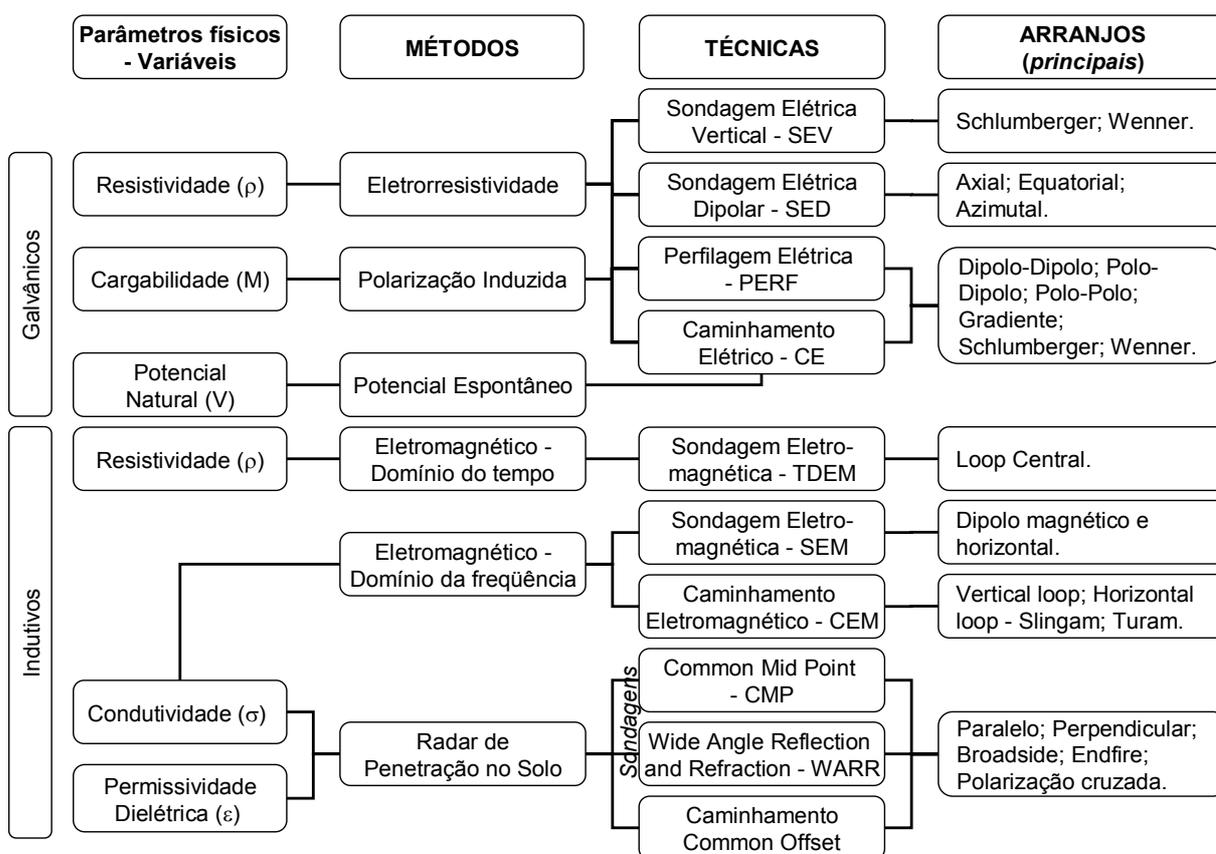
Para o desenvolvimento das técnicas de campo, diferentes *procedimentos* de campo podem ser adotados, levando ao mesmo fim. Esses procedimentos referem-se à disposição dos acessórios (eletrodos) necessários para a execução das técnicas, e são denominados de **arranjos de campo**, os quais, apresentam uma grande variedade de opções.

Esses critérios, na prática, revelam-se de fácil entendimento e utilização, tornando claro o tipo de levantamento geofísico empregado. Portanto, em função do exposto, apresenta-se uma proposição para a classificação dos métodos geoeletricos aplicados, a qual pode ser

definida conforme a Figura III-01. A Figura III-02, apresenta um detalhamento da classificação proposta.



**Figura III-01 - Classificação dos métodos geoeletricos - geral.**



**Figura III-02 – Classificação dos métodos geoeletricos - detalhamento.**

### 3.2. MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

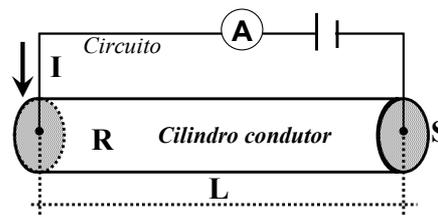
Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a *eletrorresistividade* – ER, é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam fundamentalmente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas.

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico, apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de

alteração, fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas.

Da Lei de Ohm\*, define-se que a relação entre a resistividade ( $\rho$ ) e a resistência ( $R$ ) de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica ou prismática (Figura III-03), é dada pela equação:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{ohms}) \quad \text{III-01}$$



**Figura III-03 - Relação resistividade e resistência.**

onde,  $L$  é o comprimento e  $S$  a seção transversal do condutor. A magnitude  $\rho$  é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo considerado e recebe o nome de *resistividade*. Deste modo pode-se definir a resistividade elétrica deste corpo como sendo:

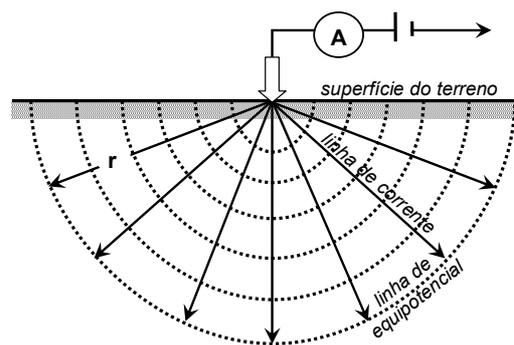
$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{ohm.m}) \quad \text{III-02}$$

Portanto, a dimensão da resistividade é o produto de uma resistência elétrica por uma longitude; em função disto, a unidade de resistividade no sistema SI será ohm.m. De maneira simplista, a resistividade pode ser definida como sendo uma medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra na sua passagem em um determinado material, e isto está ligado aos mecanismos pelos quais a corrente elétrica se propaga.

Na Terra, ou qualquer corpo tri-dimensional, a corrente elétrica não flui por um único caminho, como no caso do condutor da Figura III-03.

Considerando uma bateria conectada ao solo (Figura III-04), através de cabos e eletrodos, por dois pontos distantes um do outro, a Terra, que não é um isolante perfeito, conduz a corrente elétrica gerada pela bateria.

Neste estágio, assume-se que a resistividade do solo é uniforme.



**Figura III-04 – Potencial no semi-espaço.**

Aplicando a Equação III-01 no semi-espaço, tem-se:  $R = \frac{\rho \cdot r}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r}$ , substituindo em  $V = R \cdot I$  (Lei de Ohm), resulta em:

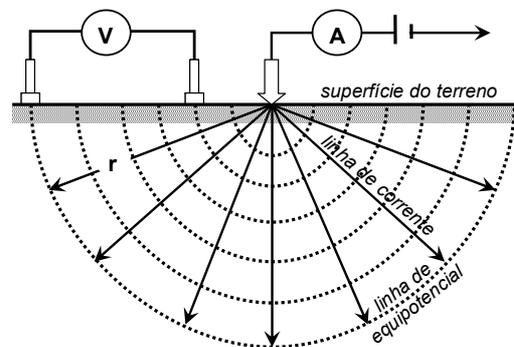
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \text{III-03}$$

Portanto, considerando o subsolo com uma resistividade constante, pode-se determinar sua resistividade:

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad \text{III-04}$$

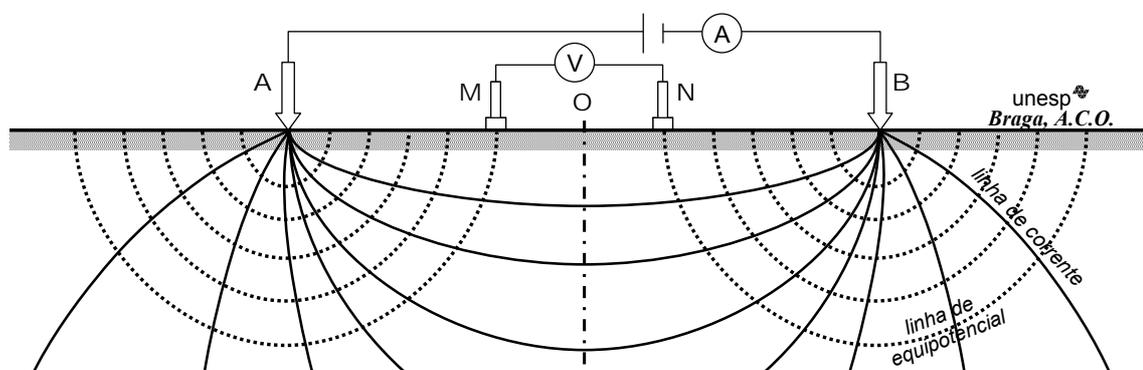
onde:  $V$  = potencial,  $I$  = corrente,  $\rho$  = resistividade, e  $r$  = distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido.

Ao se conectar um cabo condutor de uma bateria a um eletrodo de corrente (Figura III-05), pode-se medir o valor da intensidade de corrente –  $I$ ; e, conectando um voltímetro a dois eletrodos, um localizado próximo ao de corrente e outro mais afastado (distância  $r$ ), pode-se medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), entre estes dois locais.



**Figura III-05 – Diferença de potencial no campo.**

Ocorre que na prática, este procedimento não é usual, devido a grande distância entre os dois eletrodos de corrente. Portanto, devem-se reduzir as distâncias entre os quatro eletrodos. Então, a configuração usual, consiste em se utilizar quatro eletrodos (AMNB), mantidos conforme a Figura III-06.



**Figura III-06 – Configuração tetraeletródica usual de campo.**

Em geral, os arranjos de campo dos métodos geoeletricos principais, constam de quatro eletrodos cravados na superfície do terreno. Um par de eletrodos serve para introduzir a corrente elétrica no subsolo (AB), enquanto que, o outro par, é utilizado para medir a diferença de potencial que se estabelece entre eles (MN), como resultante da passagem desta corrente.

\* Lei de Ohm: em um cilindro condutor, a corrente ( $I$ ) é proporcional a voltagem ( $V$ ) –  $V = R \cdot I$

A determinação do potencial resultante deste campo elétrico criado, pode ser demonstrado da seguinte maneira: conforme esquema apresentado na Figura III-06, a corrente elétrica de intensidade  $I$  é introduzida no subsolo por meio dos eletrodos A e B e o potencial  $V$  gerado, é medido por meio dos eletrodos denominados de M e N.

Ao supor que o meio investigado é homogêneo e isotrópico e tomar a Equação III-03, tem-se que o potencial no eletrodo M e N, respectivamente, será dado por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad \text{III-05} \quad \quad V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad \text{III-06}$$

A diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos MN, será:  $\Delta V_{MN} = V_M - V_N$ , assim:

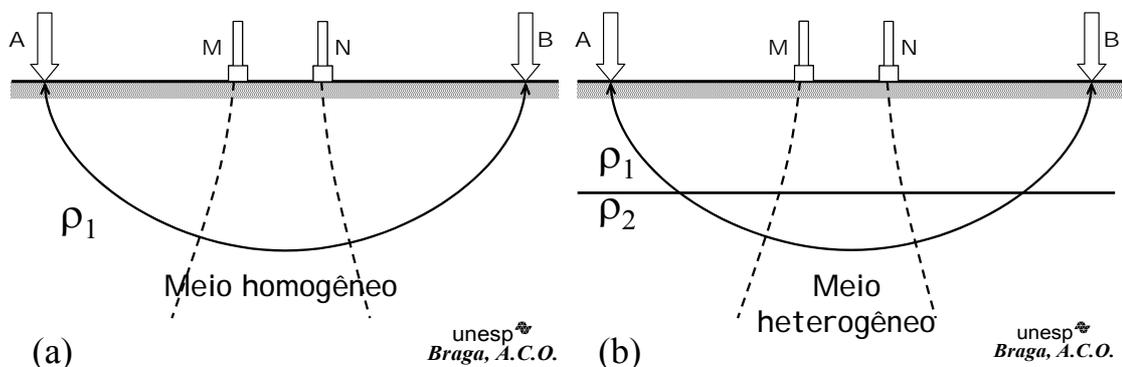
$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{III-07}$$

Pode-se então, calcular o valor da resistividade  $\rho$  do meio investigado mediante as seguintes equações:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{III-08} \quad \quad \text{onde, } K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad \text{III-09}$$

Portanto, o uso do método da eletrorresistividade no campo, é baseado na capacidade do equipamento em introduzir uma corrente elétrica no subsolo a diferentes profundidades de investigação, e calcular as resistividades dos materiais geológicos a estas várias profundidades.

Ao utilizar o mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio homogêneo (Figura III-07a), a diferença de potencial observada  $\Delta V$  será diferente da registrada sobre um meio heterogêneo (Figura III-07b), pois o campo elétrico deverá sofrer modificações em função desta heterogeneidade dos materiais geológicos.



**Figura III-07 – Resistividade em meios homogêneos (a) e heterogêneos (b).**

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a quantia medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume

de material em subsuperfície relativamente grande. Portanto ao efetuar as medições pertinentes obtém-se uma **resistividade aparente** ( $\rho_a$ ), a qual é uma variável que expressa os resultados das medições de alguns dos métodos geoeletricos, e é a que se toma como base para a interpretação final. As dimensões da resistividade aparente, em virtude de sua definição, são as mesmas que para a resistividade, e sua unidade será também *ohm.m*.

Em solos e rochas os mecanismos pelos quais a corrente elétrica se propaga, são caracterizados pela sua condutividade  $\sigma$ , que numericamente pode ser expressa como o inverso da resistividade, portanto:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{siemens/m}) \quad \text{III-10}$$

Esses mecanismos de propagação das correntes elétricas podem ser do tipo *condutividade eletrônica* ou *iônica*. A classificação destes tipos de condutividade pode ser sintetizada da seguinte maneira:

Condutividade e eletrônica	metais e semicondutores:	<ul style="list-style-type: none"> <li>deve-se ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e o grau de impurezas.</li> </ul>
Condutividade e iônica	eletrólitos sólidos (dielétricos) e eletrólitos líquidos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>deve-se ao deslocamento dos íons existentes nas águas contidas nos poros de uma massa de solo, sedimentos inconsolidados ou fissuras das rochas. Este tipo de mecanismo é o que interessa na Hidrogeologia.</li> </ul>

A resistividade das rochas que possuem condutividade iônica é função decrescente da quantidade de água, da natureza dos sais dissolvidos e da porosidade total comunicante\*. Praticamente, todas as rochas possuem poros em proporção maior ou menor, os quais podem estar ocupados, totais ou parcialmente, por eletrólitos sendo que, em conjunto, elas se comportam como condutores iônicos, de resistividades muito variáveis.

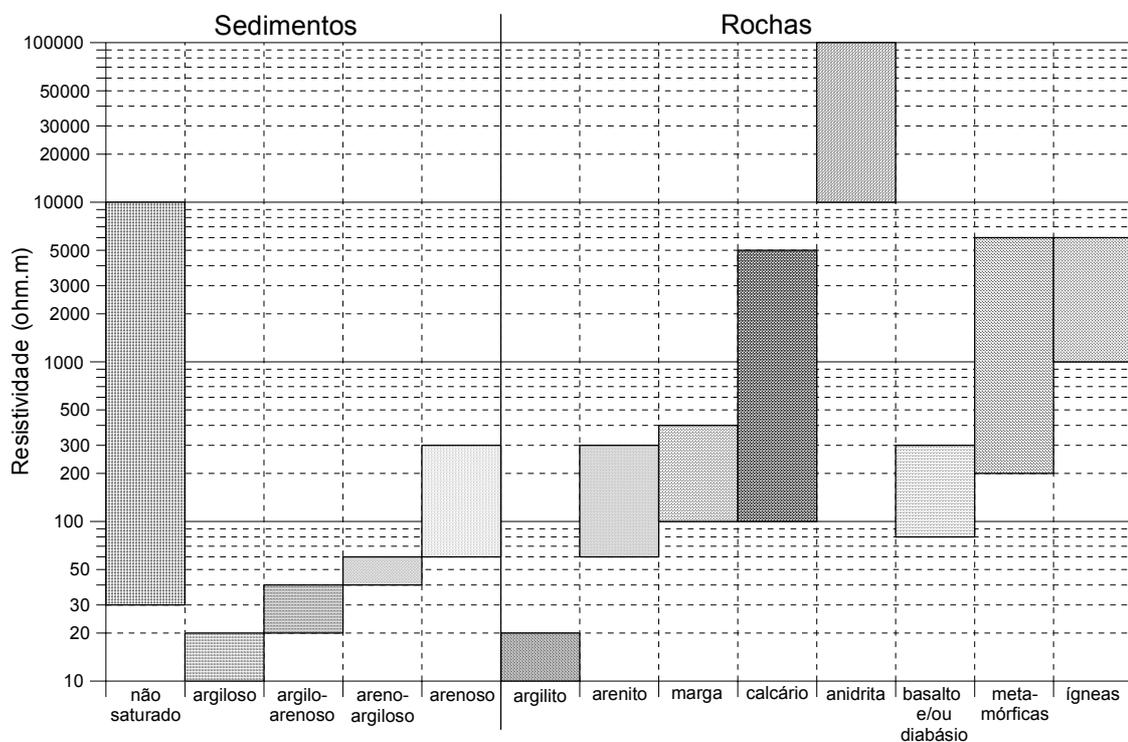
Segundo Iakubovskii & Liajov (1980), uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como sendo um agregado com estrutura de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual sua resistividade é influenciada pelos seguintes fatores:

- |   |  |
|---|--|
| 1) resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha; | 4) textura da rocha e a forma e distribuição de seus poros;  |
| 2) resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;   | 5) processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral, tais como: processo de adsorção de íons na superfície do esqueleto mineral, diminuindo a resistividade total destas rochas. |
| 3) umidade e porosidade da rocha;                                 |  |

\* Segundo Orellana (1972), a água contida em poros isolados tem pouca importância.

Portanto, a resistividade das rochas, depende de vários fatores para que se possa atribuir um só valor para um determinado tipo litológico. Rochas de mesma natureza, podem apresentar suas resistividades influenciadas pelas condições locais de: conteúdo em água; condutividade da água; e, tamanho dos grãos, porosidade, metamorfismo, efeitos tectônicos, etc.

Um mesmo tipo litológico pode apresentar, então, uma ampla gama de variação nos valores de resistividade. Como relata Sumner (1976), individualmente, os minerais são razoavelmente consistentes em suas características elétricas, mas num agregado, como ocorre na natureza, a variação total de suas resistividades é muito maior. A Figura III-08, apresenta as variações típicas, nos valores de resistividade para sedimentos não saturados e saturados, e rochas.



**Figura III-08 – Faixas de variações nos valores de resistividade – solos/sedimentos e rochas.**

Para se efetuar uma correlação adequada com a geologia, em uma determinada área de estudo, é fundamental a localização geográfica e o entendimento da geologia local em termos estratigráficos. Entretanto, para a interpretação dos dados do método da eletrorresistividade, alguns critérios para efetuar a associação resistividade/litologia, podem ser observados e seguidos:

1. em uma área estudada, as margens de variação são bem mais reduzidas e em geral podem identificar as rochas em função das resistividades;

2. a partir de dados coletados previamente (SEV's paramétricas, perfilagens elétricas, mapeamento geológico, perfis geológicos de poços confiáveis, etc.), o modelo final pode ser determinado.

Como demonstrado por diversos autores, as resistividades das águas que saturam os materiais no subsolo, podem apresentar uma variação muito ampla, mas de baixos valores. Na maioria dos casos, estas soluções aquosas contêm diversos sais minerais dissolvidos, sendo um dos principais o cloreto de sódio (NaCl). A resistividade das águas é inversamente proporcional à concentração destes sais dissolvidos.

A quantidade e classe, desses sais minerais, dependem da natureza das rochas nas quais as águas tenham percolado em seu fluxo superficial ou subterrâneo. Como a maioria das rochas existentes na natureza é constituída por minerais, tais como, o quartzo, os silicatos, a calcita, etc., os quais são considerados praticamente isolantes em termos de propagação da corrente elétrica, estas rochas seriam mal condutoras de eletricidade, sendo consideradas, portanto, no seu todo, praticamente isolantes. Em alguns casos, as rochas com quantidade apreciável de alguns minerais semicondutores, tais como, pirita, pirrotita, magnetita, etc., poderiam ser consideradas condutoras.

Entretanto, praticamente todas as rochas possuem poros em quantidades variáveis, os quais podem estar preenchidos por eletrólitos. Estas rochas, comportam-se como condutoras iônicas, pois a corrente elétrica flui praticamente através do eletrólito de saturação, pois a estrutura mineral, como dito anteriormente, conduz mal a corrente elétrica.

A relação entre a resistividade global das rochas e a do eletrólito que preenche seus poros, pode ser determinada através do coeficiente **F** - *Fator de Formação*, através de:  $F = \rho_r / \rho_a$ , onde,  $\rho_r$  é a resistividade média da rocha (matriz e poros incluídos) e  $\rho_a$  a resistividade da solução de saturação dos poros.

O fator de formação é um coeficiente importante nos estudos da resistividade do subsolo, podendo determinar, a partir de levantamentos geofísicos por eletrorresistividade, uma estimativa bastante próxima do real, das porosidades de diferentes formações geológicas. Os trabalhos de Griffiths (1976), Kelly (1977a e 1977b), Niwas & Singhal (1981), Worthington (1976) e Orellana (1972), discutem a utilização da resistividade na determinação da porosidade e permeabilidade das rochas.

Como se discutiu até agora, pode-se deduzir que as resistividades das rochas dependem, realmente, de inúmeros fatores e podem apresentar uma ampla gama de variação. Portanto, na interpretação dos dados de resistividades dos materiais no subsolo, obtidas a partir da superfície do terreno, é fundamental, tanto a experiência do intérprete como o conhecimento

geológico da área estudada, não podendo realizar esta associação (*parâmetro físico-geológico*) de forma puramente automática.

As resistividades dos solos, quando saturados, seguem os padrões descritos anteriormente, identificando e caracterizando os diferentes tipos de materiais geológicos localizados em subsuperfície. Entretanto, quando os solos encontram-se secos, porção localizada acima do nível d'água, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma ampla faixa de variação (por exemplo, 100 a 10.000 ohm.m) não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos. As variações das resistividades, neste caso, refletem apenas as pequenas variações de saturação existentes.

### 3.3. MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA

O método da polarização induzida – IP, teve sua origem por volta de 1920, quando o pesquisador Conrad Schlumberger, ao realizar trabalhos geofísicos com os métodos geoeletricos próximos de jazimentos de sulfetos, observou que, quando a corrente elétrica introduzida no subsolo era interrompida, o campo elétrico criado não desaparecia bruscamente, mas sim de uma maneira lenta (Orellana, 1974).

Esta *polarização induzida* ou residual, também denominada de sobretensão, não teve sua importância considerada por Schlumberger, talvez não acreditando em sua utilidade prática. Na obra de Sumner (1976), considerada uma das principais publicações referentes a esta metodologia geofísica, é citado, historicamente, como sendo Schlumberger, o primeiro que descreveu conclusivamente a "resposta IP".

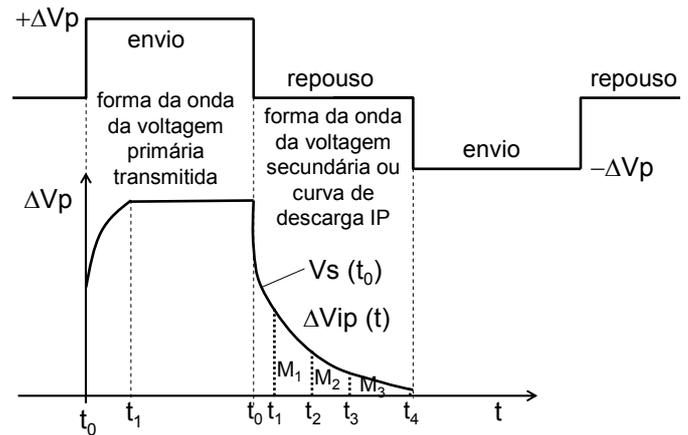
Em estudos hidrogeológicos, Börner et al (1996), procuraram estimar a permeabilidade hidráulica de um aquífero, a partir da polarização induzida, citando que as propriedades elétricas e hidráulicas de um material geológico são governadas pela geometria do espaço-poro e pela relação das microestruturas do espaço poroso.

Conforme observado por pesquisadores, desde o início do século passado, na teoria, a resposta da polarização induzida é uma quantidade, com dimensões, muito reduzida, sendo na prática medida tal como uma variação de voltagem em função do tempo ou frequência, denominados, respectivamente, de *IP-Domínio do Tempo* (usado na presente pesquisa) e *IP-Domínio da Frequência*.

No IP - Domínio do tempo, ao se aplicar, por intermédio de eletrodos de corrente denominados convencionalmente de A e B, cravados na superfície do terreno, uma diferença de potencial  $\Delta V$  primária ao solo, é provocada conseqüentemente uma polarização do mesmo.

Esta diferença de potencial primária ( $\Delta V_p$ ) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos.

Ela varia com o tempo na forma de uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ . Esta curva, liga a assíntota  $\Delta V_p$  em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente (Figura III-09).



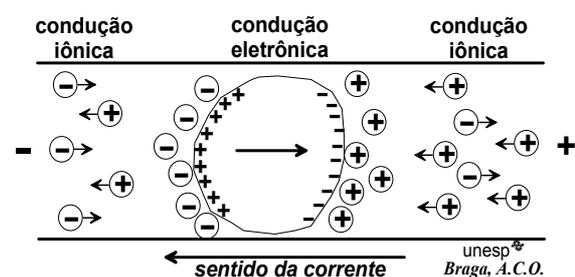
**Figura III-09 - Curva de descarga IP-  
Domínio do Tempo.**

A amplitude de um valor  $\Delta V_{IP}(t)$  está diretamente ligada à maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo-se, portanto, na base do método. Esta capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais da terra. Analogamente, pode-se descrever o fenômeno da polarização induzida, como se o solo contivesse pequenos condensadores, que se carregariam durante a emissão de corrente, descarregando-se após o corte. A curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$  poderia ser chamada então de *curva de descarga IP*.

Os fenômenos físico-químicos que poderiam explicar a polarização induzida são muito complexos, sendo que a maior parte dos autores concordam em distinguir duas origens possíveis para a polarização induzida:

a) Polarização Metálica ou Eletrônica: na superfície limite de um corpo ou partícula metálica submetido à uma corrente elétrica, têm-se uma passagem da condução iônica para a eletrônica, e vice-versa. Isto resulta no fato de que em duas superfícies opostas do corpo sejam produzidas concentrações de íons, os quais não cederam suas cargas ao corpo, ou seja, não tomaram elétrons do corpo nem cederam a ele.

Ao se cortar essa corrente, a distribuição dos íons se modifica e volta a seu estado inicial levando, para isto, um certo tempo, durante o qual existe uma polarização no corpo, atribuída aos efeitos observados (Figura III-10).

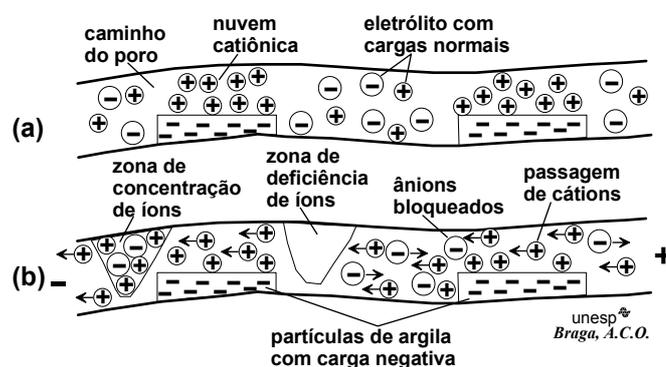


**Figura III-10 - Sobretensão de uma  
partícula metálica submersa em um  
eletrólito (Orellana, 1974).**

Este fenômeno pode ser utilizado, na prática, na prospecção de minerais metálicos condutores (condutibilidade eletrônica), os quais não precisam apresentar uma boa continuidade elétrica. O fenômeno IP é tão mais intenso quanto menor a continuidade elétrica entre os grãos minerais. As mineralizações finamente disseminadas em uma rocha fornecem respostas muito intensas e isto constitui a grande vantagem da polarização induzida com relação aos outros métodos geoeletricos, tais como, eletrorresistividade e eletromagnético.

b) Polarização de Membrana: este fenômeno ocorre em rochas carentes de substâncias metálicas, e é devido a uma diferença de mobilidade entre os ânions e cátions, produzida pela presença de minerais de argila (Figura III-11).

**Figura III-11 - Polarização de membrana. (a) meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico. (b) meio poroso após a aplicação de um campo elétrico (Ward, 1990).**



Tais minerais se carregam negativamente, atraindo uma "nuvem catiônica" que permite a passagem dos portadores positivos mas não dos negativos, exercendo o efeito de uma membrana. Assim, são produzidos gradientes de concentração, que levam um tempo a desaparecer depois de suprimida a tensão exterior, e que originam, portanto, uma sobretensão residual.

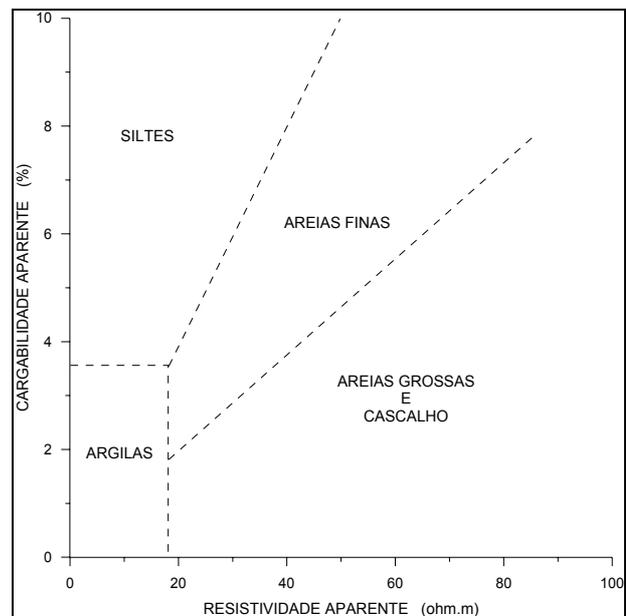
Sumi (1965), relata que a polarização induzida em minerais e rochas não metálicas seria causada principalmente pelo *potencial de membrana*, que aparece, se no eletrólito, contido nos poros dos materiais, a corrente elétrica circula através de uma membrana semipermeável (minerais de argila existentes na natureza). Isto ocorreria devido ao fato de que esta membrana seria permeável somente para cátions.

Segundo Sumi (*op.cit.*), os minerais polieletrólíticos reagiriam com os eletrólitos de tal maneira que a troca de íons na solução ocorreria entre eles mesmos. Minerais de argila possuiriam a propriedade de conservar certos ânions e cátions durante a troca, atuando portanto, como membranas semipermeáveis. Esta polarização da membrana atuaria também após o corte do campo elétrico aplicado, até que a concentração de equilíbrio fosse novamente obtida.

Vacquier et al. (1957), em seus estudos sobre a aplicabilidade da polarização induzida em aquíferos, chegaram a algumas conclusões interessantes, quais sejam: (1) em arenitos ou aluviões saturados com água, a polarização induzida aparece quando as superfícies da areia ou cascalho são parcialmente revestidas com uma película de argila; (2) areia quartzosa pura, saturada com água, não mostra quase nenhum efeito IP; (3) a magnitude da polarização induzida depende da resistividade da solução, da quantidade e espécie de argila, e do cátion que satura a argila; e, (4) geralmente, a polarizabilidade diminui com a diminuição da resistividade, então camadas de argilas e águas salgadas dão pequenos efeitos IP.

Para o entendimento das variações da resistividade e cargabilidade com a litologia dos materiais, pode-se utilizar o trabalho de Draskovits et al. (1990) - Figura III-12. Esses autores, após uma correlação geológica-geoelétrica, obtida através das técnicas de campo, da sondagem elétrica vertical e perfilagem elétrica IP-Resistividade, apresentaram as seguintes conclusões:

- (1) a resposta IP, em camadas com misturas de areias e argilas, é bem maior que a resposta em camadas argilosas puras;
- (2) argilas puras, apresentam baixa resistividade e baixa polarização;
- (3) camadas arenosas, apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária; e,
- (4) camadas silteosas, apresentam alta polarização e resistividade intermediária.



**Figura III-12 – Resistividade, cargabilidade e a litologia, (Draskovits et al., 1990).**

Existem na literatura, diversas proposições de parâmetros para expressar as observações da polarização induzida. No IP-Domínio do Tempo, a curva de descarga  $\Delta V_{IP} = f(t)$  é o objeto de estudo. Na Figura III-09, mostrada anteriormente, tem-se a forma da onda primária transmitida e a curva de descarga IP. A curva de descarga pode ser estudada em sua totalidade ou apenas amostrada em alguns intervalos de tempo.

O parâmetro medido em IP (Tempo) é chamado de cargabilidade (M) e pode ser expressa em % ou mV/V (Equação III-11), ou ainda ms, dependendo do equipamento utilizado.

$$M = \frac{\Delta V_{IP} \times 1000}{\Delta V_p} \quad (\text{mV/V}) \quad \text{III-11}$$

Como ocorre no método da eletroresistividade, se as medidas da polarização induzida são efetuadas sobre um terreno cujo subsolo é homogêneo, qualquer das magnitudes definidas acima podem ser utilizadas como medida de sua polarização verdadeira. Na prática, como o meio pode ser considerado heterogêneo, o parâmetro resultante das medidas, no IP-Domínio do Tempo, é denominado de *cargabilidade aparente* (*Ma*).

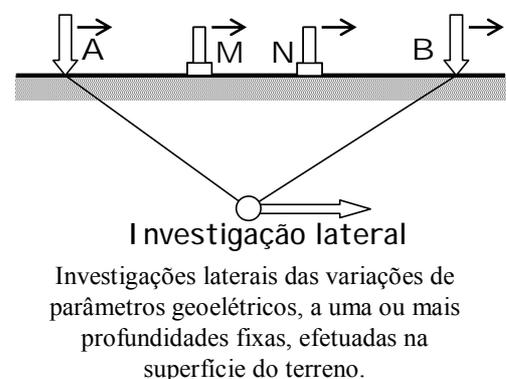
### 3.4. TÉCNICAS DE CAMPO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Como apresentado no sub-item 3.1., as técnicas de ensaios geofísicos dos métodos geoeletricos, podem ser de três tipos principais: *caminhamentos*, *perfilagens* e *sondagens*. A diferença básica entre essas técnicas, está no procedimento de campo para se obter o parâmetro físico a ser estudado, ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e a maneira de desenvolvimento dos trabalhos para se obter os dados de campo, ligada aos objetivos da pesquisa e geologia da área.

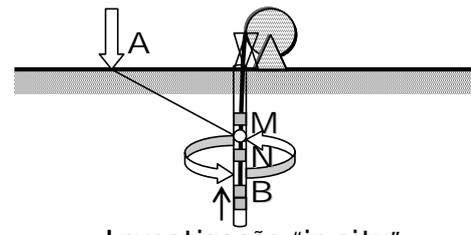
Esses três tipos de técnicas de prospecção pelos métodos geoeletricos amplamente utilizados, são ilustradas e definidos a seguir.

A técnica do *caminhamento elétrico* – CE, aplica-se principalmente, em situações cujos objetivos das pesquisas visam determinar discontinuidades laterais dos materiais geológicos em subsuperfície, tais como: diques e "sills", contatos geológicos, fraturamentos e/ou falhamentos, corpos mineralizados, etc..

Esta técnica pode ser empregada também em estudos ambientais, como determinar a posição do lençol freático e a direção do fluxo d'água subterrâneo (menor precisão que as SEV's), e mapear a plumas de contaminação no subsolo.



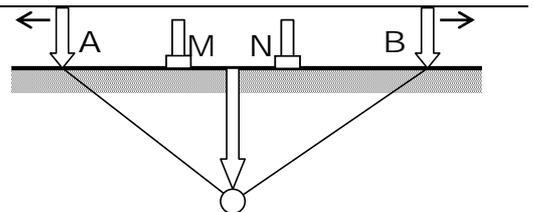
A *perfilagem elétrica* – PERF, é uma técnica utilizada e desenvolvida no interior de furos de sondagens mecânicas. Seus objetivos principais são os de estudar as variações de parâmetros físicos *in situ*. É aplicada na hidrogeologia e na prospecção de petróleo, como por exemplo, na determinação de níveis arenosos/argilosos, permeabilidades, etc.



#### Investigação "in situ"

Investigações laterais e em profundidade das variações de parâmetros geoeletricos, efetuadas no interior de furos de sondagens mecânicas.

A *sondagem elétrica* - SE, é empregada em situações cujos objetivos sejam investigar em profundidade os diferentes tipos e situações geológicas, determinando suas espessuras e resistividades e/ou cargabilidades, a partir de um ponto fixo na superfície de terreno.



#### Investigação em profundidade

Investigações das variações de parâmetros geoeletricos com a profundidade, efetuadas na superfície do terreno a partir de um ponto fixo.

Para se obter uma maior performance dessa técnica, as investigações devem ser efetuadas, preferencialmente, em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas em relação ao parâmetro físico estudado, e limitadas por planos paralelos à superfície do terreno - *meio estratificado*.

As sondagens elétricas podem ser simétricas ou dipolares. As simétricas são denominadas de *sondagens elétricas verticais* - SEV, enquanto que as dipolares, são denominadas de *sondagens elétricas dipolares* – SED (Orellana, 1972). Além de apresentar excelentes resultados, a SEV é uma das mais utilizadas no mundo inteiro, envolvendo estudos rasos aplicados à Geologia de Engenharia, Ambiental, Hidrogeologia, etc., como, pode ser utilizada também, para estudos profundos de cunho acadêmico ou aplicados à Geologia de Petróleo.

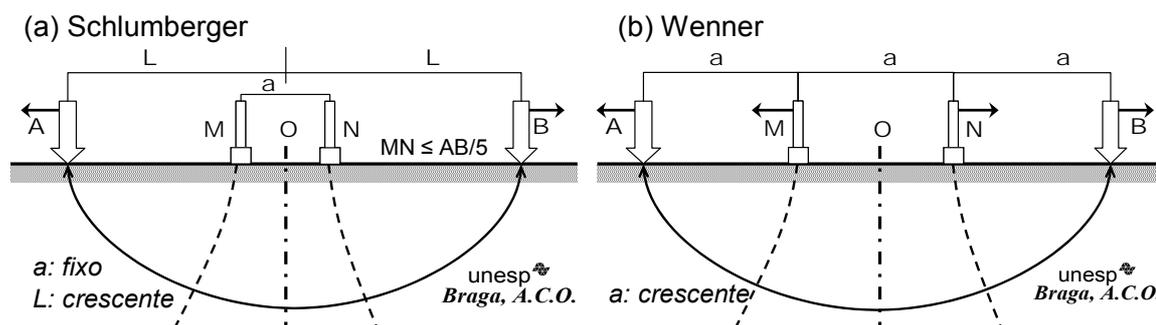
Essas técnicas de investigação do subsolo, apresentam maneiras de disposição dos eletrodos na superfície do terreno - *arranjos de campo* - variando em função dos objetivos do trabalho e de situações gerais de campo, tais como, topografia, ruídos artificiais indesejáveis, urbanização, etc.

### 3.4.1. Sondagem Elétrica Vertical - SEV

A técnica da sondagem elétrica consiste em uma sucessão de medidas de um parâmetro geoeletrico (resistividades e/ou cargabilidades aparentes), efetuadas, a partir da superfície do

terreno, mantendo-se uma separação crescente entre os eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial. Quando os eletrodos são alinhados na superfície do terreno de maneira simétrica, ou assimétrica com um eletrodo no “infinito”, e durante a sucessão de medidas, a direção do arranjo e o centro do dipolo de recepção de potencial permanecem fixos, tem-se a *sondagem elétrica vertical*.

Existem dois tipos principais de arranjos de campo para o desenvolvimento da técnica da SEV: **Schlumberger** e **Wenner** (Figura III-13). Enquanto que o primeiro, é utilizado na maioria dos países europeus, principalmente, França e Rússia e no Brasil, o segundo tipo é utilizado mais no Canadá, Estados Unidos e Inglaterra.



**Figura III-13 - Arranjo de campo Schlumberger - SEV.**

Apesar das diferenças entre estes dois tipos de arranjo, serem pequenas, o Schlumberger pode ser considerado superior, tanto em praticidade como em qualidade dos resultados (Tabela III-03), e é o adotado na maioria dos trabalhos desenvolvidos em nosso país.

**Tabela III-03. Diferenças práticas entre os arranjos Schlumberger e Wenner.**

Schlumberger	Wenner
- Mais prático no campo, é necessário o deslocamento de apenas dois eletrodos (AB);	- Menos prático no campo, é necessário o deslocamento dos quatro eletrodos (AMNB);
- As leituras estão menos sujeitas às interferências produzidas por <i>ruídos</i> indesejáveis; e,	- As leituras estão mais sujeitas às interferências produzidas por <i>ruídos</i> indesejáveis;
- Menos susceptível a erros interpretativos em terrenos não homogêneos.	- Mais susceptível a erros interpretativos devido a heterogeneidades laterais; e,
	- Ideal para medidas da resistividade e/ou resistência do solo para fins, por exemplo, de aterramento.

### Arranjo Schlumberger

A idéia básica deste arranjo (Figura III-13/a), é fazer com que a distância  $a$  que separa os eletrodos M e N se mantenha fixa e tenda a zero em relação à distância crescente de L

(entre AO e OB). O modelo geoeétrico final obtido, através da interpretação dos dados, é atribuído ao ponto central do arranjo.

As leituras, neste tipo de arranjo, estão menos sujeitas às variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais. Com isto as leituras de campo apresentam maior precisão, resultando numa interpretação mais próxima da realidade e coerente com os princípios gerais que norteiam a técnica da SEV.

Segundo Orellana (1972), o erro produzido por esse tipo de arranjo, que se reflete nos dados de campo, em função dos ajustes necessários nas equações gerais básicas, pode ser considerado insignificante, não se traduzindo em desvantagem. Nas medições de campo, pode-se adotar a norma sugerida pelo autor referido quanto à relação entre os eletrodos:  $MN \leq AB/5$ ; então, para  $MN = a$  e  $AB = 2L$ , demonstrou-se que para esta relação o erro nas leituras de campo seria de aproximadamente 4%.

No desenvolvimento de uma SEV – arranjo Schlumberger, ao introduzir, no subsolo, a corrente elétrica (I) por meio dos eletrodos A e B, resulta que entre os eletrodos M e N mede-se a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) criada. As medidas obtidas são utilizadas para o cálculo da resistividade aparente, utilizando-se as equações:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \text{ (ohm.m);} \quad \text{III-12} \qquad K = \frac{\pi \cdot (\overline{AM} \cdot \overline{AN})}{MN} \quad \text{III-13}$$

onde, K é um fator geométrico que depende do espaçamento AMNB utilizado. Durante o corte da corrente elétrica, o equipamento analisa e fornece o valor da cargabilidade aparente. Ao aumentar-se à distância entre os eletrodos de corrente AB, o volume total da subsuperfície incluída na medida também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas.

Os resultados sucessivos estarão, portanto, estritamente ligados com as variações da resistividade e/ou cargabilidade com a profundidade. A utilização de curvas logarítmicas, para representação e interpretação dos dados de campo, se dá por que, nestes tipos de curvas, as variações das estruturas geoeétricas representativas são realçadas, e, principalmente, reduzem os cálculos teóricos para o traçado das curvas-modelos, usadas na interpretação (Iakubovskii & Liajov, 1980; Kunetz, 1966; e, Orellana, 1972).

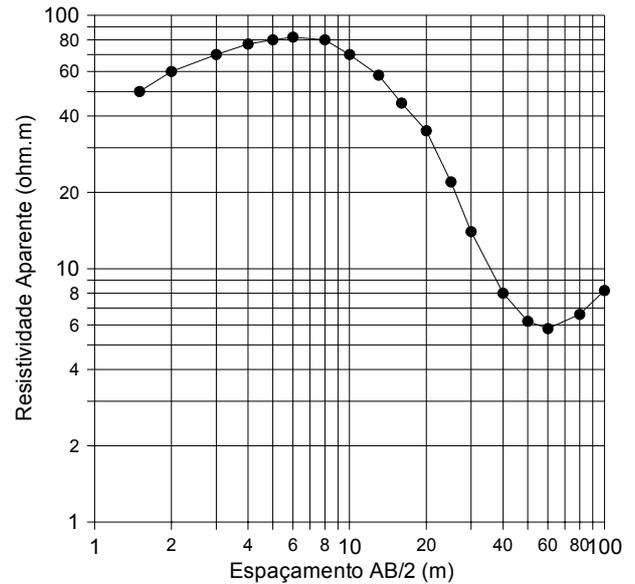
Os dados geoeletricos, assim obtidos, em cada SEV, são representados por meio de uma curva bilogartmica em função dos espaçamentos adotados entre os eletrodos correspondentes -  $AB/2$  (Figura III-14).

As interpretações das curvas de campo das SEV's, devem ser efetuadas considerando os fundamentos que regem a aplicação desta técnica, cuja utilização se dá em áreas nas quais a distribuição do parâmetro físico no subsolo corresponde, com razoável aproximação, ao modelo dos meios estratificados.

A finalidade da interpretação de uma SEV é, portanto, (1) determinar a distribuição espacial dos parâmetros físicos no subsolo, partindo dos dados das curvas de campo observados na superfície do terreno, e (2) buscar o significado geológico de tais parâmetros. Ambas as etapas não são de fácil execução, sendo que a primeira se baseia em leis físico-matemáticas, e a segunda depende fundamentalmente de correlações entre os dados físicos e geológicos, envolvendo muito a experiência do intérprete.

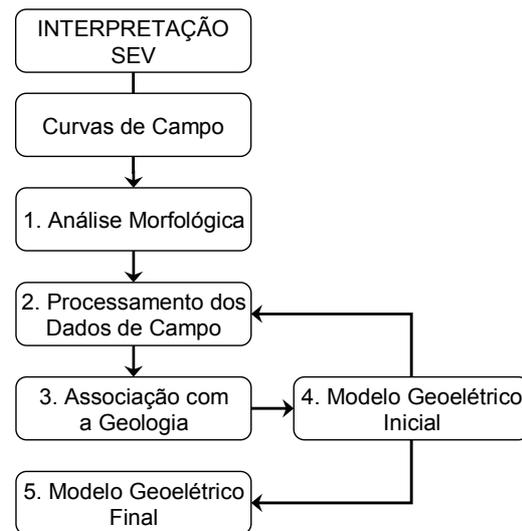
Os vários processos existentes na literatura para se cumprir a primeira etapa citada anteriormente, são denominados de *processamento dos dados de campo*, já que a "interpretação" inclui, também, a correlação entre os resultados de diferentes SEV's e a associação com a geologia das camadas geoeletricas e suas estruturas.

O modelo geoeletrico processado das SEV's, pode ser obtido por softwares adequados para computadores, tais como: IX1D versões 2 e 3 (Interpex Limited-USA), IPI2Win versão 3 – Resistivity sounding interpretation (Moscow State University). Esses softwares, além de apresentarem maior rapidez no processamento, trouxeram uma maior precisão nos modelos geoeletricos finais. A Figura III-15, ilustra as etapas necessárias na interpretação de uma SEV, onde após a *obtenção* das curvas de campo e *suavização* dos dados, tem-se:



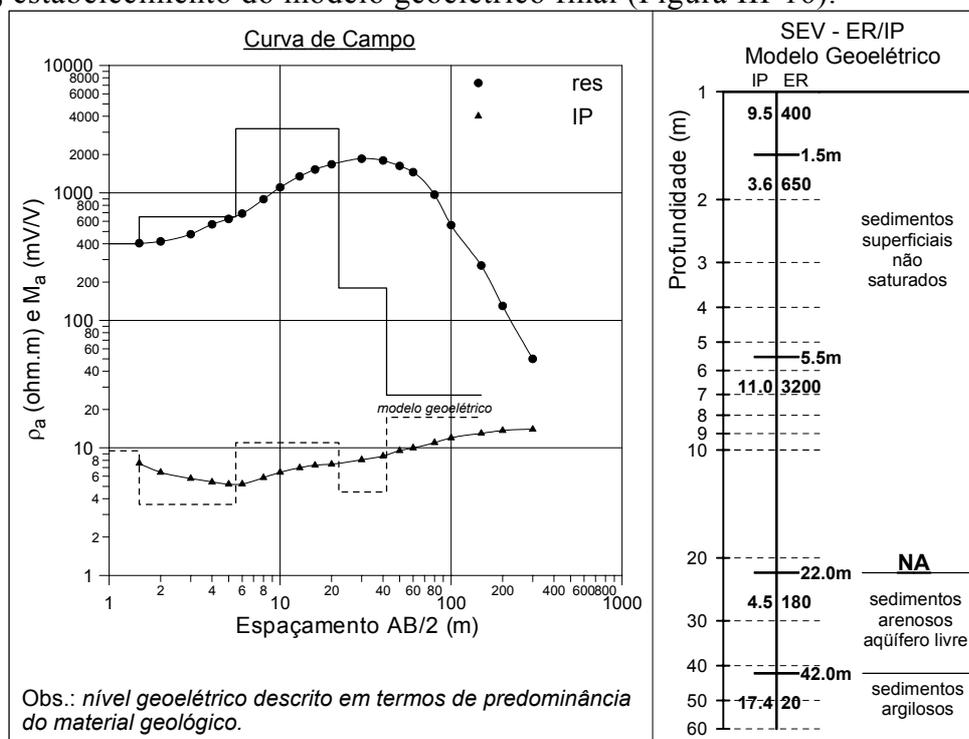
**Figura III-14 – Plotagem dos dados - SEV.**

- **etapa-1**, *análise* da morfologia das curvas de campo, procurando identificar as camadas geolétricas existentes, definindo um modelo de tipo de curvas. Esta etapa é efetuada analisando-se todas as SEV's em conjunto;
- **etapa-2**, processamento dos dados das curvas, em função do modelo do item anterior, utilizando-se de curvas preexistentes e/ou programas computacionais, obtendo as resistividades/cargabilidades e espessuras reais das camadas geolétricas;



**Figura III-15 – Etapas na interpretação - SEV.**

- **etapa-3**, *associação com a geologia*, envolvendo uma correlação dos modelos obtidos entre as SEV's e a geologia local, estabelecendo um *modelo geolétrico inicial* (**etapa-4**); se necessário, deve-se voltar a novo processamento dos dados de campo, procurando o melhor *ajuste* do modelo inicial com a geologia; e, finalmente,
- **etapa-5**, estabelecimento do modelo geolétrico final (Figura III-16).



**Figura III-16 – Interpretação de uma SEV-ER/IP – modelo geolétrico final.**

A *análise morfológica*, constitui-se em uma das etapas mais importante da interpretação das SEV's. É, nesta análise, que o intérprete define, de maneira qualitativa, o modelo geoeétrico da área estudada. Ela deve ser efetuada de maneira visual, com todas as SEV's em conjunto, procurando identificar as camadas geoeétricas e seus comportamentos em termos espaciais ao longo da área estudada, considerando, sempre, a geologia local.

Uma questão importante nas análises morfológicas das SEV's, diz respeito às variações das resistividades em subsuperfície, correspondendo às distribuições verticais das resistividades e/ou cargabilidades dentro de um volume determinado do subsolo. Estas variações podem ser classificadas segundo seu número de camadas geoeétricas, isto é: de uma (difícil na prática), duas, três, quatro camadas, etc. Em função do número de camadas identificadas e das variações de resistividades, as colunas geoeétricas podem ser dos tipos:

- duas camadas - a) ascendente:  $\rho_1 < \rho_2$ ; b) descendente:  $\rho_1 > \rho_2$ ;
- três camadas - a) K:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ; b) H:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ; c) A:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ; e, d) Q:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ ;
- quatro camadas - a) KH:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ ; b) QH:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ ; etc.

As etapas anteriores, relacionadas à interpretação dos dados de uma SEV, são importantes de serem destacadas, pois a definição do modelo final não é um simples ajuste das curvas de campo com modelos teóricos, efetuados, principalmente, por meio de programas existentes para computadores, sem levar em consideração uma análise dos dados com a geologia da área.

A interpretação puramente *automática* pode levar a erros graves na definição do modelo geoeétrico, resultando em uma descrença da técnica e até em prejuízos financeiros para os usuários. Na prática, já se comprovou inúmeros casos ocorridos em que, a interpretação efetuada de maneira inadequada, levou a resultados incompatíveis com a geologia da área; normalmente, atribuindo à *ineficiência* da técnica.

Cabe destacar as metodologias de processamento dos dados de campo antes do advento dos softwares existentes hoje em dia. Essas metodologias, apesar de trabalhosas e menos precisas, são extremamente didáticas e devem ser utilizadas pelos geofísicos interpretes iniciantes. Nessa linha tem-se o *método da superposição*, adotado pelos geofísicos franceses da escola Schlumberger, o qual consiste basicamente na comparação da curva de campo com curvas teóricas de catálogos existentes, até encontrar uma que coincida perfeitamente com a de campo.

Uma limitação desta metodologia diz respeito ao fato de que, apesar da utilização de escalas logarítmicas reduzirem os parâmetros da seção, a quantidade de casos possíveis leva à

necessidade de uma derivação deste método para outro denominado de *método do ponto auxiliar* (Koefoed, 1979a), entre os quais destaca-se o *método de Ebert*.

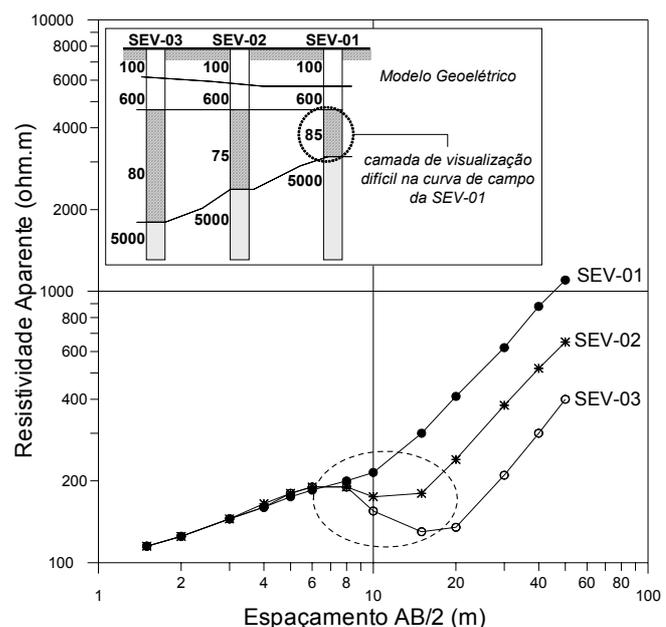
Segundo o autor referido, basicamente, o método de Ebert consiste em reduzir artificialmente o número de camadas da curva de campo, substituindo as duas primeiras por uma só equivalente a elas e assim sucessivamente, o que permite aplicar o método da superposição com uma coleção de curvas teóricas de duas ou três camadas para seções geoeletricas de várias camadas.

Zohdy (1965), apresenta uma relação importante entre o método do ponto auxiliar com os parâmetros de Dar Zarrouk, ilustrada graficamente, mostrando a utilidade destes parâmetros na interpretação das curvas de SEV. Considerações sobre a utilização desses métodos de interpretação e uma coleção de curvas teóricas podem ser encontradas nas obras de Orellana & Mooney (1966), Compagnie Générale de Géophysique (1963) e Rijkswaterstaat (1969).

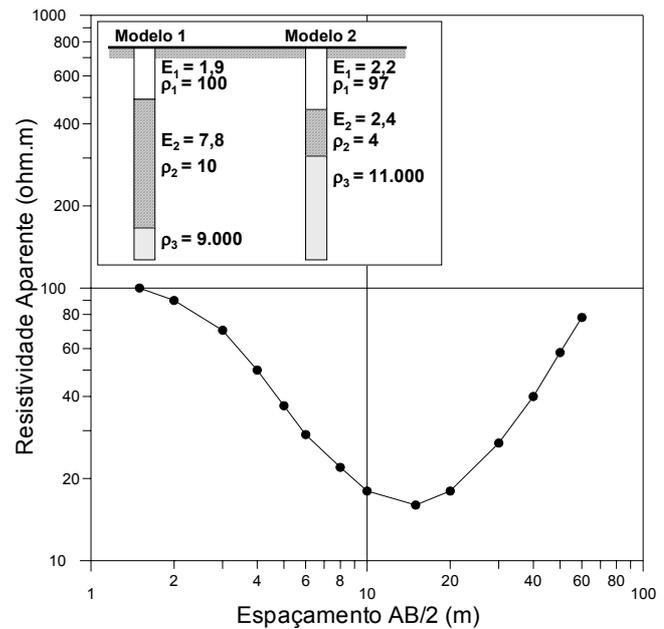
Entretanto, em qualquer método utilizado na interpretação das SEV's, uma das dificuldades que o intérprete dos dados encontra, diz respeito à ambigüidade na obtenção do modelo final, uma vez que as curvas de campo podem admitir muitas soluções. Entre estas, o intérprete têm que escolher, dentro das margens de variações possíveis, aquele conjunto de soluções que tenham maior probabilidade de representar a seqüência geológica real da área.

Nessa ambigüidade, dois efeitos são muito importantes e fundamentais na interpretação das SEV's:

(1) **Supressão de Camadas:** uma camada relativamente delgada, em relação à sua profundidade de ocorrência, cuja resistividade é intermediária entre às das camadas que a delimitam, pode influir muito pouco na curva de campo, tornando-se difícil sua visualização.



(2) **Equivalência:** baseado no fato de que diferentes seções geoeletricas podem corresponder a curvas de campo iguais ou muito semelhantes entre si, resultantes das relações entre as espessuras e resistividades das camadas existentes.



Koefoed (1979a), Kunetz (1966), Queiroz & Rijo (1995), Orellana (1972) e Souza & Rijo (1995), discutem de forma detalhada esses efeitos mencionados, mostrando suas conseqüências teóricas e práticas. Rigoti & Crossley (1987), apresentam um estudo procurando reduzir essa ambigüidade na interpretação geofísica usando vários parâmetros simultâneos na interpretação, tais como resistividade-DC, cargabilidade domínio-tempo e dados magnetotelúricos.

Cabe destacar, que ao utilizar os dados de resistividade e cargabilidade em conjunto, têm-se enormes vantagens sobre apenas a resistividade, pois no subsolo, podem ocorrer camadas com respostas "IP" que não necessariamente correspondam a camadas de resistividade, podendo ser identificadas.

Entretanto, para reduzir as ambigüidades, são fundamentais, a qualidade dos dados de campo, o conhecimento geológico da área estudada, a familiaridade do intérprete com os princípios teóricos básicos do método e técnica utilizados, bem como sua experiência. Deve-se ressaltar que, em ensaios geofísicos pela técnica da sondagem elétrica vertical, é importante, tanto na interpretação dos dados obtidos, como na redução das ambigüidades do modelo geoeletrico final, a execução de algumas SEV's de *calibração*, tal como ensaios executados junto a furos de sondagens mecânicas que contenham descrições geológicas confiáveis, visando obter uma perfeita modelagem dos dados de campo com os dados geológicos.

Cabe ressaltar ainda que, o modelo geoeletrico final reflete variações do parâmetro físico obtido com a profundidade, a partir de investigações efetuadas na superfície do terreno, de forma indireta, estando sujeito a imprecisões de acordo com a teoria da

metodologia geofísica desenvolvida. Segundo Orellana (1972), o erro do modelo final, em condições normais de trabalho, pode ser tomado como 10%.

Como referência, podem-se destacar alguns trabalhos pioneiros que discutem os métodos interpretativos de uma SEV e suas ambigüidades, quais sejam: Bhattacharya & Patra (1968), Kunetz & Rocroi (1970), Mooney & Wetzel (1956), Oldenburg & Li (1994), Seara & Conaway (1980) e Zohdy (1968 e 1974).

As SEV's – ER/Schlumberger, apresentam como vantagens principais, a característica de permitir um recobrimento de extensas áreas, de maneira rápida, precisão satisfatória, custos relativamente reduzidos e de efetuar investigações rasas até profundas, a partir da superfície do terreno, sem alterar as condições e estados naturais dos materiais em superfície e subsuperfície, o que pode ocorrer com as perfurações de poços tubulares.

Em relação a outros métodos geofísicos, outra vantagem da SEV, diz respeito a sua pouca sensibilidade a “ruídos” provocados, por exemplo, por instalações elétricas, cabos de alta tensão, etc., pois a gama de leitura dos potenciais primários gerados, normalmente são superiores a esses ruídos. Ressaltam-se, principalmente, trabalhos efetuados no interior de refinarias de combustíveis, onde o elevado nível de “ruídos”, inviabiliza a maioria dos métodos/técnica geofísicos; sendo a SEV-ER, perfeitamente capaz de ser executada. O que já não ocorre com o método da polarização induzida.

Outros métodos/técnicas geofísicos podem apresentar limitações nas profundidades de investigação. Tais limitações práticas podem ser do tipo: camadas resistivas (refrator) – sísmica de refração ou camadas muito condutivas – GPR; as quais podem limitar as investigações dessas metodologias. Isso já não ocorre na SEV-ER, onde, independentemente da seqüência estratigráfica, pode alcançar grandes profundidades. Cabe ressaltar ainda, que normalmente os custos dos equipamentos geofísicos de eletrorresistividade - eletrorresistímetro, são considerados os mais baixos no mercado, possibilitando mais facilmente suas aquisições.

Como limitações impostas a essa metodologia, podem-se destacar os efeitos produzidos nos dados de campo por situações, tais como: presença de tubulações; cabos de alta tensão; vazios no solo resultante de formigueiros, cupins ou erosões internas; fugas de corrente no circuito AB; etc.; os quais podem ser significativos se localizados próximos dos eletrodos de potenciais MN. Outra limitação prática das SEV's, diz respeito aos espaços disponíveis para o desenvolvimento do arranjo AB, onde, dependendo dos locais de ensaios, não se permite atingir um espaçamento necessário conforme os objetivos programados.

Na etapa de processamento dos dados, podem-se destacar, principalmente, os fenômenos da ambigüidade (destacados anteriormente) e a precisão e qualidade dos softwares utilizados. A disponibilidade de dados geológicos dos locais estudados, são fatores de extrema importância. Entretanto, as limitações citadas podem ser minimizadas e/ou eliminadas desde de que todos os cuidados recomendados na execução das SEV's sejam observados e seguidos com rigor.

### **3.4.2. Caminhamento Elétrico - CE**

A técnica do caminhamento elétrico (CE) se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoelétrico (resistividade e/ou cargabilidade), obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas.

Os resultados obtidos se relacionam entre si através de mapas (a uma ou mais profundidades determinadas), ou de seções (com várias profundidades de investigação - vários níveis de investigação). No desenvolvimento desta técnica, existem vários tipos de arranjo possíveis de serem utilizados, tais como: dipolo-dipolo, polo-dipolo, gradiente, Schlumberger, Wenner, etc.. Na presente pesquisa, discute-se o arranjo dipolo-dipolo.

#### **Arranjo Dipolo-Dipolo**

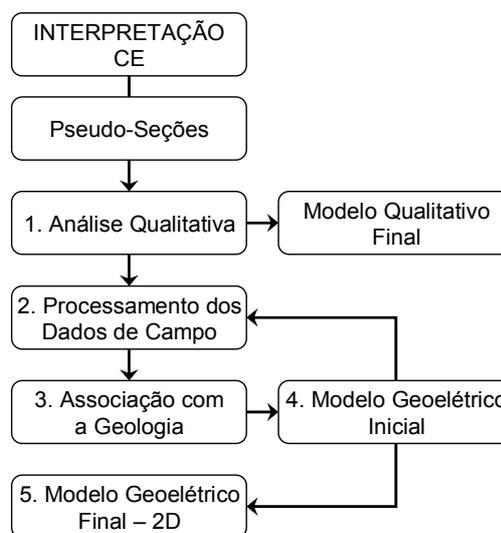
No desenvolvimento desse arranjo de campo, podem-se utilizar simultaneamente vários dipolos de recepção (MN) dispostos ao longo da linha a ser levantada (Figura III-17). Cada dipolo MN corresponde a um nível de investigação, podendo, dependendo do caráter do trabalho, estudar as variações horizontais de um parâmetro geoelétrico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigações.

Nesse tipo de arranjo a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, é tomada, segundo alguns autores, como sendo  $Z = R/2$  (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada como sendo aproximadamente  $R/4$ .



através de mapas de isovalores. A Figura III-18, ilustra as etapas necessárias na interpretação de um CE, onde após a *obtenção* dos dados de campo e *plotagem das pseudo-seções*, tem-se:

- **etapa-1**, *análise qualitativa* das variações do parâmetro físico obtido, considerando-se o sistema de plotagem de 45° graus e a posição dos dipolos – podendo-se definir o *modelo qualitativo final*;
- **etapa-2**, *processamento dos dados*, através de programas computacionais, obtendo as resistividades e/ou cargabilidades e espessuras reais das camadas geoeletricas – 2D;



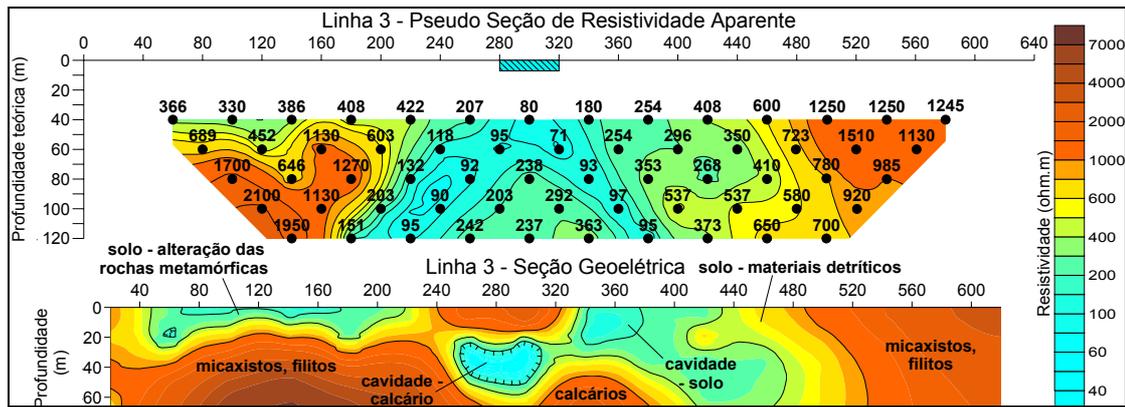
**Figura III-18 – Etapas na interpretação - CE.**

- **etapas-3, 4 e 5**, associação com a geologia e definição do *modelo geoeletrico final*.

As pseudo-seções do CE-DD podem ser processadas (quantificadas) através da inversão 2D dos dados de campo por softwares adequados, tais como: Res2dinv V. 3.5 - 2D e Res3dinv V. 2.15 – 3D Resistivity and IP Inversion (Geotomo Software – Malaysia); RESIX-IPDI V. 3.04 - 2-D Resistivity and IP Forward and Inverse Modeling (Interpex - USA); e, DC Resistivity 2.5d – forward modelling and inversion software versão 1.0 (Zond - Rússia). Dessa maneira, pode-se obter uma seção geoeletrica real.

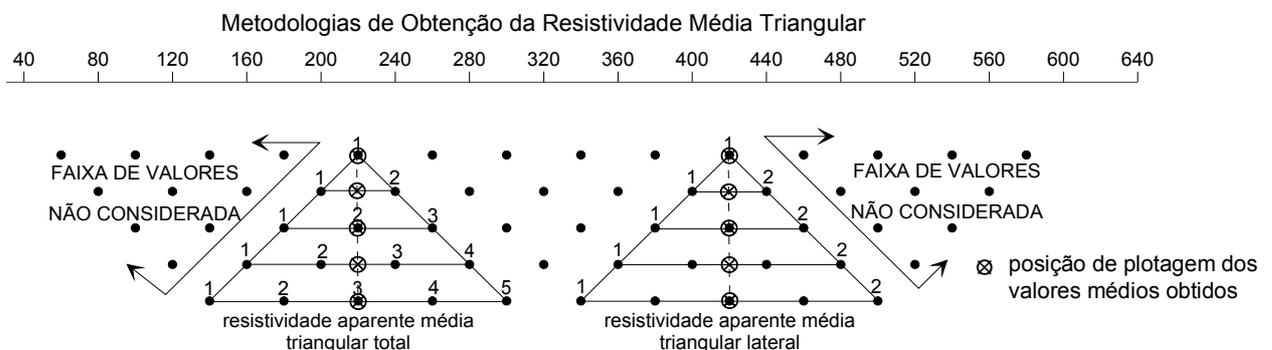
A Figura III-19 ilustra as etapas descritas anteriormente na interpretação de uma pseudo-seção, desde a plotagem, análise qualitativa e inversão dos dados de campo, resultando na seção geoeletrica. Normalmente, as anomalias resultantes de corpos ou estruturas geológicas refletem dois flancos anômalos nas pseudo-seções, um em função dos eletrodos de potenciais e outro em função dos eletrodos de corrente. A intensidade desses flancos varia em função da geologia local.

Essa Figura, mostra uma anomalia condutora, associada a falhamento, posicionada na superfície do terreno (barra azul). Pode-se observar que, o flanco anômalo à esquerda é resultante da passagem dos eletrodos de potencial sobre a falha (anomalia de potencial) e que o flanco anômalo à direita é resultante da passagem dos eletrodos de corrente (anomalia de corrente). Na seção geoeletrica, as anomalias condutoras são posicionadas com maior precisão, sendo a principal, localizada entre as E-260-300, com extensão para a direita (E-440).



**Figura III-19 – Interpretação do CE – Dipolo-Dipolo (software Res2dinv).**

Visando determinar com maior precisão a posição na superfície do terreno das anomalias qualitativas identificadas, as pseudo-seções podem ser filtradas, procurando “eliminar” os flancos resultantes. Uma das maneiras consiste no sistema de plotagem denominado médias dos triângulos. As médias triangulares podem ser obtidas de duas maneiras (Figura III-20): *médias triangulares totais* - consiste em obter as médias de todos os valores incluídos no triângulo, considerando os níveis investigados; e, *médias triangulares laterais* - consiste das médias dos valores externos do triângulo. Nos dois sistemas, os valores médios são plotados no centro do triângulo, na vertical.



**Figura III-20 – Sistema de plotagem pelas médias triangulares – CE/Dipolo-Dipolo.**

### 3.5. PARÂMETROS E FUNÇÕES DE DAR ZARROUK

Nas discussões teóricas sobre os meios condutores estratificados, determinados parâmetros têm fundamental importância na interpretação e entendimento do modelo geoeletrico para uma determinada situação geológica em profundidade. Tais parâmetros resultam de uma combinação, por meio de multiplicação ou divisão, da espessura e resistividade de cada camada geoeletrica obtida no modelo.

Como citado em Henriot (1975), Koefoed (1979a), Orellana (1963 e 1972) e Zohdy (1965 e 1975), a importância desses parâmetros foi relatada pela primeira vez por Maillet (1947), em trabalho, considerado por Orellana (1972), como decisivo para a teoria dos

métodos geométricos. Neste trabalho Maillet propôs para os novos parâmetros a denominação de *parâmetros de Dar Zarrouk - DZ*.

Considerando-se uma seção geométrica, como a indicada na Figura III-21, a corrente elétrica ao fluir no subsolo pode tomar dois caminhos preferenciais: um perpendicular e outro paralelo à estratificação. No *fluxo perpendicular* à estratificação as diferentes camadas comportam-se como condutores em série cujas resistências se somam.

Portanto, a resistência de uma camada  $i$ , sendo  $L$  seu comprimento e  $S$  sua seção transversal, será dada por:

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{E_i}{1 \times 1} = \rho_i E_i \quad \text{III-15}$$

Este produto é denominado de **resistência transversal unitária "T"**, resultando, portanto:

$$T_i = \rho_i E_i \quad \text{III-16}$$

As dimensões de T são as de uma resistividade por uma longitude e sua unidade é ohm.m<sup>2</sup>.

No *fluxo de corrente paralelo* à estratificação, a resistência da camada  $i$  será:

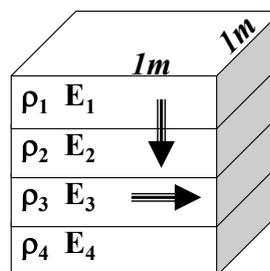
$$R'_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{1}{E_i \times 1} = \frac{\rho_i}{E_i} \quad \text{III-18}$$

Assim estas resistências não podem ser somadas, por estarem em paralelo, portanto é conveniente passar às suas inversas - as *condutâncias*, já que estas possuem a propriedade aditiva.

Ao denominar de  $S_i$ , a condutância da camada  $i$ , tem-se a **condutância longitudinal unitária "S"**, ou seja:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad \text{III-19}$$

As dimensões de S são as de uma condutância, medida em siemens (ou mhos).



**Figura III-21 – Parâmetros de DZ.**

O conjunto das  $n$  primeiras camadas, corresponderá à resistência total:

$$T_i = \sum_i \rho_i E_i \quad \text{III-17}$$

Cujo conjunto das  $n$  primeiras camadas da seção dará uma condutância total:

$$S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \quad \text{III-20}$$

\* Nas dimensões dessa magnitude, deve-se considerar que a seção transversal não influi, já que por definição, é igual à unidade de superfície em qualquer sistema de unidades (Orellana, 1972).

Os parâmetros T e S representam as componentes vertical e horizontal da resistência. Como em geral, a direção da corrente no subsolo é oblíqua, tem-se que considerar ambas magnitudes. Pode-se portanto, introduzir um novo conceito em função desses parâmetros, ou seja, a *resistividade transversal* -  $\rho_T$ , e a *resistividade longitudinal* -  $\rho_L$ .

Considerando-se a Figura III-22 como um pacote homogêneo de uma camada com espessura  $E$ , de modo que  $T$  e  $S$  sejam iguais para todo o conjunto, e a partir das Equações III-16 e III-19, tem-se que:

$$T = \rho_T E \quad \text{III-21} \qquad S = \frac{E}{\rho_L} \quad \text{III-22}$$

Dadas essas equações, Orellana (1972) concluiu em sua obra, que um pacote de camadas homogêneas e isotrópicas se comportam, de certa maneira, como um meio anisótropo, este fenômeno foi denominado por Mailliet de *pseudo-anisotropia* \*.

As deduções de Orellana (*op.cit.*) podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

- a pseudo-anisotropia  $A$  pode ser expressa numericamente a partir de:
- e, definindo uma resistividade média  $\rho_m$ , tal que:

$$A = \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_L}} \quad \text{III-23} \qquad \rho_m = \sqrt{\rho_T \rho_L} \quad \text{III-24}$$

Das equações anteriores, resultam:

$$\rho_T = A \rho_m \quad \text{III-25} \qquad \rho_L = \frac{\rho_m}{A} \quad \text{III-26}$$

Como foi demonstrado por Koefoed (1979a), Orellana (*op.cit.*) e Zohdy (1975), os parâmetros T e S podem ser calculados, não só para camadas individualizadas, mas também para profundidades intermediárias.

Ao multiplicar-se por  $E$  as Equações III-25 e 26, e considerando as III-21 e III-22, tem-se portanto:

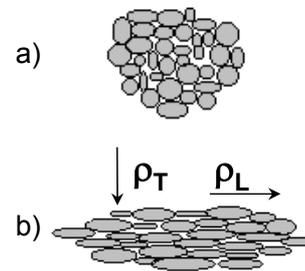
$$A_z = \sqrt{\sum T \cdot \sum S} \quad \text{III-27} \qquad \rho_m = \sqrt{\frac{\sum T}{\sum S}} \quad \text{III-28}$$

Então, dado uma seção geométrica, é possível calcular os valores de T e S que correspondem a cada profundidade  $z$ , e a partir destes, por meio das Equações III-27 e III-28, a *pseudopropriedade* (ou profundidade DZ)  $A_z$  e a *resistividade média* (ou resistividade DZ)  $\rho_m$  correspondente a cada  $z$ .

\* Denominação utilizada para diferenciar das anisotropias usuais.

A Figura III-22 ilustra, de um modo geral, a relação entre as resistividades em função da litologia de solos e rochas, sem considerar as profundidades dos materiais em subsuperfície:

- Figura III-22a: o esqueleto mineral e poros da rocha, estão orientados desordenadamente (materiais arenosos), como conseqüência, a resistividade da rocha será a "mesma" em qualquer direção.
- Figura III-22b: mostra o esqueleto mineral e poros com formas alongadas, orientadas (materiais argilosos), sendo a resistividade transversal ( $\rho_T$ ) maior que a resistividade longitudinal ( $\rho_L$ ).



**Figura III-22 - Relação da resistividade de uma rocha com sua estrutura mineral (Iakubovskii & Liajov, 1980).**

A diferença entre estas resistividades, é a pseudo-anisotropia "A". Portanto, as resistividades obtidas, refletem as resistividades longitudinais (Iakubovskii & Liajov, 1980).

A combinação das resistividades e espessuras das camadas geolétricas, resultando nos parâmetros e curvas de Dar Zarrouk, têm grande importância na teoria e interpretação de um modelo geolétrico obtido pelas curvas de resistividades aparentes de uma SEV.

Esses parâmetros, além de auxiliarem na definição do modelo final, podem ser utilizados em outras questões práticas, como bem demonstrou Henriet (1975), cujo trabalho trata da utilização dos parâmetros de Dar Zarrouk em estudos hidrogeológicos. O parâmetro T, pode ser empregado na avaliação de propriedades hidrogeológicas de aquíferos, tal como a transmissividade; e o parâmetro S da camada sobrejacente, em estudos sobre a proteção de aquíferos frente a poluentes.

As Figuras III-23 e III-24, apresentam as relações dos parâmetros, respectivamente, resistência transversal unitária e condutância longitudinal unitária, com as resistividades e espessuras, em função da litologia.

Na correlação com a transmissividade de aquíferos (Figura III-23), como sugestão, pode-se adotar os valores de  $T \geq 500 \text{ ohm.m}^2$  (mínimo de  $T > 250,0 \text{ ohm.m}^2$ ), como sendo adequados em termos de potencial aquífero.

Na correlação com a proteção de aquíferos frente a contaminantes (Figura III-24), recomenda-se os valores de  $S \geq 1,0 \text{ siemens}$  (mínimo de  $S > 0,3$ ) para as camadas sobrejacentes, como os adequados.

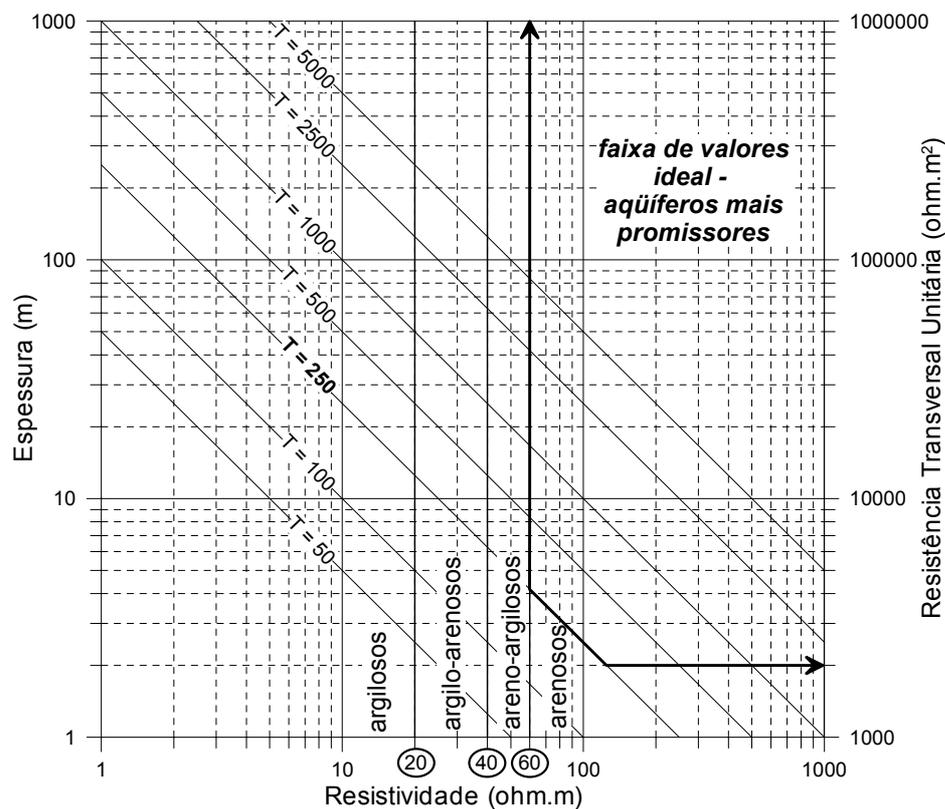


Figura III-23 – Relação resistência transversal unitária/transmissividade.

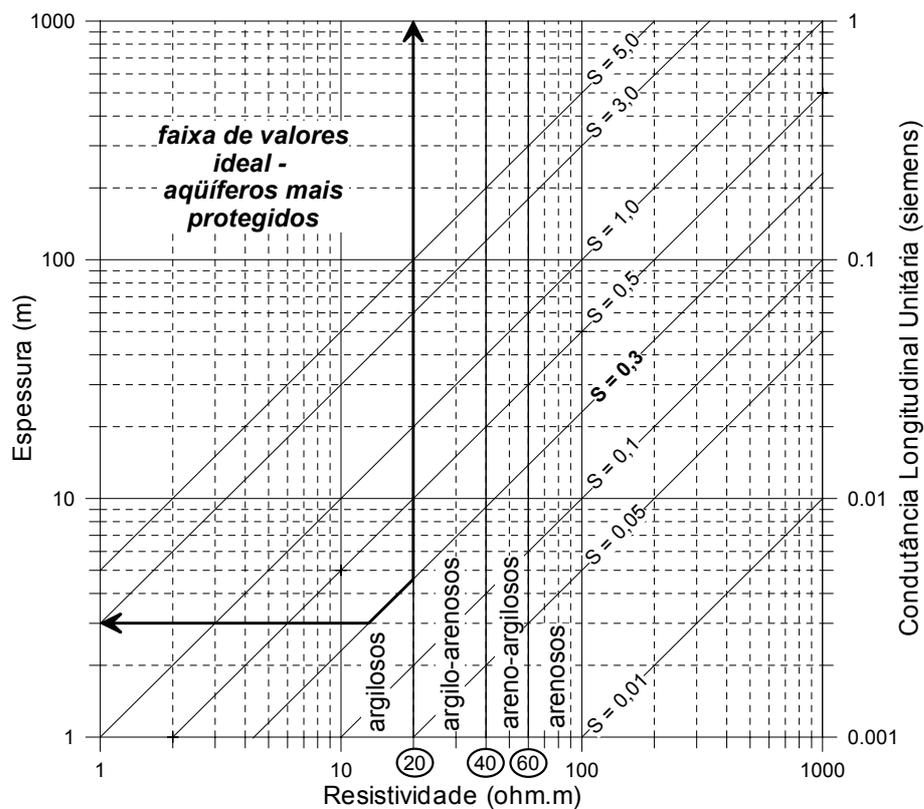


Figura III-24 – Relação condutância longitudinal unitária/proteção do aquífero.

A Figura III-25 ilustra as aplicações comentadas anteriormente, para uma seção geolétrica. Para a camada aquífera, observa-se um aumento da resistividade no sentido da

SEV-04, conseqüentemente, pode-se assumir um aumento da condutividade hidráulica. Com o aumento da resistividade e espessura da camada nesse sentido, tem-se um aumento da resistência transversal unitária, conseqüentemente, assume-se um aumento da transmissividade. Para a camada sobrejacente ao aquífero, os valores de  $S > 1,0$  indicam locais de maior proteção frente a contaminantes.

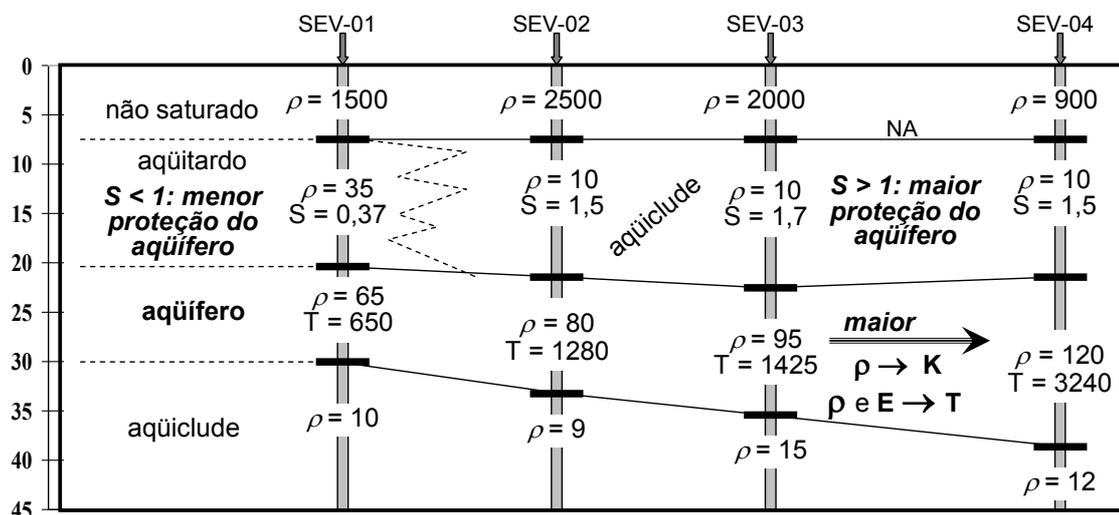


Figura III-25 – Relação condutância longitudinal unitária/proteção do aquífero.

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGIA GEOELÉTRICA APLICADA NA HIDROGEOLOGIA**

### **4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A técnica da SEV–ER, tem sido ao longo dos anos, importante instrumento de apoio em estudos aplicados à Hidrogeologia, tendo como aplicação principal, investigações de aquíferos aluvionares (sedimentos inconsolidados) e aquíferos sedimentares (rochas sedimentares), visando à locação de poços tubulares para a captação de águas subterrâneas.

Em áreas de rochas calcárias e cristalinas (rochas ígneas e metamórficas), envolvendo a identificação de aquíferos, respectivamente, cársticos e fraturados, a técnica da SEV não apresenta resultados satisfatórios. A técnica do CE–ER/IP (dipolo-dipolo), inicialmente muito empregada na prospecção mineral, com o passar dos anos, foi sendo utilizada com mais frequência em estudos referentes a esses aquíferos.

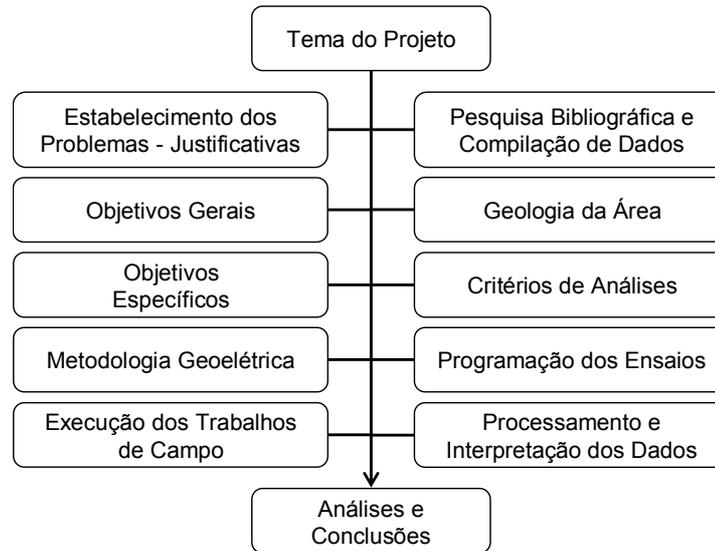
Em estudos ambientais, envolvendo a contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas, as técnicas da SEV e CE, em conjunto, tem sido utilizadas com grande sucesso, tanto no que se refere à precisão dos resultados obtidos, quanto aos custos e prazos relativamente reduzidos, resultando em um excelente apoio em nesses tipos de estudos. O método da polarização induzida, tem sido utilizado nessas questões, juntamente com a eletrorresistividade, ainda de maneira insatisfatória. Entretanto, a contribuição desse parâmetro físico (cargabilidade), é significativa, auxiliando a interpretação da resistividade, principalmente, quando se tem ocorrência de minerais argilosos.

Uma questão que merece destaque, na aplicação, não só dos métodos geoeletricos, mas da Geofísica como um todo, diz respeito à divergência, dos resultados obtidos em um levantamento geofísico, com dados geológicos de sondagens mecânicas. A primeira vista, a Geofísica é sempre questionada quanto à sua “eficácia”, “não funciona”, é o comum de se constatar, infelizmente. Antes de qualquer conclusão precipitada, estando seguro sobre a correta metodologia geofísica utilizada, devem-se, além de rever as interpretações, rever a geologia local, principalmente se os dados geológicos existentes são incompletos e pouco esclarecedores.

### **4.2. METODOLOGIA GEOELÉTRICA ADEQUADA**

No estabelecimento de uma programação de uma campanha pelos métodos geoeletricos, a estratégia metodológica adotada é importante para se atingir com sucesso, os objetivos

propostos. A Fig. IV-01, apresenta uma seqüência de etapas mínimas de um projeto de desenvolvimento, que se aplica de um modo geral a toda Geofísica.



**Figura IV-01 – Etapas de uma campanha geoeletrica aplicada à hidrogeologia.**

Após o estabelecimento do tema do projeto com os objetivos gerais, a compilação de dados pré-existentis é importante, pois além de fornecer *dados geológicos* sobre a área a ser estudada, pode informar sobre suas condições gerais, tais como, topografia, acidentes naturais, etc.. Essas características, dependendo das condições, podem inviabilizar uma determinada metodologia geoeletrica.

Portanto, para melhor entendimento e utilização dos métodos geoeletricos na hidrogeologia, envolvendo a definição da metodologia mais adequada, e posterior processamento dos dados, interpretação e obtenção de seus produtos finais, deve-se considerar, inicialmente, os objetivos gerais e a geologia local, ou seja:

Objetivos Gerais	Geologia Local
- <i>captação de água subterrânea</i> – para fins de abastecimento, agricultura, industria, lazer;	- <i>sedimentos inconsolidados</i> – aquíferos granulares (ex. aluvião, coluvião);
- <i>contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas</i> - envolvendo as fases de investigação preventiva, confirmatória e de remediação, e monitoramento.	- <i>rochas sedimentares</i> – aquíferos granulares e cársticos (ex. arenito, calcário);
	- <i>rochas cristalinas</i> – aquíferos fraturados (ex. granito, gnaisse).

A partir dos objetivos gerais e das características geológicas da área de interesse, podem-se definir os *objetivos específicos* da pesquisa, tais como: identificação litológica, identificação de aquíferos sedimentares ou fraturados, elaborar mapas potenciométricos, etc..

Portanto, em função dos objetivos gerais do projeto, geologia local e objetivos específicos (considerando a classificação geoeétrica proposta - Capítulo 3), define-se a **metodologia geoeétrica adequada** a ser utilizada. A partir desse estabelecimento metodológico, podem-se obter produtos finais com segurança e sucesso, visando atingir os objetivos propostos do trabalho.

#### 4.2.1. Objetivos Gerais e Geologia Local

Quando o projeto visa à **captação** de águas subterrâneas, deve-se considerar a geologia local: *sedimentos inconsolidados* (aqüíferos tipo granular; podendo, dependendo da situação geológica, ser denominado de aqüíferos aluvionares), *rochas sedimentares* (aqüíferos granulares ou cársticos) ou *rochas cristalinas* (aqüíferos fraturados).

No caso de sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, a utilização dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, em conjunto, leva a uma caracterização litológica mais consistente, servindo para identificar sedimentos arenosos, argilosos e areno-argilosos e/ou argilo-arenosos. Em rochas cristalinas, a cargabilidade pode indicar a presença de materiais argilosos preenchendo as fraturas.

Quando o trabalho envolve **estudos ambientais**, visando um diagnóstico de solos, rochas e águas subterrâneas frente a prováveis contaminantes, deve-se ressaltar que os parâmetros geoeétricos determinados, refletem o meio investigado, ou seja, solos e rochas saturados, incluindo as águas subterrâneas, ou não saturados. Nesses estudos deve-se considerar, inicialmente, além da geologia, a fase do empreendimento, por exemplo, se o aterro, indústria, refinaria de combustíveis, etc., já existem (*pós-empreendimento*) ou se estão em fase de implantação (*pré-empreendimento*).

Na fase **pré-empreendimento** – investigação preventiva, os métodos geoeétricos auxiliam na caracterização da geologia, determinação do nível d'água e elaboração de mapas potenciométricos, e ainda caracterizando a área quanto ao grau de proteção de determinada camada geológica frente a contaminantes.

Na fase **pós-empreendimento**, envolvendo investigação confirmatória, de remediação e monitoramento, deve-se considerar a provável ocorrência de plumas de contaminação. Nesse caso, os métodos geoeétricos podem delimitar eventuais plumas, tanto lateralmente como em profundidade, auxiliando a locação de poços de monitoramento, e orientando a instalação desses poços, quanto a eventuais riscos de perfuração de tanques enterrados contendo resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas. Pode-se estimar, ainda, através da Geofísica, áreas e volumes para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados.

Outro condicionante a ser considerado nesses estudos ambientais, refere-se, como na captação, à geologia local: sedimentos inconsolidados (porosidade granular), rochas sedimentares (porosidade granular ou cárstica) ou rochas cristalinas (porosidade de fratura). Como a metodologia geométrica utilizada é a mesma, e para facilitar as discussões, os sedimentos inconsolidados são incorporados nas discussões das rochas sedimentares.

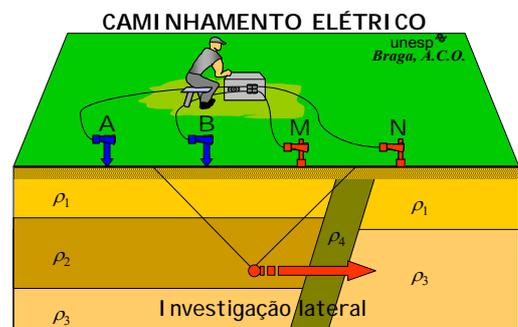
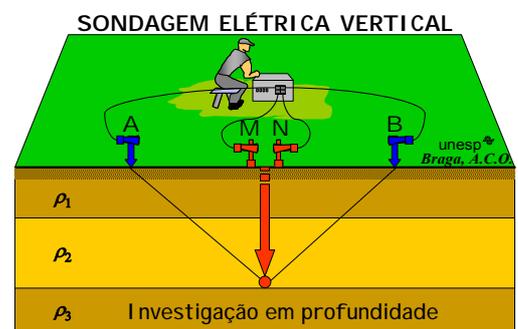
De um modo geral, nos estudos visando a captação de águas subterrâneas e ambientais em sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, envolvendo aquíferos granulares, deve-se recorrer a técnicas, cujos princípios teóricos se baseiam em situações semelhantes a modelos geológicos do meio estratigráfico – *bacias sedimentares*, cujas camadas devem ocorrer, aproximadamente, plano paralelas à superfície do terreno.

A técnica a ser utilizada, deve ser desenvolvida a partir da *superfície do terreno*; com os espaçamentos entre os eletrodos A-B *crescentes*; sendo o levantamento pontual, estudando as *variações verticais* do parâmetro físico medido, e conseqüentemente, o *centro* do arranjo AMNB, *deverá permanecer fixo* durante todo o

desenvolvimento do ensaio. Todas as condições citadas, definem a técnica da **sondagem elétrica vertical – arranjo Schlumberger**.

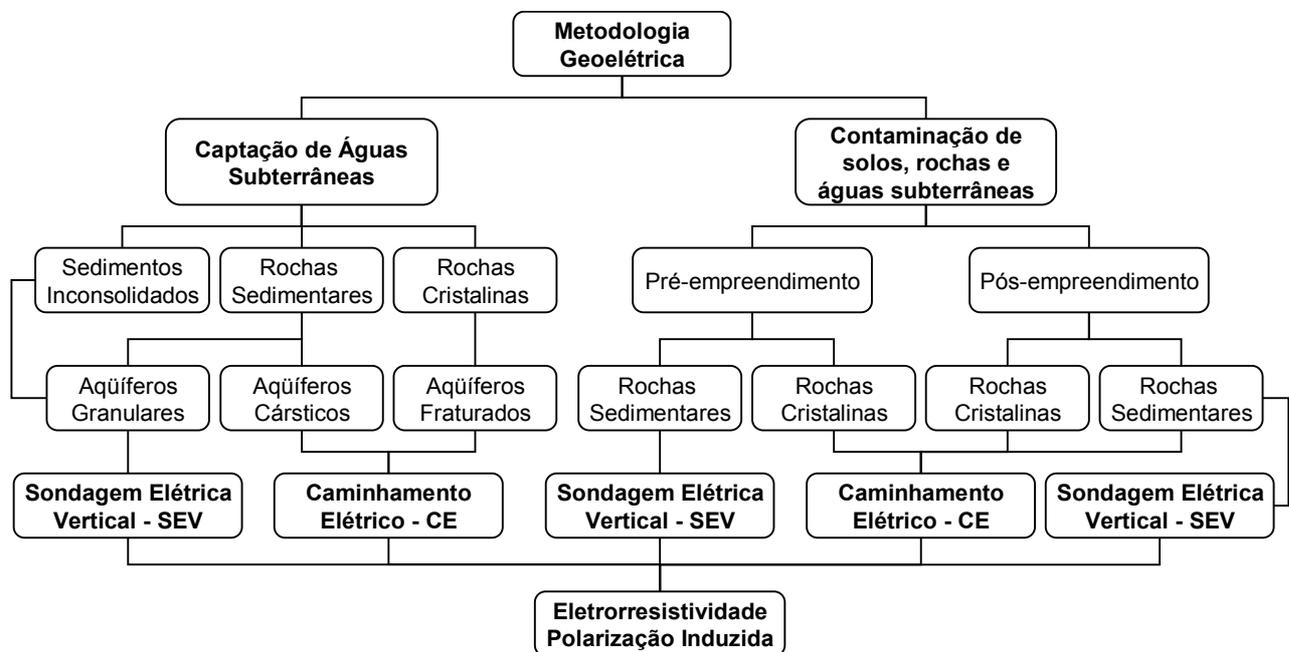
No caso de rochas sedimentares (aquíferos cársticos) e rochas cristalinas (aquíferos fraturados), as técnicas ideais, referem-se a aquelas que permitem obter um estudo lateral das estruturas geológicas, ocorrendo, aproximadamente, de forma descontínua à superfície do terreno, como seria o caso de fraturas e falhamentos, contatos geológicos, diques, etc. Nesse caso, a variação lateral do parâmetro físico obtido interessa no ensaio, diferentemente das SEV's.

A técnica a ser utilizada, nesse caso, deve ser desenvolvida a partir da *superfície do terreno*; com os espaçamentos entre os eletrodos A-B e M-N *constant*; sendo o levantamento efetuado ao longo de perfis, estudando as *variações laterais* do parâmetro físico medido, conseqüentemente, o *centro* do arranjo AMNB, *não deverá permanecer fixo*



durante todo o desenvolvimento do ensaio. Todas as condições citadas, definem a técnica do **caminhamento elétrico – arranjo dipolo-dipolo**.

A Fig. IV-02 apresenta a metodologia ideal nesses estudos, considerando a geologia local e em função da resolução do método/técnica de investigação.



**Figura IV-02 – Metodologia geométrica – captação de águas subterrâneas e estudos ambientais.**

#### 4.2.2. Objetivos Específicos e Critérios de Análises

Na definição da metodologia geométrica adequada, além dos condicionantes citados anteriormente e em função da classificação dos métodos geométricos proposta, deve-se considerar os *objetivos específicos* do trabalho e certos *critérios de análises*. Como já comentado anteriormente, os objetivos específicos de um trabalho envolvem a identificação litológica, identificação de aquíferos sedimentares ou fraturados, determinação do nível d'água e elaboração de mapas potenciométricos, etc.. Esses objetivos devem estar claramente definidos, pois esta é uma condição básica e essencial para o desenvolvimento e obtenção de conclusões sérias.

A Tabela IV-01 apresenta a metodologia ideal na captação de águas subterrâneas e estudos ambientais detalhando a Fig. IV-02, com os objetivos específicos principais (produtos) a serem obtidos.

A Tabela IV-02, apresenta uma relação dos critérios a serem considerados para, juntamente com as condições citadas anteriormente, definir a metodologia adequada com melhor precisão.

Tabela IV-01 – Metodologia e produtos geolétricos.

Objetivos Gerais	Fases do Empreendimento		Geologia		Objetivos Específicos – Principais Produtos	Metodologia Geolétrica
			Tipo	Porosidade		
Captação de Águas Subterrâneas	Avaliação Hidrogeológica - Identificação de aquíferos promissores (locação de poços tubulares)		Sedimentos Inconsolidados e/ou Rochas Sedimentares	Granular	- Nível d'água - Mapa potenciométrico	SEV-ER
					- Parâmetros hidráulicos	
					- Litologia - Topo rochoso	SEV-ER/IP
					- Profundidade e espessura do aquífero	
					- Contato água doce/salgada	
				- Cavidades	CE-ER/IP	
Cárstica	- Cárstes					
Rochas Cristalinas	Fratura	- Fraturas e falhamentos				
Estudos Ambientais - Contaminação de Solos, Rochas e Águas Subterrâneas	Pré	Investigações Prévias	Sedimentos Inconsolidados e/ou Rochas Sedimentares	Granular	- Nível d'água - Mapa potenciométrico	SEV-ER
					- Parâmetros hidráulicos	
					- Litologia - Topo rochoso	SEV-ER/IP
				- Cavidades		
	Cárstica	- Cárstes	CE-ER/IP			
	Rochas Cristalinas	Fratura		- Fraturas e falhamentos		
	Pós	Investigações confirmatórias	Sedimentos Inconsolidados e/ou Rochas Sedimentares	Granular	- Nível d'água - Mapa potenciométrico	SEV-ER
					- Litologia - Topo rochoso	SEV-ER/IP
					- Plumas de contaminação	CE-ER/IP
					- Cavidades	
				Cárstica	- Cárstes e contaminação	
		Rochas Cristalinas	Fratura	- Fraturas, falhamentos e contaminação		
		Investigações para remediação e monitoramento	Sedimentos Inconsolidados e/ou Rochas Sedimentares	Granular	- Nível d'água - Mapa potenciométrico	SEV-ER
					- Litologia - Topo rochoso	SEV-ER/IP
- Evolução de plumas de contaminação					CE-ER/IP	
- Cavidades						
Cárstica	- Cárstes e contaminação					
Rochas Cristalinas	Fratura	- Fraturas, falhamentos e contaminação				

Tabela IV-02 – Critérios de análise na definição da metodologia geolétrica adequada.

Profundidade de investigação a ser atingida	Estudos envolvendo o uso e ocupação do solo (questões ambientais): <i>métodos e técnicas geofísicas de estudos rasos</i> . Estudos visando à captação de águas subterrâneas: <i>métodos e técnicas geofísicas de estudos relativamente profundos</i> .
Espessura e forma do corpo a ser prospectado	Corpos com pequena espessura, localizados estratigraficamente a uma grande profundidade, em relação à superfície do terreno, podem não ser detectados dependendo da técnica utilizada. Corpos planos paralelos à superfície do terreno sugerem técnicas de investigação diferentes de corpos verticais ou subverticais à superfície do terreno.
Contrastes de propriedades físicas - corpo investigado/meio encaixante	Dependendo do tipo de materiais geológicos, determinados métodos geofísicos não apresentam contrastes de propriedades físicas. Portanto, a escolha do método deve considerar as diferentes situações em cada tipo de pesquisa.
Poder de resolução, custo e rapidez	Os métodos e técnicas a serem utilizadas, devem aliar, a capacidade de atingir os objetivos propostos, com custos dos ensaios e prazos adequados.
Topografia e área de estudo	Topografias muito acidentadas e áreas ocupadas por instalações diversas, podem inviabilizar determinadas técnicas, necessitando o emprego de técnicas não muito precisas, mas adequadas à situação.

### **4.3. PROGRAMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS GEOELÉTRICOS**

Após a escolha da metodologia a ser utilizada na pesquisa, deve-se proceder à programação e o desenvolvimento dos ensaios, também considerados fundamentais para o sucesso da campanha, pois, numa pesquisa Geofísica, os resultados obtidos, podem ser considerados satisfatórios, na medida em que a coleta de dados e a interpretação final, apresentem, do ponto de vista técnico, segurança e precisão.

Nada adianta, um geofísico intérprete, experiente e conhecedor das leis básicas que regem a metodologia utilizada, se os dados de campo forem obtidos por operadores inexperientes, levando a uma não confiabilidade nos dados coletados. Ressalta-se que, até mesmo operadores experientes podem enfrentar situações adversas, as quais podem resultar em dados não confiáveis. Pode ocorrer ainda, a situação inversa, na qual os dados são confiáveis, mas o intérprete não tem uma razoável experiência ou não dispõe de dados geológicos consistentes.

Nas discussões, a seguir, sobre as técnicas da SEV e CE, os arranjos referidos, são, respectivamente, o Schlumberger e o Dipolo-Dipolo, em função de suas precisões, qualidade dos resultados e praticidade nas operações de campo.

#### **4.3.1. Sondagem Elétrica Vertical - Schlumberger**

Como já ressaltado, uma campanha por SEV – Schlumberger, depende do tipo de investigação a ser efetuada, ou seja: objetivos propostos do trabalho, geologia a ser estudada, profundidade a serem atingidas, etc..

Para a programação de uma campanha por SEV, além de uma visita prévia na área de estudo, é importante dispor de alguns dados gerais, tais como: mapas topográficos, mapas e seções geológicas, informações de subsuperfície (poços, cacimbas, etc.), geologia em detalhe e outras informações sobre a infra-estrutura, tais como: vias de comunicação, clima, presença de instalações industriais, redes de energia elétrica, rios, etc. Os mapas devem ser em escala adequada ao trabalho a ser executado e os dados de poços devem ser confiáveis.

Outra condição para a utilização adequada de uma SEV diz respeito à topografia. Se esta apresenta uma inclinação muito acentuada, os dados podem ser imprecisos e até inviabilizar os trabalhos, considerada suas dimensões em relação aos espaçamentos dos eletrodos utilizados.

O mergulho das camadas geológicas, em relação à superfície do terreno, também deve ser considerado.

A Fig. IV-03 ilustra situações inadequadas em relação à topografia do terreno (a) e mergulho acentuado das camadas (b) e (c); e, adequadas (d) ao desenvolvimento das SEV's.

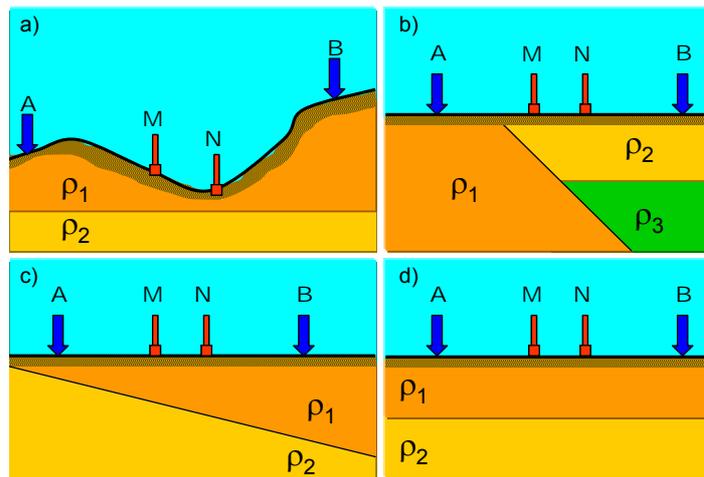


Figura IV-03 –Desenvolvimento de uma SEV.

A programação de uma campanha de SEV inclui, além das questões de organização, logística, infra-estrutura, etc., a escolha da *densidade* das medições, situação dos locais dos *centros* das SEV's, *direções* das linhas AMNB, e ainda, a determinação do *espaçamento final* – profundidade de investigação, ou seja, quando dar por encerrada uma SEV?

#### Densidade dos Ensaio

A distância entre os centros de SEV's contínuas – malha adotada, depende, de um lado, do caráter e fase da investigação, e de outro, das estruturas geológicas existentes. Para que os modelos geoeletricos, resultantes das interpretações das SEV's, tenham uma correlação satisfatória, recomenda-se que a distância adequada de separação entre os locais de investigação, seja menor ou igual a *duas* vezes a profundidade do objetivo a ser atingido. Na medida do possível, deve-se iniciar por um levantamento de caráter regional e posteriormente detalhar os locais de maior interesse.

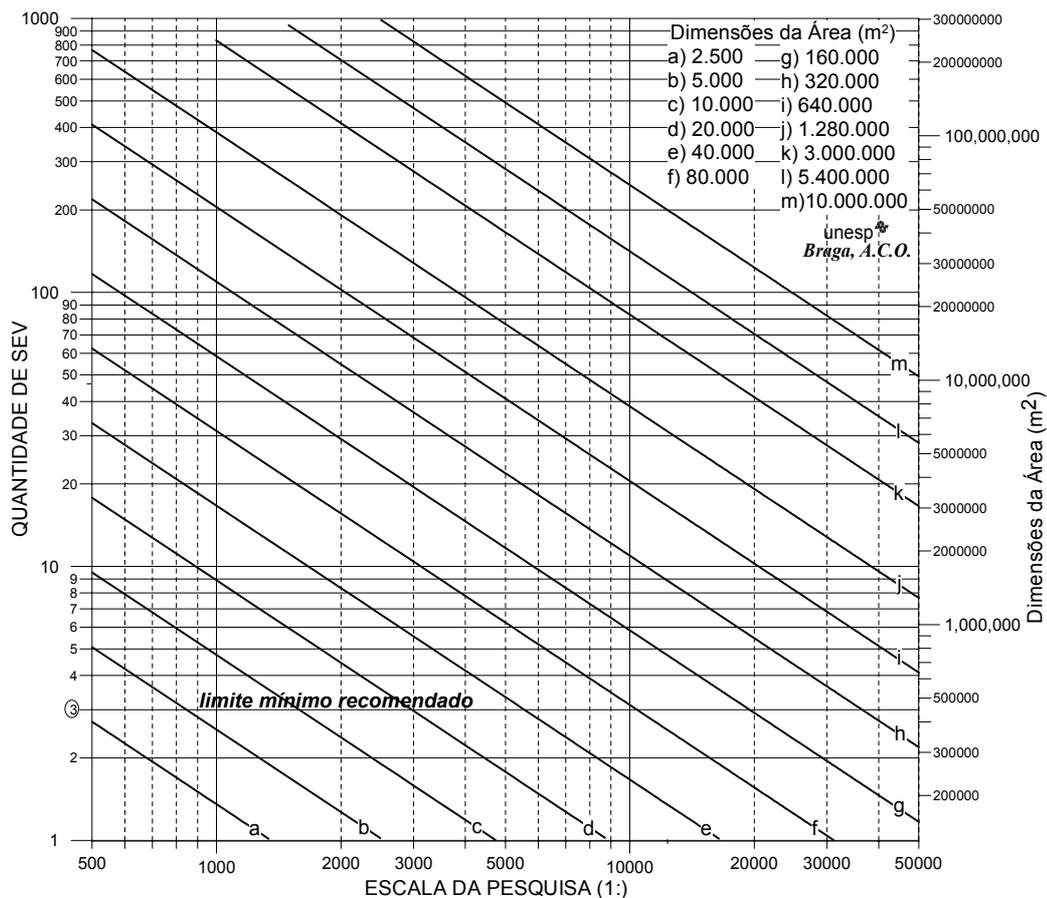
Para estabelecer uma malha de ensaios, estimando a quantidade de SEV's a serem executadas em função da profundidade de investigação (m) e das dimensões da área de estudo (m<sup>2</sup>), pode-se utilizar a Equação IV-01.

$$SEV = \left( \frac{\sqrt{\text{área}}}{2 \times \text{prof.}_{inv.}} \right)^2 \quad \text{IV-01}$$

Entretanto, a programação de uma campanha por SEV, deve aliar além da qualidade e segurança dos resultados, prazos disponíveis e custos. Em áreas de grandes dimensões, com profundidades de investigação relativamente pequenas, as relações anteriores, podem-se tornar inviável, tanto economicamente como em termos de prazos. As relações entre, as dimensões da área de estudo e a *escala* do trabalho, devem ser consideradas na definição da malha ideal.

Entretanto, uma das dificuldades encontradas na programação, principalmente envolvendo profissionais inexperientes, diz respeito às relações entre as dimensões da área de estudo e escala adequada a ser utilizada, ou seja, quais os tipos de escala mais adequados para representar uma anomalia em níveis de detalhes diferenciados. Normalmente, utiliza-se o bom senso, mas em alguns casos, os mapas apresentados, não apresentam uma representatividade em função do grau de detalhe exigido na pesquisa.

Como uma tentativa de contribuição na programação de uma campanha de SEV, a Fig. IV-04, apresenta um ábaco, que pode ser utilizado como um indicativo inicial para orientar a quantidade de ensaios a serem desenvolvidos, em uma determinada área de trabalho. A utilização do ábaco da Fig. IV-04 é simples: 1) de posse das dimensões da área de pesquisa - z (metros quadrados), deve-se encontrar a reta correspondente; 2) ao longo dessa reta, determinar a escala (x) de trabalho a se utilizada; e, 3) nesse ponto, tomar o valor correspondente ao eixo y – *quantidade de SEV's recomendadas* (y). Recomenda-se, entretanto, um número mínimo de três ensaios.



**Figura IV-04 – Densidade de ensaios/escala – Programação de SEV.**

Ressalta-se que esse ábaco foi elaborado, considerando áreas de trabalho até 10.000.000 m<sup>2</sup> (10 Km<sup>2</sup>). Isso se deve ao fato, de que a grande maioria dos trabalhos, para fins

hidrogeológicos e ambientais, apresentam áreas menores que este limite estabelecido, e a metodologia de cálculo deve mudar para áreas maiores.

Entretanto, através das Equações IV-02 e IV-03, a metodologia anterior pode ser sintetizada, incluindo áreas maiores que as do ábaco, estimando-se a quantidade de SEV's, em função das dimensões da *área de pesquisa* e das *escalas sugeridas*, simultaneamente:

Áreas (m <sup>2</sup> )	Escalas Sugeridas (1:)	Equações
≤ 1.280.000	≤ 20.000	$y = (x^{-1}) \times (1,14 z^{0,905})$ IV-02
1.280.000 a 10.000.000	10.000 a 30.000	
> 10.000.000	25.000 a 500.000	$y = (x^{-2}) \times (16,7 z^{1,05})$ IV-03

onde,  $y$  = quantidade de SEV's recomendadas;  $x$  = escala de trabalho e  $z$  = dimensões da área de pesquisa (m<sup>2</sup>).

Os valores obtidos para as quantidades de SEV's, devem ser aproximados, de preferência para mais, facilitando a programação. Deve-se ressaltar entretanto, que a quantidade de ensaios finais, estará sempre ligada às especificidades de cada projeto. A Tabela IV-03, apresenta alguns exemplos de aplicação dessas equações.

**Tabela IV-03 – Estimativa da quantidade de SEV's em função das dimensões da área de pesquisa e da escala sugerida.**

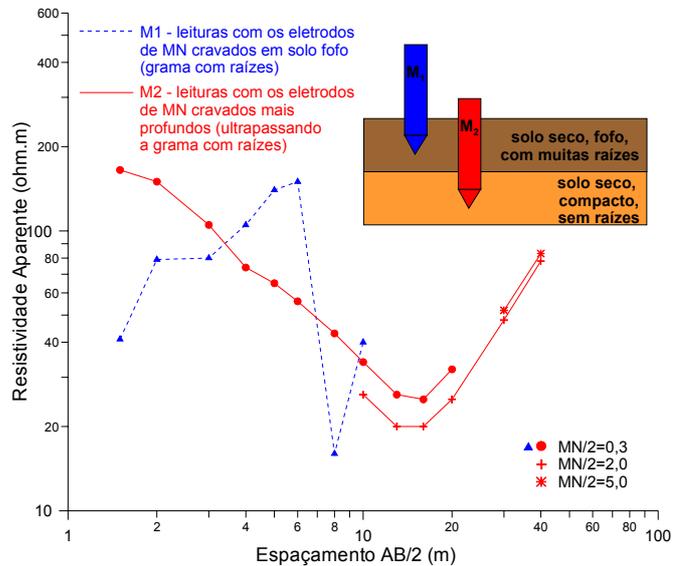
Área - z (m <sup>2</sup> )	Escalas Sugeridas (1:) - x	Quantidade de SEV's recomendadas - y	
10.000	1.000	5	Equação IV-02
	500	10	
	12.000	119	
5.448.437 (5,45 Km <sup>2</sup> ) - (Fundunesp, 1998)	50.000	12	Equação IV-03 Levantamentos de caráter regional
624.000.000 (624 Km <sup>2</sup> ) ~ Folha IBGE/1:50.000	500.000	62	
250.000.000.000 (250.000 Km <sup>2</sup> ) ~ Geológico do Estado de São Paulo/1:500.000 - IPT	250.000	248	

#### Escolha do Local do Centro da SEV e Direção da Linha AMNB

A escolha do local do centro da SEV (ponto de atribuição dos resultados) é de fundamental importância. Deve-se proceder a um reconhecimento prévio, procurando evitar situações em possam interferir na qualidade dos resultados, tais como: encanamentos e tubulações, formigueiros com grandes dimensões, caixas de alta tensão, etc.. Tais ocorrências, situadas entre os eletrodos de potencial MN, podem provocar uma distorção do campo elétrico, alterando os resultados de maneira contínua, afetando grande parte da curva de campo. Já, próximas dos eletrodos de corrente AB, apresentam distorções pontuais, podendo ser desprezadas, não prejudicando a curva final de campo.

A Fig. IV-05, ilustra uma situação em que, os eletrodos de potenciais foram afetados pelos materiais em subsuperfície. Esses eletrodos, cravados em solos pouco compactos, com muitas raízes e presença de seixos (situação 1 – M<sub>1</sub>), não apresentam um contato eletrodo/solo adequado, podendo resultar em dados totalmente imprecisos. Já na situação 2 – M<sub>2</sub>, com os eletrodos de potenciais cravados em um solo mais compacto, resultou em dados adequados, com a curva de campo dentro do esperado.

Observa-se ainda nessa figura, que a camada superficial, de pequena espessura, ainda pode ser notada em função da diferença nos segmentos de  $MN/2 = 0,30$  e  $MN/2 = 2,0$ ; já não se fazendo notar, com os segmentos de  $MN/2 = 2,0$  e  $MN/2 = 5,0$ .



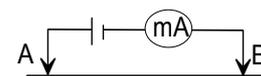
**Figura IV-05 – Efeitos nos eletrodos de potenciais - SEV.**

Devido a resistências de contato solo/eletrodo elevadas, o trabalho pode até ser inviabilizado. Estas resistências afetam, tanto o circuito de emissão de corrente, como o circuito de recepção de potencial.

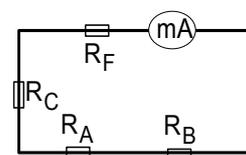
#### Circuito de Emissão:

Este circuito consiste basicamente, de: uma fonte de alimentação; dois eletrodos de barras de aço inoxidável (A e B); de um amperímetro (ou miliamperímetro) para as medidas de  $I$ ;  $e$ , dois cabos e elementos de conexões necessários. A partir da equação III-12, sendo  $K = \text{cte}$ , tem-se que  $\Delta V$  é proporcional a  $I$ . Tomando um esquema equivalente (Figura b) ao de campo (Figura a), pode-se denominar:  $R_F$  = resistência da fonte;  $R_C$  = resistência ôhmica dos cabos,  $R_A$  e  $R_B$  = resistência de contato eletrodos/solo;  $e$ ,  $U$  = f.e.m. do gerador.

Como  $R_F$  e  $R_C$  (linhas curtas) são pequenos,  $I$  só depende de  $R_A$  e  $R_B$ . Ressalta-se que  $U$  é limitado por razões práticas e de segurança. Portanto, conclui-se que, as resistências de contato entre eletrodos/solo, são fatores que limitam na prática o valor da intensidade  $I$ .



a) esquema prático

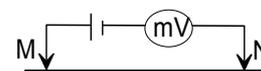


b) esquema equivalente

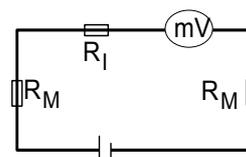
$$I = \frac{U}{R_F + R_C + R_A + R_B}$$

### Circuito de Recepção:

Para este circuito, tem-se:  $R_I$  = resistência do equipamento;  $R_M$  e  $R_N$  = resistência de contato eletrodos/solo. Disso, resulta: o  $\Delta V'$  é o potencial lido no equipamento, que é menor que o potencial criado. Isto se deve à  $R_M$  e  $R_N$ , as quais produziram uma queda de tensão na leitura do equipamento. Como  $R_M$  e  $R_N$  não podem ser diminuídos além de um certo limite, é melhor que  $R_I$  seja muito maior que estas, ou seja, deve-se empregar um equipamento de impedância de entrada muito grande.



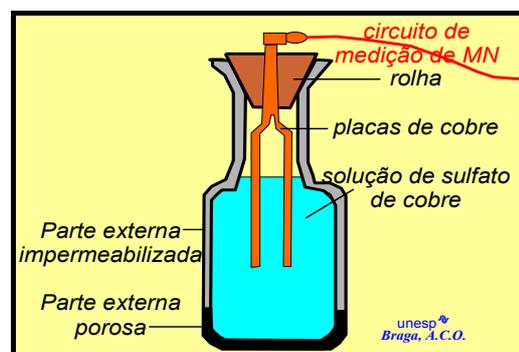
a) esquema prático



b) esquema equivalente

Ressalta-se que na utilização de eletrodos metálicos para medidas do potencial (M e N), o fenômeno da polarização que ocorre entre estes e o solo (ORELLANA, 1972), normalmente induz a erros nas leituras do potencial analisado, principalmente, na polarização induzida (cargabilidade), na qual os valores são muito baixos.

Visando minimizar estes efeitos de polarização do solo, recomenda-se a utilização de eletrodos impolarizáveis do tipo pote de cerâmica (Fig. III.8), parcialmente saturados, com solução aquosa de sulfato de cobre, conectado à linha de medição através de placas de cobre eletrolítico.



**Figura III.8 – Eletrodo de recepção**

### impolarizável.

A solução de  $\text{CuSO}_4$ , entra em contato com o solo, através de uma parte inferior porosa do eletrodo. Deste modo, se consegue que essas polarizações sejam iguais em ambos eletrodos e se anulem.

Situações naturais, tais como: depressões acentuadas no terreno, variações litológicas, etc., também podem resultar em imprecisões nas leituras de campo. Portanto, o centro de uma SEV deve atender uma melhor aproximação das condições de homogeneidade lateral, atendendo a teoria dos meios estratificados.

A direção da linha AMNB deve se manter paralela às estruturas geológicas (contatos, falhas, etc.) e de modo que a superfície topográfica apresente a mínima variação na direção escolhida. Os eletrodos, preferencialmente, não devem cruzar falhamentos e/ou contatos geológicos, pois essas variações laterais de resistividade, podem distorcer os campos elétricos criados, levando à obtenção de dados imprecisos.

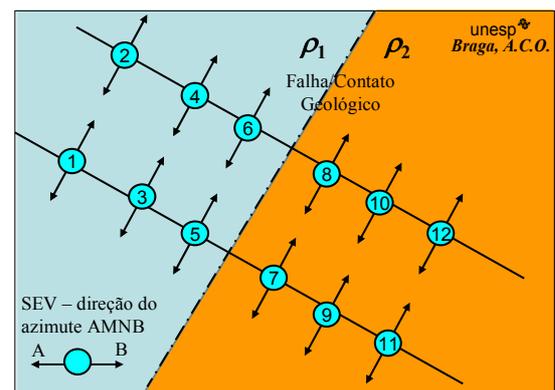
A Fig. IV-06, ilustra o desenvolvimento adequado de várias SEV's, em situação de ocorrência de falhamento geológico, com diferentes resistividades dos materiais presentes em superfície e subsuperfície.

O perfil investigado é perpendicular à estrutura geológica, enquanto que a direção da linha AMNB se mantém aproximadamente paralela à estrutura, procurando manter os eletrodos sem heterogeneidades laterais.

Os cuidados citados anteriormente, no desenvolvimento dos trabalhos de campo, são considerados de extrema importância, para a qualidade dos dados de uma SEV. De nada vale, softwares sofisticados, intérpretes experientes, se os dados não apresentam qualidade adequada.

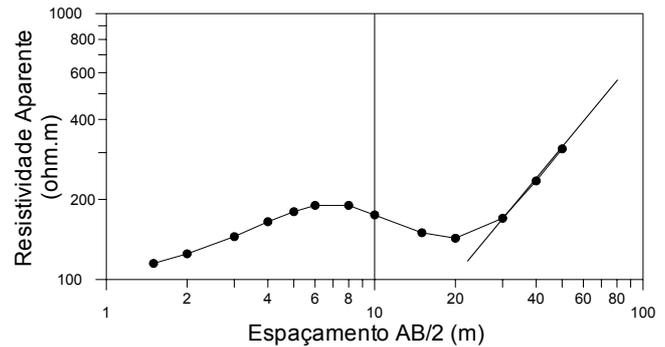
#### Espaçamento AB Final – Profundidade de Investigação

O espaçamento AB final de uma SEV, para se atingir os objetivos propostos, deve ser estimado na programação dos ensaios. Pode-se tomar a relação  $AB/4$  como sendo a profundidade teórica atingida. Na prática alguns procedimentos podem ser seguidos para escolher sobre o AB final:



**Figura IV-06 – Localização das SEV's.**

- 1) basear-se em resultados de campanhas anteriores realizadas na área ou em áreas geologicamente semelhantes;
- 2) efetuar algumas SEV's em pontos estratégicos da área ou junto a poços que contenham descrições confiáveis; e,
- 3) tomar a relação AB/4 e prosseguir as leituras, até se obter, no mínimo, três pontos na curva de campo após atingir o objetivo esperado (Fig. IV-07).

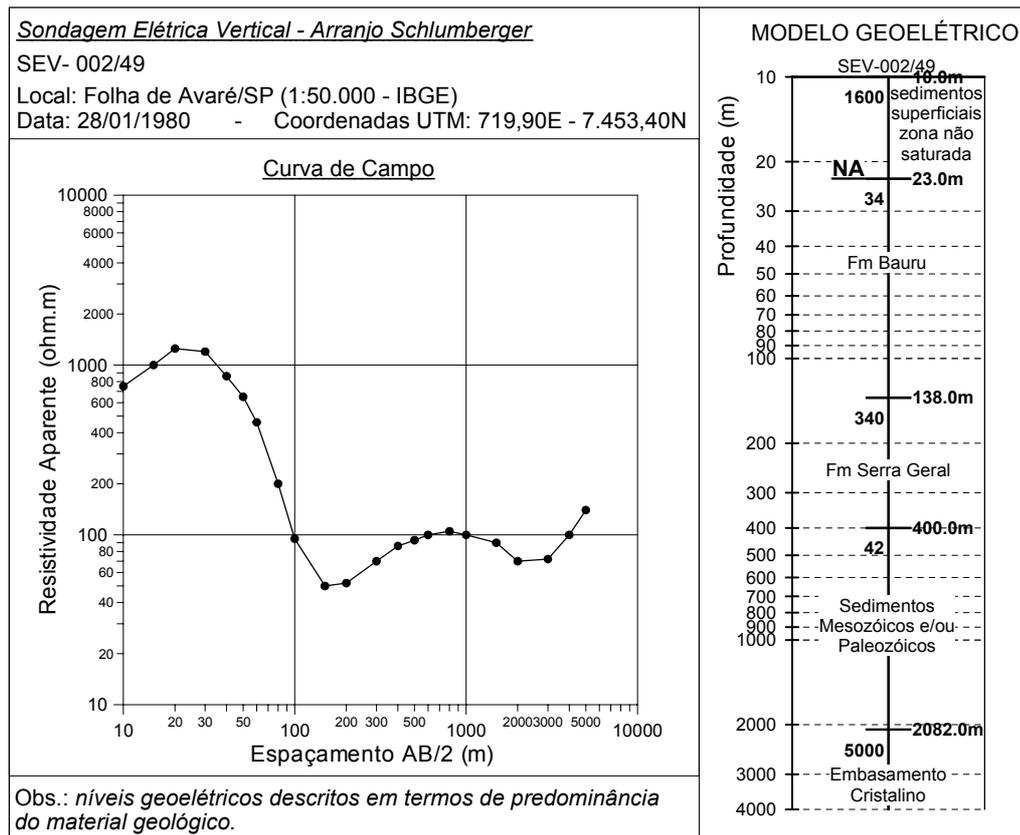


**Figura IV-07 – Espaçamento AB final - SEV.**

Na Hidrogeologia, as profundidades solicitadas visando à captação de águas subterrâneas, de um modo geral, situam-se entre 100 e 500 metros. Portanto, a técnica a ser utilizada não pode apresentar limitações, principalmente, quando envolve grandes profundidades, sendo a técnica da SEV – Schlumberger, superior às demais, tanto na resolução quanto na penetração.

Em estudos profundos, como é o caso do aquífero Guarani (por volta de 1.500 metros nas regiões oeste e noroeste do Estado de São Paulo), as SEV's – Schlumberger, podem ser utilizadas com sucesso. Nesse caso, podem-se destacar os trabalhos efetuados pelo Consórcio CESP/IPT - PAULIPETRO (Fig. IV-08 - IPT, 1980).

Os objetivos dessas SEV's foram o de determinar o topo do embasamento cristalino, em áreas de afloramento dos sedimentos da Bacia do Paraná. O espaçamento utilizado foi de AB = 10.000 m, determinando o topo do embasamento cristalino a 2.082,0 metros de profundidade.



**Figura IV-08 – SEV profunda (IPT, 1980).**

Entretanto, para profundidades maiores que, aproximadamente, 2.500 metros ( $AB = 10.000$  m), as SEV's – arranjo Schlumberger não são produtivas, em termos de rendimento de campo. Neste caso, deve-se recorrer às sondagens elétricas dipolares – arranjo equatorial (Orellana, 1972). Em investigações envolvendo a contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas, as profundidades de investigação requeridas, são relativamente rasas, normalmente não ultrapassando 100 metros. Nesses casos, as SEV's apresentam uma relação custo/benefício, satisfatória, sendo empregadas com sucesso.

As profundidades de investigação de uma SEV ( $AB/4$ ), referidas anteriormente, são teóricas, pois na prática, camadas de alta e baixa resistividade, podem mudar a relação proposta. Uma questão importante na SEV-ER, diz respeito à profundidade de investigação em terrenos sedimentares de alta resistividade, localizados superficialmente na zona não saturada. A ocorrência desses materiais, pode ocasionar um “atraso” significativo nas curvas de campo, deslocando os espaçamentos AB.

Orellana (1972), cita que em alguns casos, onde ocorre uma camada de alta resistividade (podendo ser considerada isolante), a penetração de uma SEV não crescerá com o espaçamento AB. O referido autor ressalta também que, a presença de camadas espessas e de altas resistividades, em relação às camadas subjacentes, produziria na curva de resistividades aparentes um ramo *ascendente* seguido de outro *descendente*, sendo que para se

obter uma definição da camada resistiva, que permitiria sua interpretação, o espaçamento AB teria que ser *superior a dez vezes* ou mais a profundidade de seu topo.

Em estudos geofísicos desenvolvidos nos estados de Tocantins e Pará (IPT, 1985/86), foram executados ensaios por sísmica de refração e eletrorresistividade (SEV). De um modo geral, as curvas de campo das SEV's, apresentaram altos valores de resistividades aparentes para as camadas superficiais. Essas curvas mostraram nos ramos iniciais, configuração semelhante à descrita anteriormente por Orellana (*op. cit.*).

Analisando o tipo das curvas obtidas, constatou-se esse efeito em mais de 90% das SEV's executadas. Ao efetuar a interpretação dessas SEV's, o modelo geoeletrico resultante não era compatível com as informações geológicas disponíveis e com os resultados da sísmica de refração – *profundidades muito elevadas*, indicando um claro deslocamento dos espaçamentos AB.

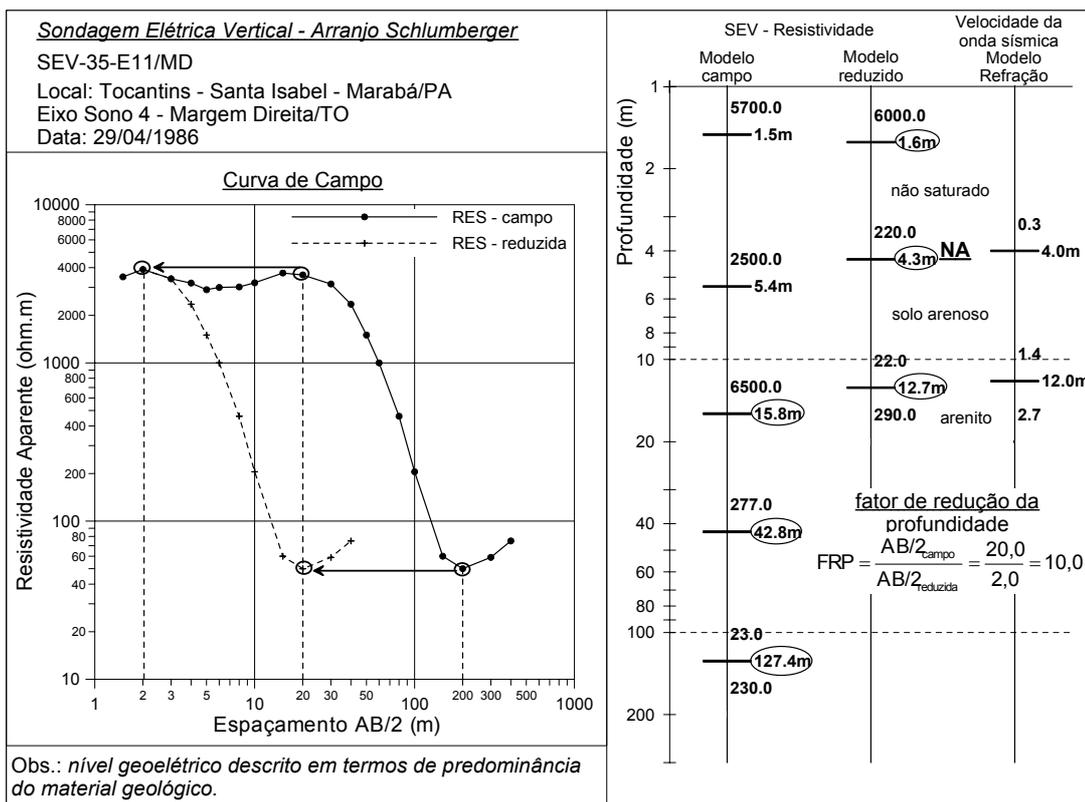
Após várias análises dessas curvas, pode-se observar que o ramo final poderia ser deslocado, mantendo as resistividades aparentes, para a esquerda do gráfico até coincidir com as primeiras leituras de campo, eliminando com isso o efeito devido à camada resistiva resultando em uma curva “reduzida”. Tomando-se um ou dois pontos AB/2 coincidentes, a relação entre eles resulta em um fator denominado de *fator de redução da profundidade – FRP* (equação IV-04).

$$FRP = \frac{(AB/2)_{\text{reduzido}}}{(AB/2)_{\text{campo}}} \quad \text{IV-04}$$

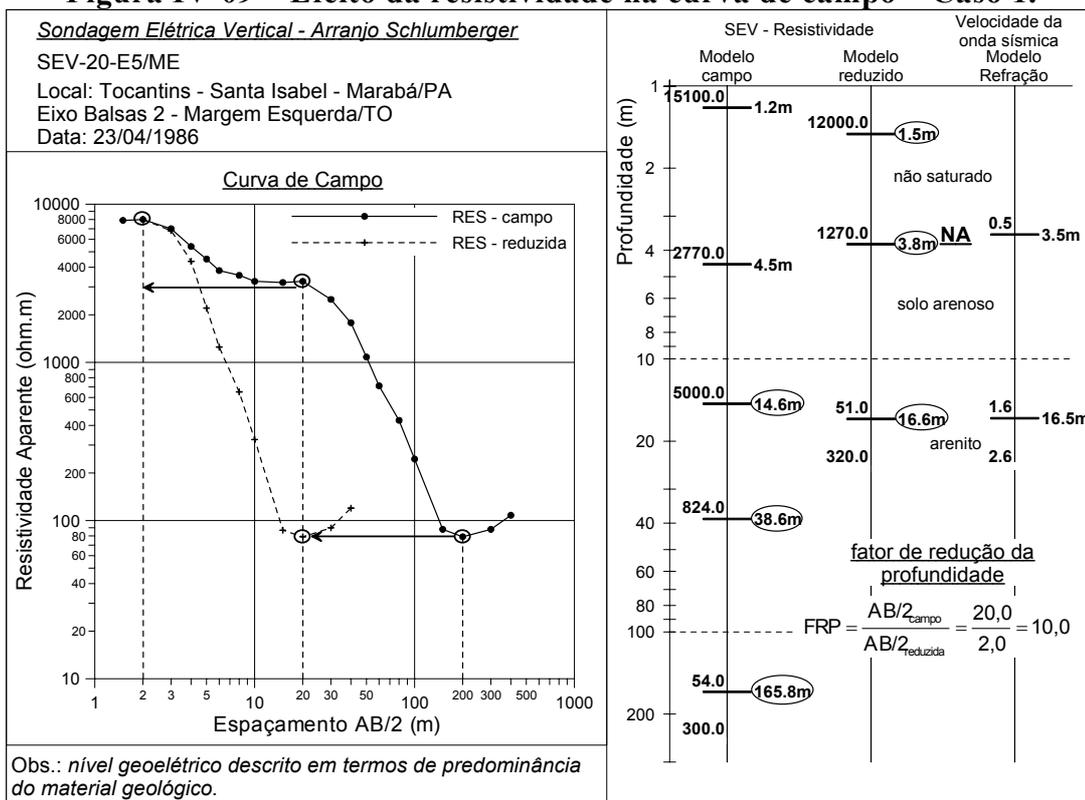
As Fig.s IV-09 e IV-10 ilustram as situações descritas, sendo apresentadas as curvas de campo, curva reduzida, modelo geoeletrico de campo e modelo geoeletrico reduzido e o modelo da sísmica de refração.

No caso 1 (Fig. IV-09) os dados de campo, a partir do AB/2 = 30, foram deslocados até coincidir com o início da curva original de campo (AB/2 = 3,0) resultando em um FRP = 0,1. Tomando-se as profundidades do modelo de campo e aplicando o FRP, eliminando as camadas superficiais delgadas, tem-se o modelo reduzido perfeitamente compatível com a situação esperada.

No caso 2 (Fig. IV-10), tomou-se para redução os AB/2 = 6,0 e 60,0; sendo nesse caso as resistividades aparentes do ramo inicial reduzidas. Observa-se nesse caso, a perfeita correspondência do modelo reduzido com a sísmica de refração.



**Figura IV-09 – Efeito da resistividade na curva de campo – Caso 1.**



**Figura IV-10 – Efeito da resistividade na curva de campo – Caso 2.**

Desenvolvimento dos Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo de uma SEV iniciam-se pela escolha do local exato do centro da linha AMNB, considerando o exposto anteriormente. Neste local coloca-se uma estaca

identificando o número da sondagem; recomenda-se que a numeração de identificação das SEV's seja seqüencial, independente das localizações. A partir desta estaca, mantendo a direção da linha AMNB de acordo com o programado, esticam-se duas trenas, uma para cada lado, previamente demarcadas com os espaçamentos a serem utilizados.

As trenas podem ter o comprimento de 100 metros com as devidas marcas dos espaçamentos, o que facilita muito o início do ensaio, tornando-o mais rápido. A partir de 100 metros, as marcas (podem ser de 50 em 50 metros) devem ser fixadas nos próprios cabos das bobinas, sendo controladas pelo operador. Como já comentado, ao introduzir-se, no subsolo, a corrente elétrica (I) por meio dos eletrodos A e B, resulta que entre os eletrodos M e N mede-se a diferença de potencial criada ( $\Delta V$ ). As medidas obtidas são utilizadas para o cálculo da resistividade aparente utilizando-se as Equações III-12 e III-13. O aumento do espaçamento AB, implica em um aumento da profundidade de investigação.

Na obtenção do parâmetro cargabilidade aparente (método da polarização induzida), o procedimento de campo e a atribuição dos dados obtidos é o mesmo descrito anteriormente, diferindo na análise do potencial obtido. Enquanto que, na obtenção da resistividade o equipamento analisa o momento de envio de corrente no subsolo, estudando o potencial primário criado, na obtenção da cargabilidade aparente, o equipamento analisa o potencial secundário (curva de descarga), no momento do corte da corrente elétrica.

No gráfico utilizado para a representação dos dados tem-se no eixo das ordenadas o valor da resistividade aparente –  $\rho_a$  (ohm.m) e/ou cargabilidade aparente - **Ma** (mV/V ou ms) e no eixo das abscissas a distância - **AB/2** (m).

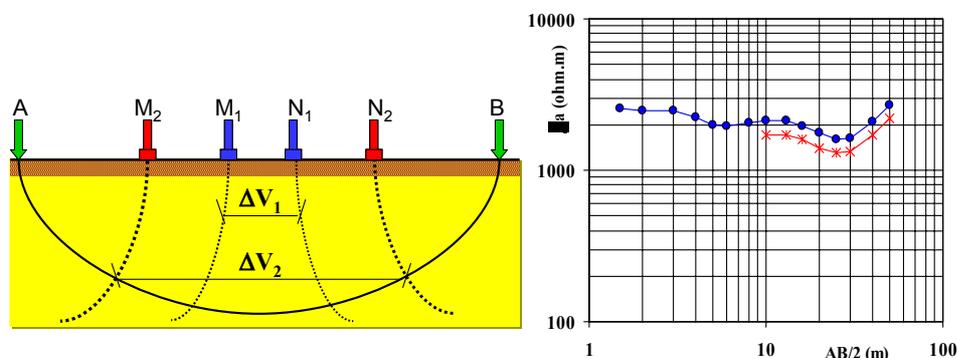
Cabe ressaltar a importância da utilização do gráfico, com os cálculos de campo sendo plotados simultaneamente às leituras. Uma técnica, cuja interpretação deve resultar em modelos quantitativos reais de campo, obrigatoriamente tem que ter um maior controle sobre a qualidade dos dados de campo obtidos. Em levantamentos de campo, esperam-se curvas suaves, sem interrupções bruscas, situações que só através dessas curvas, podem ser identificadas (Fig.s IV-05 e IV-06).

A profundidade de investigação, como já comentado, de uma SEV é governada, principalmente, pelo espaçamento entre os eletrodos de corrente AB, podendo ser tomada como  $= AB/4$ . É definida como uma profundidade teórica investigada, pois, dependendo dos contrastes entre, por exemplo, as resistividades das camadas geoeletricas, na prática, esta relação pode ser alterada.

No desenvolvimento de uma SEV (arranjo Schlumberger), ao aumentar-se o espaçamento entre os eletrodos AB (MN = fixo), o valor de  $\Delta V$  diminui rapidamente, podendo

atingir valores imprecisos. Uma das maneiras de se manter o  $\Delta V$  com valor razoável, seria através do aumento da intensidade da corrente  $I$ , entretanto, existe um limite, tanto devido às características técnicas do equipamento em uso, como devido a problemas de segurança. Visando melhorar as leituras de potenciais, uma operação utilizada, em conjunto com o aumento da intensidade de corrente ( $I$ ), é a chamada operação "embreagem". Esta operação consiste, em aumentar o valor de  $\Delta V$ , aumentando a separação entre os dois eletrodos de potencial, mantendo-se fixos os dois eletrodos de corrente. Para isto, com o espaçamento  $AB$  fixo, realizam-se duas leituras da diferença de potencial: uma com o espaçamento  $MN$  inicial; e, outra com um espaçamento  $MN$  maior.

Após estas duas leituras, passa-se para o espaçamento  $AB$  seguinte, no qual, novamente, realiza-se duas leituras de potencial, com os mesmos espaçamentos de  $MN$  anteriores. Recomenda-se que para cada espaçamento  $AB/2$ , sejam efetuadas duas leituras do parâmetro físico até o final do ensaio. Teremos, portanto, vários segmentos de curva plotados no gráfico. A operação embreagem, além de melhorar o sinal medido, determina a qualidade dos resultados obtidos, pois os vários segmentos de curva, devem manter um paralelismo. A Fig. IV-11 ilustra um exemplo de embreagem com dois espaçamentos de  $MN$ . A diferença entre os ramos se dá em função da área investigada em subsuperfície, sendo essa diferença mais realçada quanto maior as variações laterais do terreno investigado.



**Figura IV-11 – Esquema da embreagem nas curvas de SEV.**

Os espaçamentos dos eletrodos  $AB$  e  $MN$ , a serem utilizados em um levantamento de SEV são importantes e muitas vezes fundamentais. Dependendo do espaçamento, pode ocorrer que uma camada de pequena espessura, não seja identificada em uma curva de campo.

Como já ressaltado, a identificação das camadas geoeletricas em uma curva de campo de SEV, depende, além da existência de contrastes entre as propriedades físicas da camada com as adjacentes, da relação de sua espessura com a profundidade em que esta camada ocorre.

Uma camada geoeletrica de pequena espessura (por exemplo: 2 metros), localizada a pequena profundidade (10 metros), pode ser visualizada em uma curva de SEV; entretanto,

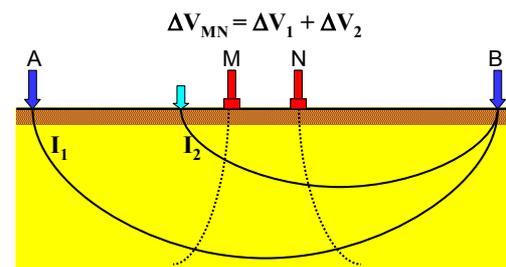
esta mesma camada localizada a uma maior profundidade (por exemplo: 500 metros), não será identificada. Portanto, o espaçamento ideal para os eletrodos AB, deve apresentar um bom detalhamento, sem, entretanto, serem exagerados.

Ressalta-se ainda, que os espaçamentos utilizados, devem manter o limite da relação  $MN \leq AB/5$  (Schlumberger), pois, desta maneira, trabalha-se com potenciais mais elevados, reduzindo os efeitos perturbadores dos potenciais indesejáveis.

### Fugas de Corrente

Uma das causas de erro mais freqüente e grave nas medidas de campo de uma SEV, consiste no aparecimento das chamadas "fugas de corrente" no circuito de emissão. Estas "fugas" se dão em função de um "escape" de corrente, gerada pelo transmissor, em um ponto do circuito diferente das posições dos eletrodos A e B, aparecendo normalmente em dias de chuva. Isto pode ocorrer devido a problemas de isolamento dos cabos, tal como pedaços de fios descascados, situados em solo muito úmido e/ou fios submersos em poças d'águas e rios, ou ainda, nas próprias bobinas do circuito AB.

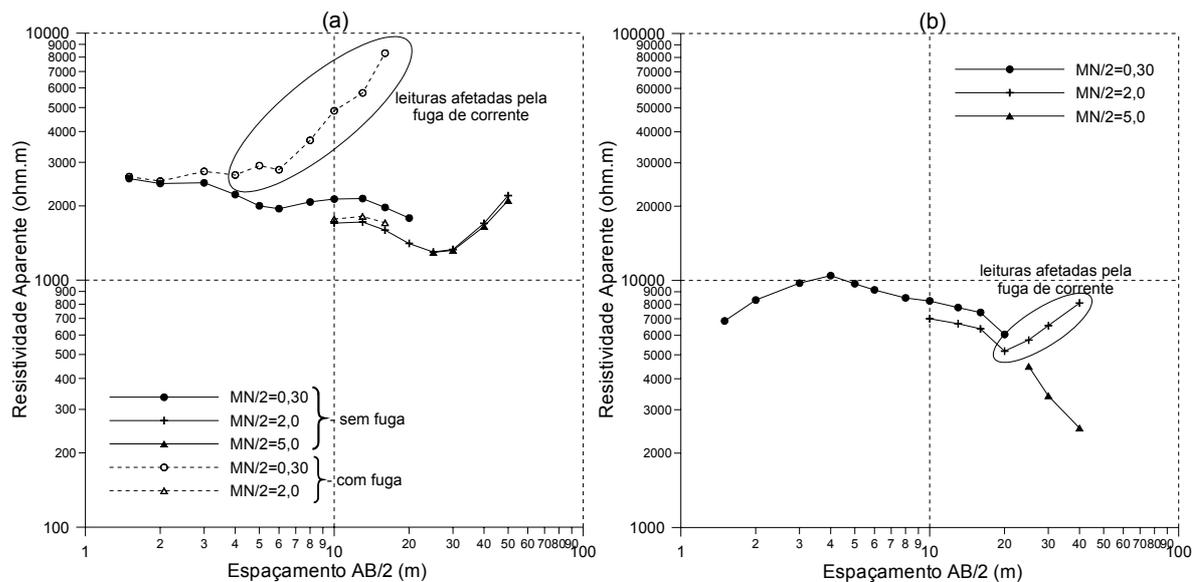
A presença destas fugas equivaleria ao de um eletrodo suplementar, que produziria uma diferença de potencial adicional ( $\Delta V_2$ ) no circuito, em função da corrente adicional  $I_2$ , resultando em uma leitura da  $\Delta V_{MN} = \Delta V_1 + \Delta V_2$  (Fig. IV-12).



**Figura IV-12 – Fuga de corrente.**

Estas fugas podem ser percebidas durante a plotagem dos valores calculados da resistividade aparente na curva de campo. As embreagens, que deveriam manter um paralelismo, começam, de maneira suave, a se distanciar. A Fig. IV-13, ilustra duas situações de fugas de corrente.

Na Fig. IV-13(a) a fuga se dá próxima de um dos eletrodos com espaçamento de  $MN/2 = 0,30$ , resultando em um ramo da curva com falsa tendência de indicar a presença de uma camada geológica de alta resistividade. Pode-se observar, neste caso, que o espaçamento  $MN/2 = 2,0$  não é afetado pela corrente adicional, como foi demonstrado pela curva real obtida após a eliminação dessa fuga. Na Fig. IV-13(b), a fuga, próxima de um dos eletrodos  $MN/2 = 2,0$ , começou a partir da leitura do espaçamento de  $AB/2 = 20,0$ , quando se iniciou uma forte chuva.



**Figura IV-13 – Exemplos de campo de fugas de corrente.**

Uma maneira de comprovar sua existência, é executar o "teste de fuga": (1) desconectar o cabo de um dos eletrodos A ou B, mantendo sua extremidade isolada; (2) enviar corrente pelo equipamento; (3) se as leituras não são nulas, existem fugas deste lado do circuito. Repetir este procedimento para o outro segmento do circuito. Comprovada sua existência, deve-se proceder a uma verificação dos cabos, procurando localizar trechos expostos e efetuar o devido isolamento, ou ainda, providenciar o isolamento das bobinas. Este teste deve ser efetuado com cuidado, evitando possíveis choques no pessoal ajudante.

#### 4.3.2. Caminhamento Elétrico – Dipolo-Dipolo

A programação de uma campanha pela técnica do CE - Dipolo-Dipolo, inclui, como na SEV, além das questões de organização, logística, infra-estrutura, etc., a escolha do: *espaçamento* entre os eletrodos AB-MN, os *níveis* a serem investigados, os espaçamentos ideais entre os perfis, e ainda, as *direções* das linhas ABMN.

##### Espaçamento Entre os Eletrodos AB-MN e Níveis de Investigação

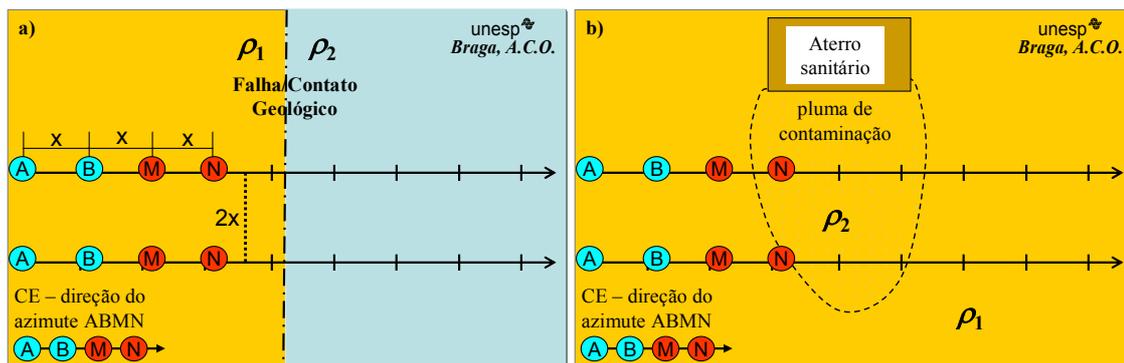
Tomando a Fig. III-17, tem-se que, o espaçamento  $x$  a ser utilizado deve ser definido em função dos objetivos do trabalho e da profundidade máxima de investigação a ser atingida, controlada pelo número de níveis investigados. Para estudos envolvendo a locação de poços para captação de águas subterrâneas, em meios fraturados, recomenda-se adotar o espaçamento  $x = 40$  m – *mínimo de cinco níveis*. Para estudos ambientais, pode-se utilizar o espaçamento  $x = 20$  m – *mínimo de cinco níveis*.

Na escolha do espaçamento, deve-se considerar o número ideal de mudanças em função das dimensões da área estudada, a fim de se obter uma seção representativa. Recomenda-se

obter 10 mudanças completas de cinco níveis, e que o arranjo se inicie e termine além da área de interesse de investigação.

### Programação e Desenvolvimento dos Trabalhos de Campo

Os levantamentos devem ser executados, em linhas, previamente estaqueadas, paralelas entre si, mantendo, de preferência, uma distância entre elas de 2 vezes o espaçamento dos dipolos ( $x$ ). As linhas devem manter uma direção perpendicular às estruturas de interesse, como ilustrado na Fig. IV-14.



**Figura IV-14 – Locação das linhas do CE.**

No caso de zonas de fraturamento e/ou falhamento, as linhas devem ser locadas perpendiculares às estruturas de interesse - Fig. IV-14(a), de modo a interceptar as prováveis zonas de falhas. No caso de mapeamento de plumas de contaminação (aterros, vazamentos, etc.) as linhas devem ser locadas paralelas ao aterro - Fig. IV-14(b), acompanhando as curvas de nível (topografia do terreno), e perpendiculares à provável direção da pluma. As direções e sentidos da evolução das plumas de contaminação, podem ser estimados previamente a partir de mapas potenciométricos obtidos por SEV's.

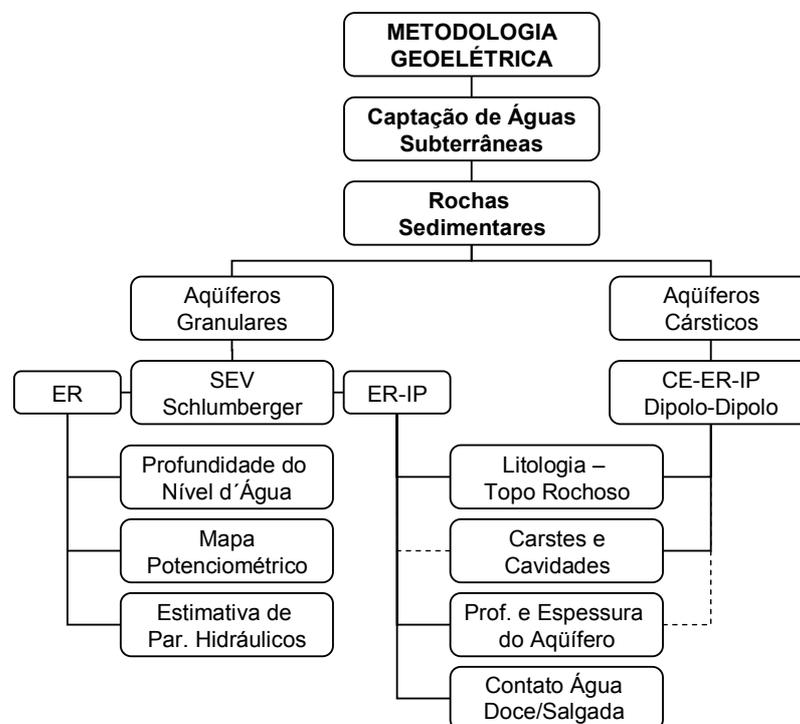
No desenvolvimento do CE - Dipolo-Dipolo, após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando este procedimento até final do perfil a ser levantado.

Uma das grandes vantagens desse arranjo, é o fato de poder utilizar, simultaneamente, vários dipolos de recepção dispostos ao longo da linha a ser levantada. Como já comentado, cada dipolo refere-se a um nível de investigação, podendo, dependendo do caráter da pesquisa, estudar as variações laterais de um parâmetro geoeletrico, ao longo de um perfil, com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigações. Dessa maneira, em estudos ambientais, eventuais plumas de contaminação, podem ser delimitadas lateralmente e em profundidade.

## CAPÍTULO 5. MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 5.1. ROCHAS SEDIMENTARES

Nos estudos hidrogeológicos para captação de águas subterrâneas, visando abastecimento de determinada população, para fins industriais, agricultura, etc., em sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, o aquífero granular é constituído por camadas predominantemente arenosas, de certo modo, plano paralelas à superfície do terreno. A Figura V-01 apresenta a metodologia recomendada em estudos visando à captação de águas subterrâneas em rochas sedimentares, com os principais produtos a serem obtidos.



**Figura V-01 – Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Sedimentares.**

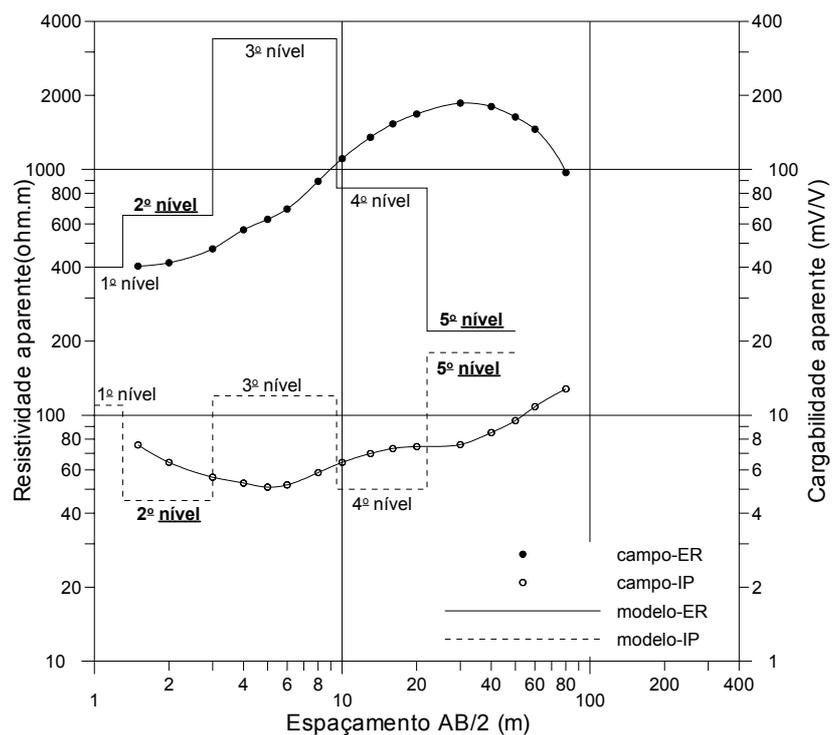
Ressalta-se que, neste caso também, os sedimentos inconsolidados foram incorporadas nas discussões envolvendo as rochas sedimentares – aquíferos granulares. Dos produtos referidos, destacam-se a determinação da: *profundidade do nível d'água* e *identificação litológica* – caracterização do aquífero, *contato água doce/salgada* – aquíferos sedimentares costeiros, *cavidades* em sedimentos, e *estimativa de parâmetros hidráulicos*.

### 5.1.1. Aquíferos Granulares

Após a análise qualitativa das curvas de campo, identificando os vários níveis geoeletricos presentes, e o processamento dos dados de campo através de softwares adequados, procurando determinar as resistividades, cargabilidades e espessuras reais das diferentes litologias presentes, define-se a estratigrafia geoeletrica inicial da área. Nessa fase, cabe destacar que na definição do modelo inicial, a inversão conjunta dos dados de resistividade e cargabilidade podem contribuir para diminuir a ambigüidade da interpretação – efeito de supressão de camadas (Capítulo 3).

A Figura V-02, ilustra um caso, no qual a definição do 2º e 5º nível geoeletrico, efetuou-se com precisão, a partir da curva de cargabilidade aparente, pois a resistividade não identificou com clareza estes níveis. Esse tipo de supressão de camada (5º nível), se dá, não tanto em função de espessuras reduzidas, mas, mais em função dos contrastes de resistividades, uma vez que, um nível geoeletrico com alta resistividade, pode "atrasar" a identificação de outro subjacente.

**Figura V-02 - Supressão de camada na curva de resistividade aparente, identificada pela cargabilidade - Fm Rio Claro (Modificado de Braga, 1997).**



Pode ocorrer a situação inversa, na qual, a definição de um nível geoeletrico, seria efetuada a partir da curva de resistividade aparente, não sendo clara, sua identificação na cargabilidade.

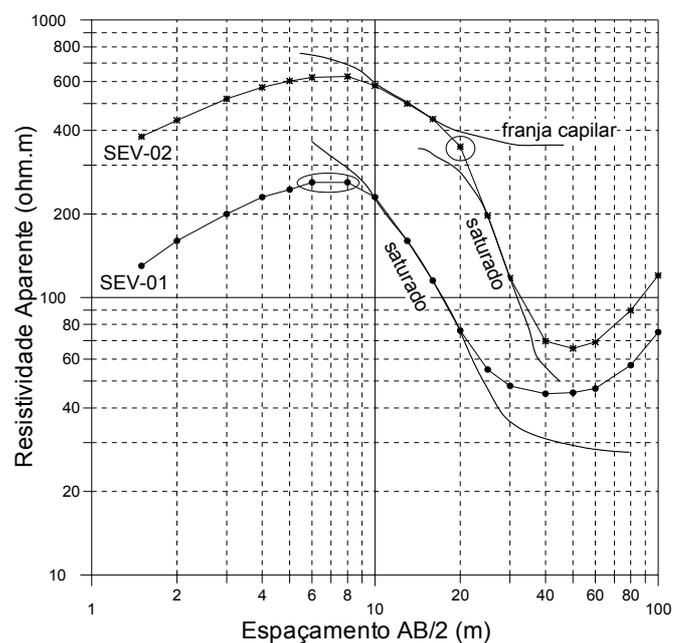
Profundidade do Nível d'Água

Na identificação da profundidade do *nível d'água* (NA), delimitando as zonas não saturada e saturada, recomenda-se a SEV-ER; cuja determinação do NA deve ser efetuada, inicialmente, de maneira qualitativa nas curvas de campo, procurando identificar as “quebras” nos valores de resistividade aparente.

A Figura V-03, ilustra duas situações típicas de SEV's executadas em áreas de rochas sedimentares. A parte inicial das curvas é do tipo K, evidenciando, nas duas primeiras camadas geelétricas, as porções do solo não saturado: zona de evapotranspiração e retenção. A terceira camada, que corresponderia à franja capilar, pode variar em função da litologia local.

Na **SEV-01**, a franja capilar, praticamente não ocorre, ou ocorre mas com espessuras pequenas, apresentando uma queda acentuada nos valores ( $AB/2 = 6,0$  a  $8,0$ ) - curva tipo KH, característica de sedimentos arenosos.

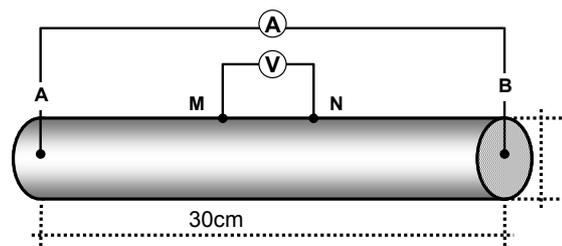
Já, a **SEV-02**, apresenta uma inflexão intermediária na queda dos valores ( $AB/2 = 20,0$ ), caso típico de sedimentos argilosos, resultando na ocorrência da franja capilar de espessura significativa, identificada nas curvas de campo - curva tipo KQH.



**Figura V-03 – Curva de campo e o NA - SEV.**

Na definição do nível d'água, tem-se constatado em vários trabalhos de campo, que a cargabilidade não apresenta a mesma resolução que a resistividade. Procurando ilustrar essa constatação, foram efetuadas medidas em laboratório, em amostras de sedimentos areno-argilosos, conforme esquema da Figura V-04.

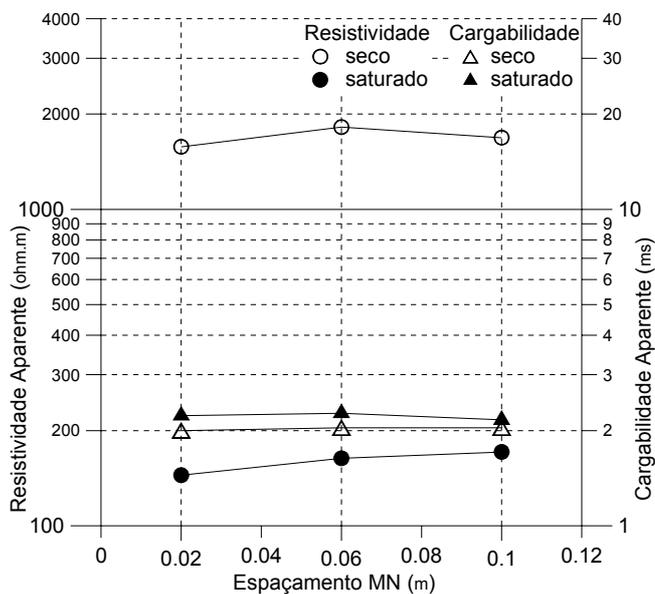
As medidas foram efetuadas inicialmente na amostra seca e posteriormente com a amostra totalmente saturada, com três espaçamentos de MN (2, 6 e 10 cm).



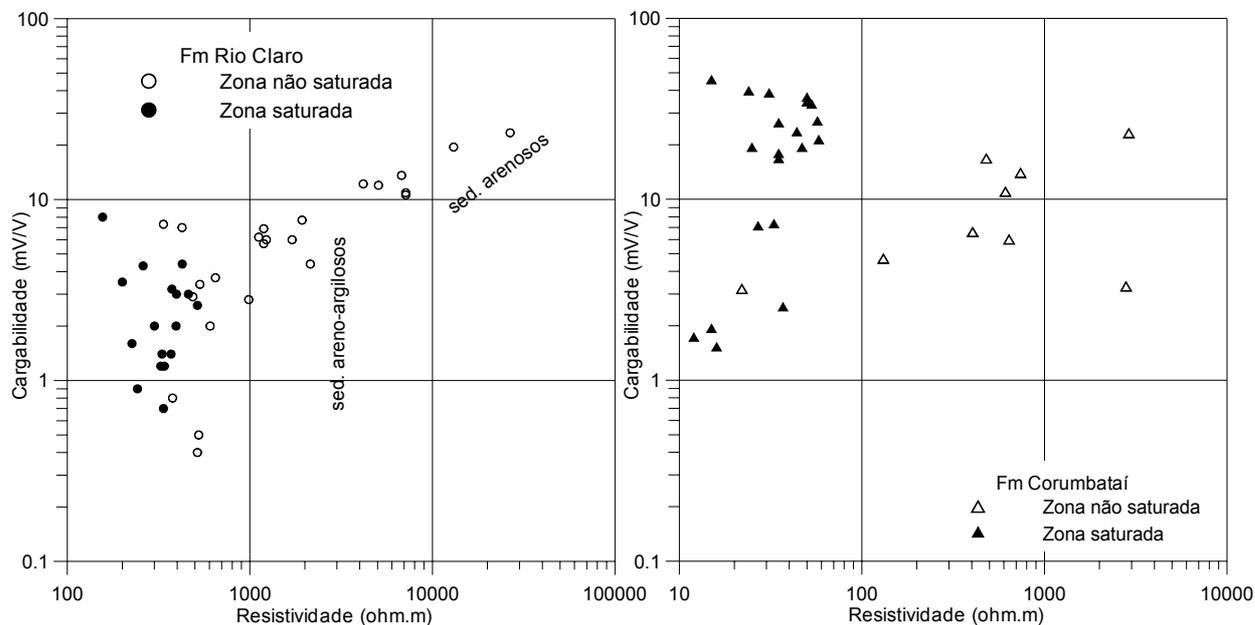
**Figura V-04 – Esquema de medidas em amostras.**

Pode-se observar na Figura V-05, que as resistividades apresentam uma ampla variação nas faixas de valores para a amostra não saturada e saturada. Já a cargabilidade apresenta uma insignificante variação entre os valores da amostra não saturada e saturada.

**Figura V-05 – Medidas de resistividade e cargabilidade em amostra não saturada e saturada.**



No campo, conforme Braga (1997) - Figura V-06, sedimentos argilosos da Formação Corumbataí (COR), apresentaram os valores de cargabilidade para a zona não saturada aproximadamente com a mesma faixa de variação que os valores para zona saturada.



**Figura V-06 – Resistividade/Cargabilidade e o NA (modificado de Braga, 1997).**

Para os sedimentos arenosos da Formação Rio Claro (RC), os valores de cargabilidade da zona não saturada são mais elevados que para os valores da zona saturada, enquanto que os sedimentos areno-argilosos dessa formação, apresentaram faixas de cargabilidade semelhantes para as zonas não saturada e saturada. Já, a resistividade, para as duas formações geológicas,

define claramente as duas zonas de saturação dos solos, não importando a predominância litológica.

Pode-se concluir das análises anteriores que, para sedimentos arenosos a cargabilidade poderia definir a posição do nível d'água, embora sem a mesma intensidade que as resistividades; já para sedimentos com ocorrência das argilas, essa definição seria inviável.

### Identificação Litológica

A partir da quantificação do modelo inicial, faz-se então, a correlação com os dados geológicos disponíveis, visando definir o *tipo litológico* identificado nas camadas geoeletricas – modelo geoeletrico final (Figura V-07). Na zona não saturada, os valores de resistividade apresentam uma ampla gama de variação, em função, principalmente, das variações no conteúdo em água nesses sedimentos.

Dessa maneira, nessa porção do solo, os valores de resistividade não caracterizam a litologia local. Apenas podem indicar a ocorrência estratigráfica das faixas de evapotranspiração, retenção e capilar.

Na zona saturada, os valores de resistividade definem, em termos de predominância, as diferentes litologias presentes, em função do conhecimento geológico da área em questão.

SEV ↓	Modelo Geoeletrico	
4,0m	$\rho_1 = 1.200$ Evapotranspiração	Sedimentos superficiais Zona não saturada
9,0m	$\rho_2 = 5.000$ Retenção	
10,0m	$\rho_3 = 300$ Capilar	
25,0m	$\rho_4 = 80$ Sedimentos arenosos	Zona saturada
52,0m	$\rho_5 = 10$ Sedimentos argilosos	
	$\rho_6 = 300$ Rocha sã - Basalto	

**Figura V-07 – Modelo geoeletrico.**

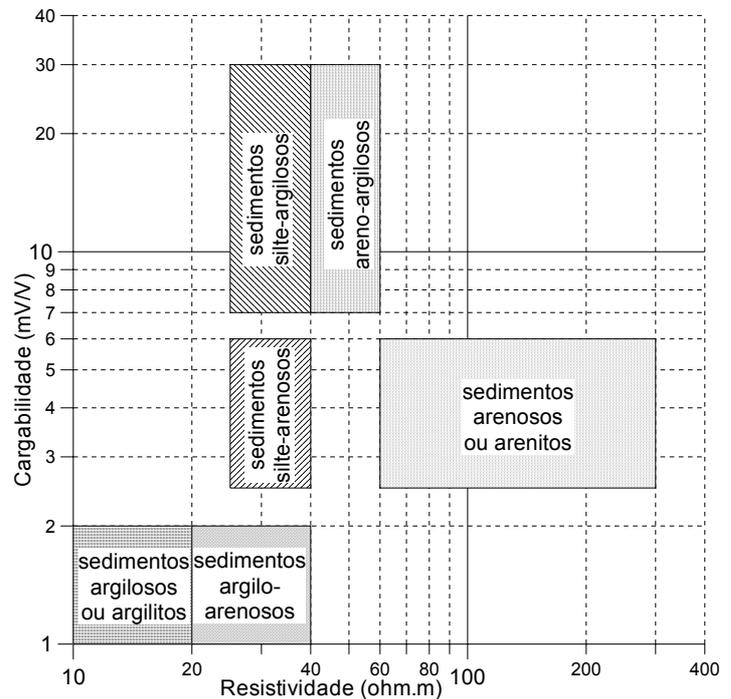
A partir da coletânea de resultados de vários trabalhos desenvolvidos, a Tabela V-01 apresenta faixas de variação dos valores de resistividade e cargabilidade para sedimentos e alguns tipos de rochas, para zona não saturada e saturada.

**Tabela V-01 – Resistividade/cargabilidade e a litologia.**

Tipo Litológico: Sedimentos/(Rochas)		Resistividade e (ohm.m)	Cargabilidade (mV/V)
Zona não saturada		20 a 30.000	2,0 a 25,0
Zona saturada	Sedimentos Argilosos – (Argilitos)	$\leq 20$	1,0 a 2,0
	Sedimentos Argilo-Arenosos	20 a 40	
	Sedimentos Areno-Argilosos	40 a 60	7,0 a 30,0
	Sed. Silte-Argilosos – (Siltitos Argilosos)	25 a 40	
	Sed. Silte-Arenosos – (Siltitos Arenosos)		$\geq 60$
	Sedimentos Arenosos – (Arenitos)		

A Figura V-08, ilustra a correlação entre sedimentos arenosos e argilosos com a resistividade e cargabilidade, para os sedimentos da zona saturada.

**Figura V-08 – Variações da resistividade e cargabilidade em função da litologia na zona saturada.**

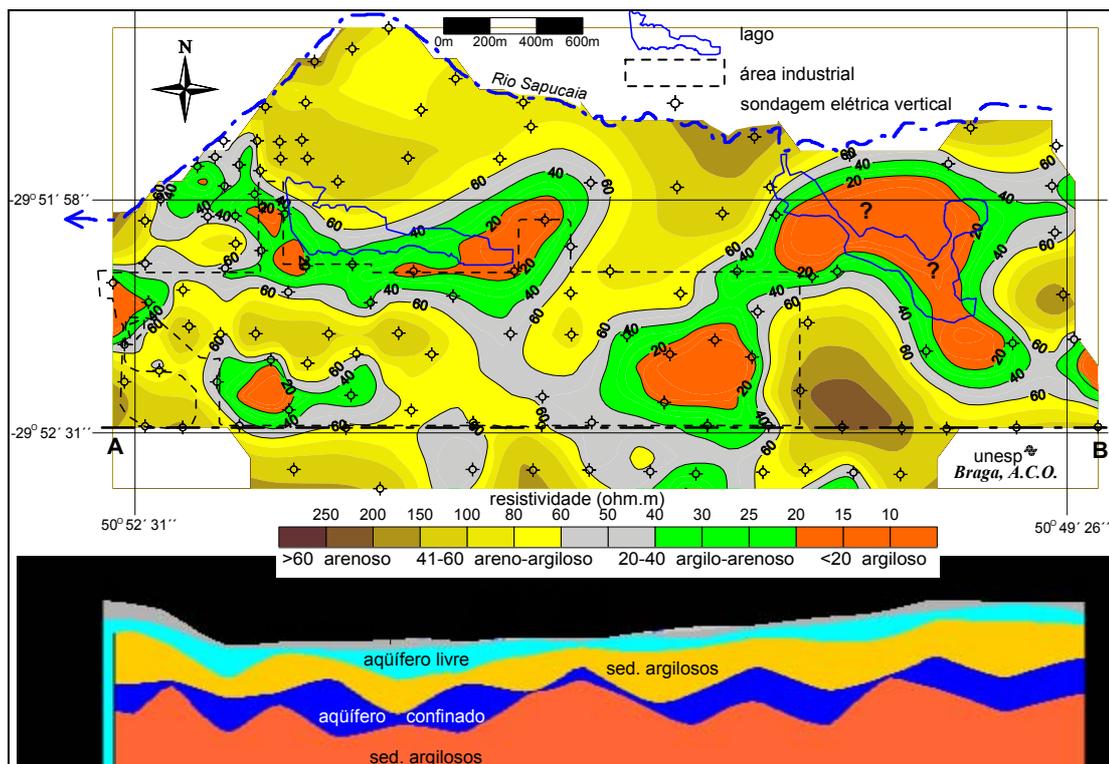


Portanto, na definição da litologia visando identificar camadas geológicas com potencial aquífero para captação de águas subterrâneas, a partir da resistividade e cargabilidade, e ainda, considerando as conclusões de Vacquier et al. (1957) e Draskovits et al. (1990) - Capítulo 3, algumas considerações podem ser efetuadas:

- 1) a Figura V-08, modo geral concorda com os limites propostos por Draskovits et al. (*op cit*) – Figura III-12, e utilizados por Braga (1997), e as camadas argilosas apresentam baixos valores de resistividade e cargabilidade;
- 2) camadas argilo-arenosas, silte-arenosas e silte-argilosas, com a mesma faixa de variação nos valores de resistividade, podem ser individualizadas a partir da cargabilidade;
- 3) camadas siltosas ou arenosas, com misturas de argilas (sedimentos siltes-argilosos e areno-argilosos), apresentam uma resposta IP bem maior que a resposta em camadas argilosas ou arenosas puras;
- 4) camadas arenosas, apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária; e,
- 5) **em rochas sedimentares, os aquíferos a serem explorados, em função da resistividade e cargabilidade, devem apresentar valores, respectivamente, entre:  $60,0 < \rho < 300,0$  ohm.m e  $2,5 < M < 6,0$  mV/V.**

A Figura V-09, apresenta um caso (Braga et al., 2005) de identificação litológica do primeiro nível geoeletrico saturado – aquífero livre (mapa) e uma seção geoeletrica, perfil

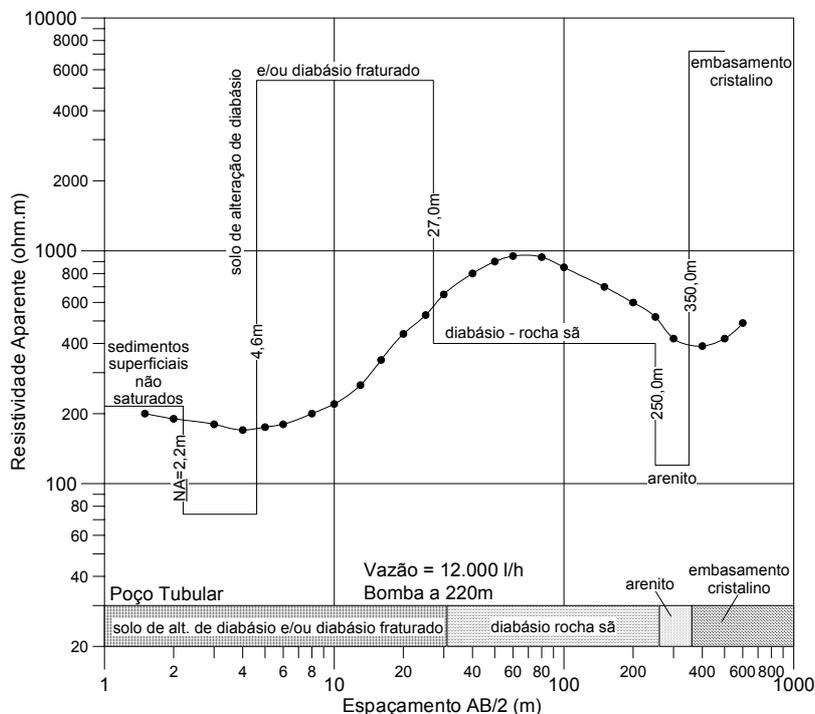
AB, da seqüência estratigráfica da área, procurando delimitar a ocorrência dos aquíferos livre e confinado, a partir da técnica da SEV.



**Figura V-09 – Mapa de resistividade do primeiro nível geolétrico saturado e seção geolétrica AB (modificado de Braga et al., 2005).**

A Figura V-10a mostra um caso de SEV-ER executada no município de Nova Odessa-SP, com a finalidade de auxiliar a locação de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.

Pode-se observar a curva de campo – *resistividade aparente*, a curva de resistividade real – *modelo geolétrico* e o perfil do poço tubular perfurado.

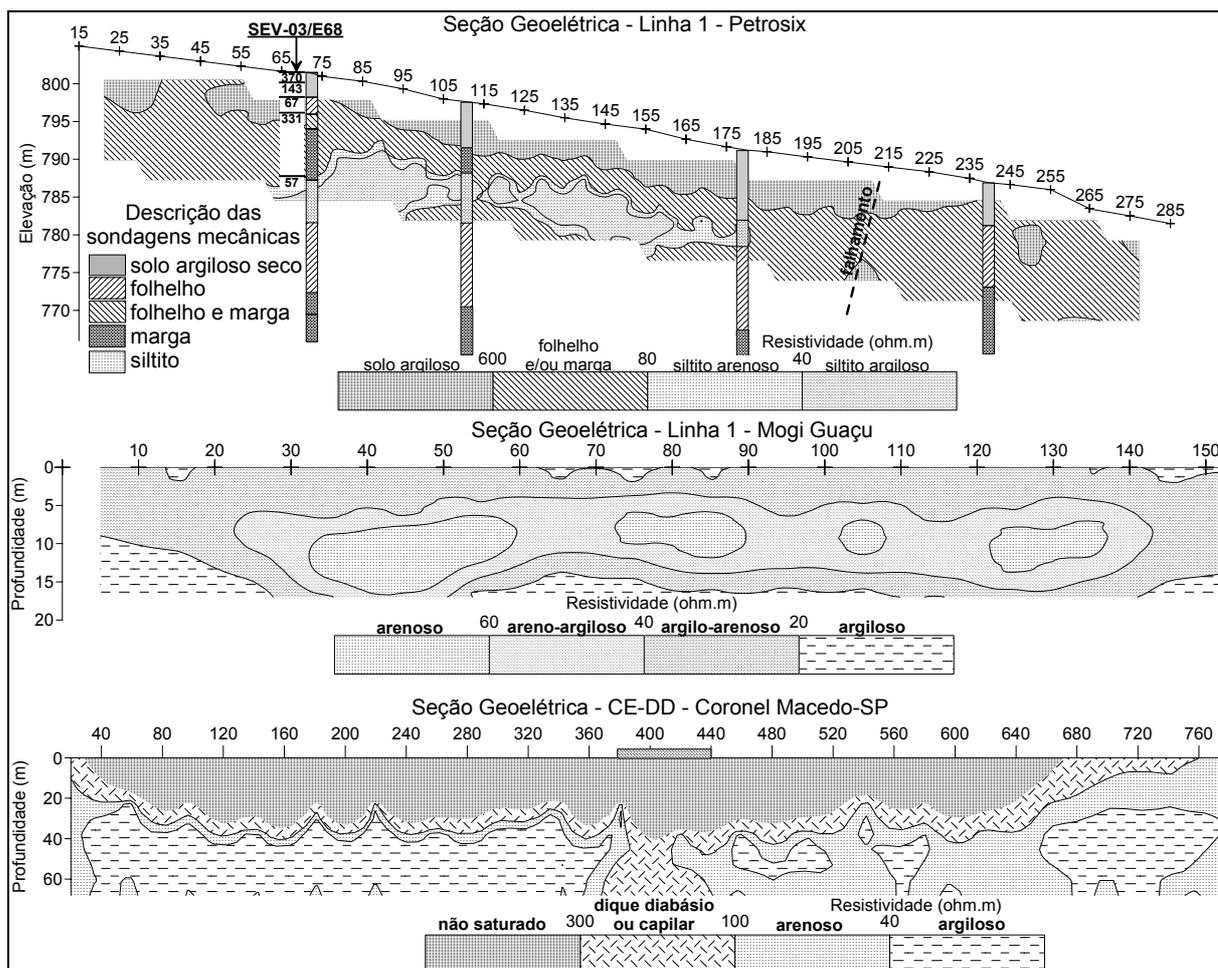


**Figura V-10a – SEV na localização de poço tubular profundo.**

A seqüência estratigráfica da geologia local, indicava uma perfuração de risco, espessa intrusão de diabásio e incerteza na ocorrência de aquíferos promissores em profundidade

(Formação Itararé). Após a perfuração do poço tubular, com uma vazão de 12.000 l/h, os dados obtidos mostraram a boa precisão do modelo geoeletrico obtido previamente.

De acordo com a geologia e área a ser estudada, a técnica do CE-DD, pode ser empregada na identificação litológica e determinação do nível d'água subterrâneo, com maior detalhe que as SEV's, as quais podem ser executadas, em menor número, sendo utilizadas para calibrar o modelo da inversão do CE. A Figura V-10b, apresenta três seções geoeletricas processadas, cujo modelo é associado com a geologia local.

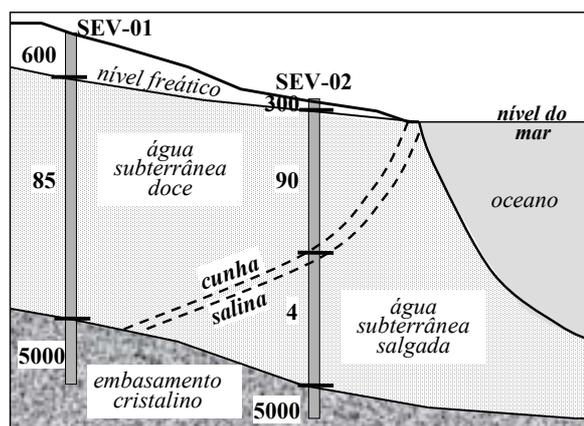


**Figura V-10b – Seções geoeletricas do CE-DD e a litologia.**

### Aqüíferos Sedimentares Costeiros

Uma aplicação importante da SEV-ER e com excelentes resultados, diz respeito a estudo para captação de água subterrânea em *aqüíferos sedimentares costeiros*, onde nesse caso, as intrusões salinas poderiam ser classificadas como poluição “natural”, podendo ser induzida pelo homem.

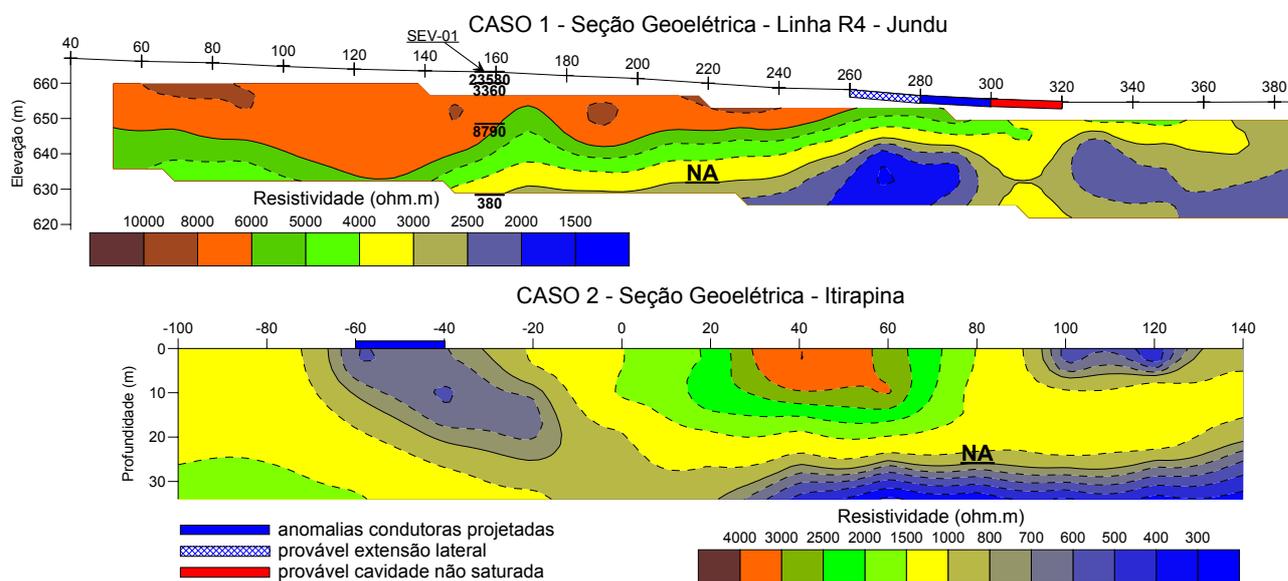
A Figura V-11 ilustra um exemplo de estudo em zona litorânea, com duas SEV's executadas. Para os sedimentos arenosos saturados com água doce, a resistividade é bem mais elevada (85 e 90 ohm.m) que para os mesmos sedimentos saturados com água salgada (4 ohm.m).



**Figura V-11 – Aquíferos sedimentares costeiros.**

### Cavidades em Sedimentos

A Figura V-12 apresenta o modelo geoeletrico resultante da inversão dos dados de campo da técnica do CE-DD, em estudos de identificação de cavidades em sedimentos, visando: a proteção de frentes de lavras em mineração de areias – Caso 1, e a captação de águas subterrâneas superficiais – Caso 2. Nos dois casos, as cavidades apresentam-se saturadas – resistividades baixas.



**Figura V-12 – Cavidades em sedimentos.**

### **5.1.2. Aquíferos Cársticos**

Neste tipo de aquífero, um caso particular de bacias sedimentares – rochas calcárias, é importante, tanto a caracterização dos materiais de maneira pontual (SEV), como a caracterização de estruturas descontínuas a superfície do terreno (CE), como no caso de falhamentos e cavidades por dissolução do material calcário. Como técnica principal, têm-se o

CE-DD, o qual apresenta boa precisão. A técnica da SEV, pode ser utilizada para determinar o topo das camadas, nível d'água, etc..

Como os resultados e produtos obtidos pelo CE-DD, em rochas calcárias, são semelhantes aos obtidos em rochas cristalinas, serão discutidos no sub-item Rochas Cristalinas.

### 5.1.3. Estimativa de Parâmetros Hidráulicos

O parâmetro físico resistividade pode ser correlacionado com certos parâmetros importantes utilizados na Hidrogeologia, essas correlações, mesmo apresentando um caráter aproximado, podem contribuir no entendimento dos modelos hidrogeológicos de uma determinada área de estudo, minimizando os custos e prazos dos projetos.

#### Resistividade e a Porosidade

As relações entre as resistividades de uma formação aquífera saturada não argilosa, a do eletrólito que preenche seus poros e a porosidade total, podem ser estimadas através do coeficiente F - Fator de Formação (Archie, 1942). Este fator pode ser calculado a partir das equações:

$$F = \frac{\rho_R}{\rho_W} \quad , \quad e \quad V-01 \qquad P^m = \frac{1}{F} \quad V-02$$

onde,  $\rho_R$  = resistividade média da rocha (matriz e poros incluídos);  $\rho_W$  = resistividade da solução de saturação dos poros; P = porosidade total; e, m = coeficiente de cimentação. Das equações anteriores, tem-se:

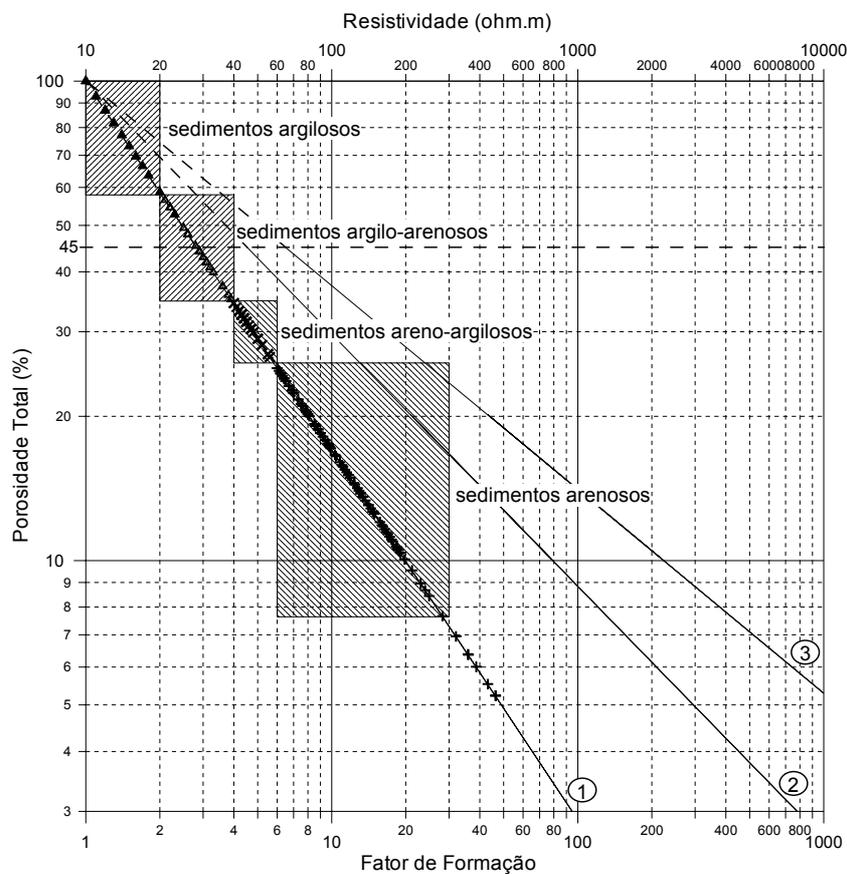
$$P^m = \frac{\rho_W}{\rho_R} \quad V-03$$

Medidas da porosidade em laboratório, permitem calcular "m"; senão, tomando  $\rho_W = 10$  ohm.m e a Equação V-01, pode-se estimar a porosidade a partir do gráfico da Figura V-13. Vacúolos isolados não são considerados, portanto, obtém-se a porosidade total comunicante. Assume-se que, para valores de porosidade total > 45%, predominam sedimentos argilosos.

Nesse gráfico, foram lançados valores de resistividade obtidos por 120 SEV's por Braga et al. (2005), aplicadas a estudos de aquífero livre e confinado, apresentando a correlação fator de formação/porosidade, com a litologia dos sedimentos definida pelos valores de resistividade.

Na faixa de sedimentos argilo-arenosos ( $20 < \rho < 40$  ohm.m), valores de porosidade > 45%, indicam muito pouco material arenoso; já valores de porosidade < 45%, indicam

aumento na ocorrência de sedimentos arenosos. O aumento da granulometria dos sedimentos, implica em um aumento dos valores de resistividade, e conseqüentemente, numa diminuição da porosidade.



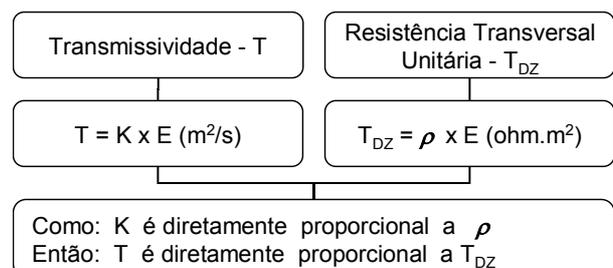
- **curva 1** ( $m = 1,3$ ): formação fofa – sedimentos inconsolidados;
- **curva 2** ( $m = 1,9$ ): rocha consolidada com porosidade de interstícios (quartzitos, arenitos);
- **curva 3** ( $m = 2,35$ ): rocha consolidada, para a qual a porosidade resultante da fissuração é mais importante que a de interstício (calcários, derrames basálticos).

**Figura V-13 – Fator de formação e a porosidade (modificado de Archie, 1942).**

### Resistividade e a Condutividade Hidráulica e Transmissividade

A condutividade hidráulica ( $K$ ) e a transmissividade ( $T$ ) de uma camada geológica (Capítulo 2), podem ser correlacionados com os parâmetros geoeletricos resistividade e espessura das camadas processadas. Como demonstraram, entre outros, Henriot (1975) e Griffiths (1976), a resistividade elétrica de sedimentos arenosos e argilosos saturados, pode ser tomada como sendo diretamente proporcional à condutividade hidráulica desses materiais.

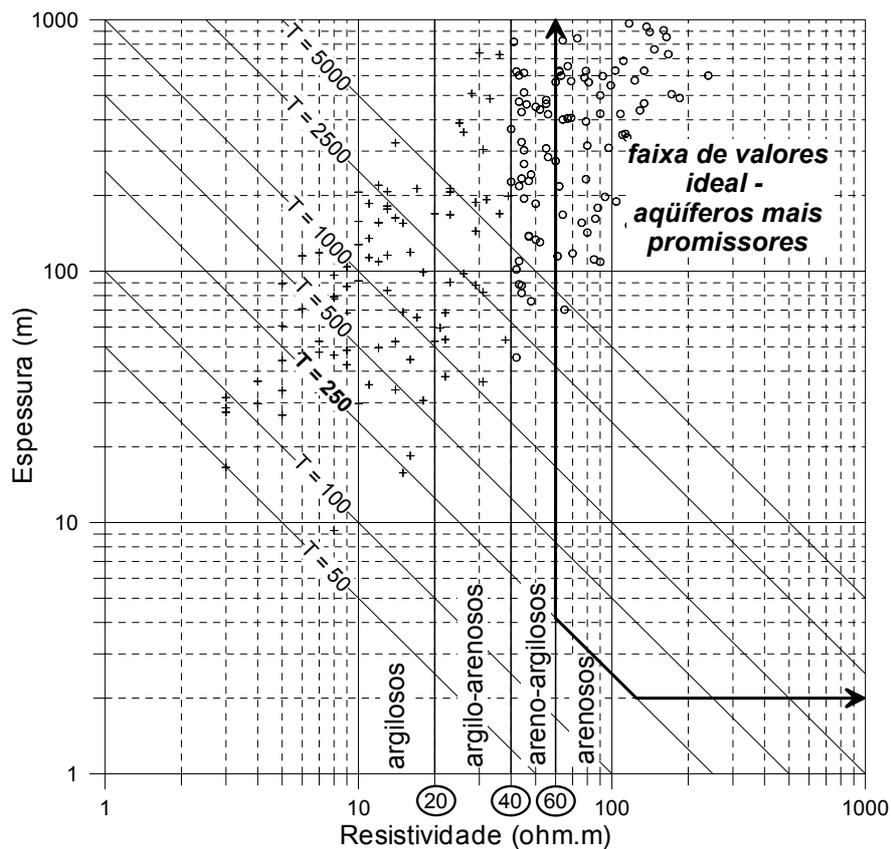
Portanto, como a resistência transversal unitária  $T_{DZ}$  (Capítulo 3), é o produto da resistividade pela espessura de uma camada (Equação III-16), tem-se a seguinte correlação:



Em estudos hidrogeológicos envolvendo camadas arenosas ou argilosas saturadas, a associação de mapas de resistência transversal unitária com mapas de resistividade, referentes

a uma determinada camada de interesse, contribui significativamente com esses estudos, podendo dirigir a locação dos poços tubulares em alvos mais promissores.

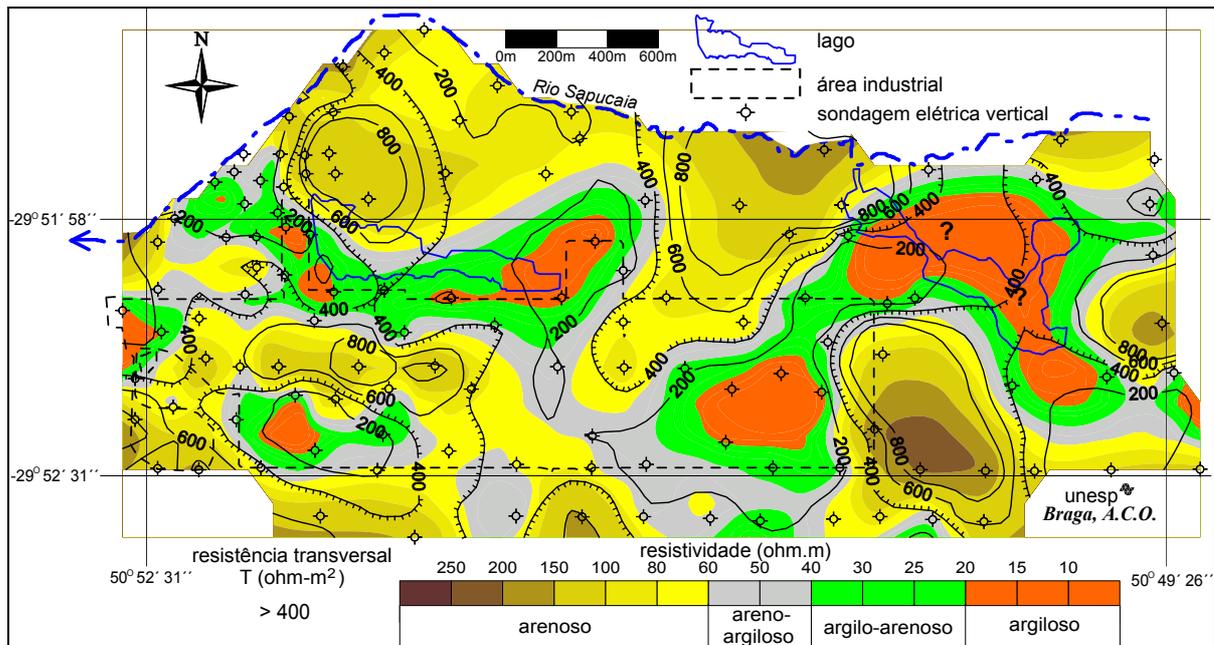
Como exemplo de aplicação desse parâmetro  $T_{DZ}$ , apresentam-se a seguir alguns resultados da campanha geofísica por Braga et al. (2005). A Figura V-14, mostra os valores obtidos pelo modelo geométrico referente à primeira camada geométrica saturada, lançados no gráfico padrão (Figura III-24). O estudo dessa primeira camada saturada, visou caracterizar o aquífero livre.



**Figura V-14 – Relação resistência transversal unitária/transmissividade (Braga et al., 2005).**

Os valores de  $T_{DZ}$  para os sedimentos arenosos, tendem a serem mais elevados que para os sedimentos argilosos, entretanto podem-se observar também valores para os sedimentos argilosos maiores que para os sedimentos arenosos; isto se dá em função de um aumento da espessura dessa camada. Portanto, os valores de  $T_{DZ}$  têm que estar associados a litologia – *mapa de resistividade*.

A Figura V-15 mostra o mapa de  $T_{DZ}$  para a área estudada, indicando locais associados à maior transmissividade do aquífero livre ( $T_{DZ} > 400 \text{ ohm.m}^2$ ), correlacionado com o mapa de resistividade dessa primeira camada saturada.



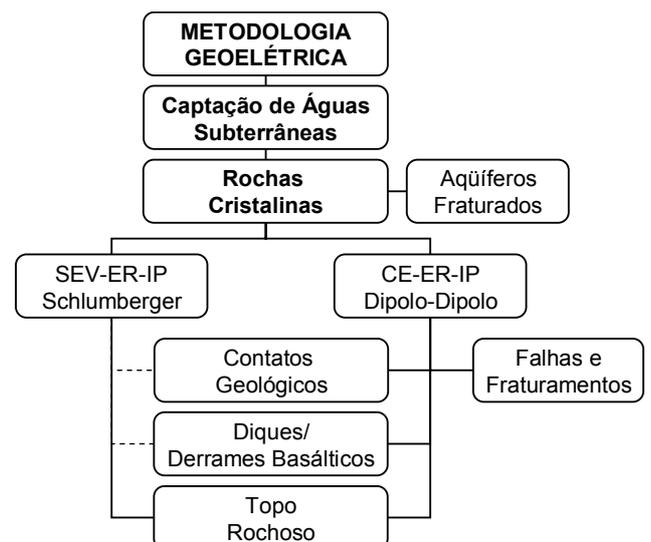
**Figura V-15 – Mapa de resistência transversal unitária e resistividade do aquífero livre (Braga et al., 2005).**

## 5.2. ROCHAS CRISTALINAS

Na captação de águas subterrâneas, visando abastecimento, em terrenos cristalinos, o aquífero é constituído por falhas e/ou fraturas nas rochas, normalmente não paralelas à superfície do terreno, cujo objetivo principal da geofísica é o de posicionar os falhamentos e/ou fraturamentos em superfície, indicando o sentido de mergulho.

Conforme já comentado no sub-item 4.2.1., a técnica mais adequada sugerida, é o caminhamento elétrico – arranjo dipolo-dipolo (CE-DD), com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida. A técnica do SEV, pode ser utilizada em situações específicas, com menor detalhe do que a técnica do CE.

A Figura V-16, apresenta a metodologia recomendada em estudos visando à captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas, com os principais produtos a serem obtidos. Com destaque para a determinação de *falhas e fraturamentos*.



**Figura V-16 – Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Cristalinas.**

### 5.2.1. Aquíferos Fraturados

Este tipo de aquífero é composto por rochas compactas, nas quais a água ocorre ocupando fissuras, fendas ou fraturas dessa rocha. Ressalta-se que nesse caso, devido ao caráter da anomalia visada, incluem-se nessa discussão os aquíferos cársticos (rochas sedimentares). Através do CE, pode-se posicionar, em superfície, a zona de anomalia condutora (associada a falhamentos e/ou fraturamentos saturados), bem como estimar o mergulho da estrutura identificada.

Recomenda-se, a utilização do arranjo dipolo-dipolo, com no mínimo três linhas topográficas de levantamento, espaçamento entre os dipolos  $x = 40$  metros e, no mínimo, cinco níveis de investigação, os quais atingiriam a uma profundidade teórica total de 120 metros, satisfatória para se identificar anomalias significativas. De um modo geral, as resistividades das rochas cristalinas (por exemplo, granito, gnaisses) e calcárias, possuem valores elevados, apresentando um bom contraste com as zonas fraturadas e/ou falhadas saturadas com água – faixas de baixa resistividade.

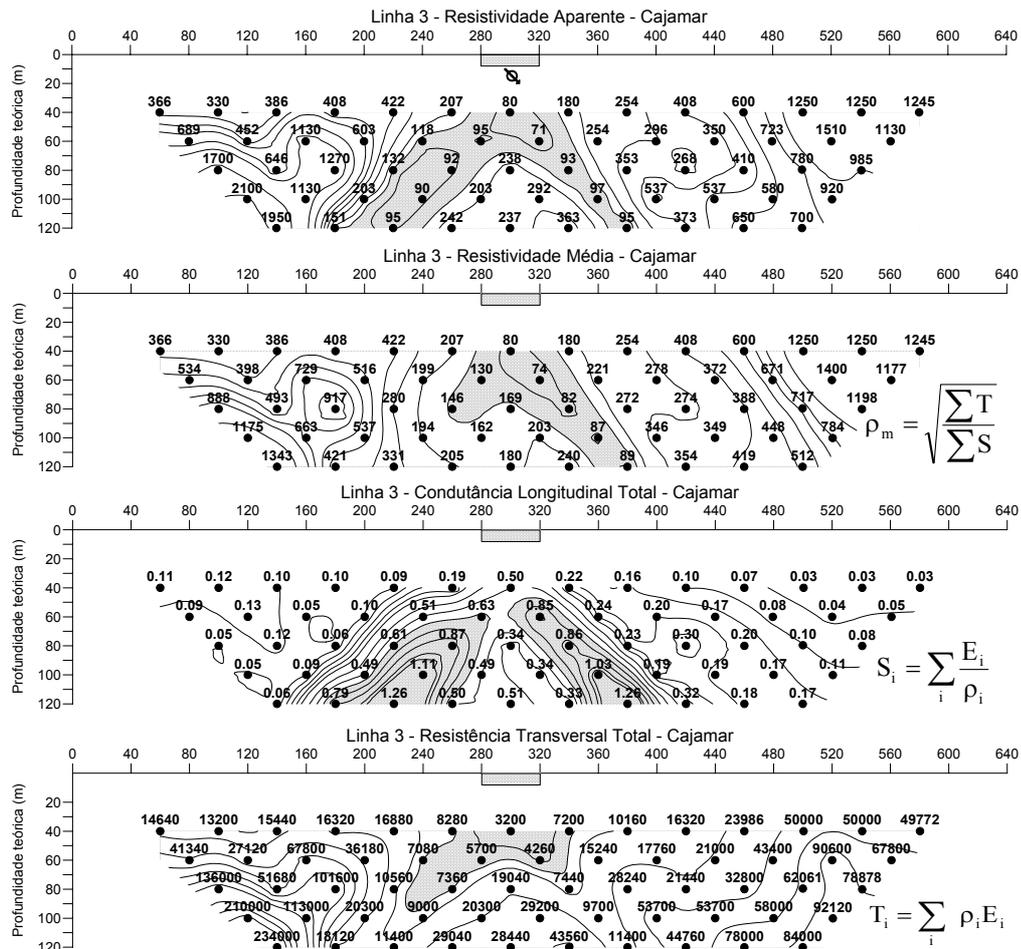
Inicialmente, a determinação das anomalias geofísicas, pode ser efetuada qualitativamente, nas pseudo-seções, posicionando-as na superfície do terreno, com o mergulho indicado. Mapas dos vários níveis investigados pelo dipolo-dipolo, podem ser traçados, procurando localizar, em planta, as direções das zonas de interesse, em várias profundidades de investigação, constituindo uma visão em 3D.

Procurando analisar as anomalias resultantes de fraturas/falhamentos na rocha, quanto a sua forma e intensidade, alguns casos históricos são discutidos, sendo aplicados os parâmetros DZ: condutância longitudinal total (S), resistência transversal total (T) e resistividade média ( $\rho_m$ ). As pseudo-seções, obtidas pelo CE, podem ainda ser interpretadas em 2D utilizando-se de softwares que possibilitam a inversão dos dados de resistividade aparente – interpretação quantitativa, gerando um modelo geoeletrico real.

#### **Caso Histórico - 1:**

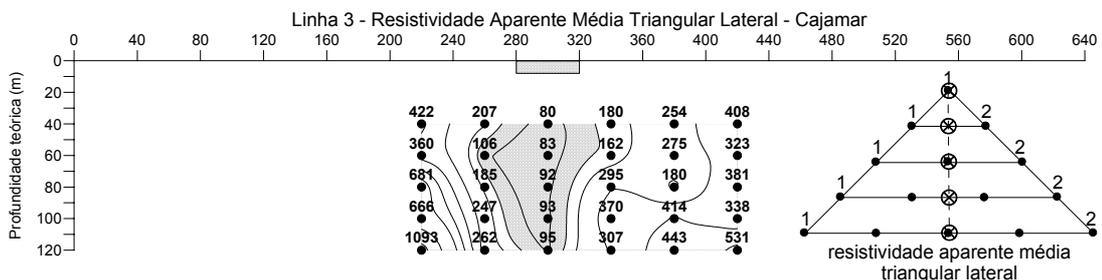
A Figura V-17 ilustra uma aplicação em aquíferos cársticos. Observa-se nessa figura, que a intensidade da anomalia na seção de condutância longitudinal total (S) é maior que na seção de resistência transversal total (T), isto se deve, principalmente, ao fato de que nesta situação a resistividade longitudinal é mais sensível à zona fraturada que a resistividade transversal.

A seção de resistividade média, “filtra” as resistividades aparentes, indicando a posição da anomalia na superfície do terreno, e a direção do mergulho (E-280 para E-360, à direita da seção); fato confirmado por dados geológicos disponíveis.



**Figura V-17 – Resistividade aparente e os parâmetros de DZ – CE-DD (Caso 1).**

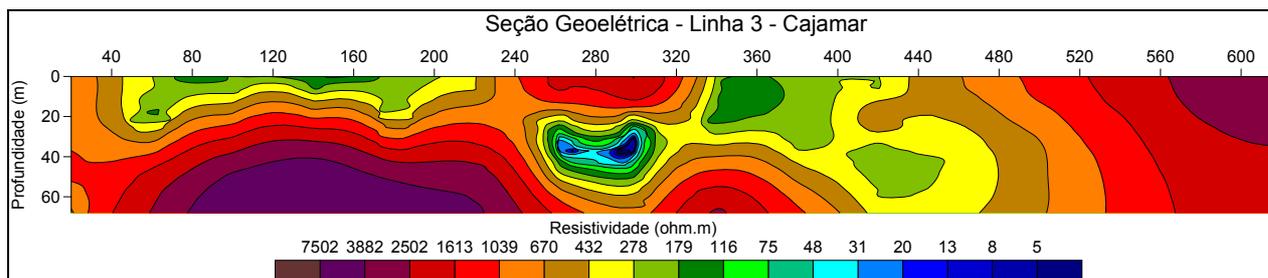
Procurando analisar a anomalia condutiva, quanto a sua forma e intensidade, a Figura V-18 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente plotada pelo sistema de média triangular lateral (sub-item 3.4.2. – Figura III-20). A posição e o mergulho da anomalia condutora, ficam bem evidentes.



**Figura V-18 – Pseudo-seção de resistividade aparente – plotagem média triangular lateral.**

A Figura V-19, mostra o resultado da inversão da Linha 3 – *resistividade aparente*, utilizando o software Res2dinv, com a seção geolétrica real, sendo as resistividades e profundidades obtidas pela inversão das resistividades aparentes. Observa-se, pela inversão,

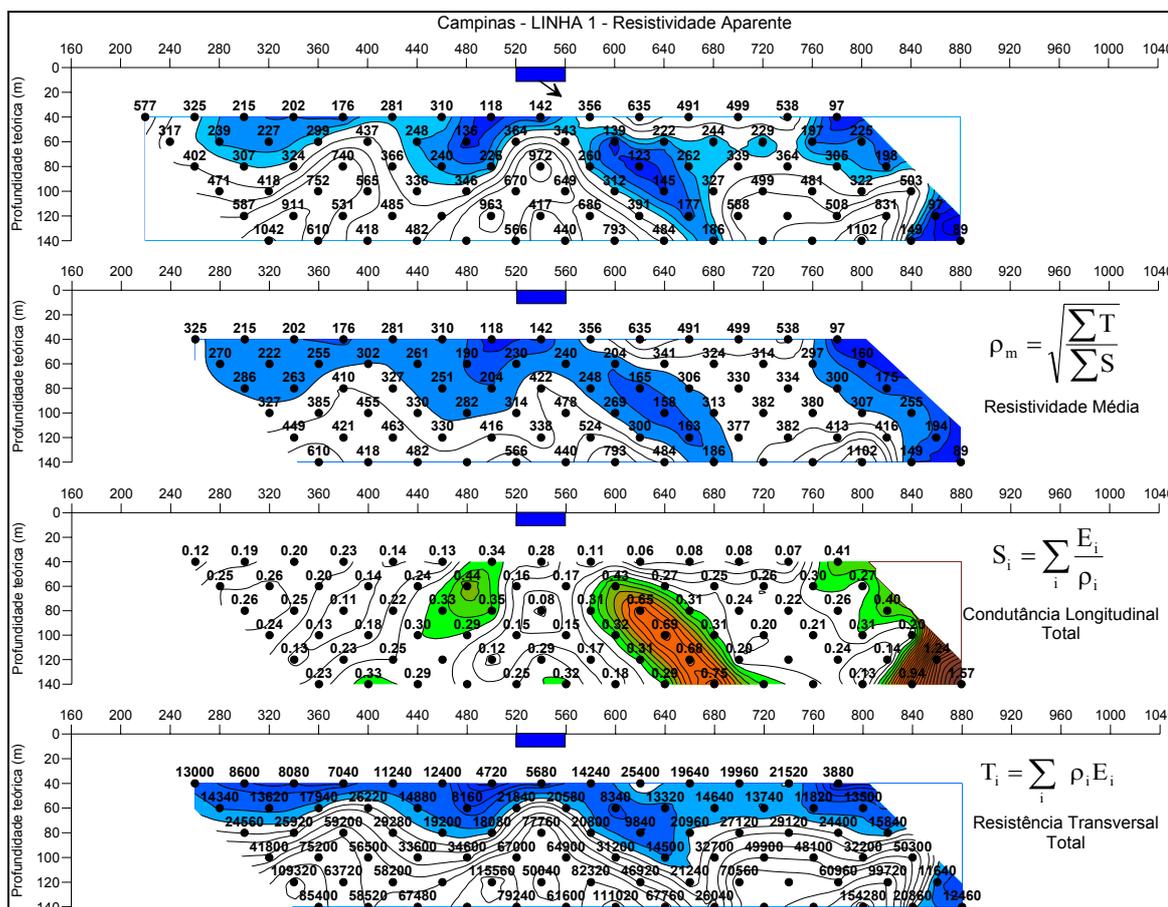
uma anomalia condutiva vertical, centralizada entre as estacas 280 e 320, com pequeno prolongamento à direita, semelhante à Figura V-18.



**Figura V-19 – Inversão da Linha 3 – Caso 1 - Res2dinv (Geotomo).**

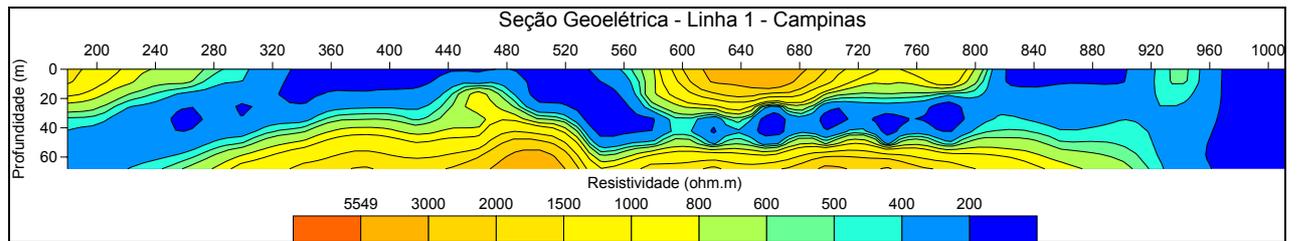
**Caso Histórico - 2:**

A Figura V-20, ilustra um caso de rochas cristalinas (Fundunesp, 1997/a), sendo que as mesmas considerações e conclusões anteriores podem ser aplicadas nesse caso. Com destaque para as seções de resistividade média e condutância longitudinal.



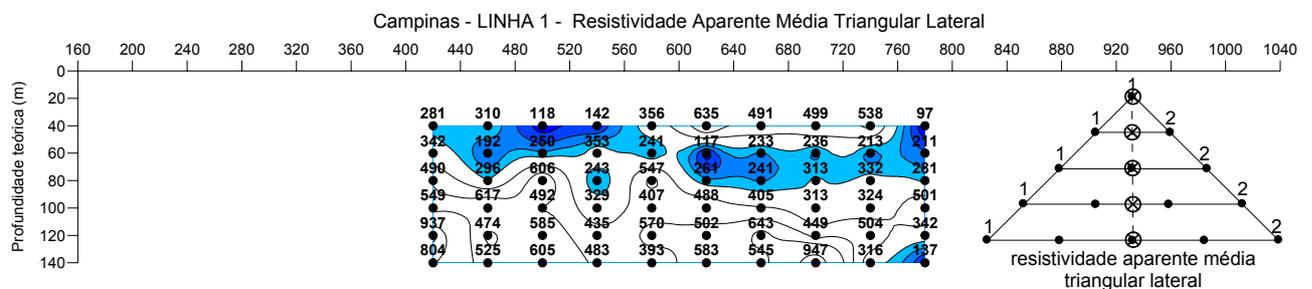
**Figura V-20 – Resistividade aparente e os parâmetros de DZ – CE-DD (Caso 2).**

A Figura V-21, mostra o resultado da inversão da Linha 1, utilizando o mesmo software anterior. O modelo geolétrico definiu, como nas seções da Figura V-20, uma anomalia condutora, posicionada entre as E-520 a E-560; entretanto o modelo apresenta um fraturamento horizontal ao longo da seção.



**Figura V-21 – Inversão da Linha 1 – Caso 2 - Res2dinv (Geotomo).**

A pseudo-seção de resistividade aparente, foi processada e plotada pelo sistema de média triangular lateral (Figura V-22). Observa-se na seção “filtrada” que a anomalia condutora não apresenta uma continuidade em profundidade, evidenciando um fraturamento lateral, como mostra a Figura V-21. Nesse caso, o poço tubular perfurado entre as estacas 560-600, apresentou uma vazão que atendia à demanda, entretanto com rebaixamento significativo, não mantendo a vazão inicial.

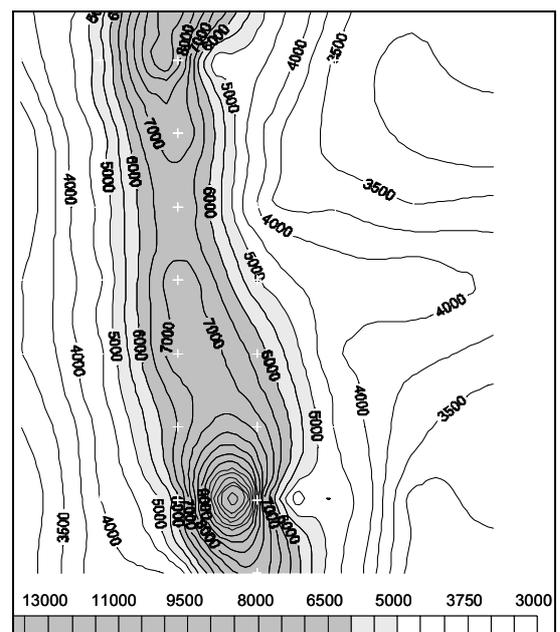


**Figura V-22 – Pseudo-seção de resistividade aparente – plotagem média triangular lateral (Caso 2).**

### Caso Histórico - 3:

Cabe ressaltar que os levantamentos geofísicos, podem inviabilizar uma perfuração para captação de água subterrânea, dependendo dos resultados obtidos. A Figura V-23, ilustra um caso de aplicação do CE – arranjo gradiente, na identificação de zonas favoráveis à locação de poço tubular (UHE Balbina/AM).

Nesse caso, as resistividades determinaram uma faixa anômala de *altos* valores de resistividades, indicando uma zona, de falhamento resistivo, não adequada à locação de poços visando à captação de água subterrânea.



**Figura V-23 – CE/Gradiente.**

Posteriormente, mesmo com os resultados da geofísica, foi perfurado um poço no centro da anomalia, e como se esperava, totalmente seco, indicando uma falha preenchida de arenito silicificado.

### 5.2.2. Rochas Basálticas e Diabásios

A Figura V-24, apresenta um caso de mapeamento de um dique de diabásio em rochas sedimentares da Bacia do Paraná-SP, através da técnica do CE-DD. A anomalia resistiva da pseudo-seção de resistividade aparente, associada ao dique, é bem definida, apresentando um flanco (efeito dos eletrodos de corrente) mais intenso, indicando um forte mergulho aparente à direita da linha. Nesse caso, interpreta-se o sentido do mergulho para esquerda da linha.

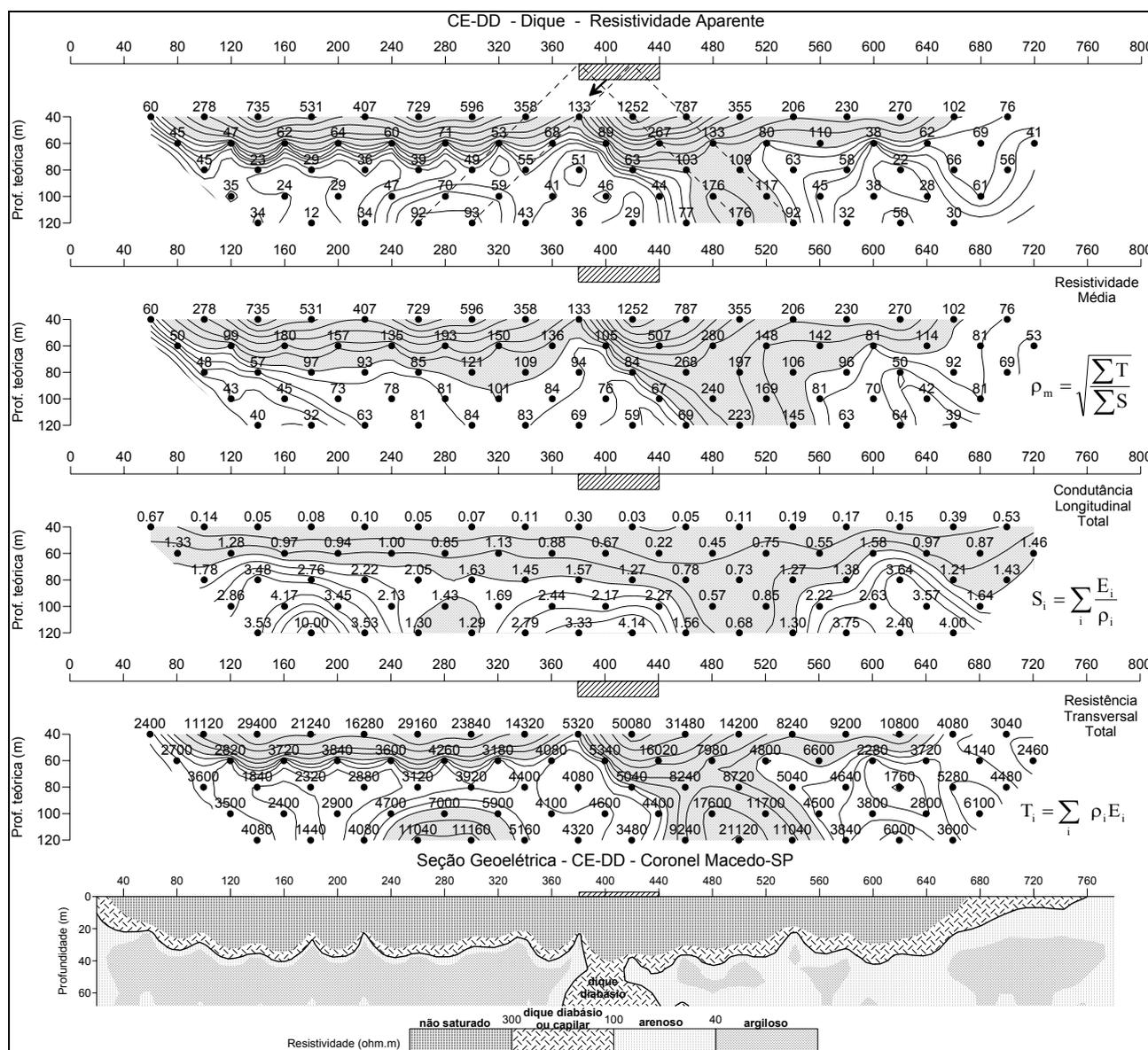
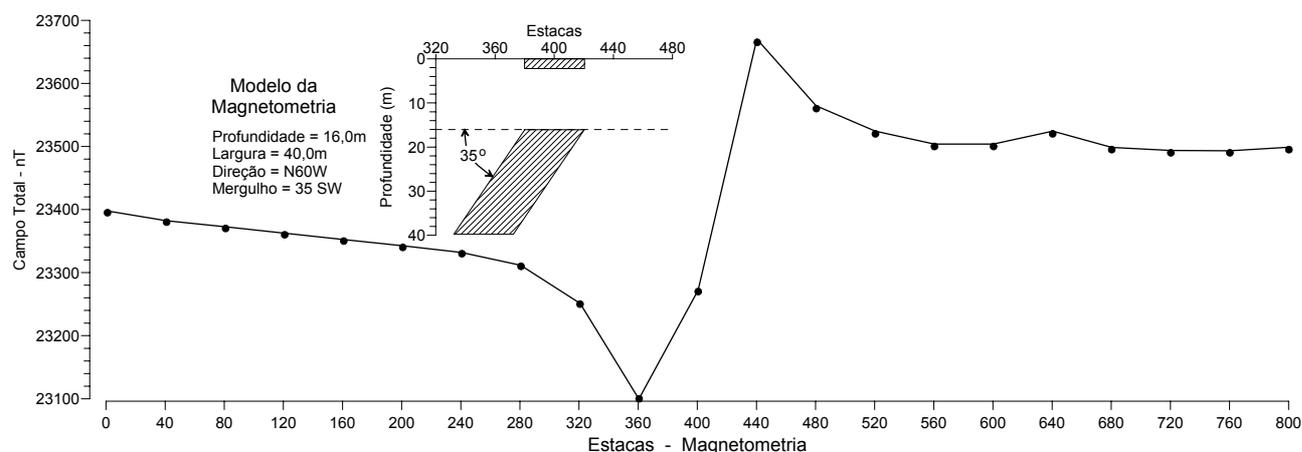


Figura V-24 – Resistividade (CE-DD) – rocha intrusiva/diabásio.

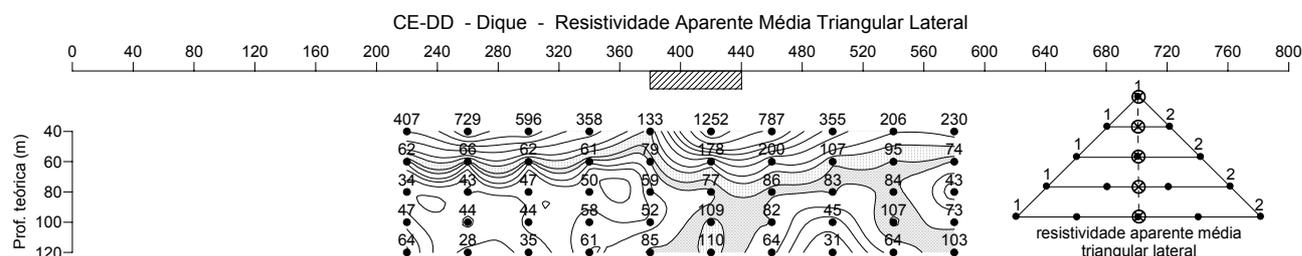
As seções DZ, apenas destacam a anomalia resistiva referida. A seção geoeétrica resultante da inversão dos dados de resistividade aparente, define a posição do dique, indicando o sentido de mergulho. Observa-se, nas seções, a posição do nível d'água bem definida.

Os resultados do levantamento magnetométrico executado na mesma linha que o CE-DD são apresentados na Figura V-25. Pode-se observar que os resultados são semelhantes, confirmando a posição e o sentido de mergulho do corpo do dique, definidos na seção geoeétrica – modelo geoeétrico resultante da inversão.



**Figura V-25 – Magnetometria – rocha intrusiva/diabásio.**

Procurando analisar a anomalia resistiva do caso anterior, quanto a sua forma e intensidade, a Figura V-26 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente plotada pelo sistema de médias triangulares laterais. Observa-se que a pseudo-seção resultante indica a posição real de mergulho da anomalia, conforme os resultados indicados anteriormente da magnetometria e seção geoeétrica com inversão dos dados.



**Figura V-26 – Pseudo-seção de resistividade aparente – plotagem média triangular lateral (rocha intrusiva/diabásio).**

O método de plotagem dos dados de campo, pela média triangular lateral, pode auxiliar na interpretação final, de maneira qualitativa, posicionando as anomalias com maior precisão.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS GEOELÉTRICOS NOS ESTUDOS DA CONTAMINAÇÃO DE SOLOS, ROCHAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

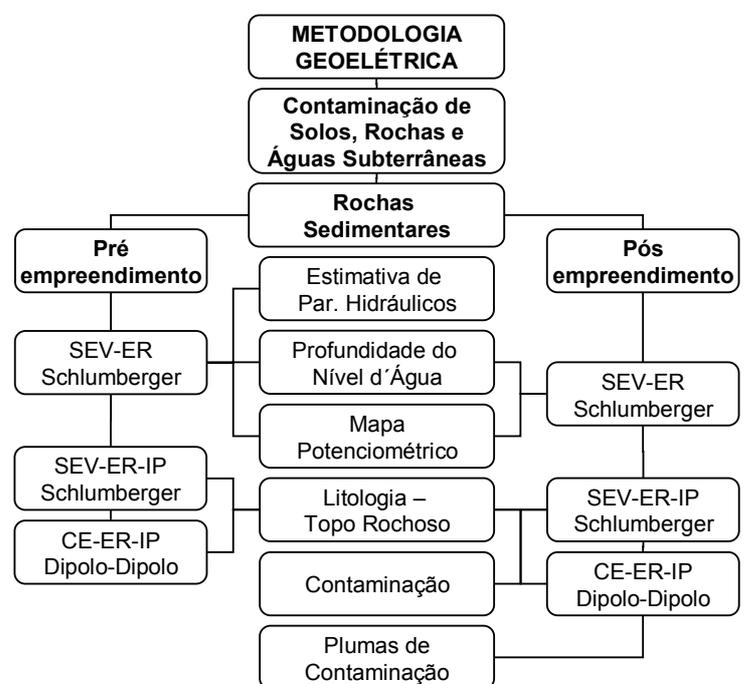
### 6.1. ROCHAS SEDIMENTARES

Nos estudos ambientais, visando obter um diagnóstico de solos, rochas e águas subterrâneas, frente a contaminantes, em sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, tem-se as técnicas mais adequadas sugeridas, considerando resolução, custo e rapidez, a sondagem elétrica vertical – arranjo Schlumberger (SEV) e o caminhamento elétrico – arranjo Dipolo-Dipolo (CE), com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida.

A técnica do CE-DD, assume papel importante nesses estudos ambientais, delimitando com detalhe, lateralmente e em profundidade, eventuais plumas de contaminação, com maior resolução e prazos reduzidos em relação as SEV's e demais métodos/técnicas geofísicas. Quanto à resolução, a superioridade dessa técnica em relação, por exemplo, ao radar de penetração no solo (GPR), deve-se ao fato de que, além de não ser afetada por várias interferências comuns no GPR, não apresenta problemas quanto à profundidade de investigação na presença de camadas muito condutoras, podendo, dependendo do espaçamento entre os dipolos, atingir profundidades ideais nesse tipo de estudo.

Como já ressaltado anteriormente, nos estudos envolvendo prováveis contaminações, a fase do empreendimento, pré ou pós-instalação, juntamente com a geologia local, é importante na definição da metodologia geoeletrica e nos produtos a serem obtidos.

A Figura VI-01, apresenta a metodologia recomendada, com os principais produtos. Ressalta-se que, neste caso também, os sedimentos inconsolidados foram incorporadas nas discussões envolvendo as rochas sedimentares – aquíferos granulares.



**Figura VI-01 – Metodologia e produtos em estudos ambientais – Rochas Sedimentares.**

Dos produtos referidos na Figura VI-01, destacam-se a determinação da: *profundidade do nível d'água, mapa potenciométrico, identificação litológica, identificação e delimitação de plumas de contaminação e estimativa de parâmetros hidráulicos*. Os produtos profundidade do nível d'água e identificação litológica, foram abordados no Capítulo 5, e suas discussões aplicam-se nos estudos ambientais envolvendo as fases pré e pós-emprego.

### 6.1.1. Mapa Potenciométrico

Na elaboração do mapa potenciométrico, o método da eletrorresistividade com a técnica da SEV – Schlumberger, adquire um papel fundamental, para o entendimento do fluxo d'água subterrâneo, permitindo um recobrimento de pequenas a grandes áreas de estudos, de maneira rápida, precisão satisfatória e custos relativamente reduzidos.

Outro fato que merece destaque, diz respeito à coleta de dados do nível d'água de poços de monitoramento (PM) para elaboração do mapa potenciométrico, pois se deve prestar a atenção nos aquíferos perfurados pelos poços (Figura VI-02). Não tem sentido misturar dados referentes a aquíferos livres e confinados, e traçar um mapa.

Em muitos dados de poços disponíveis, essa informação não está clara. Neste ponto, as SEV's são fundamentais, pois podem individualizar esses diferentes aquíferos, fornecendo com certeza os dados necessários.

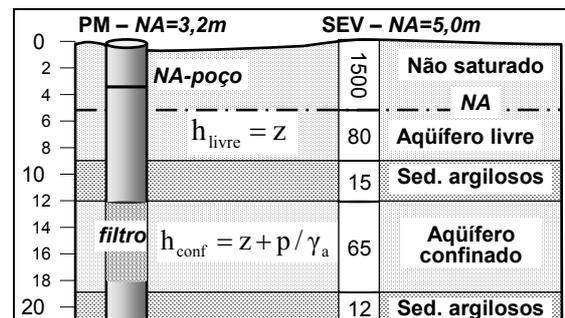


Figura VI-02 – Nível d'água – PM e SEV.

Na identificação do NA, para elaboração de mapas potenciométricos, cabe ressaltar ainda que, na zona não saturada, os valores de resistividade tendem a serem altos (normalmente, superiores a 500 ohm.m), diminuindo, significativamente, quando atingem as zonas saturadas, sendo possível identificar com razoável precisão o nível d'água.

A Figura VI-03 (Braga et al., 2005) apresenta os mapas topográfico e potenciométrico em 3D de uma refinaria de combustível. A área apresenta grandes dimensões (> 4 Km<sup>2</sup>), inviabilizando o levantamento através de poços, mais caro e demorado que as SEV's. A partir dos resultados da campanha de 120 SEV's, poços de monitoramento foram locados com maior precisão em alvos pré-determinados, diminuindo a quantidade inicialmente programada.

A Figura VI-04, ilustra os mapas topográfico e potenciométrico 3D, em área de mineração de areia. Nesse caso, efetua-se um monitoramento anual do comportamento das águas subterrâneas frente ao avanço da lava.

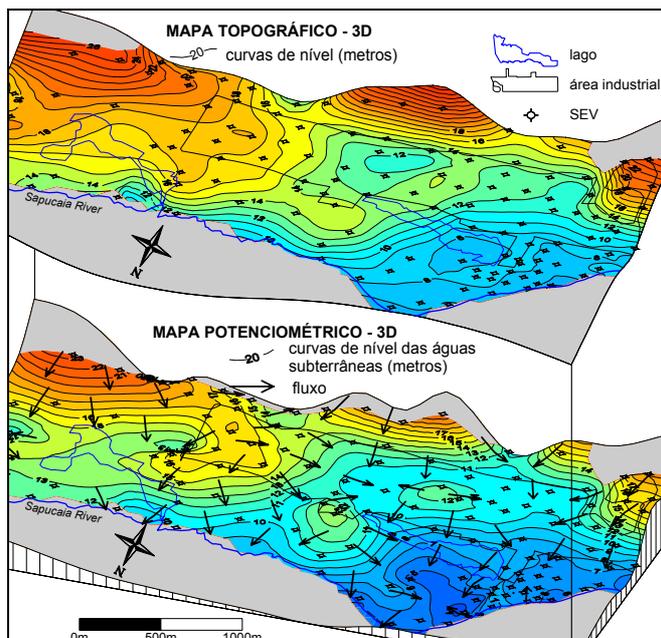


Figura VI-03 – Potenciométrico em 3D – SEV (modificado de Braga et al., 2005).

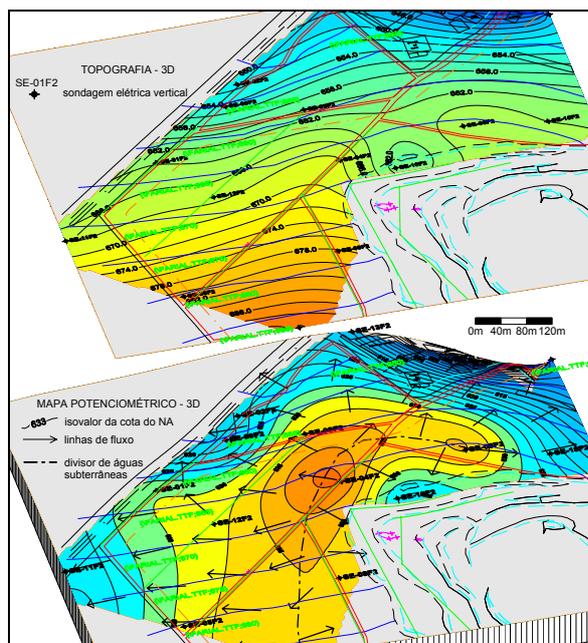


Figura VI-04 – Potenciométrico em 3D - SEV.

Entretanto, em áreas pós-empresamento, com ocorrência de poluentes, as resistividades naturais da zona não saturada, normalmente, diminuem devido à presença de determinados tipos de poluentes, dificultando a correta definição do NA (Figura VI-05a).

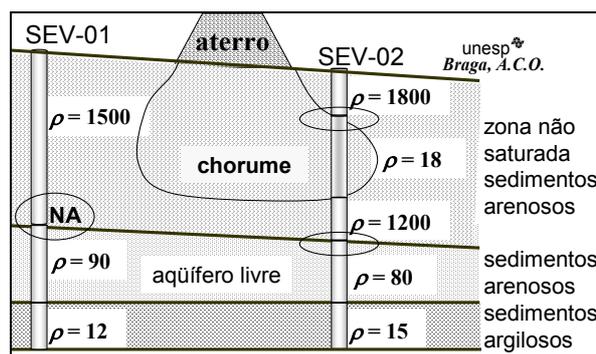


Figura VI-05a – NA e contaminantes.

Essa alteração, em função da presença de contaminantes, nos valores dos parâmetros geoeletricos dos materiais geológicos, também pode trazer certas dificuldades na identificação litológica. A interpretação conjunta de várias SEV's, dados de poços e localização dos ensaios, revelam-se fundamentais na definição do modelo final.

A Figura VI-05b, apresenta uma situação típica, na qual o nível geoeletrico condutor identificado na SEV-02 (15 ohm.m), foi caracterizado como sedimentos arenosos contaminados em função, tanto dos dados dos poços como suas localizações na área de estudo.

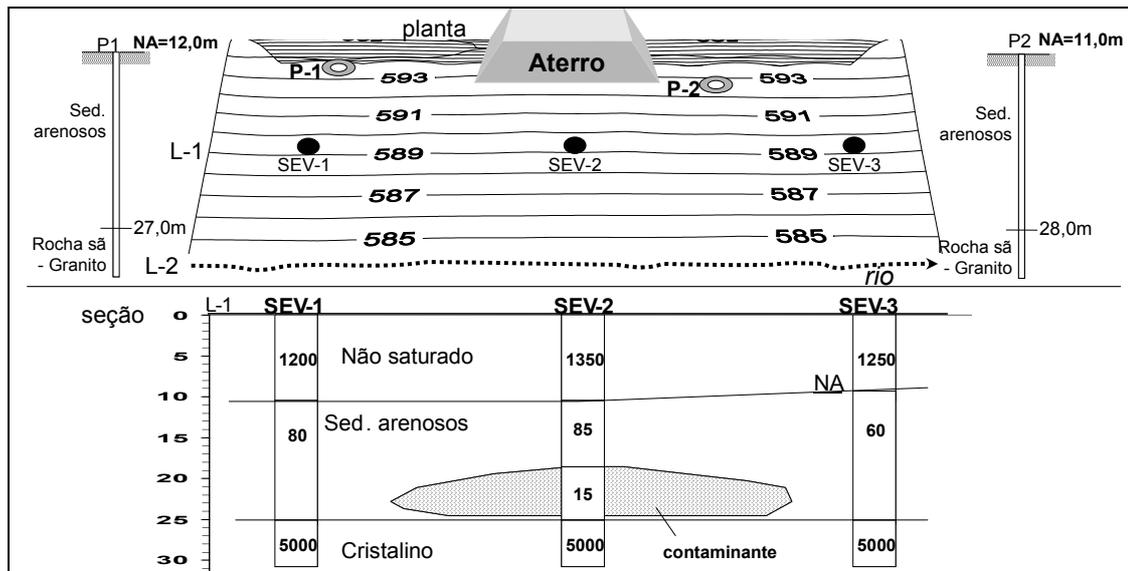


Figura VI-05b – Identificação de contaminantes - SEV.

### 6.1.2. Identificação e Delimitação de Plumas de Contaminação

A introdução de alguns tipos principais de contaminantes no subsolo, altera significativamente os valores naturais dos principais parâmetros geoeletricos. Experiências de campo, comprovam que valores de resistividades, por exemplo, de sedimentos arenosos, na presença de chorumes, podem diminuir até dez vezes o valor natural. Na identificação e delimitação de plumas de contaminação, a técnica do CE-DD, é de extrema utilidade.

Através dessa técnica, as evoluções das plumas podem ser estudadas lateralmente e em profundidade a partir de mapas extraídos das pseudo-seções, revelando o comportamento dos contaminantes em 3D.

A Figura VI-06(a) (Fundunesp, 1997/b), ilustra os resultados obtidos pela técnica do CE-DD, representados pelos mapas de resistividades aparentes referentes ao primeiro, terceiro e quinto nível de investigação. A pluma de contaminação, é bem caracterizada, e tem sua evolução bem definida lateralmente e em profundidade.

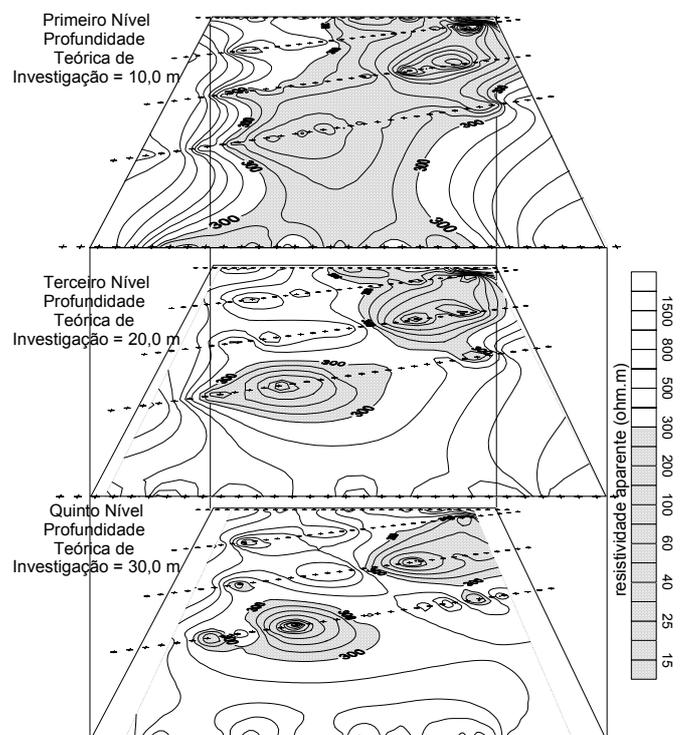
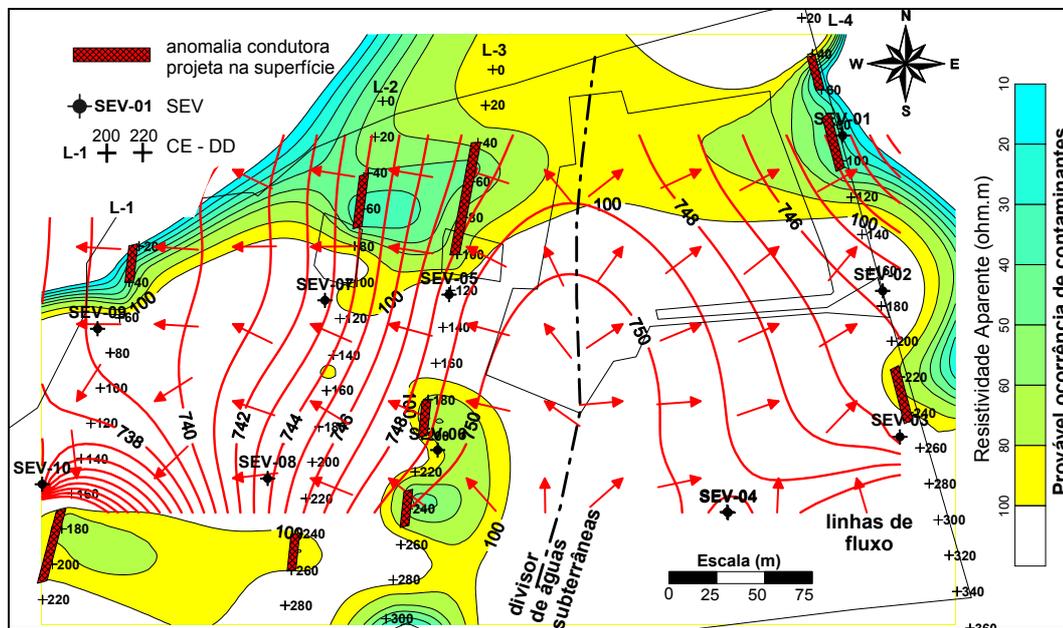


Figura VI-06 (a) – Mapas de resistividade aparente (Fundunesp-1997/b).

A Figura VI-06(b) - Funep, 2005(b), mostra um caso de identificação e delimitação da pluma de contaminação pela técnica do CE-DD ( $n_1 = 10,0$  metros) e o mapa potenciométrico pela técnica da SEV-Schlumberger. Podendo ser observada a correspondência das plumas com as direções e sentidos do fluxo subterrâneo.



**Figura VI-06(b) – Pluma de contaminação e mapa potenciométrico (Funep, 2005b).**

As SEV's também podem ser utilizadas na identificação de plumas de contaminação; entretanto apresentam resultados pontuais, exigindo um detalhamento improdutivo (custos e prazos) em relação ao CE-DD. O emprego das SEV's é recomendado em situações onde as áreas de estudos são de grandes dimensões, por exemplo  $> 4 \text{ Km}^2$ , onde, nesse caso, o CE-DD não é aconselhável; podendo ser utilizado, entretanto, em detalhamento das anomalias identificadas nas SEV's.

### Derivados de Hidrocarbonetos

Nesse caso em particular, a contaminação dos materiais em subsuperfície por derivados de hidrocarbonetos, por exemplo, gasolina e óleo diesel, apresentam um aspecto em particular, no qual as resistividades desses materiais geológicos, apresentam uma variação com o tempo (Sauck, 2000 e Fapesp, 2005).

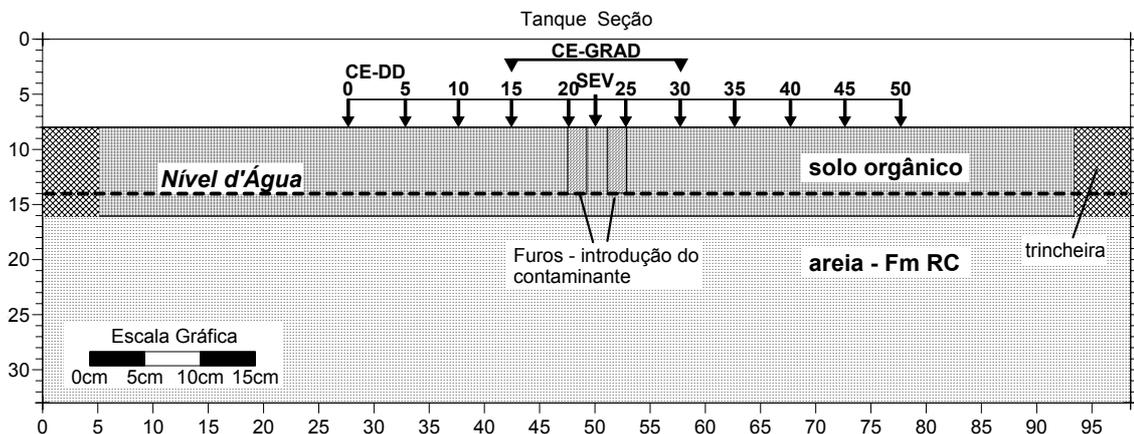
#### (1) Projeto FAPESP (2005) – Ensaio em Laboratório

Ensaio geofísicos pelos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, através das técnicas de campo da SEV - (arranjo Schlumberger), CE (arranjos dipolo-dipolo e gradiente) e PERF (arranjo polo-dipolo), foram efetuados em modelos reduzidos de

laboratório, em três tanques contendo sedimentos areno-argilosos e arenosos da Formação Rio Claro, contaminados por derivados de hidrocarbonetos (gasolina e óleo diesel).

As SEV's apresentaram um espaçamento máximo AB/2 de 16 cm. Para o CE – arranjo dipolo-dipolo, o espaçamento utilizado, considerando o fator de escala 100, foi de 5 cm, com quatro níveis de investigação. No arranjo Gradiente, os espaçamentos foram os seguintes: AB = 40 cm; MN = 2 cm; cuja profundidade teórica de investigação foi de 10 cm. O terço central investigado foi de 14x16 cm. Foram locadas 9 linhas, de 14 cm cada, espaçadas entre si de 2 cm.

No tanque 3, de dimensões 100,0 cm x 34,0 cm x 40,0 cm (Figura VI-07), com sedimentos secos (solo orgânico) e saturados (areia da Fm Rio Claro) – nível d'água = 6,0 cm, foram executadas as técnicas do caminhamento elétrico – arranjos dipolo-dipolo e gradiente, e da sondagem elétrica vertical – arranjo Schlumberger.



**Figura VI-07 – Esquema do tanque 3 utilizado nos ensaios de laboratório (Fapesp, 2005).**

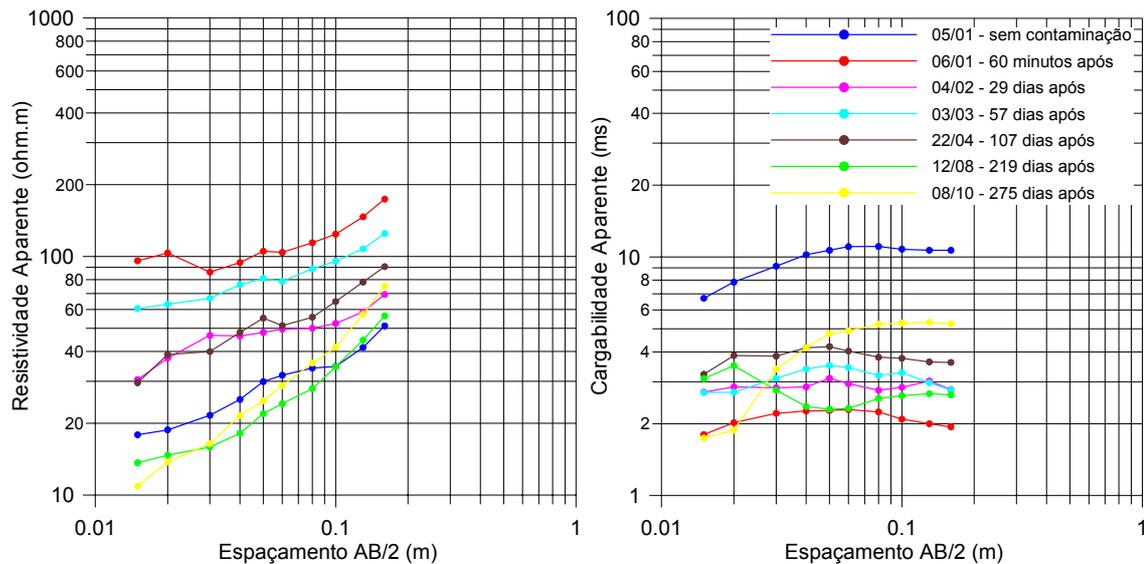
As contaminações foram monitoradas durante dez meses. Para apresentação nesse trabalho, apenas alguns resultados das SEV's e CE-DD, mais representativos, do tanque 3 (gasolina), são discutidos, sendo que todas as observações referentes à gasolina, aplicam-se ao óleo diesel (tanques 1 e 2). Os ensaios geofísicos foram iniciados da seguinte maneira:

Data	Técnica Geométrica/Arranjo	Situação
05/01/04	SEV – Schlumberger	• sem contaminação
06/01/04	CE - Dipolo-Dipolo e Gradiente	• sem contaminação
	CE – Gradiente	• 30 minutos após contaminação
	SEV – Schlumberger	• 60 minutos após contaminação
07/01/04	CE - Dipolo-Dipolo	• com contaminação

Conforme resultados do projeto de pesquisa desenvolvido, demonstrou-se que os valores de **resistividade** de sedimentos areno-argilosos não saturados, *aumentaram* até 4 vezes o valor natural no dia seguinte à contaminação por gasolina. Depois de seis meses de

monitoramento (aproximadamente 219 dias), esses valores inverteram e tornaram-se condutivos em relação aos valores naturais. Os valores de **cargabilidade** apresentaram uma variação, também significativa, com valores mais *baixos* que os naturais, sem contaminação. Entretanto, com o tempo, os valores se tornaram, aproximadamente, constantes, diferentemente da resistividade. Em todos os ensaios, pode-se observar que a cargabilidade não responde imediatamente à presença da gasolina, como a resistividade.

A Figura VI-08, apresenta resultados obtidos pelas SEV –ER/IP, ao longo do tempo.



**Figura VI-08 – SEV–ER/IP (Fapesp, 2005).**

Na Figura anterior, são apresentadas algumas curvas de campo, pois o monitoramento se desenvolveu com pelo menos quatro SEV's por mês. Ressalta-se que as SEV's foram desenvolvidas com um espaçamento AB/2 máximo de 16 cm, e mantendo o MN/2 de 0,3 cm, procurando evitar o efeito lateral das caixas nas leituras (Orellana, 1972).

Na discussão qualitativa, observa-se que as curvas de campo de resistividade e cargabilidade aparentes, apresentaram alterações significativas, variando totalmente o ciclo na escala logarítmica (eixo y), considerando a SEV-05/01 – sem gasolina e SEV-06/01 – com gasolina. Os valores de resistividade aumentaram expressivamente, já os valores de cargabilidade diminuíram.

A partir do mês de agosto, nas SEV's 12/08 (219 dias após contaminação) e 08/10 (275 dias após contaminação), a parte inicial das curvas de campo de resistividade, tornaram-se mais condutivas que a SEV-05/01; enquanto que os valores de cargabilidade continuavam abaixo dos valores iniciais, sem contaminante; entretanto a SEV 08/10, apresenta uma tendência de se aproximar da SEV 05/01.

O CE-DD (Figura VI-09), foi desenvolvido com espaçamento de 5 cm, com quatro níveis de investigação (profundidades teóricas: 2,5 – 3,75 – 5,0 – 6,25 cm). A contaminação por gasolina se deu entre as estacas 20 e 25, cuja anomalia resultante resistiva, esta perfeitamente definida na DD-2 (dia 07/01). A cargabilidade apresenta uma anomalia de baixos valores.

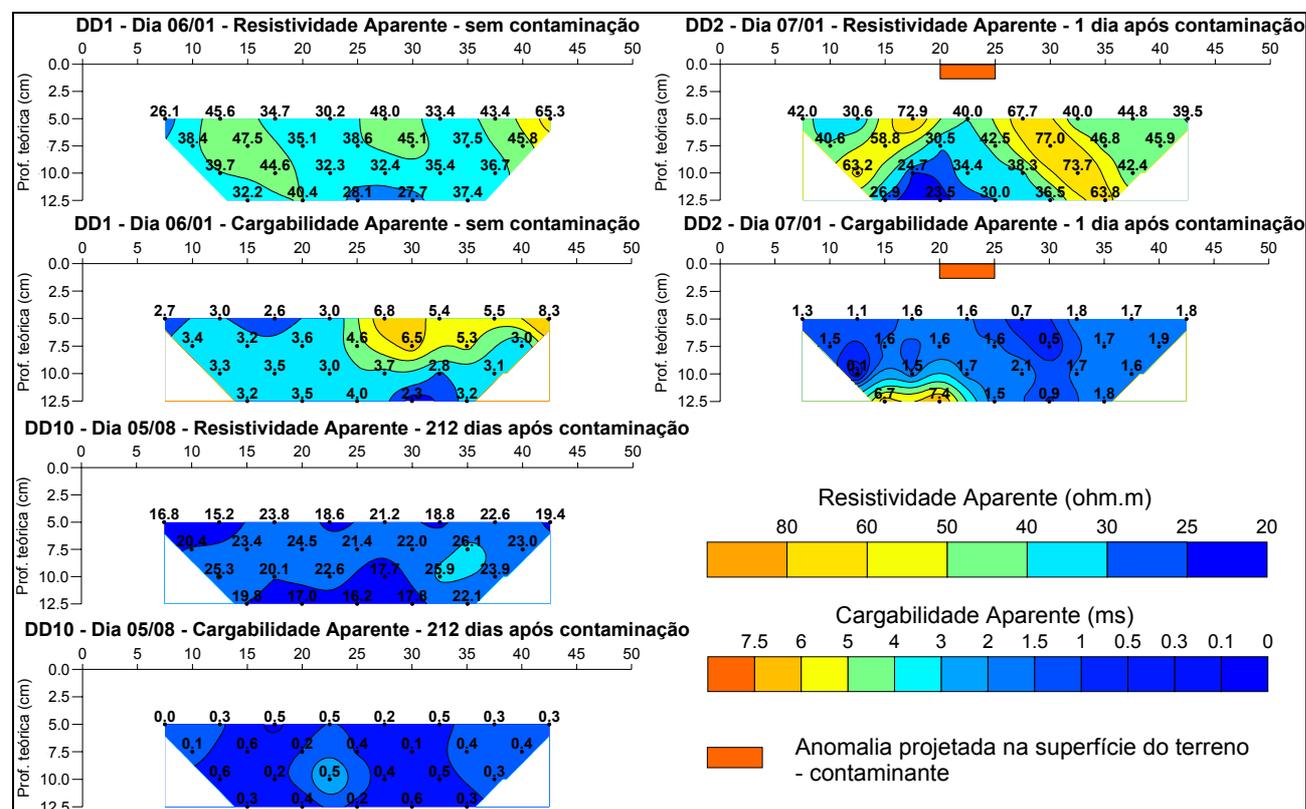
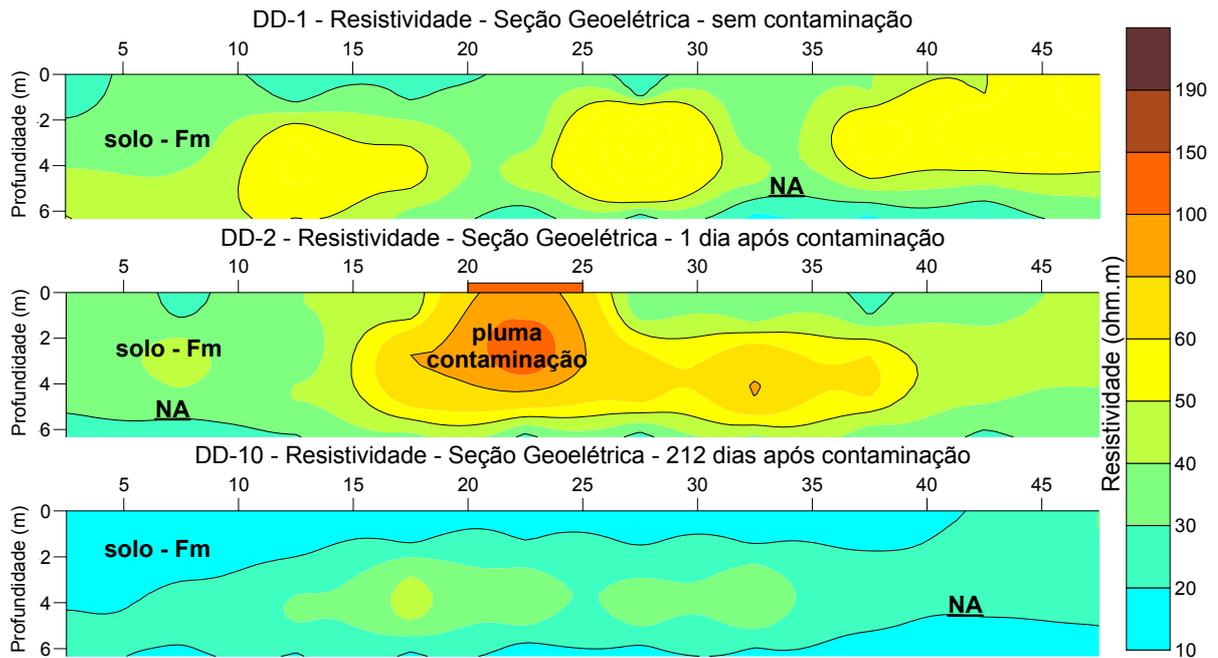


Figura VI-09 – CE-DD (Fapesp, 2005).

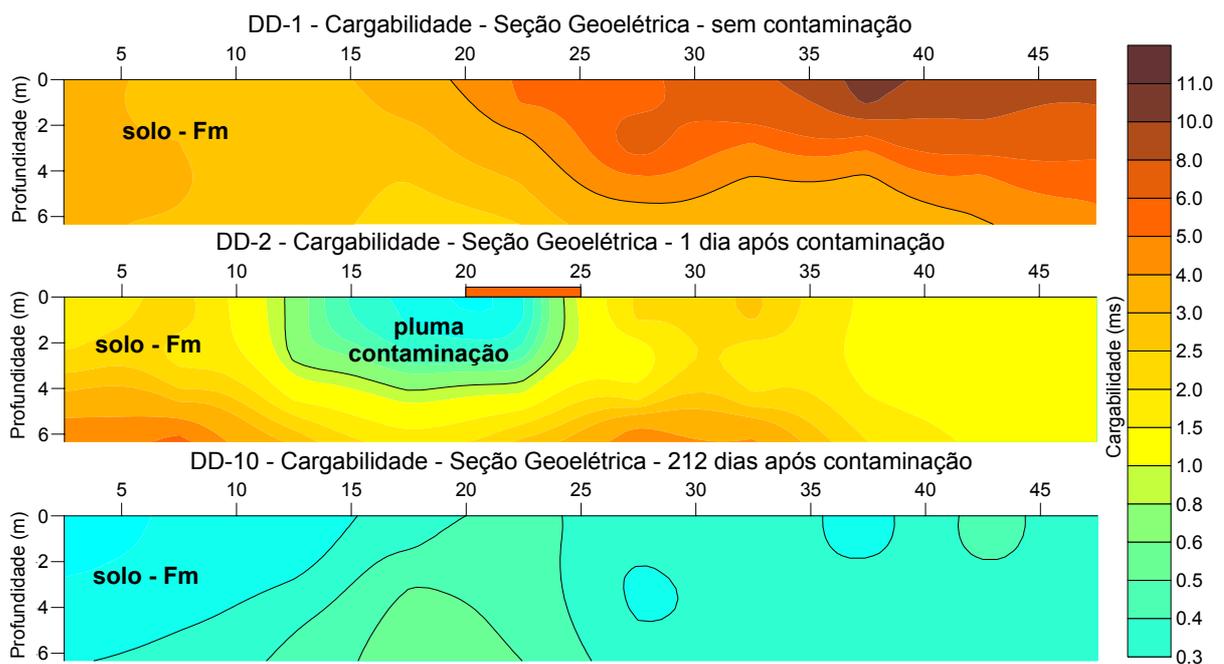
O levantamento DD-10 (dia 05/08) foi desenvolvido 212 dias após contaminação, mostrando, como nas SEV's, que os valores de resistividades aparentes foram mais baixos que os registrados antes da contaminação (DD-1 - 06/01), e as cargabilidades continuam com valores baixos.

Na Figura VI-10, tem-se a inversão dos dados de resistividade aparente, com seus modelos geoeletricos, dos três levantamentos anteriores. Observa-se na seção invertida DD-2 a contaminação pela gasolina perfeitamente definida, mostrando uma evolução à direita da seção. Na DD-10 fica claro o caráter condutivo temporal dos sedimentos, em relação à DD-1. Nessas seções invertidas, pode-se observar o nível d'água a 6,0 cm.

Os dados da cargabilidade aparente foram processados e as seções resultantes da inversão dos dados de campo são apresentadas na Figura VI-11. Como nas SEV's, observa-se na DD-2 uma anomalia de baixos valores de cargabilidade entre as estacas 15-25. Na DD-10, os valores ainda continuam baixos em relação à DD-1.



**Figura VI-10 – CE-DD - Modelo geométrico/resistividade (Fapesp, 2005).**



**Figura VI-11 – CE-DD - Modelo geométrico/cargabilidade (Fapesp, 2005).**

A Figura VI-12 apresenta os resultados do CE-Gradiente, com destaque para o perfil da linha 5. Ressaltando que a profundidade teórica de investigação desse arranjo é de 10 cm.

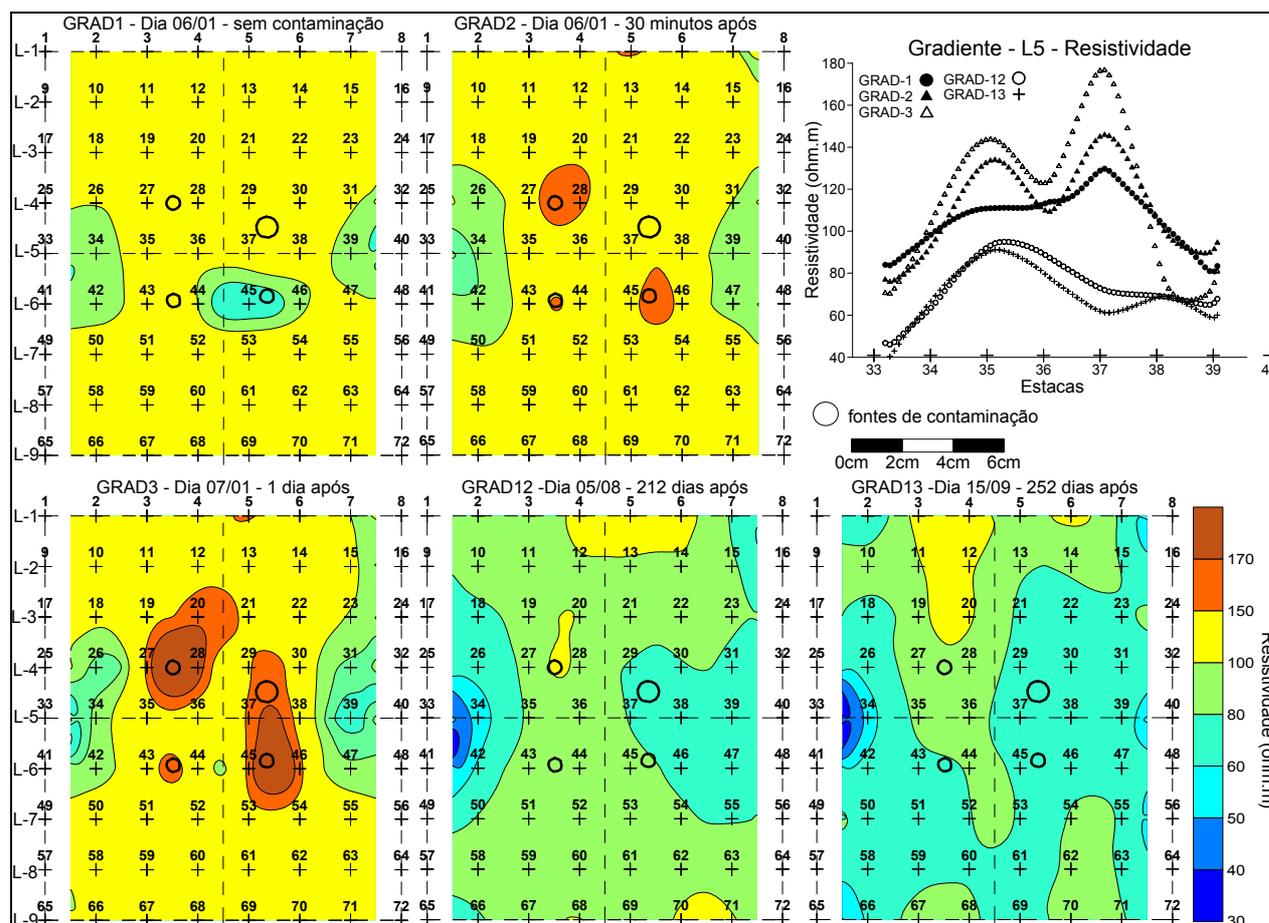


Figura VI-12 – CE-GRAD (Fapesp, 2005).

A pesquisa demonstrou que a resistividade dos sedimentos aumentou significativamente, imediatamente após a introdução dos contaminantes, enquanto a cargabilidade diminuiu. Com o passar do tempo, aproximadamente seis meses após a contaminação, os valores de resistividade diminuíram, tornando os sedimentos mais condutivos em relação ao meio não contaminado. A cargabilidade, apesar de não voltar ao padrão inicial, apresentou uma tendência de elevação nos valores.

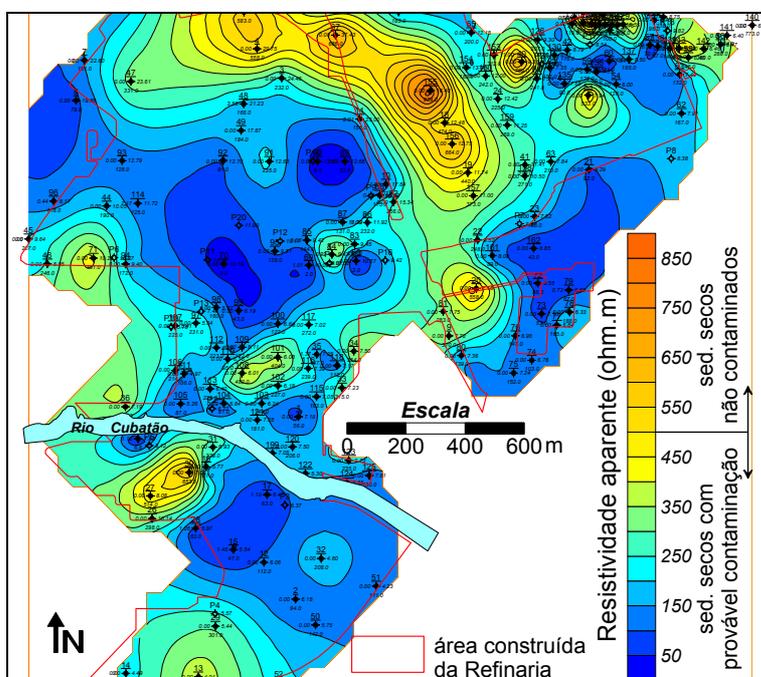
Portanto, pode-se concluir de uma maneira geral, que em vazamentos de derivados de hidrocarbonetos, o fator tempo é fundamental na caracterização dos parâmetros geoeletricos: resistividade e cargabilidade. Em relação ao meio natural (sem contaminante), vazamentos recentes deverão apresentar: resistividades altas – *anomalias resistivas* e cargabilidades baixas – *anomalias de baixa cargabilidade*. Em vazamentos antigos, a situação se inverte: a resistividade deverá ser baixa - *anomalias condutivas*, e a cargabilidade alta - *anomalias de alta cargabilidade*.

## (2) Refinarias de Combustível - Petrobrás

Em áreas de grandes dimensões envolvendo um diagnóstico do solo, rochas e águas subterrâneas frente a eventuais contaminantes, como é o caso de refinarias de combustíveis (> 4 Km<sup>2</sup>), as SEV's podem ser utilizadas em forma de semidetalhe, visando à elaboração de mapas potenciométricos, identificação litológica e de eventuais contaminações no subsolo. Conforme já comentado, se for necessário, pode-se utilizar o CE-DD, inviável em termos de prazos e custos nesses casos, em locais de maior interesse, detalhando os resultados das SEV's.

Nessas áreas, o método da eletrorresistividade é insubstituível, pois com equipamentos adequados, as leituras de campo apresentam precisão satisfatória. A utilização da técnica da SEV, apresenta a vantagem de que, em eventuais interferências locais nas leituras de campo (existência de tubulações, galerias, etc.), estas podem ser desprezadas nas curvas de campo, não afetando a interpretação final como um todo.

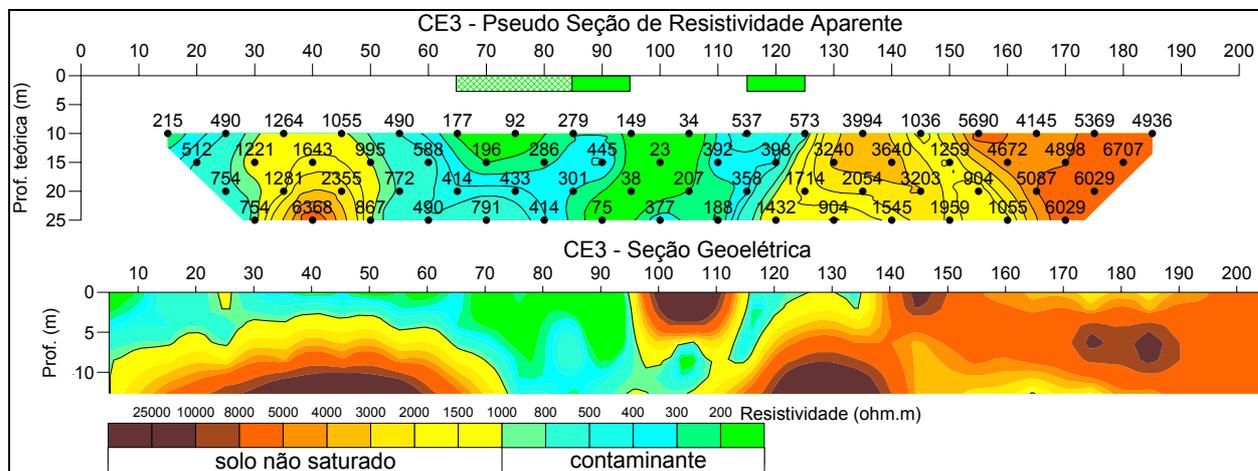
No projeto Cubatão-SP Fundunesp (1999/a), a Figura VI-13 apresenta o mapa, com valores de resistividades correspondentes à zona não saturada, onde normalmente os valores tendem a serem altos. Portanto, baixos valores podem ser associados à presença de contaminantes não recentes, nos sedimentos superficiais não saturados. Essa tendência é perfeitamente coerente com os mapas do topo do embasamento cristalino e potenciométrico, cujo fluxo subterrâneo esta associado ao contorno do embasamento.



**Figura VI-13 – Mapa de resistividade do nível não saturado (Fundunesp, 1999/a).**

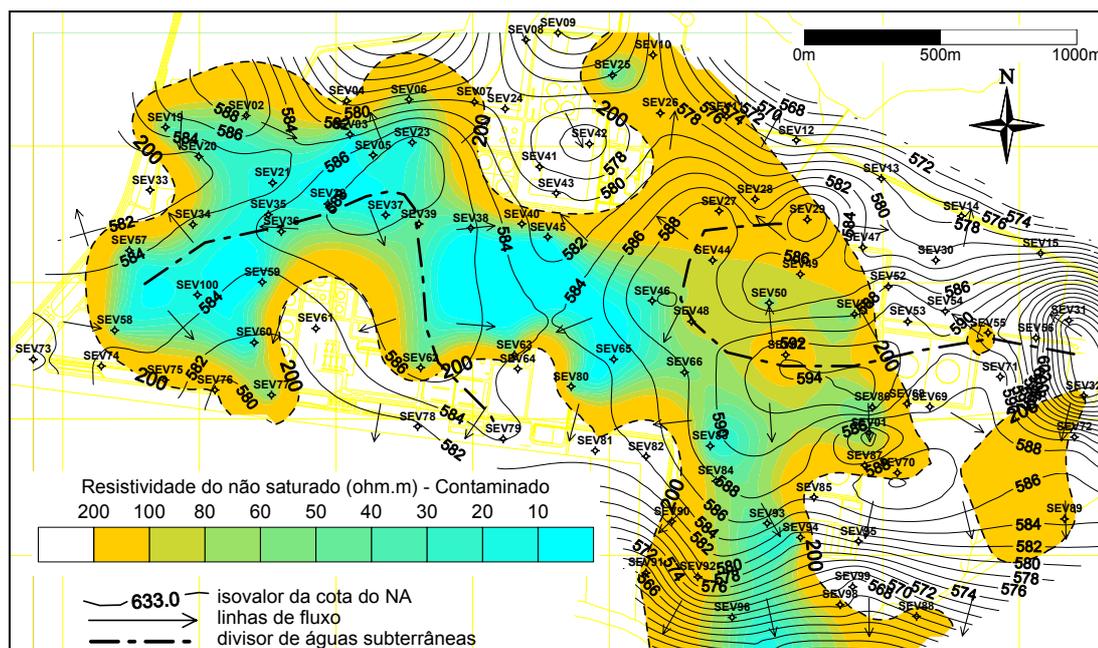
A Figura VI-14 apresenta um dos resultados do projeto Fundunesp (1999/b), desenvolvido visando mapear pluma de contaminação no solo não saturado, resultante de vazamento de óleo diesel. Observa-se nas seções de resistividade aparente e geoeletrica

(inversão) da linha 3, anomalia condutora bem definida, entre as estacas 70-95 e estaca 120, associada à contaminação por óleo diesel. Ressalta-se que de acordo com as conclusões anteriores, essa anomalia deve corresponder a vazamentos com mais de quatro a cinco meses de ocorrência.



**Figura VI-14 – Linha 3 – CE-DD (Fundunesp, 1999/b).**

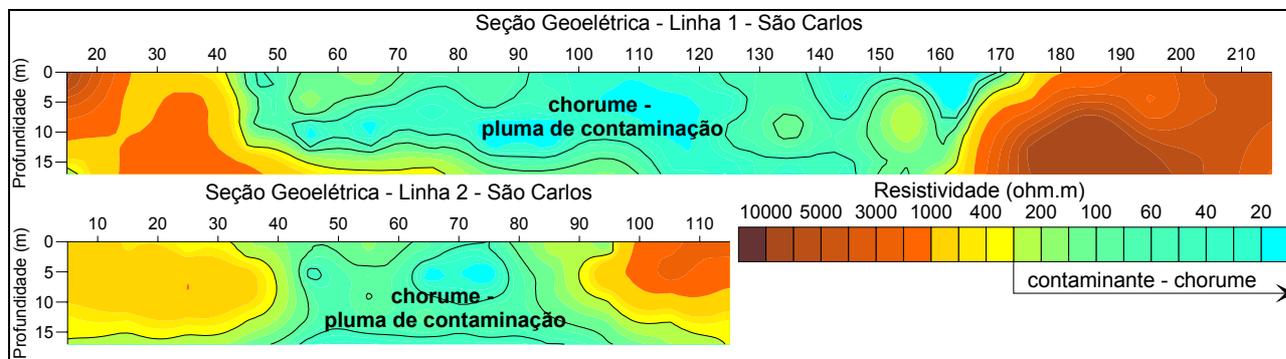
Nos estudos ambientais que se desenvolvem na refinaria de combustível da Petrobrás, em Paulínia-SP (Fundunesp, 2002/b), foram executadas 100 SEV's, visando traçar o mapa potenciométrico, identificar a litologia e eventuais plumas de contaminação (Figura VI-15). Nessa Figura, tem-se o mapa de resistividade da zona não saturada, com as faixas de baixos valores de resistividades ( $< 200$  ohm.m), associadas à provável antigas contaminações desses sedimentos, e o potenciométrico.



**Figura VI-15 – Potenciométrico e Resistividade do não saturado (Fundunesp, 2002/b).**

#### Disposição de Outros Tipos de Resíduos – Aterros

A Figura VI-16 apresenta os resultados do CE-DD – seção geoeétrica (inversão) de duas linhas representativas dos ensaios efetuados em área de disposição de resíduos sanitários (lixão) no município de São Carlos/SP. A linha 1 foi executada próxima do lixão e a linha 2 à jusante.



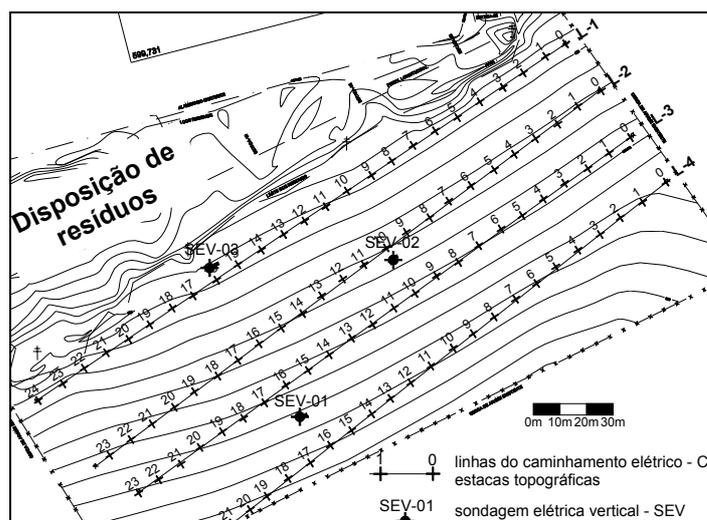
**Figura VI-16 – Área de lixão/Linhas 1 e 2 - CE-DD.**

Pode-se observar nas figuras anteriores, o contraste significativo entre os valores de resistividade do solo não saturado e do solo contaminado pelo chorume (E-40 a E-170 – Linha 1; e, E-40 a 80 – Linha 2), resultante da decomposição dos resíduos. Poços de monitoramento podem ser locados com grande precisão, resultando em dados representativos.

O projeto Fundunesp (2002/c), apresentou um resultado interessante, em termos de identificação de plumas de contaminação. A indústria estudada localiza-se no município de Matão-SP, e os resíduos gerados da fundição, dispostos na superfície do terreno, são: chumbo, cromo total, alumínio, ferro e manganês, conforme análises efetuadas.

A Figura VI-17 apresenta a localização dos ensaios geofísicos realizados, sendo quatro linhas de CE-DD e três SEV's.

O nível d'água, na época do levantamento, localizava-se a uma profundidade de 15,0 a 17,0 metros, conforme dados das SEV's e poço tubular existente.

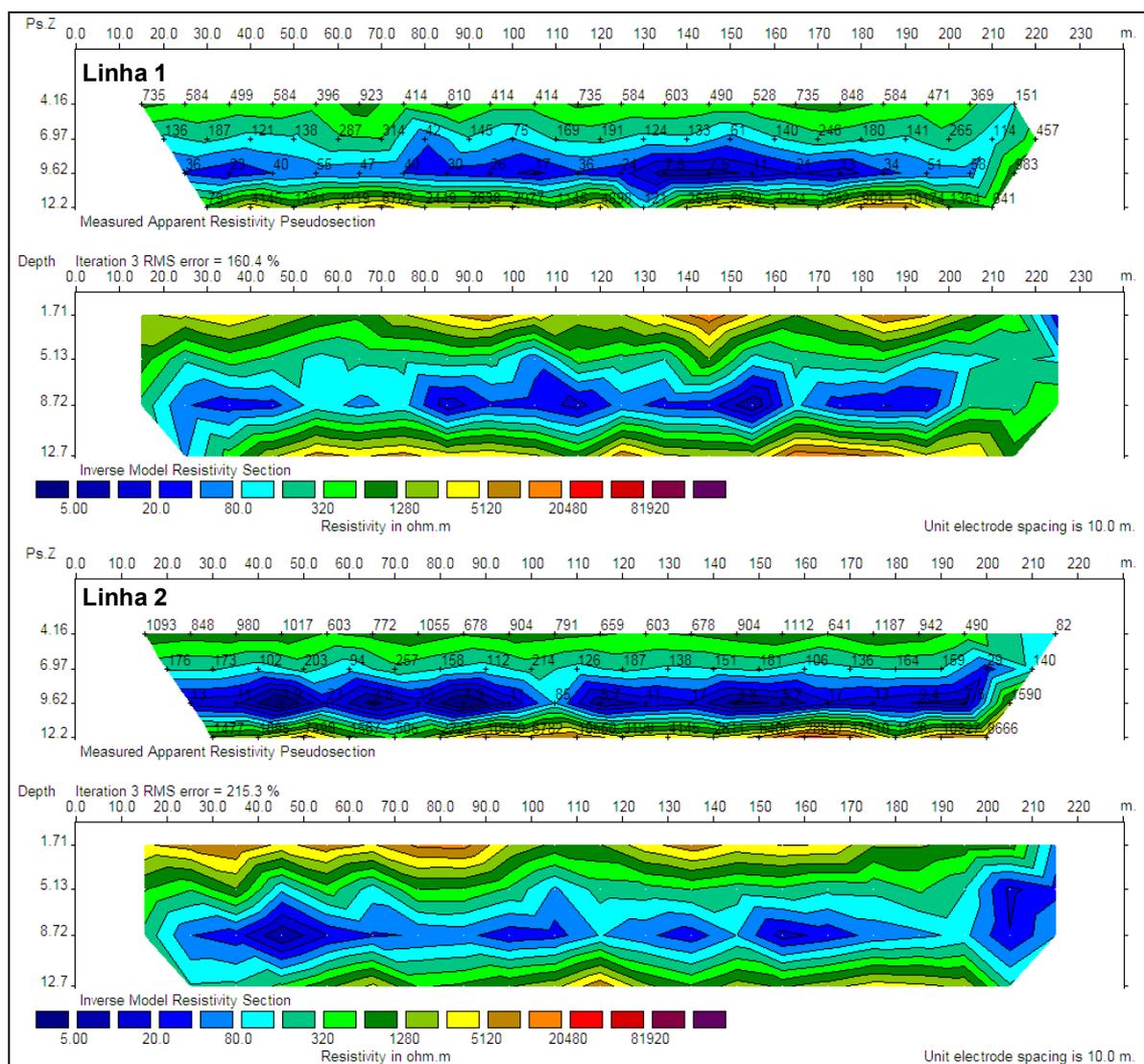


**Figura VI-17 – Mapa de localização dos ensaios geofísicos (Fundunesp, 2002/c).**

Entretanto, conforme se pode observar na Figura VI-18, as seções de resistividade aparente e geoeétricas (inversão) de duas linhas representativas (L-1 e L-2) identificaram

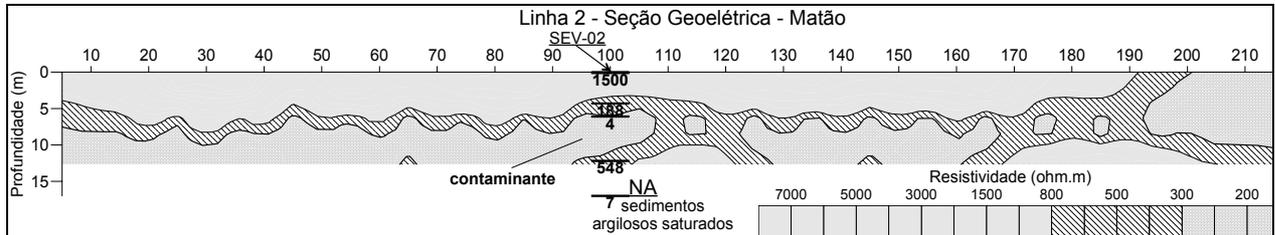
camadas planas-paralelas à superfície do terreno, cujas resistividades aparentes diminuem em profundidade, até atingir o terceiro nível (muito condutor). Já, o último nível de investigação, apresentou valores extremamente altos, indicando, como nos dados das SEV's e poço, que a seção do CE investigou a zona não saturada, não atingindo o nível d'água.

Portanto, pode-se concluir que os valores baixos de resistividade devem refletir os resíduos metálicos dispostos no terreno, “devidamente” cobertos e compactados, não refletindo percolação iônica. Ressaltando que os ensaios geofísicos foram executados em um período de, aproximadamente, cinco meses sem chuvas. Nesse caso, a resistividade é influenciada, principalmente, pela condutividade eletrônica dos minerais metálicos dispostos, e não pela condutividade iônica – *fluidos incompressíveis*, como nos casos anteriores discutidos.



**Figura VI-18 – CE-DD - linhas 1 e 2 (Fundunesp, 2002/c).**

O modelo do CE-DD - Linha 2, foi ajustado ao modelo da SEV-02, executada na E-100 do CE (Figura VI-19), mostrando a perfeita identificação dos níveis contaminantes. Portanto, nesse tipo de geologia e situação, a técnica do caminhamento elétrico executada com, por exemplo, oito níveis de investigação, poderiam definir com precisão a situação da área estudada com maior detalhe que as SEV's.



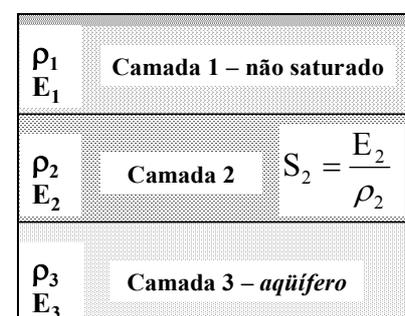
**Figura VI-19 – Modelo do CE-DD – linha 2 - ajustado com modelo da SEV-02.**

### 6.1.3. Aplicação dos Parâmetros de Dar Zarrow

Na fase de prevenção, ou seja, *pré-empendimento*, a aplicação dos parâmetros de Dar Zarrow pode contribuir de maneira significativa com os estudos hidrogeológicos. Através dos parâmetros resistividade e resistência transversal unitária -  $T_{DZ}$ , discutidos no Capítulo anterior, podem-se estimar áreas de maior condutividade hidráulica e transmissividade das formações geológicas.

O parâmetro condutância longitudinal unitária -  $S_{DZ}$ , na fase de pré-empendimento, assume papel de extrema importância nos estudos de prevenção a contaminantes, envolvendo aquíferos. Através desse parâmetro, pode-se ter uma avaliação de quanto esse aquífero estaria vulnerável ou não a determinado tipo de contaminante. Seus resultados poderiam orientar futuras instalações de áreas de disposição de resíduos, bacias de tratamento de efluentes, etc.

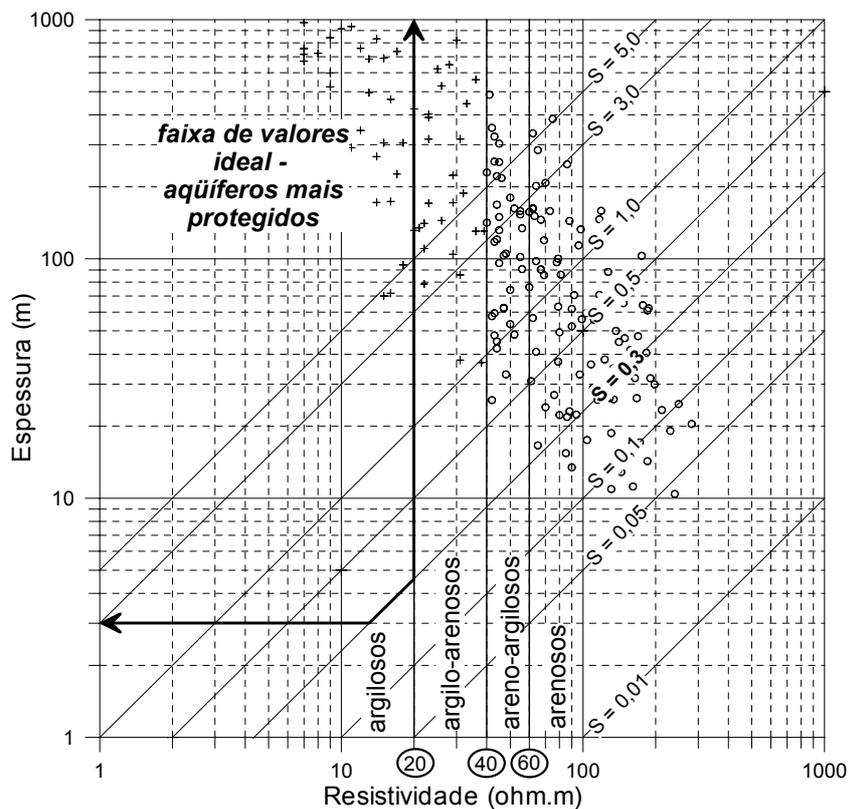
A Figura VI-20, apresenta a correlação  $S_{DZ}$  com o grau de proteção de um aquífero (camada 3). Calculando a condutância longitudinal unitária para a *camada 2*, tem-se que, quanto maior o valor de  $S_2$ , maior será o grau de proteção do aquífero, frente a contaminantes superficiais, pois: (1) Quanto maior a espessura da camada 2: maior o tempo de percolação do poluente – *maior filtro*; e, (2) Quanto menor sua resistividade: mais argiloso – *mais impermeável*.



**Figura VI-20 – Condutância longitudinal unitária/proteção do aquífero.**

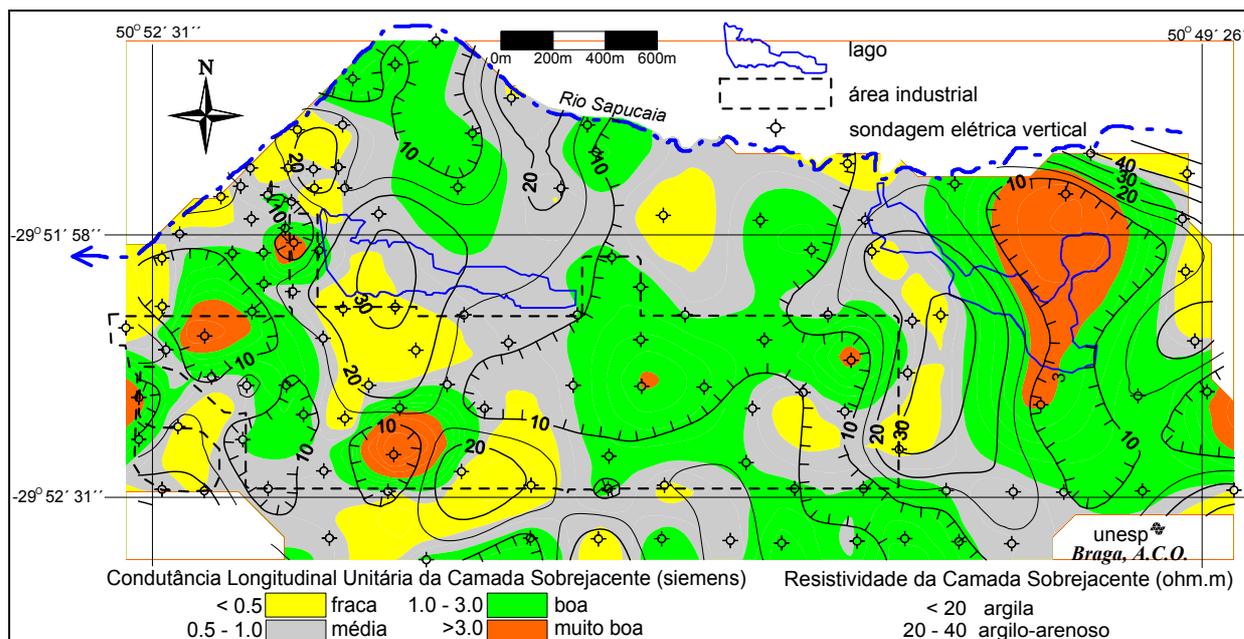
A seguir apresentam-se os resultados da campanha geofísica por SEV's, já referida em Braga et al. (2005). Os valores da condutância longitudinal da camada *sobrejacente* ao aquífero confinado, foram calculados e lançados no gráfico padrão (Figura III-24) e

apresentados na Figura VI-21. Para sedimentos argilosos, os valores de  $S_{DZ}$ , tendem a serem mais elevados que para os sedimentos arenosos, entretanto têm-se valores para os sedimentos arenosos maiores que para os sedimentos argilosos (função das espessuras), portanto, o valor de  $S_{DZ}$ , como no caso de  $T_{DZ}$  tem que estar associado a litologia, para uma perfeita associação.



**Figura VI-21 –  
Condutância  
longitudinal unitária  
resultante da relação  
resistividade -  
espessura (Braga et al.,  
2005).**

A Figura VI-22 apresenta o mapa da condutância longitudinal unitária sobreposto ao mapa de resistividade da camada sobrejacente ao aquífero confinado.



**Figura VI-22 – Relação condutância longitudinal unitária e resistividade da camada sobrejacente ao aquífero confinado (Braga et al., 2005).**

Na figura anterior tem-se que, locais com  $S_{DZ} > 1,0$  siemens apresentam boa proteção ao aquífero confinado, destacando as faixas com valores  $S_{DZ} > 3,0$  siemens. Já nos demais locais, recomenda-se cuidados, pois esse aquífero apresenta-se mais vulnerável às contaminações, ou devido à ocorrência de sedimentos mais arenosos, ou em função de menor espessura da camada sobrejacente.

Na fase *pós-emprego*, supondo a existência de contaminantes nos solos e águas subterrâneas, não tem sentido a aplicação dos parâmetros de Dar Zarrouk na correlação com parâmetros hidráulicos, pois os valores naturais de resistividade modificam-se em função da presença dos contaminantes, resultando em uma correlação totalmente inadequada. Entretanto, como discutido no Capítulo anterior, visando *analisar as anomalias*, resultantes da técnica do CE-DD, quanto suas intensidades e definições, os parâmetros de DZ podem ser aplicados em estudos ambientais, auxiliando na interpretação das anomalias existentes.

A Figura VI-23 apresenta os resultados já referidos, do projeto Fapesp (2005), aplicando os parâmetros de Dar Zarrouk, antes (DD1-06/01) e depois (DD2-07/01 – 1 dia após e DD10-05/08 – 212 dia após) da contaminação dos sedimentos por gasolina. Esses resultados compreendem as fases, respectivamente, pré e pós-emprego. As escalas de cores das pseudo-seções foram mantidas as mesmas, antes e depois da contaminação.

As pseudo-seções DD-1 e DD-10, são similares quanto às variações dos valores ao longo da seção, diferindo no fato de que nas seções da DD-10, o contaminante está presente em toda a seção, com valores refletindo essa contaminação, ou seja, valores mais baixos nas seções de resistividade aparente, resistividade média e resistência transversal total, e mais

altos na condutância longitudinal total. Ressalta-se que na pseudo-seção de resistência transversal total da DD-10, a anomalia condutora é mais intensa que nas demais seções desse levantamento.

Já nas pseudo-seções da DD-2, com a gasolina presente em forma de pluma, as anomalias são mais significativas, com destaques para a resistência transversal total, e a resistividade média, pois conforme já comentado anteriormente, a resistividade média “filtra” os dados de resistividade aparente, e como pode ser observado nesse levantamento, identificou um flanco mais intenso à direita da seção, indicando uma percolação do contaminante nessa direção, o que pode ser comprovado pela seção geométrica invertida (Figura VI-10).

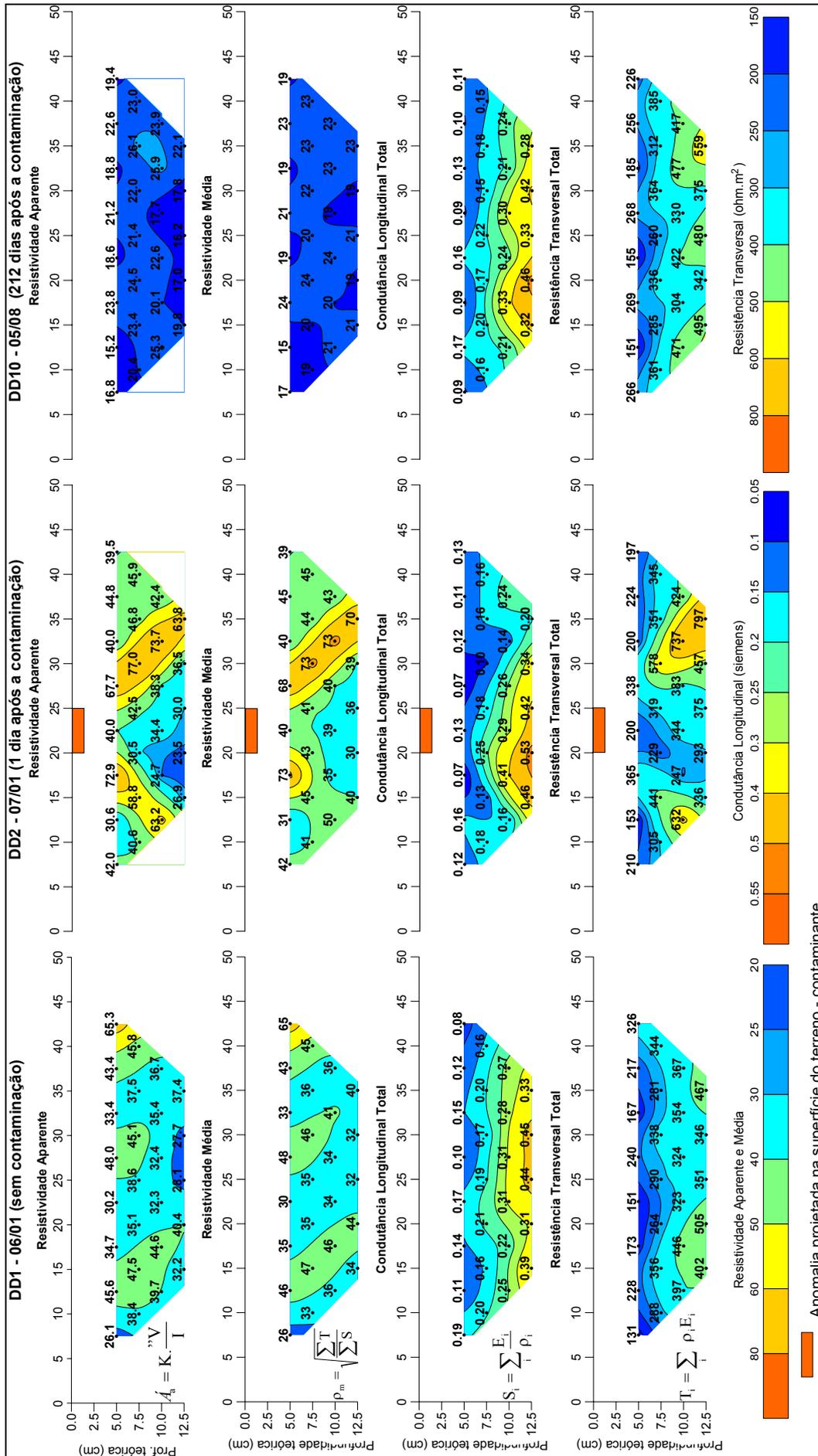


Figura VI-23 – Correspondência dos parâmetros ER-DZ, antes (DD1) e depois (DD2 e DD10) da contaminação - (Fapesp, 2005).

Pode-se concluir que, nas investigações de anomalias associadas a plumas de contaminação em terrenos sedimentares, a *resistividade transversal* é mais representativa que a resistividade longitudinal, conseqüentemente a resistência transversal total deve refletir, essas anomalias, com maior intensidade, e que a *resistividade média* posiciona com maior precisão as anomalias resultantes dos contaminantes presentes, mostrando uma seção bem próxima da real.

Exemplos das conclusões anteriores podem ser vistos nos casos históricos, já comentados anteriormente, e destacados a seguir:

### (1) Projeto REVAP (Fundunesp, 1999/b)

A aplicação dos parâmetros de Dar Zarrouk nos dados de campo desse projeto (Figura VI-24), mostra que a seção geoeletrica resultante da inversão (Figura VI-14) é bem semelhante à pseudo-seção de *resistividade média*, em termos de posicionamento da anomalia condutiva devida à ocorrência do óleo diesel (entre as E-60-125, com centro nas E-100-110 e 70-80).

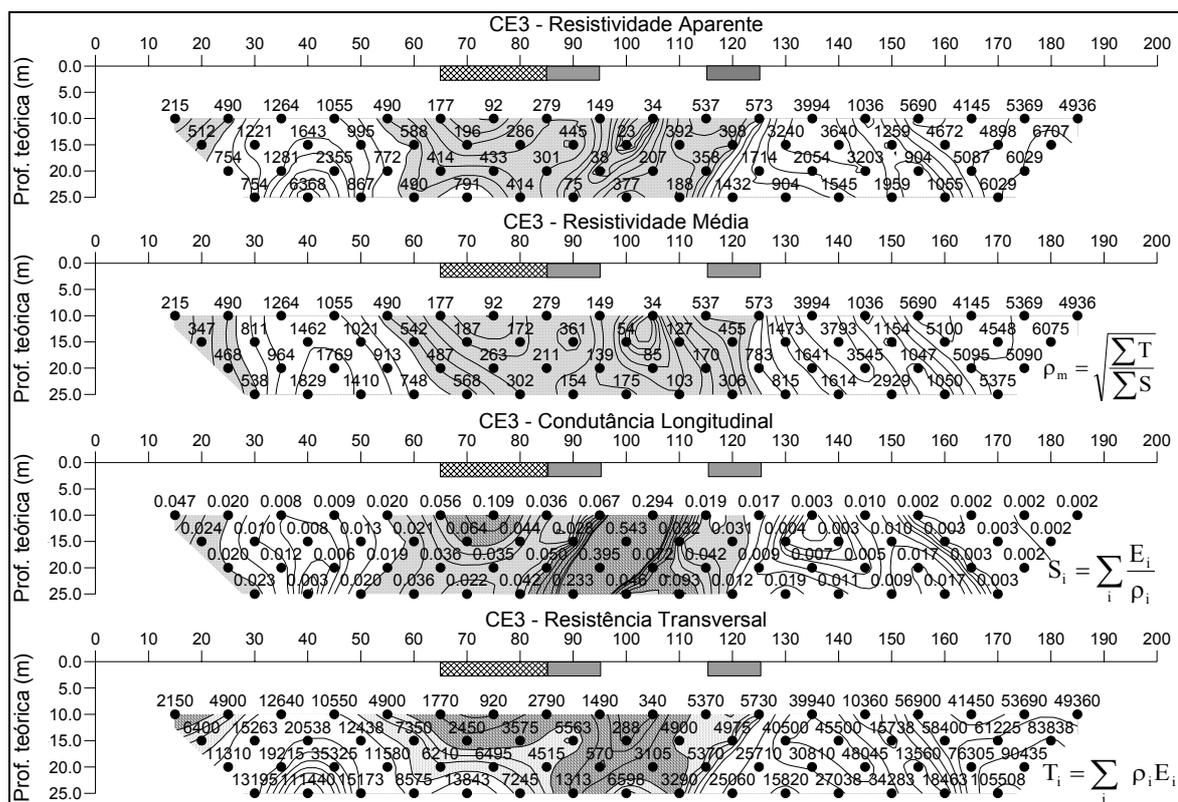
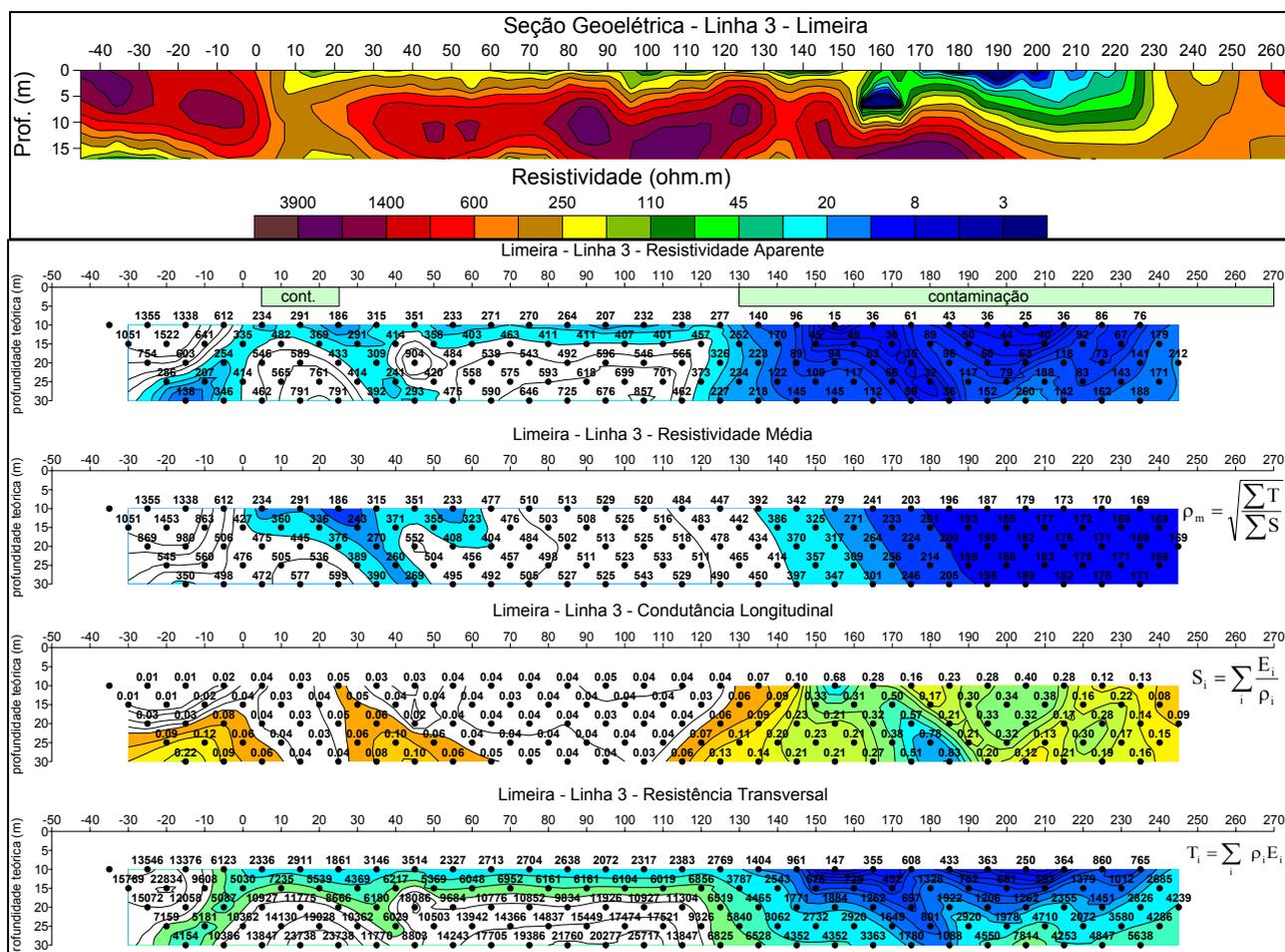


Figura VI-24 – Parâmetros de DZ – Pós-empreendimento (Fundunesp, 1999/b).

### (2) Projeto Limeira (Fundunesp, 1997/b)

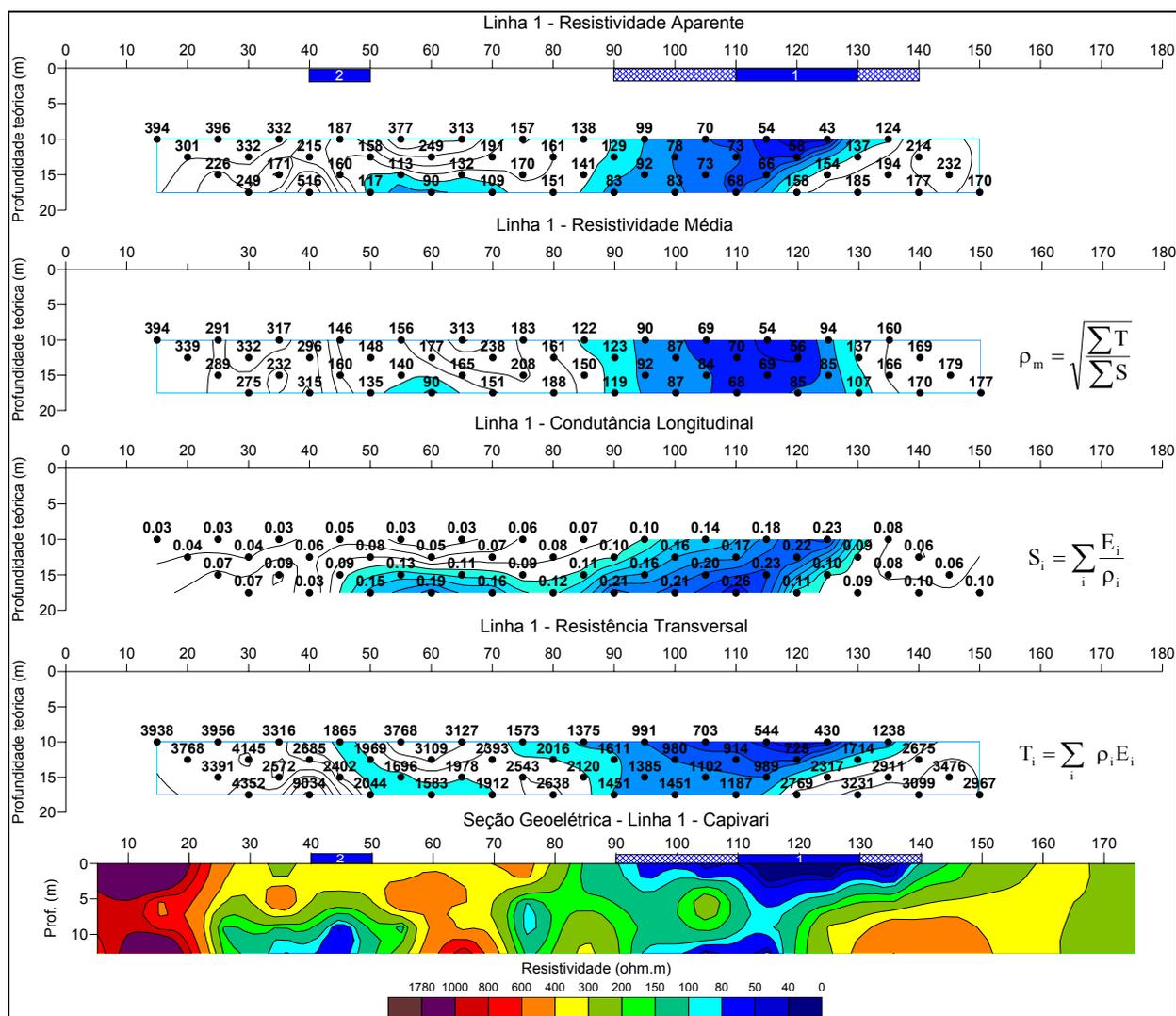
Nesse projeto, a linha 3 foi destacada (Figura VI-25). A anomalia condutora principal esta situada entre as E-150-160 com prolongamento para o final da linha, outra anomalia localiza-se entre as E-10-20. Interessante notar na seção de *resistividade média* os efeitos correspondentes a essas anomalias identificadas. Enquanto que a anomalia entre as E-10-20 assume um caráter mais pontual, com mergulho definido à direita da pseudo-seção, a anomalia entre as E-150-160 evidencia uma extensão do condutor no sentido do final da linha, comportando-se como uma camada de baixa resistividade. O efeito registrado nessa pseudo-seção, nas E-10-20, é semelhante ao registrado nas rochas cristalinas identificando fraturas e falhamentos (Capítulo 5).



**Figura VI-25 – Rochas sedimentares - Aplicação dos parâmetros de DZ – Pós-empredimento (Fundunesp, 1997/b).**

### (3) Projeto Capivari (Funep, 2005-c)

As mesmas considerações do projeto anterior, aplicam-se nesse caso (Figura VI-26), com destaque para a pseudo-seção de resistividade média.



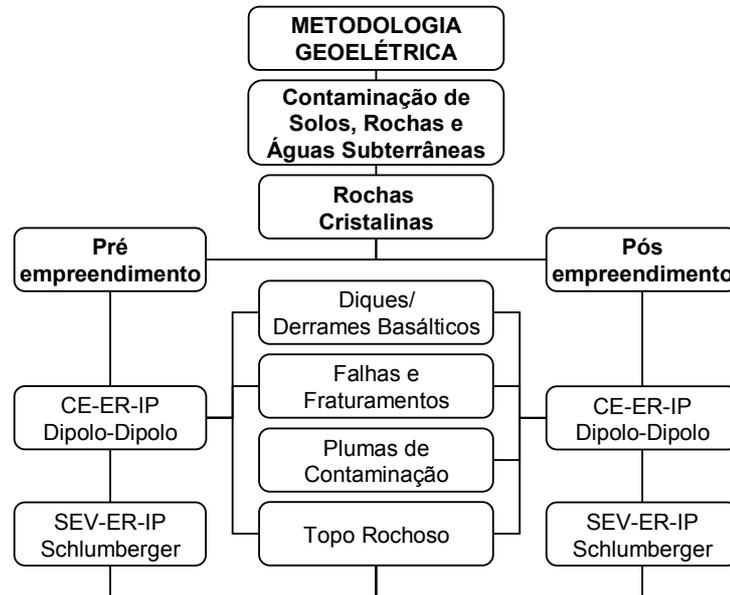
**Figura VI-26 – Rochas sedimentares - Aplicação dos parâmetros de DZ – Pós-emprego (Funep, 2005-a).**

## 6.2. ROCHAS CRISTALINAS

Nos estudos ambientais, visando obter um diagnóstico dos aquíferos fraturados, frente a contaminantes, em rochas cristalinas, tem-se a técnica mais adequada, considerando resolução, custo e rapidez, o caminhamento elétrico – arranjo Dipolo-Dipolo (CE-DD), com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida. Nesse caso, o radar de penetração no solo (GPR), também pode ser utilizado com relativo sucesso, entretanto, caracteriza-se por atingir pequenas profundidades de investigação, o que não é o caso do CE-DD.

Como já ressaltado anteriormente, nos estudos envolvendo prováveis contaminações, resultantes de aterros, refinarias, postos de combustíveis, etc., a fase do emprego, pré ou pós-instalação, juntamente com a geologia local, é importante na definição da metodologia geométrica e nos produtos a serem obtidos. A Figura VI-27, apresenta a metodologia recomendada, com os principais produtos a serem obtidos, considerando as fases do

empreendimento. Dos produtos referidos nessa figura, destaca-se a determinação de: *falhas e fraturamento e plumas de contaminação*.



**Figura VI-27 – Metodologia e produtos em estudos ambientais – Rochas Cristalinas.**

Nas fases pré e pós-empreendimento, envolvendo a determinação de falhas e fraturamentos, a metodologia geoeletrica e análise dos dados seguem o descrito no Capítulo 5.

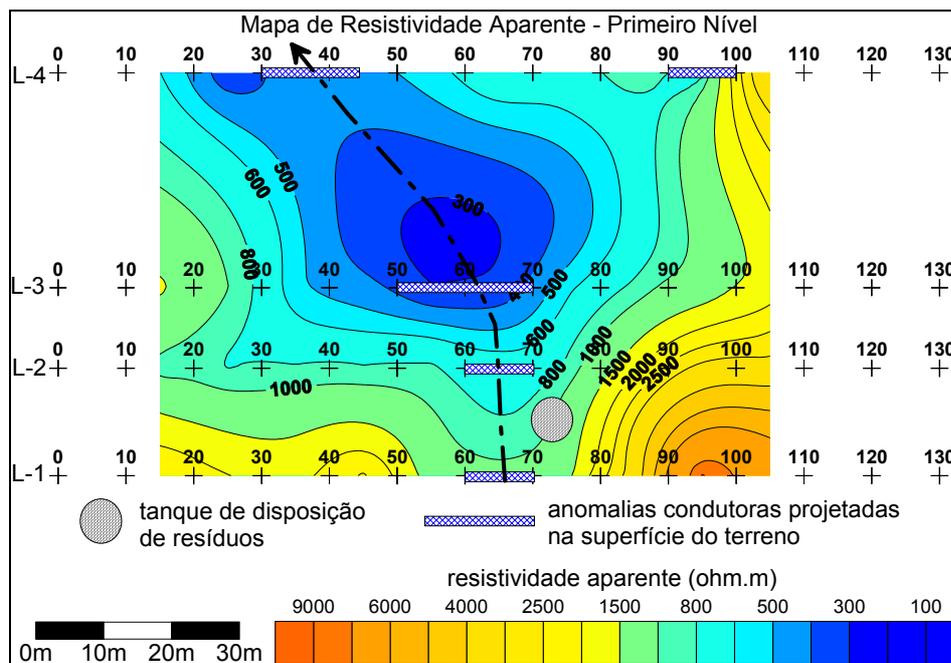
### 6.2.1. Identificação e Delimitação de Plumam de Contaminação

Como já comentado no Capítulo 5, os valores de resistividade das rochas cristalinas - granitos, gnaisses, etc., são altos (normalmente, superiores a 3.000 ohm.m), sendo que, nesse caso, técnicas geoeletricas aplicadas visando identificar aquíferos fraturados, determinará anomalias condutoras em relação ao meio, associadas a fraturas/falhas nas rochas.

Portanto, tanto na fase pré-empreendimento quanto na fase pós-empreendimento, determinam-se zonas de fraturamento, com suas direções e mergulhos, caminho provável dos contaminantes, sendo difícil identificar se as águas percolantes estão ou não contaminadas.

A Figura VI-28, apresenta mapa de resistividade aparente do primeiro nível, de um estudo visando determinar provável pluma de contaminação (Fundunesp, 2002/a). O resíduo industrial disposto no tanque, é resultante da industria de curtume da região. Os resultados obtidos na interpretação das pseudo-seções, estão sintetizados na figura com o mapa do primeiro nível.

O estudo se deu em rochas basálticas fraturadas. Pode-se observar nessa figura, uma zona de baixos valores de resistividade, associada à zona de fratura na rocha, passando ao lado do tanque de resíduos.



**Figura VI-28 – Mapa de resistividade aparente – Fundunesp (2002/a).**

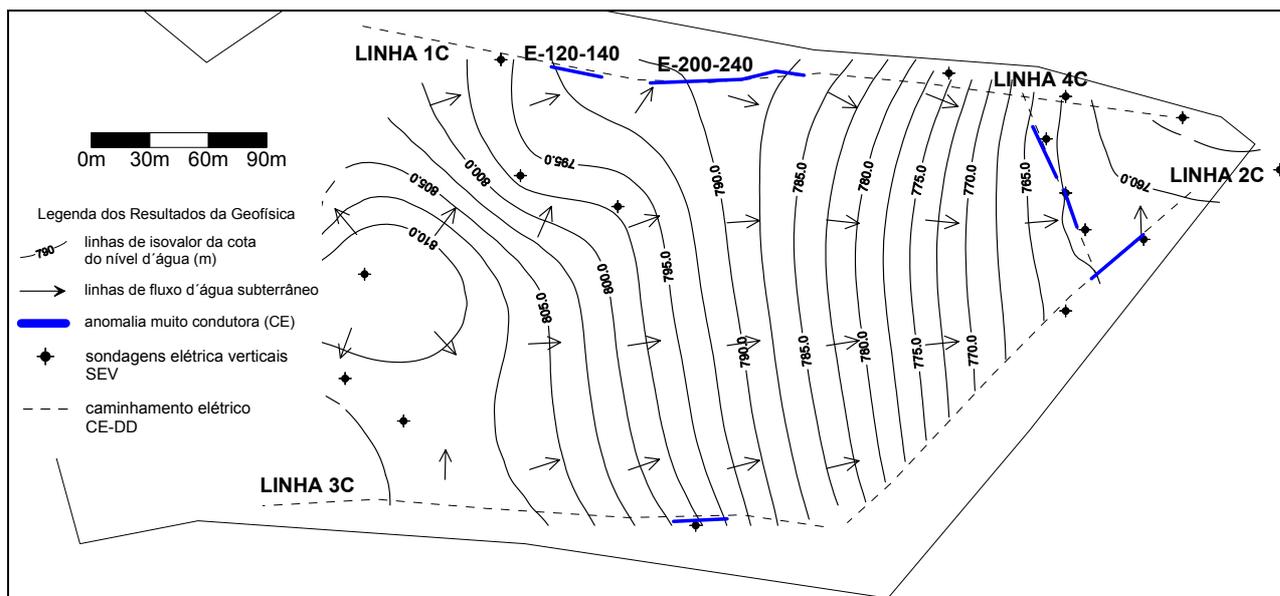
Devido à ocorrência da anomalia condutora na Linha 1, realçada a partir do segundo nível – mais profunda (pseudo-seção – Linha 1) e situada à montante da área estudada (topograficamente mais elevada), não se pode afirmar a priori, que o condutor reflete contaminação.

Nesse caso, pode-se simplesmente indicar zona de fratura condutora, sendo, portanto, necessário a locação de um poço de monitoramento (Linha 3 – E-60), para coleta e análise das águas subterrâneas. A partir dos resultados da geofísica, pode-se direcionar com maior precisão a locação desse(s) poço(s).

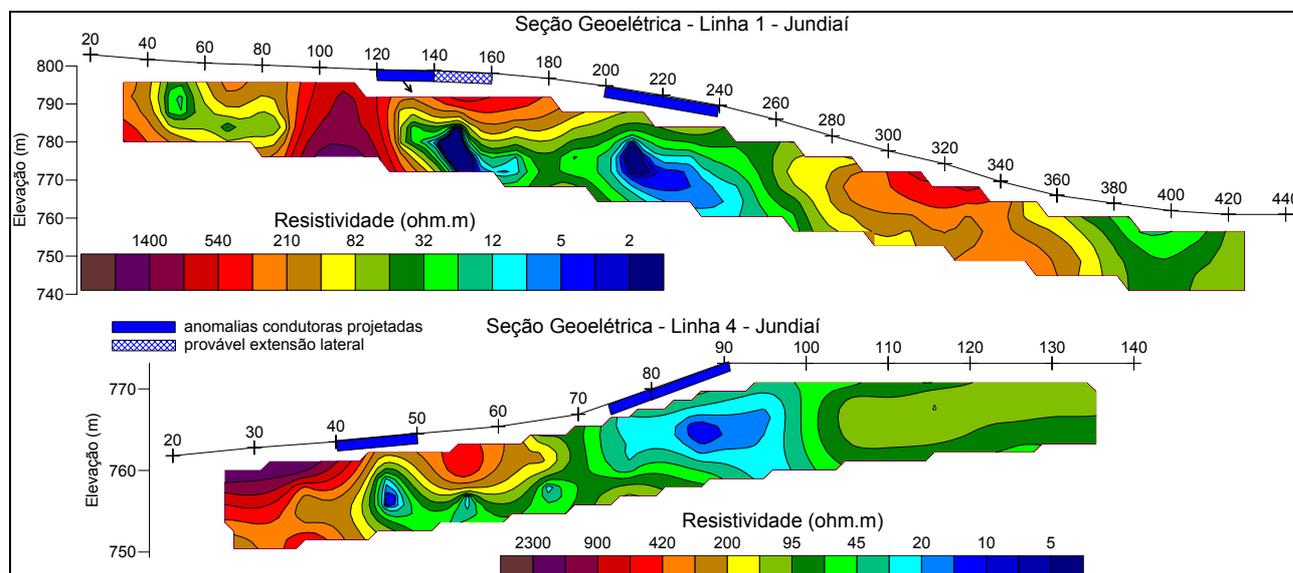
Entretanto, o projeto Fundunesp (2000/c), executado em um aterro sanitário localizado em terrenos cristalinos (Figura VI-29), com aproximadamente 40 metros de resíduos acumulados, apresentou resultados interessantes utilizando as técnicas da sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico.

A partir de SEV's executadas, pode-se traçar o mapa potenciométrico do aterro com as direções e sentido do fluxo do fluido incompressível (contaminante) subterrâneo. Em função dos resultados do CE-DD - Linha 1 (Figura VI-30), observa-se duas anomalias condutoras bem definidas entre as E-120-140 e E-200-240, associadas a fraturamento/falhamento na rocha.

Essas anomalias do CE-DD, bem caracterizadas na seção geoeletrica, aliadas ao mapa de fluxo das SEV's, demonstram uma percolação do contaminante (chorume) nesse sentido (NE), contrariando a tendência geral de sentido leste. A ocorrência do contaminante nessa região, foi confirmada após a instalação de poço de monitoramento e coleta e análise das águas.



**Figura VI-29 – Mapa potenciométrico e resultados do CE-DD – Fundunesp (2000/c).**



**Figura VI-30 – Seção geoeletrica – processamento das Linhas 1 e 4/CE-DD – Fundunesp (2000/c).**

Ressalta-se que na linha 4 do CE-DD, bem no centro, localiza-se um poço de monitoramento e coleta de chorume para tratamento. A partir desses resultados, novos poços foram programados.

## CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1. MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NA HIDROGEOLOGIA

#### 7.1.1. Considerações Metodológicas

Além das considerações teóricas e práticas sobre os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida e das técnicas da sondagem elétrica vertical – Schlumberger e caminhamento elétrico - dipolo-dipolo, esse trabalho apresentou uma proposta de *classificação* para os métodos geoeletricos de maneira geral, na qual procurou-se normalizar e, principalmente, facilitar o entendimento das variáveis que envolvem esses métodos, evitando confusões entre, por exemplo: métodos, técnicas e arranjos. Nessa proposta procuraram-se definir de maneira simples e objetiva, os métodos geoeletricos como aplicação, principalmente, para usuários da Geofísica.

Discutiu-se ainda a escolha da *metodologia* geoeletrica mais adequada, considerando os objetivos gerais do trabalho, ou seja, a aplicação visando à captação de águas subterrâneas, atendendo às mais variadas finalidades, e estudos de caráter ambiental, envolvendo a contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas. Nessa definição metodológica mais adequada, a geologia local aliada aos objetivos específicos do trabalho - produtos, é fundamental na decisão final.

Dependendo da geologia da área estudada, determinada metodologia pode se tornar inviável, sendo necessário recorrer a outro tipo menos precisa. Os objetivos específicos envolvem os produtos a serem obtidos, tais como: determinação da profundidade do nível d'água, mapa potenciométrico, identificação litológica, aquíferos promissores, etc. No alcance desses objetivos específicos, certos critérios de análise, devem ser considerados, tais como: profundidade de investigação a ser atingida, espessura e forma do corpo a ser prospectado (ligada à geologia), tipos e contrastes de propriedades físicas entre o corpo a ser prospectado e o meio encaixante, além de levar em consideração as questões de custos e prazos do projeto.

Quanto à definição dessa metodologia, consideraram-se ainda, as diferentes fases de um projeto envolvendo questões ambientais (pré ou pós-emprego), onde a ocorrência ou não de eventuais plumas de contaminação, somam às outras considerações anteriores na utilização ou não de determinadas técnicas de campo.

Nas discussões sobre a *programação e desenvolvimento* da técnica de campo da SEV-Schlumberger, apresentou-se, como uma tentativa de contribuição na programação, um ábaco, que pode ser utilizado como um indicativo inicial para orientar a quantidade de ensaios a serem desenvolvidos, em uma determinada área de pesquisa. Ressalta-se entretanto, que a

quantidade de ensaios finais, estará sempre ligada às especificidades de cada pesquisa. Quanto à profundidade de investigação de uma SEV, procurou-se abordar questões práticas, tais como o efeito de penetração em terrenos de alta resistividade, determinando-se o fator de redução da profundidade. Várias outras questões práticas, envolvendo também a técnica do CE-Dipolo-Dipolo, foram abordadas.

### 7.1.2. Tratamento dos Dados e Produtos Obtidos

Nas discussões envolvendo o tratamento dos dados de campo e seus principais produtos obtidos (Capítulos 5 e 6), ressalta-se a definição da *litologia*, a partir da resistividade e cargabilidade, visando identificar camadas geológicas com potencial aquífero para **captação** de águas subterrâneas em terrenos de rochas sedimentares. Concluiu-se, principalmente, que os aquíferos a serem explorados, em função da resistividade e cargabilidade, devem apresentar valores, respectivamente, entre: 60,0 - 300,0 ohm.m e 2,5 - 6,0 mV/V.

De acordo com a geologia e área a ser estudada, a técnica do CE-DD, pode ser empregada na identificação litológica e determinação do nível d'água subterrâneo, com maior detalhe que as SEV's, as quais podem ser executadas, em menor número, sendo utilizadas para calibrar o modelo da inversão do CE

As aplicações dos parâmetros de *Dar Zarrouk*, resistência transversal e condutância longitudinal, revelam-se de extrema utilidade no entendimento do modelo final. Nos estudos visando tanto à captação de águas subterrâneas como no diagnóstico ambiental de solos, rochas e águas subterrâneas, esses parâmetros podem ser utilizados com critérios estabelecidos.

Nas associações dos parâmetros hidrogeológicos: condutividade hidráulica e transmissividade, com os parâmetros de *Dar Zarrouk*, mostrou-se que os valores de resistência transversal ( $T_{DZ}$ ) para sedimentos arenosos, tendem a serem mais elevados que para sedimentos argilosos. Entretanto observaram-se também valores para os sedimentos argilosos maiores que para os sedimentos arenosos, evidenciando que nesse tipo de correlação, a litologia, através por exemplo do *mapa de resistividade*, tem que ser considerada.

Em terrenos de rochas cristalinas ou em rochas cársticas, onde os aquíferos a serem investigados apresentam semelhanças em termos de investigação geoeletrica, observou-se que, de um modo geral, ao aplicar os parâmetros de *Dar Zarrouk* na técnica do CE-Dipolo-Dipolo, a intensidade da anomalia na pseudo-seção de condutância longitudinal total ( $S_{DZ}$ ) é maior que na pseudo-seção de resistência transversal total ( $T_{DZ}$ ), isto se deve, principalmente, ao fato de que nesta situação a resistividade longitudinal é mais sensível à zona fraturada que

a resistividade transversal. Nas pseudo-seções de resistividade média, observou-se uma filtragem das resistividades aparentes, indicando posições mais precisas de anomalias e suas direções de mergulho. As inversões dos dados do CE, através do software Res2dinv (Geotomo), apresentaram resultados bem satisfatórios, cujos modelos geoeletricos finais são bem próximos à geologia.

Nas questões **ambientais**, estudando as diferentes fases de um empreendimento, destacam-se os resultados obtidos no Projeto FAPESP/2005 – ensaios em laboratório. Conforme resultados do referido projeto, demonstrou-se que os valores de resistividade, de sedimentos areno-argilosos não saturados, aumentaram significativamente, imediatamente após a contaminação por gasolina. Depois de seis meses de monitoramento, esses valores tornaram-se condutivos em relação aos valores naturais.

Já, os valores de cargabilidade apresentaram uma variação, também significativa, com valores mais baixos que os naturais, sem contaminação. Entretanto, com o tempo, os valores se tornaram, aproximadamente constantes, diferentemente da resistividade. Em todos os ensaios, observou-se que a cargabilidade não responde imediatamente à presença da gasolina, como a resistividade.

Portanto, conclui-se a partir desses estudos em laboratório que, de uma maneira geral, em vazamentos de derivados de hidrocarbonetos, atingindo os solos e rochas sedimentares e as águas subterrâneas, o fator temporal é fundamental. Em relação ao meio natural (sem contaminante), vazamentos recentes deverão apresentar: resistividades altas – *anomalias resistivas* e cargabilidades baixas – *anomalias de baixa cargabilidade*. Em vazamentos antigos, a situação tende a se inverter: a resistividade deverá ser baixa - *anomalias condutivas*, e a cargabilidade alta - *anomalias de alta cargabilidade*. Em vários projetos desenvolvidos em refinarias de combustíveis, antigos vazamentos de derivados de hidrocarbonetos, apresentaram baixos valores de resistividade em relação ao meio sem contaminação, fato devidamente comprovado por poços de monitoramento.

Nesses estudos ambientais, a aplicação dos parâmetros de Dar Zarrouk na técnica do CE-Dipolo-Dipolo, em terrenos sedimentares, mostrou que a resistência transversal total realçou mais a anomalia que a condutância longitudinal total, isto se deve ao fato de que, nesses casos, a resistividade transversal predomina sobre a resistividade longitudinal. Destaca-se ainda a importância da aplicação do parâmetro condutância longitudinal unitária obtida principalmente através das SEV's, visando estudar o *grau de proteção* de uma camada aquífera frente a contaminantes.

A aplicação dos parâmetros de Dar Zarrouk ( $T_{DZ}$  e  $S_{DZ}$ ) é fundamental em uma fase pré-emprego, e não recomendados em fases pós-emprego, onde as presenças de contaminantes alteram os valores de resistividade do meio natural, tornando inviável qualquer correlação com os tipos litológicos e suas características. Nessa fase pós-emprego, a aplicação dos parâmetros de Dar Zarrouk visa apenas obter uma análise das anomalias existentes quanto às suas intensidades e definições, auxiliando na interpretação do modelo final.

## **7.2. CONCLUSÕES**

Somado aos objetivos, amplamente discutidos anteriormente, esse trabalho procurou apresentar uma discussão sobre os principais métodos e técnicas de campo dos métodos geoeletricos aplicados em estudos hidrogeológicos, com destaque na captação para abastecimento e diagnóstico de solos, rochas e águas subterrâneas frente a poluentes.

É evidente que a integração de vários métodos geofísicos, aplicados simultaneamente, podem definir as diferentes características geológicas de cada área estudada, com maior precisão e detalhamento. Entretanto, essa proposição metodológica apresentada, procurou aplicar uma relação entre a resolução de métodos e técnicas com custos e prazos adequados a um trabalho envolvendo a Geofísica Aplicada em estudos hidrogeológicos.

O emprego da eletrorresistividade, com as técnicas da SEV e CE, por si só, revela-se decisivo para atingir os mais variados fins envolvendo esses tipos de estudos. A resistividade elétrica dos materiais geológicos, é definida, principalmente, em função de seus constituintes mineralógicos e o tipo de fluido presente, sendo, portanto, ideal para os estudos hidrogeológicos de maneira geral. Cabe ressaltar ainda, que além do fato desse método apresentar conceitos simples para seu entendimento e os valores de resistividade, normalmente, não necessitem de filtros especiais para suas determinações, os equipamentos eletrorresistivímetros, estão entre os que apresentam os custos mais reduzidos no mercado.

## BIBLIOGRAFIAS REFERENCIADAS E CONSULTADAS

São apresentadas a seguir as publicações que foram referenciadas no desenvolvimento do texto dessa monografia e as publicações consultadas, importantes no trabalho, mas não referenciadas. Algumas publicações são consideradas clássicas nas discussões sobre os métodos geoeletricos e outras apresentam aplicações práticas e atuais.

- Alfano, L. 1959. Introduction to the interpretation of resistivity measurements for complicated structural conditions. *Geophysical Prospecting*, v. 7, p. 311-366.
- Alfano, L. 1966. The influence of surface formations on the apparent resistivity values in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*; v.8, p. 576-606.
- Apparao, A.; Srinivas, S.; & Sarma, V.S., 1997. Physical modeling results on modified pseudodepth sections in exploration of Highly Resistive Targets; Pure Applied Geophysics, Publisher:Birkhäuser Verlag AG - ISSN: 0033-4553 (Paper) 1420-9136 (Online) - DOI: 10.1007/s000240050080, Issue: V. 150, N. 2, p. 341 - 352, p. 341-352.
- ANA, 2001. Glossário de Termos Hidrológicos – Versão 1.1. Agência Nacional de Águas, Superintendência de Informações Hidrológicas – SIH.
- ANP, 2003. Site da ANP - [http://www.anp.gov.br/petro/refino\\_editorial.asp](http://www.anp.gov.br/petro/refino_editorial.asp); 09/12/2003 – 09:36 hs.
- Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metall., Eng.*, 146, p. 54-62.
- Bogoslovsky, V.A.; Ogilvy, A.A. 1977. Geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics*, v. 42, p. 562-571.
- Bogoslovsky, V.A.; Ogilvy, A.A. 1986. *The possibilities of geophysical control of man-made changes in the geologic environment*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. *Eng. Geol.*, v. 22, p. 301-315.
- Börner, F.D.; Schopper, J.R.; Weller, A. 1996. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting*, v. 44, nº 4, p. 583-601.
- Braga, A.C.O., 1997. “Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – IGCE, Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração Geociências e Meio Ambiente, Campus de Rio Claro-SP, 169 p.

- Braga, A.C.O., 2001. “Métodos Geométricos Aplicados no Diagnóstico do Lençol Freático para Subsídio em Estudos Ambientais”. Projeto de Pesquisa - Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ). Entidade Financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Coordenação de Ciências Exatas e da Terra 2 – Programa Básico de Geociências: Geofísica, Meteorologia e Geodésia. Período: 01/08/2000 a 31/07/2002.
- Braga, A.C.O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J.C. 2005. “Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies”. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics (JEEG) – The Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS) – USA*, ISSN-1083-1363, *Submitted: julho/2005*.
- Cetesb, 1999. Site da CETESB Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/manual.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp). Acessado em: 03/agosto/2005.
- Cummings, D. 1990. Surface geophysical investigations for Hazardous Waste Sites. *Geophysical Applications for Geotechnical Investigations*, ASTM STP 1101, Frederick L. P. and Wayne R. S. Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, p. 9-16.
- Daily, W.; Ramirez, A.; Binley, A. 2004. Remote monitoring of leaks in storage tanks using electrical resistance tomography: application at the Hanford Site. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, V. 9, Issue 1, p. 11-24.
- Draskovits, P.; Hobot, J.; Verö, L.; Smith, B. 1990. Induced-polarization surveys applied to evaluation of groundwater resources, Pannonian Basin, Hungary. USA. *Investigations in Geophysics*, nº 4. Induced Polarization Applications and Case Histories. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, p. 379-396.
- Elis, V.R.; 1999. *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro.
- FAPESP, 2005. *Métodos geométricos aplicados em estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas por derivados de hidrocarbonetos*. Projeto de Pesquisa – Modalidade Individual, financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, e desenvolvido de 08/2003 a 02/2005, 58 p.
- Ferreira, J. & Zuquette, L.V. 1998. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. *Geociências*, São Paulo, V. 17 (2): 527 – 557.

- Flathe, H. 1976. The role of a geologic concept in geophysical research work for solving hydrogeological problems. *Geoexploration*, v. 14, nº 3/4, p.195-206.
- Funep. 2005(a). Relatório Técnico: “Ensaio de Eletroresistividade no Município de Franca/SP”. Sítio Santo Antonio, Fazenda Bom Jardim, localizados no município de Franca-SP, e Fazenda Nossa Senhora de Lourdes, município de Pedregulho-SP. Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão – FUNEP.
- Funep. 2005(b). Relatório Técnico: “Estudos Geofísicos no Sítio Santa Emília – Patrocínio Paulista-SP”. Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão – FUNEP.
- Funep. 2005(c). “Ensaio de eletroresistividade no município de Capivari - SP” - 2005. Implanta Assessoria e Consultoria Ambiental Ltda - Microsal Indústria e Comércio Ltda, Capivari/SP. Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão – FUNEP.
- Fundunesp. 1997(a). Relatório Técnico: “Ensaio geoeletricos no subsídio à pesquisa de água subterrânea em meios fissurados no município de Campinas-SP” - 1997. Campinas-SP. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 1997(b). Relatório Técnico: “Ensaio geofísicos aplicados para o subsídio ao monitoramento do lençol freático em área de disposição de resíduos industriais” - Limeira - SP. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - FUNDUNESP.
- Fundunesp. 1998. Relatório Técnico: “Diagnóstico ambiental do lençol freático da Refinaria Alberto Pasqualini”. 1997/98. Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP – Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS, Canoas-RS. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - FUNDUNESP.
- Fundunesp. 1999(a). Relatório Técnico: “Diagnóstico do lençol freático da Refinaria Presidente Bernardes RPBC – Cubatão-SP”. Refinaria Presidente Bernardes RPBC – Cubatão-SP – Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - FUNDUNESP.
- Fundunesp. 1999(b). Relatório Técnico: “Avaliação da contaminação na área das linhas de distribuição de combustível da REVAP – São José dos Campos-SP”. Refinaria Henrique Lage – REVAP – Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS, São José dos Campos-SP. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2000(a). Relatório Técnico: “Ensaio geofísicos na determinação do lençol freático no Posto Safira, Rio Claro-SP”. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.

- Fundunesp. 2000(b). Relatório Técnico: “Estudos geológico-geotécnicos na área de implantação de posto de abastecimento de combustíveis”. Rio Claro-SP. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2000(c). Relatório Técnico: “Emprego de métodos geofísicos na caracterização, análise prévia e diagnóstico do Aterro Sanitário de Jundiá e Região - SP”. Município de Várzea Paulista, SP. Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário – CIAS. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2001. Relatório Técnico: “Ensaio geofísicos aplicados à Hidrogeologia no município de São Carlos-SP”. Drillmine S/C Ltda. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2002(a). Relatório Técnico: “Ensaio Geofísicos Aplicados ao Controle Ambiental no Município de Pedregulho-SP” (Franca-SP). Implanta Assessoria e Consultoria Ambiental Ltda. - Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2002(b). Relatório Técnico: “Avaliação Hidrogeológica da Refinaria de Paulínia”. Refinaria de Paulínia – Paulínia-SP – Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2002(c). Relatório Técnico: “Ensaio Geofísicos Aplicados ao Monitoramento do Solo e do Lençol Freático em Área de Disposição de Resíduos”. Agri-Tillage do Brasil Ltda/Fundição Baldan, Matão-SP - Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2003. Relatório Técnico: “Ensaio Geofísicos Aplicados no Estudo do Lençol Freático no Município de Franca-SP” - 2003. Implanta Assessoria e Consultoria Ambiental Ltda, Franca-SP - Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Fundunesp. 2004. Relatório Técnico: “Ensaio de Radar de Penetração no Solo e de Resistividade Elétrica em Riachuelo - Sergipe”. Campo produtor de Riachuelo/SE – Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS. Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP.
- Gallas, J. D. F. 2000. “Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental” - Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – IGCE, Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração Geociências e Meio Ambiente, Campus de Rio Claro-SP, 174 p.

- Goes, B.J.M.; Meeke, J.A.C. 2004. An effective electrode configuration for detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v.9, Issue 3, p. 127-141.
- Griffiths, D.H.; King, R.F. 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos*. Trad. Angel R.Cruz (Original - 1965). Madrid, Ed. Paraninfo, 231 p.
- Griffiths, D.H. 1976. Application of electrical resistivity measurements for the determination of porosity and permeability in sandstones. *Geoexploration*, v.14 n° 3/4, p. 207-213.
- Haberjam, G.M.; Watkins, G.E. 1967. The reduction of lateral effects in resistivity probing. *Geophysical Prospecting*, v. 15, p. 221-235.
- Henriet, J.P. 1975. Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting*, n° 24, p. 344-353.
- Iakubovskii, I.U.V.; Liajov, L.L. 1980. *Exploración eléctrica*. Espanha, Editorial Reverté, S.A., 421 p.
- IPT. 1980. Relatório Técnico N° 14.193: Sondagens elétricas verticais em apoio aos estudos geológicos dos Blocos 46 e 49. PAULIPETRO – Consórcio CESP/IPT.
- IPT. 1985/1986. Relatório n. 21.692: Ensaio geofísico por sísmica de refração e eletrorresistividade em apoio aos estudos em Tocantins - Santa Isabel - Marabá. Marabá/PA, ENGEVIX.
- Inman, J.R. 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40, p. 798-817.
- Jorgensen, D.G. 1991. Estimating geohydrologic properties from borehole - geophysical logs. *Rev. Ground Water Monitoring Review*. Summer 1991, v. 29, p. 123-129.
- Labrecque, D.J.; Heath, G.; Sharpe, R. Versteeg, R. 2004. Autonomous monitoring of fluid movement using 3-D electrical resistivity tomography. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, V. 9, Issue 31, p. 167-176.
- Koefoed, O. 1965. Direct methods of interpreting resistivity observations. *Geophysical Prospecting*, v. 13, n° 4, p. 568-591.
- Koefoed, O. 1979a. *Geosounding Principles, 1 - Resistivity sounding measurements*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 276 p.
- Koefoed, O. 1979b. Resistivity sounding on an earth model containing transition layers with linear change of resistivity with depth. *Geophysical Prospecting*, v. 27, n° 4, p. 862-868.
- Kunetz, G. 1966. Principles of direct current resistivity prospecting. Berlin, Gebruder Borntraeger, [English translation from the French by Robert Van Nostrand]. *Geoexploration Monographs*, Series 1 - n° 1, 103 p.

- Maillet, R. 1947. The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, v. 12, nº 4, p. 529-556.
- Matias, S.M.J. 2002. Square array anisotropy measurements and resistivity sounding interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, v.49, p. 185-194.
- Matias, M.J.S.; Habberjam, G.M. 1984. A field example of the use of anisotropy parameters derived from resistivity soundings. *Geophysical Prospecting*, v. 32, p. 725-739.
- Malagutti Filho, W.; Braga, A.C.O.; Dourado, J.C.; Lourenço JR., J.C.R.; 2000. "Emprego de métodos geofísicos na caracterização e análise ambiental do aterro sanitário de Jundiáí-SP". *Geociências. Revista da Editora UNESP – Fundação*, v. 19, n.1, 2000, p. 115-124.
- Moura, H.P.; Malagutti Filho, W., Braga, A.C.O. 2001. "Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes - Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos". 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society - SBGf, SEG, EAGE, ULG, Salvador/Brazil, 28 a 31 de outubro de 2001, Anais... CD-ROM – Session: Environmental Geophysics.
- Oldenburg, D.W.; LI, Y. 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, v. 59, nº 9, p. 1327-1341.
- Oliveira, S. L. 1999. *Tratado de Metodologia Científica*. 2 a. Ed. São Paulo: Pioneira.
- Ogilvy, A.A.; Bogoslovsky, Y.A. 1979. The possibilities of geophysical methods applied for investigating the impact of man on the geological medium. *Geophysical Prospecting*, v. 27, nº 4, p. 775-789.
- Ogilvy, A.A.; Berry, B.L.; Kuzmina, E.N. 1979. The study of the genesis of surface waters by observing their electrical resistivities. *Geophysical Prospecting*, v. 27, p. 790-797.
- Ogilvy, A.A.; Bogoslovsky, Y.A.; Kuzmina, E.N. 1980. Geoelectric models in engineering geophysics. *Geophysical Prospecting*, v. 28, p. 945-955.
- Orellana, E. 1972. *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 523 p.
- Orellana, E. 1974. *Prospeccion geoelectrica por campos variables*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 571 p.
- Ossela, A.; Veja, M. e Lascano, E. Caracterização de Pluma Contaminante de um derrame de Hidrocarboneto , usando métodos Geoeletricos. *Journal of Environmental & Engineering Geophysic s*, vol. 7, issue 02, p. 78 – 87, 2002.
- Ogilvy, A.A.; Bogoslovsky, Y.A. 1979. The possibilities of geophysical methods applied for investigating the impact of man on the geological medium. *Geophysical Prospecting*, v. 27, nº 4, p. 775-789.

- 
- Parasnis, D.S. 1970. *Principios de geofísica aplicada*. Trad. E. Orellana (Original - 1962). Madrid, Ed. Paraninfo, 208p.
- Roberts, J.J.; Wildenschild, D. Electrical properties of sand-clay mixtures containing trichloroethylene and ethanol. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, V. 9, Issue 1, p. 1-10, 2004.
- Robinson, E.S.; Çoruh, C. 1988. *Basic exploration geophysics*. EUA, Ed. John Wiley & Sons, Inc., Cap. 13 - Geoelectrical Surveying, p. 445-500.
- Sauck, W.A. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 151-165.
- Software Res2dinv V. 3.5 - 2D Resistivity and IP Inversion, GEOTOMO – Malaysia.
- Software IX1D V. 2.0 - 1D Sounding Inversion - Interpex Limited - USA.
- Sumner, J.S. 1976. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277 p.
- Tagliavini, J. V. 1998. Curso de Metodologia Científica. Apostila. São Carlos: IPESU.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, Second Edition, 770 p.
- Vacquier, V.; Holmes, C.R.; Kintzinger, P.R.; Lavergne, M. 1957. Prospecting for ground water by induced electrical polarization. *Geophysics*, v. XXII, no 3, p. 660-687.
- Ward, S.H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. USA. *Investigations in Geophysics*, nº 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, v. I, p. 147-189.