

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**PERFIS RESISTIVO E DE INDUÇÃO EM POÇOS DELGADOS:  
UFRJ-1-RJ E ITAB-1-RJ**

**José Leão de Luna**

Dissertação de Mestrado

**JOSÉ LEÃO DE LUNA**

**PERFIS RESISTIVO E DE INDUÇÃO EM POÇOS DELGADOS: UFRJ-1-RJ E ITAB-1-RJ**



UFRJ

## **PERFIS RESISTIVO E DE INDUÇÃO EM POÇOS DELGADOS: UFRJ-1-RJ E ITAB-1-RJ**

**José Leão de Luna**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências (Geologia).

Orientador(es):

Prof. Dr. Paula Lúcia Ferrucio da Rocha  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Fernandes  
Prof. Dr. Fábio André Perosi

Rio de Janeiro  
Março de 2012

**PERFIS RESISTIVO E DE INDUÇÃO EM POÇOS DELGADOS:  
UFRJ-1-RJ E ITAB-1-RJ**

José Leão de Luna

Orientadores: Prof. Dr. Paula Lúcia Ferrucio da Rocha, Prof. Dr. Carlos Eduardo  
Fernandes, Prof. Dr. Fábio André Perosi

Dissertação de Mestrado submetida ao  
Programa de Pós-graduação em Geologia,  
Instituto de Geociências, da Universidade  
Federal do Rio de Janeiro –UFRJ, como  
parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Mestre em Ciências  
(Geologia).

Aprovada por:

---

GERSON CARDOSO DA SILVA JR., UFRJ

---

LEONARDO FONSECA BORGHI DE ALMEIDA, UFRJ

---

IRINEU FIGUEIREDO, OBSERVATÓRIO NACIONAL

Rio de Janeiro  
Março de 2012

LUNA, José Leão de

Perfis Resistivo e de Indução em Poços Delgados:  
UFRJ-1-RJ e ITAB-1-RJ [Rio de Janeiro] 2012.

xii, 91 p. (Instituto de Geociências – UFRJ, M.Sc.,  
Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2012).

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, realizada  
no Instituto de Geociências.

1. Perfilagem Geofísica de Poços. 2. Bacia de São José de Itaboraí. 3. Perfis de Resistividade. 4. Perfil de Indução. 5. Propriedades Elétricas das Rochas.

I – IG/UFRJ

II - Título (série)

Este trabalho é dedicado aos meus pais, José Martiniano de Luna Neto e Nélia Leão Luna e a toda a minha família.

## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora e amiga Paula Lucia Ferrucio da Rocha por todo o incentivo, conselhos e ajuda para que este trabalho fosse concluído.

Ao meu orientador e amigo Carlos Eduardo Fernandes por toda a sua ajuda.

Ao meu orientador e amigo Fábio André Perosi por toda a sua ajuda na etapa final deste trabalho.

Ao meu colega de mestrado Emerson Alves por todo o companheirismo durante este projeto.

À aluna de Doutorado Milena Ferreira de Siqueira por todo o apoio acadêmico.

Ao professor Miguel Ângelo Mane (LAGEX-UERJ) por todas as oportunidades de vivenciar o trabalho na área de geofísica e por todas as conversas sobre perfilagem.

A Geneci Regina Coelho por toda a ajuda operacional na organização dos campos.

A Geraldo N. Girão pela sua disponibilidade em me ajudar na análise dos dados.

A Marcelle Cristine Paes de Melo, por toda a sua ajuda na revisão do texto e carinho e paciência inesgotáveis.

A Roberto Hermann Plastino, por toda ajuda técnica, e pelas conversas que sempre foram fontes de conhecimento e incentivo.

A todos os amigos e professores do IF-UFRJ pelo incentivo e interesse nesta nova etapa de minha vida acadêmica.

A Petrobrás S.A. pelo apoio financeiro ao Laboratório de Perfilagem e Geofísica – IGEO / UFRJ.

Ao CNPq por me possibilitar a realização deste trabalho.

KOSI OBA KAN AFI OLORUN  
(Não há outro senhor Deus)

## RESUMO

### PERFIS RESISTIVO E DE INDUÇÃO EM POÇOS DELGADOS: UFRJ-1-RJ E ITAB-1-RJ

José Leão de Luna

Orientadores: Dra. Paula Lúcia Ferruccio da Rocha, Dr. Carlos Eduardo Fernandes e Dr. Fábio André Perosi.

Neste trabalho são discutidos os resultados da aplicação de duas técnicas de perfilagem baseadas nas propriedades elétricas das rochas (perfis de eletrodo galvânico e de indução) nos poços UFRJ-1-RJ e ITAB-1-RJ respectivamente, ambiente resistivo e condutor. Para tal, foram discutidas as bases teóricas de ambas as técnicas, suas limitações e suas principais aplicações. Também foram incluídas as características físicas das regiões onde cada poço foi perfurado (UFRJ-1-RJ – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ e ITAB-1-RJ – Bacia de São José de Itaboraí, Itaboraí, RJ) e interferências nos resultados. São ainda abordadas questões operacionais dos equipamentos utilizados, os perfiladores comerciais (*Electric Log*® e *Slim Induction Tool*®), e breves comentários sobre as outras ferramentas cujos dados foram utilizados como auxiliares para interpretação dos resultados (perfis Sônico, Neutrão, Gama e Condutividade de água). Foi possível observar, no ambiente resistivo (UFRJ-1-RJ) os efeitos de fuga de corrente, devido ao alto contraste de resistividade entre a água do poço e a formação (de baixa porosidade), e conseqüentemente, a baixa penetração do sinal. No ambiente de baixa resistividade (ITAB-1-RJ) foi possível determinar qualitativamente, face à baixa recuperação dos testemunhos e ao alto grau de desmoronamento, contatos entre camadas. Observou-se que mesmo em ambientes extremos (valores muito altos e baixos de resistividade) foi possível obter informações sobre as possíveis zonas de contato entre camadas e regiões onde exista maior saturação de água.

Palavras-chave: Perfilagem Geofísica de Poço; Perfil de Eletrodo; Perfil de Indução; Bacia de São José de Itaboraí; Ilha do Fundão; Propriedades Elétricas das Rochas.

Rio de Janeiro  
Março de 2012



**ABSTRACT****RESISTIVITY AND INDUCTION LOG IN THIN WELLS: UFRJ-1-RJ AND ITAB-1-RJ**

José Leão de Luna

Orientador (es): Prof. Dr. Paula Lúcia Ferrucio da Rocha, Prof. Dr. Carlos Eduardo Fernandes e Prof. Dr. Fábio André Perosi

This paper discusses the results of applying two well logging techniques based on the electrical properties of rocks (short and long normal resistivity and focused induction) in the wells UFRJ-1-RJ and ITAB-1-RJ, respectively a very high and a very low resistivity wells. To this end, we discussed the theoretical bases of both techniques, their limitations and their main applications. Also included are the physical characteristics of the areas where each well was drilled (UFRJ-1-RJ – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ e ITAB-1-RJ –São José de Itaboraí Basin, Itaboraí, RJ) and interference factors in the results associated to this places. It also covers operational issues of equipment used, the commercial logs (*Electric Log*® and *Slim Induction Tool*®), and brief comments about the other tools whose data were used as assistants to interpretation of the results (Sonic Log, Neutron, Gamma, and Well Water Conductivity). Was possible to observe in the high resistivity environment (RJ-1-UFRJ) the effects of current drain due to the high contrast between the well's water and the high resistivity formation (low porosity) and accordingly the low penetration of the signal. In the environment of low resistivity (ITAB-1-RJ) was determined qualitatively, given the low recovery of testimonies and the high degree of collapse, contacts between layers. It was observed that even in extreme environments ( high and low resistivities) information was available of possible areas of contact between layers and regions where there is higher water saturation.

Key-Words: Well Logging; Resistivity Log; Conductivity Log, São José de Itaboraí Basin; Ilha do Fundão; Electrical Properties of Rocks.

Rio de Janeiro  
Março de 2012

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Formulação do Problema e Justificativa do Estudo .....	1
1.2. Objetivo .....	3
1.3. Organização do Texto da Dissertação .....	4
<b>2. CONCEITOS DE PETROFÍSICA E PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO</b> .....	5
2.1. Introdução .....	5
2.2. O Ambiente do Poço .....	10
2.3. Perfil de Eletrodo Galvânico (Normal Curto e Longo) .....	13
2.4. O Perfil de Indução Focado .....	19
2.4.1. Sonda de duas bobinas .....	23
2.4.2. Sonda de duas bobinas focada .....	29
2.4.3. Skin effect .....	30
<b>3. CONTEXTO GEOLÓGICO E MATERIAL DE ESTUDO</b> .....	32
3.1. Fluxograma do Projeto .....	32
3.2. Características Geológicas da Bacia de São José de Itaboraí .....	33
3.3. Características do Poço ITAB-1-RJ .....	38
3.4. Características Geológicas da Localização do Poço UFRJ-1-RJ .....	41
3.5. Características do Poço UFRJ-1-RJ .....	42
3.6. As Ferramentas de Perfilagem .....	43
3.7. O Laboratório Móvel .....	49
<b>4. ANÁLISES DOS RESULTADOS</b> .....	54
4.1. Análise dos dados do Poço UFRJ-1-RJ .....	54
4.2. Análise dos dados do Poço ITAB-1-RJ .....	58
4.3. Análise Comparativa da Ferramenta de Eletrodo em Ambientes de Baixa e Alta Resistividade .....	68
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	70
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	72
<b>APÊNDICE A</b>	

## LISTA DE FÍGURAS

<b>Figura 01</b>	Dados de perfis de poço (UFRJ-1-RJ)	06
<b>Figura 02</b>	Ferramenta de Perfilagem (Electric Log)	08
<b>Figura 03</b>	Representação das zonas do poço	11
<b>Figura 04</b>	Primeiro Perfil Elétrico realizado pelos irmãos Schlumberger	14
<b>Figura 05</b>	Caminho realizado pela corrente caso $R_t \gg R_m$	15
<b>Figura 06</b>	Caminho percorrido pela corrente no caso de camada fina e mais resistiva do que as encaixantes	16
<b>Figura 07</b>	Modelo de circuito elétrico para estimativa da influencia da geometria do poço nos perfis normais	17
<b>Figura 08</b>	Carta de correção (Schlumberger) para perfil de eletrodo normal curto	19
<b>Figura 09</b>	Geometria utilizada para o cálculo do campo magnético produzido por uma espira	21
<b>Figura 10</b>	Geometria utilizada para o cálculo do potencial vetor	22
<b>Figura 11</b>	Modelo de Ferramenta de Indução de duas bobinas	24
<b>Figura 12</b>	Geometria para determinação do fator geométrico para a ferramenta de indução de duas bobinas	26
<b>Figura 13</b>	Modelo geométrico e gráficos de peso dos fatores geométricos vertical e radial (sem considerar o skin effect)	27
<b>Figura 14</b>	Fator Geométrico Integral Vertical	28
<b>Figura 15</b>	Fator Geométrico Integral Radial	28
<b>Figura 16</b>	Ferramenta de duas bobinas focada, com gráfico da soma dos sinais dos receptores	29
<b>Figura 17</b>	Fluxograma do trabalho	32
<b>Figura 18</b>	Mapa de localização da Bacia de São José de Itaboraí	33
<b>Figura 19</b>	Bacia de São José de Itaboraí no ano de 1957	35
<b>Figura 20</b>	Coluna estratigráfica da Bacia de São José de Itaboraí	38
<b>Figura 21</b>	Caixas dos testemunhos do poço ITAB-1-RJ	39
<b>Figura 22a</b>	Ilha do Fundão, com destaque para o Poço Escola IGEO/UFRJ	41
<b>Figura 22b</b>	Área de treinamento em perfilagem, IGEO-UFRJ, com detalhe do poço UFRJ-1-RJ	41
<b>Figura 23</b>	Caixas dos testemunhos do poço UFRJ-1-RJ	43
<b>Figura 24</b>	Ferramenta Electric Log® e esquema da ferramenta	45
<b>Figura 25</b>	Preparação da ferramenta E-Log com fita auto fusão	46
<b>Figura 26</b>	“Fish” utilizado para o aterramento elétrico da ferramenta	46
<b>Figura 27</b>	Ferramenta Slim Induction Tool	47
<b>Figura 28</b>	Anel de Calibração	48
<b>Figura 29</b>	Procedimento de calibração da ferramenta SIND	48
<b>Figura 30</b>	Vista lateral do Laboratório Móvel do LPP	49
<b>Figura 31</b>	Bancada / armário sendo utilizada em operação de perfilagem	50

<b>Figura 32</b>	Guincho utilizado para descer as ferramentas no poço	51
<b>Figura 33</b>	Aterramento sendo feito durante processo de perfilagem	51
<b>Figura 34</b>	Micrologger	52
<b>Figura 35</b>	Vista da boca do poço, com revestimento aparente	53
<b>Figura 36</b>	Perfis Geofísicos de Poço UFRJ-1-RJ	56
<b>Figura 37</b>	Perfil com os dados de resistividade interpretados segundo as variações na resistividade e a correlação com os dados de porosidade calculada por Silva et al. 2010	57
<b>Figura 38</b>	Perfil do poço com dados obtido em 2009	59
<b>Figura 39</b>	Perfil do Poço ITAB-1-RJ obtido em junho de 2011	61
<b>Figura 40</b>	Dados de GR obtidos em 2009 e 2011 no poço UFRJ-1-RJ	62
<b>Figura 41</b>	Gráfico das diferenças (Delta Gama - em azul) entre os valores de 2009 e 2011	63
<b>Figura 42</b>	Gráfico mostrando os valores suavizados de delta Gama (2009 e 2011)	64
<b>Figura 43</b>	Perfil do poço ITAB-1-RJ, com interpretação das zonas resistivas	67
<b>Figura 44</b>	Comparação entre os dados dos poços ITAB-1-RJ e UFRJ-1-RJ	69
<b>Figura A1</b>	Range de valores de resistividade elétrica para alguns minerais	82
<b>Figura A2</b>	Relação entre permissividade dielétrica e densidade para grupos de minerais	83
<b>Figura A3</b>	Relação entre salinidade, temperatura e resistividade de soluções	86
<b>Figura A4</b>	Range de resistividade específica e permissividade dielétrica para diversos tipos de rochas	87
<b>Figura A5</b>	Variação de resistividade causada por efeitos geológicos	88
<b>Figura A6</b>	Resistividade específica obtida de uma amostra de rocha carbonática de baixa porosidade	91

**LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1</b>	Sequencias estratigráficas da Bacia de São José de Itaboraí.	37
-----------------	--	----

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b>	Transcrição da descrição dos testemunhos do poço ITAB-1-RJ	40
<b>Tabela 2</b>	Descrição dos testemunhos em profundidade do Poço UFRJ-1-RJ	42
<b>Tabela A1</b>	Classificação de comportamento elétrico de acordo com a condutividade	79
<b>Tabela A2</b>	Permissividade dielétrica relativa de alguns fluidos encontrados em poros.	85
<b>Tabela A3</b>	Permissividade dielétrica relativa e outras propriedades de alguns dos contaminantes orgânicos mais comuns.	85
<b>Tabela A4</b>	Resistividade para alguns minerais e minérios	89
<b>Tabela A5</b>	Resistividade Específica (Valor Médio e Range)	91

# **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO**

A sociedade atual depende fortemente de dois bens de consumo provenientes da natureza: Petróleo (e seu derivados) e água. A exploração destes fluidos nas rochas em subsuperfície teve um grande desenvolvimento tecnológico devido à indústria do petróleo e provavelmente no futuro a grande demanda será por água potável.

Uma das fronteiras na área de E&P (Exploração e Produção) de óleo e gás é a perfilagem de poço e neste trabalho serão discutidas duas técnicas de perfilagem, baseadas nas propriedades elétricas das rochas (medidas de condutividade e de resistividade), utilizadas para determinar o tipo de fluido presente nos poros. Os dados utilizados foram adquiridos em dois poços, UFRJ-1-RJ furado na área externa do Instituto de Geociências (IGEO/ UFRJ) e o ITAB-1-RJ localizado na Bacia de São José de Itaboraí. Estes poços estão detalhados no capítulo 3.

Através da variação da resistividade (ou seu inverso, a condutividade) pode-se inferir, com a utilização de outros dados sobre a formação, qual o tipo de fluido contido em seu espaço poroso. Ao se comparar regiões com porosidades e permeabilidades semelhantes, as zonas que apresentarem menor resistividade (ou maior condutividade) deverão conter em seu interior água (conforme maior a salinidade da mesma, menor a resistividade). Zonas com hidrocarbonetos irão apresentar valores extremamente altos de resistividade.

O trabalho de perfilagem geoeletrica se baseia na resposta das formações geológicas quando atravessadas por uma ferramenta, se deslocando dentro de um poço de forma contínua, produzindo campos elétricos e eletromagnéticos que penetram na formação. Estas respostas, medidas por sensores na própria ferramenta, são quantificadas e correlacionadas com a profundidade e apresentadas em gráficos.

Entretanto, os sistemas geológicos são complexos e o próprio processo de perfuração já altera os valores iniciais, motivo pelos quais várias correções (utilizando modelos matemáticos) são necessárias antes da correlação do dado com o perfil litológico ou na definição do tipo de fluido do reservatório.

Desta forma, para uma boa interpretação dos dados é necessária uma base teórica de Física (campos elétricos e magnéticos e suas interações com a matéria), conhecimento das

propriedades elétricas das rochas (porosidade, permeabilidade, composição mineralógica, tipo de fluido entre outros) e um estudo do ambiente do poço do ponto de vista elétrico.

Para a validação dos dados são necessários modelos físicos e matemáticos da propagação dos campos (elétrico e eletromagnético) para uma determinada geometria. Através destes modelos são obtidos os parâmetros que permitem processar os dados, chegando a uma resposta, mais próxima possível, do que seria esperado para o sistema, caso os dados pudessem ser obtidos sem a perfuração.

Uma das características das técnicas de perfilagem é a necessidade da correlação de dados provenientes de diversos perfis durante a análise e interpretação dos dados (Asquith & Gibson, 1982), pois cada perfil fornece apenas informações sobre uma propriedade física das camadas atravessadas pelo poço, o que pode ser ilustrado pelo seguinte exemplo: variações bruscas de resistividade – picos – podem ser provenientes da presença de hidrocarbonetos ou de zonas com porosidades extremamente baixas. Desta forma, serão necessários dados sobre a porosidade e permeabilidade destas zonas para se determinar a origem do pico no perfil. No processo de análise dos resultados, serão considerados dados obtidos nos mesmos poços com outras-ferramentas, a saber: nucleares (Neutrão e densidade), Sônica, Cáliper e Condutividade / Temperatura do fluido contido no poço para ajudar na interpretação, porem, sem uma exibição direta devido aos mesmos serem temas de outros trabalhos em andamento.

As ferramentas de interação elétricas e eletromagnética utilizadas neste estudo fornecem informações sobre a condutividade das rochas que compõem as camadas geológicas atravessadas pelo poço (perfis de indução focada e de eletrodo normal). Uma das principais características destes perfis é a sua capacidade (quando associado a outros dados) de estudar o comportamento elétrico do fluido contido nos poros de uma formação. Estes perfis permitem determinar se o fluido contido em um poro possui comportamento condutor (água + sais) ou dielétrico (hidrocarbonetos). Esta técnica é de extrema importância em estudos sobre a determinação da presença de hidrocarbonetos em reservatório.

Ao final do estudo sobre as bases teóricas de ambas as técnicas, as mesmas foram aplicadas em ambientes de valores de resistividade distintos – dois poços com características geológicas distintas (um poço em uma zona de resistividade muito alta e outro em uma zona de resistividade muito baixa).

No estudo comparativo dos resultados obtidos por cada uma das ferramentas em ambos os poços, foram utilizados dados acessórios de cáliper e gama natural. O cáliper foi utilizado



para se determinar a geometria do poço (raio de separação radial – geométrica cilíndrica - entre a ferramenta e o ponto de medida) permitindo a visualização das zonas de desmoronamento. O perfil de gama natural foi utilizado como calibrador de profundidade, uma vez que todos os equipamentos utilizados o possuem. Desta forma, foi possível observar os efeitos geométricos e petrofísicos nas respostas de cada ferramenta.

As Ferramentas de perfilagem utilizadas neste trabalho são de propriedade do LPP /UFRJ (Laboratório de Perfilagem e Petrofísica Jadir da Conceição da Silva) e foram fabricadas pela *Robertson Geologging Ltd.* Atualmente, o LPP conta com um conjunto de ferramentas de perfilagem, composto por oito sondas, um laboratório móvel e uma estação para tratamento e análise dos dados.

## **1.2 OBJETIVO**

Este trabalho teve por objetivo comparar os resultados de duas técnicas de perfilagem (perfis de resistividade e de condutividade focada) que realizam a medição da resistividade elétrica de formações geológicas utilizando princípios físicos diferentes e com características operacionais que limitam o tipo de poço onde podem ser aplicadas (poço com revestimento não metálico, secos ou com água).

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – são apresentados a introdução e o objetivo deste trabalho e uma introdução sobre perfilagem; Capítulo 2 - apresenta uma discussão sobre o estado da arte na utilização de ferramentas de perfilagem; Capítulo 3 – Materiais e Métodos – são apresentados todas as etapas realizadas durante o trabalho, com um breve resumo sobre as áreas onde as técnicas foram aplicadas; Capítulo 4 – Discussão dos Resultados e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões. No Apêndice I encontram-se um resumo dos fundamentos teóricos necessários para o entendimento do trabalho de perfilagem.

## **CAPÍTULO 2 CONCEITOS DE PETROFÍSICA E PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

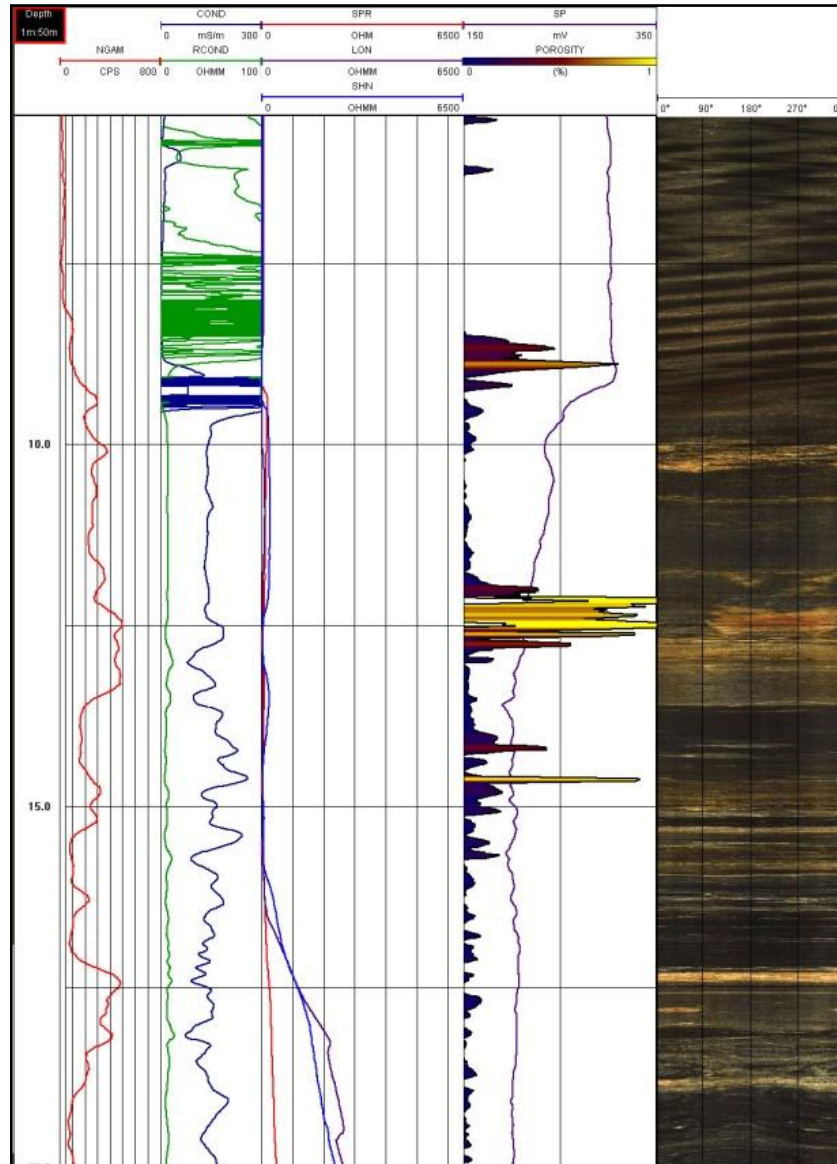
A geofísica é uma área interdisciplinar que visa estudar o nosso planeta e seus componentes formadores, através do estudo das propriedades físicas deste sistema complexo. As rochas como qualquer outro sistema material, podem ser estudadas através de suas propriedades físicas; propriedades estas associadas a sua composição mineralógica, a sua geometria, ao seu conteúdo interno (material alocado dentro dos poros, não fazendo parte da rocha em si), a sua densidade, etc.

A quantificação das propriedades físicas pode ser obtida diretamente através de ensaios em amostras de laboratório, porém, este tipo de análise altera fatores relevantes, como a pressão e a temperatura do material, que não são os mesmos do sistema “*in situ*”. E indiretamente, através de técnicas de superfície (magnetometria, gravimetria, sísmica entre outras) e técnicas de poço (perfil). O objetivo é sempre obter dados com a menor perturbação possível a fim de que reproduzam o meio físico com mais fidelidade.

Uma das técnicas geofísica que busca obter tais informações com a menor perturbação possível é a Perfilagem Geofísica de Poços. Neste processo, ferramentas, capazes de medir de forma indireta as propriedades petrofísicas desejadas, percorrem um poço que atravessa as formações geológicas de interesse.

As ferramentas de perfilagem, ao percorrerem um poço, coletam diversas informações sobre as propriedades das camadas atravessadas pelas mesmas, gerando, assim, um gráfico (Figura 1) que associa o dado com a profundidade pesquisada.

Em geral, os perfis de poço são extremamente precisos nesta correlação, e os seus dados podem ser associados a informações provenientes de testemunhos ou de amostra da calha, possibilitando, assim, uma boa compreensão do sistema estudado.



*Figura 1 – Dados de perfis de poço (UFRJ-1-RJ) obtidos com diversas ferramentas de perfilagem – observam-se os seguintes dados, da esquerda para a direita – coluna 1: profundidade, coluna 2: gama natural, coluna 3: condutividade (azul) e resistividade calculada pela condutividade (verde), coluna 4: resistência pontual (vermelha), resistividade normal curta (azul) e resistividade normal longa (roxo), coluna 5: potencial espontânea (azul) e porosidade calculada através do sônico (em escala de cores) e na última coluna uma imagem da parede do poço.*

Os dados fornecidos pelas ferramentas de perfilagem são processados e interpretados, de forma a fornecer informações sobre a porosidade, a permeabilidade, a condutividade, etc., das camadas analisadas.

Um exemplo da importância deste processamento é a obtenção da resistividade elétrica, onde o dado obtido pela ferramenta depende de vários fatores tais como: diâmetro do poço, da porosidade, da permeabilidade, da condutividade do fluido de perfuração, bem como da matriz e dos fluídos contidos na rocha.

Logo, através deste exemplo, pode ser observada a grande quantidade de parâmetros associados a estas propriedades. Quanto maior for a associação de dados provenientes de diferentes ferramentas de perfilagem (Sônico, Cáliper, Densidade, etc.) mais detalhadas serão as análises feitas sobre o poço.

As técnicas de perfilagem podem ser utilizadas em diversas aplicações, de caráter qualitativo ou quantitativo:

Qualitativamente os perfis podem ser utilizados para a realização de correlações entre poços, identificação de litologias, tipos de fluídos presentes nos poros e fraturas, permeabilidade, avaliação de cimentação de poços revestidos, entre outras.

Quantitativamente, através dos dados fornecidos pelos perfis, podem ser calculadas informações das rochas sobre: a porosidade, a saturação de fluidos, a quantidade de fluidos móveis, a resistividade, a condutividade, a densidade, a velocidade de propagação de ondas mecânicas no meio, a quantidade de materiais radioativos presentes, o percentual volumétrico de argila, entre outros parâmetros.

Vale lembrar sempre que todos estes dados são associados à profundidade, com maior precisão do que dados obtidos por análise de calha ou testemunho.

Fisicamente, as ferramentas de perfilagem possuem formato cilíndrico, se adaptando à geometria do poço e são equipadas com detectores adequados ao tipo de grandeza física que se deseja medir (uma ferramenta pode medir mais de uma grandeza, como, por exemplo, a ferramenta *Electric Log*®, (Figura 2) utilizada neste estudo, que mede gama natural, potencial espontâneo, resistividades (próximo e longe da parede do poço) e resistência da parede do poço. Para cada uma das medidas é gerado um perfil diferente.



*Figura 2 - Ferramenta de Perfilagem (Electric Log – Foto de Ana Gauza, 2009).*

Do ponto de vista da atuação no poço, as ferramentas podem ser ativas ou passivas. Ferramentas ativas são aquelas que estimulam a formação e medem a resposta a este estímulo (como exemplos: os perfis de Eletrodo, Indução, Sônico, Neutrão e Gama). As ferramentas passivas medem somente a resposta natural da formação, sem a utilização de um estímulo (como exemplos: os perfis Gama natural e Potencial Espontâneo).

Atualmente, o Laboratório de Perfilagem e Petrofísica Jadir da Conceição da Silva (LPP-IGEO/UFRJ) possui um total de oito ferramentas de perfilagem, que foram utilizadas no levantamento de dados realizado nos poços UFRJ-1-RJ e ITAB-1-RJ que foram utilizados neste trabalho.

Segue abaixo uma descrição sucinta dos perfis que são obtidos com as ferramentas disponíveis no LPP/UFRJ segundo Girão, 2009:

- **Resistividade Normal Curta / Longa:** São os perfis de eletrodo tradicionais, não focados. Fornecem informações sobre a resistividade aparente

da formação. Através da análise destes dados, é possível obter a resistividade real do meio. São utilizados para correlação de poços, delimitação de limites de camadas e avaliação sobre o tipo de material contido no interior dos poros.

- **Resistência Pontual:** Este perfil nada mais é do que um perfil normal extremamente curto, o qual fornece dados pertinentes apenas à resistência da parede do poço.

- **Potencial Espontâneo:** Este perfil fornece informações sobre a diferença de potencial elétrico gerado entre o poço e a superfície, devido às interações eletroquímicas entre a água de formação, o fluido de perfuração e a formação. Este tipo de interação é característico de regiões onde existe a presença de argila. Logo, pela variação do potencial espontâneo, obtemos dados sobre as regiões permoporosas possibilitando o cálculo da argilosidade das rochas.

- **Gama Natural:** Alguns elementos radioativos encontrados na composição de rochas emitem radiação gama de forma espontânea. Desta forma, o perfil de gama natural permite obter informações sobre o volume de argila e sobre a litologia do sistema.

- **Condutividade:** O perfil de condutividade é obtido através de uma ferramenta de indução focada, fornecendo valores mais próximos do real para a condutividade das camadas atravessadas pelo poço. Sua principal vantagem é a aplicação em sistemas onde os perfis de eletrodo não podem ser utilizados (poços secos ou com lama a base de materiais não condutores).

- **Condutividade do fluido:** Este perfil fornece informações sobre a condutividade e a temperatura do fluido contido no interior do poço (proveniente do processo de perfuração associado a possíveis misturas com fluidos oriundos das formações). Este dado pode ser utilizado na análise dos perfis de eletrodo ( $R_m$  – Resistividade da Lama).

- **Sônico:** Através deste perfil é possível medir o tempo de trânsito de uma onda mecânica através da formação. Esta informação processada permite a determinação da porosidade do sistema, assim como a detecção de zonas fraturadas.

- **Gama (gama-gama):** Este perfil se baseia na contagem de radiação gama emitida pela formação após a excitação da mesma por uma fonte de Césio

137. Com a informação processada é possível obter dados sobre a porosidade da rocha bombardeada.

- **Neutrão:** Este perfil detecta os nêutrons epitermais ou termiais provenientes do processo de interação entre a radiação emitida por uma fonte de Amerício/Berílio e a rocha. Os dados processados permitem obter uma estimativa da porosidade e da litologia do sistema, assim como a presença de hidrocarbonetos leves ou de gás.

No Apêndice I há uma revisão dos conceitos básicos das propriedades elétricas dos materiais geológicos (minerais e rochas) que foram utilizados neste trabalho, porém, deve ser lembrado neste ponto que condutividade e resistividade são grandezas correlacionadas, uma vez que uma é o inverso da outra. Outro fato a ser lembrado é a definição de resistividade e resistência elétrica. A primeira é definida como uma característica do material e de sua estrutura atômica ou molecular, de forma a ser independente do arranjo geométrico macroscópico do mesmo. A segunda grandeza irá depender da resistividade do material que compõe o corpo e do seu arranjo macroscópico. Uma mesma quantidade de material pode produzir resistores com resistividades baixas ou altas de acordo com o arranjo espacial e da direção de propagação da corrente que o atravessa.

## **2.2 O AMBIENTE DO POÇO**

No Apêndice I, são discutidos os fatores que influenciam as propriedades elétricas das rochas. Para o entendimento dos processos de medidas elétricas é necessário o estudo de como o ambiente será afetado pelo processo de perfuração do ponto de vista da resistividade.

Em primeiro lugar, deve ser considerado que o processo de perfuração é um processo invasivo, e por isso irá alterar as propriedades da formação no seu entorno até uma determinada profundidade radial. Esta alteração irá depender das características de permeabilidade das formações atravessadas.

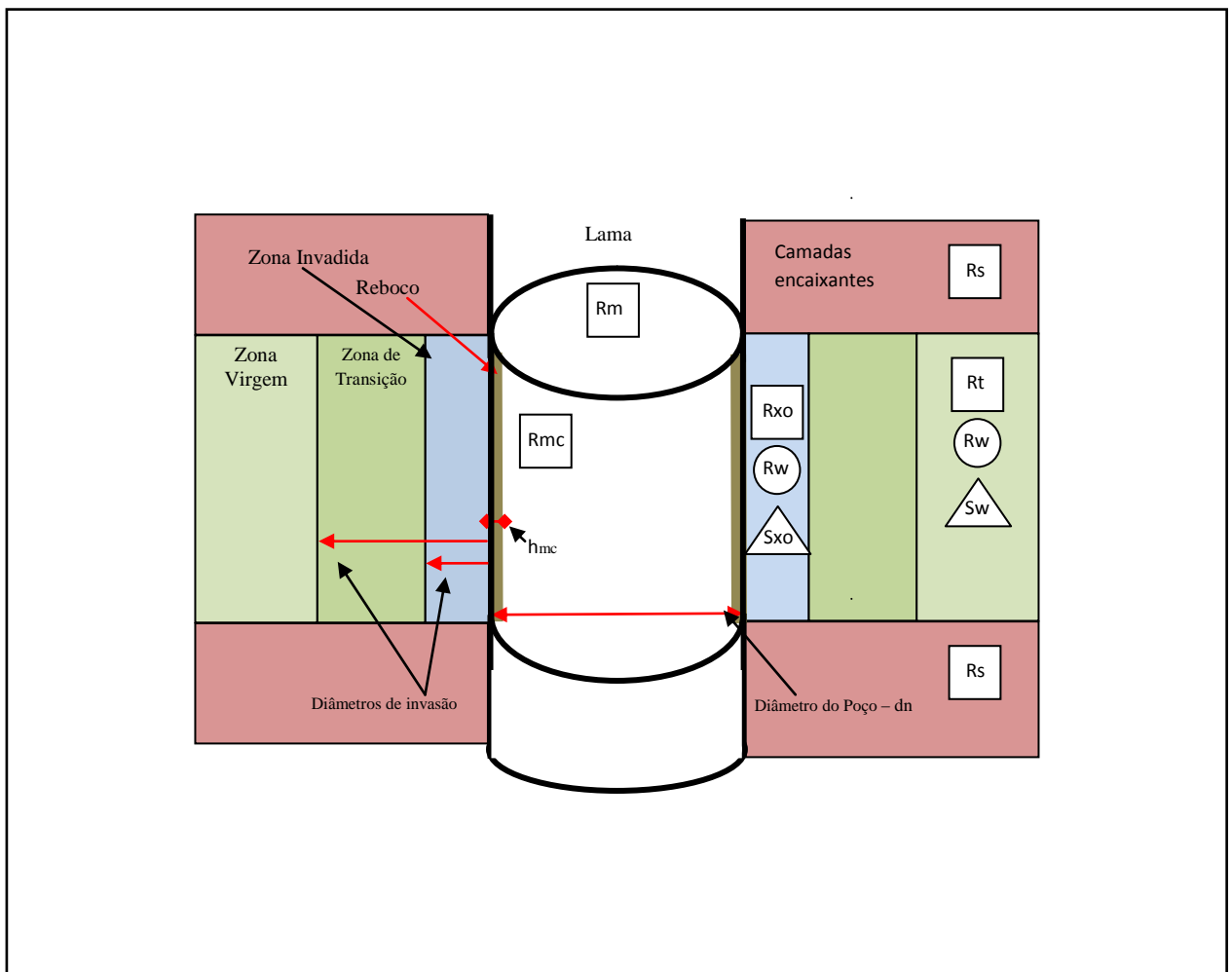
Durante o processo de perfuração, é necessária a utilização de um fluido de perfuração ou lama. Este fluido tem por objetivos resfriar e lubrificar a broca, transportar os resíduos do processo de perfuração para a superfície, e garantir pressão necessária para que os fluidos presentes nas formações não invadam o poço, o que, em regiões com hidrocarbonetos, pode



gerar acidentes de grande escala, uma vez que o gás pode chegar à superfície causando explosões de grande escala (*blow up*). Outro fato a ressaltar sobre o fluido de perfuração é sua natureza química, podendo o mesmo ser de base óleo sintética (não condutora) ou a base de água (condutora).

Para a utilização de perfis de eletrodo tradicionais se torna necessária a utilização de fluido a base de água, ou seja, de natureza química condutora, porém, existem atualmente alguns perfis de resistividade capazes de fazer medidas em poços com lama sintética.

Devido à necessidade de altas pressões, essa lama tende a invadir a formação. Neste processo de invasão, as partículas de maior porte irão se concentrar na parede do poço, formando o reboco, enquanto a parte mais líquida irá se propagar para dentro da formação, de acordo com a permeabilidade da mesma, alterando as configurações originais de distribuição de fluidos, como se pode observar nas zonas mostradas na Figura 3.



**Figura 3 – Representação das zonas do poço, com indicação da resistividade da zona (■), da água na zona (●) e da saturação de água (▲)(Adaptado de Serra, 1984).**

Neste esquema, podem ser observadas as seguintes regiões (Serra, 1984):

- **Reboco (*Mudcake*):** É a zona mais externa, formada pela parte mais sólida do fluido de perfuração, que não consegue invadir a formação. Tem sua espessura representada por  $h_{mc}$  e resistividade  $R_{mc}$ .
- **Zona do Filtrado (*Flushed Zone*):** É a região da formação mais afetada, pois o fluido de perfuração tende a remover todo o fluido móvel desta região. A resistividade desta zona é denotada por  $R_{xo}$ , e será função da resistividade do fluido de perfuração ( $R_{mf}$ ) e da saturação ( $S_{xo}$ ) da água proveniente do fluido de perfuração.
- **Zona de Transição (*Annulus Zone*):** Esta zona separa a região invadida da região não afetada. Este processo de transição pode ser suave, ou seja, não existirá uma descontinuidade marcante nos valores de resistividade entre as zonas. Porém, na hipótese da formação conter hidrocarbonetos e estes hidrocarbonetos possuírem maior mobilidade do que a água de formação há uma variação grande da resistividade, podendo esta zona ser muito mais condutiva do que a zona lavada ou a zona não afetada. Este pico de condutividade ocorre devido ao acúmulo da água proveniente da zona lavada. Esta zona possui uma vida curta, mas pode estar presente durante o processo de perfilagem.
- **Zona não invadida (*Uninvaded Zone*):** Esta é a região de interesse, pois, se obtida a sua resistividade, poderá ser inferido qual o possível tipo de fluido presente. Esta zona se caracteriza por não ter sido afetada pelo processo de perfuração do poço. A sua resistividade é representada por  $R_t$ , e é função da resistividade da água contida ( $R_w$ ) e da sua saturação de água da formação ( $S_w$ ).

Em um procedimento de perfilagem visando obter a resistividade das formações atravessadas pelo poço, os dados coletados irão representar a resistividade aparente do sistema, pois todas as regiões supracitadas podem e irão influenciar nos valores obtidos, tornando necessário um processamento posterior, de forma a se obter o valor da resistividade real da formação ( $R_t$ ) embora, contrastes muito bruscos de resistividade aparente associados a dados de porosidade, podem fornecer uma indicação da natureza do fluido contido nas formações.

### 2.3 PERFIL DE ELETRODO GALVÂNICO (NORMAL CURTO E LONGO)

Historicamente, os perfis de resistividade foram os primeiros. No ano de 1927, em um poço esgotado do campo de Pechelbron, em Alsace, província francesa, foi realizado o primeiro perfil por Henri Doll e os irmãos Schlumberger (Schlumberger, 1989).

A ferramenta, cujos dados estão apresentado na Figura 4, possuía características bem simples, sendo basicamente um tubo de material não condutor, equipado com um eletrodo, e cabos para transmissão de corrente e recuperação dos dados, estes, tomados em intervalos regulares com a sonda parada e anotados a mão, para posterior construção do perfil.

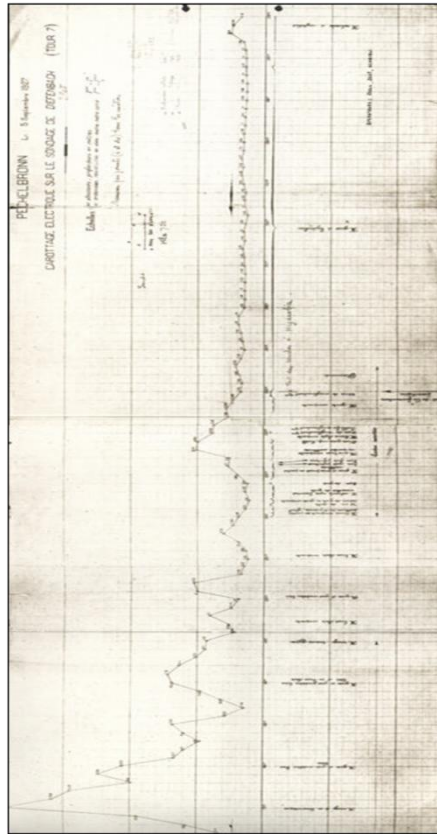
Dois anos após este primeiro teste, as ferramentas de eletrodo foram introduzidas comercialmente e mostraram seu valor para a detecção de camadas com hidrocarbonetos e para a correlação entre poços.

Em 1931, as ferramentas de eletrodo passaram também a fazer medidas do potencial espontâneo, fato que se tornou comum. A ferramenta *Electric Log*® utilizada neste trabalho é capaz de fazer tais medidas.

A ideia básica por trás destes perfis é a de se realizar uma medida da diferença de potencial entre uma região do poço e um referencial, geralmente na superfície, diferença esta gerada pela passagem de uma corrente elétrica na formação. Da apresentação mais básica da Lei de Ohm (GRIFFITHS,1999):

$$V = rI \quad (1)$$

Conclui-se que, conhecidas a tensão (ou diferença de potencial V), a corrente e a geometria do meio por onde a corrente flui, pode-se determinar a resistência do meio.



**Figura 4 – Primeiro Perfil Elétrico realizado pelos irmãos Schlumberger (Fonte: Serra, 1984).**

Neste projeto foi utilizada uma ferramenta comercial de eletrodo, a ferramenta *Electric Log*®, que possui como função principal a medida de resistividade em alcances normais curto e longo. Esta ferramenta é do tipo “não focado”, sendo extremamente simples, possui um eletrodo central, que é a fonte de corrente (A), e dois eletrodos (M) que fazem as leituras, sendo um localizado a 16” (40,64 cm – normal curto) e outro a 64” (162,56 cm – normal longo).

Nestas ferramentas, a corrente  $I$  possui um valor fixo, e a tensão, considerada com simetria esférica, será lida pelos eletrodos. Logo, teoricamente, é possível saber de forma bastante simples a resistência elétrica do meio ( $r$ ) e, dessa forma, calcular a resistividade ou a condutividade da região analisada pela ferramenta.

Esta apresentação da Lei de Ohm (Equação 1) é gerada pela integração da equação A7 (Apêndice I), onde o parâmetro da condutividade é um escalar. Porém, como anteriormente exposto, a condutividade de uma rocha irá depender de fatores associados a sua composição mineralógica e, principalmente, do tipo de fluido em seu interior e do arranjo geométrico dos

poros, o que irá acarretar uma anisotropia do sistema, e a condutividade, antes um escalar, terá uma forma tensorial dada por:

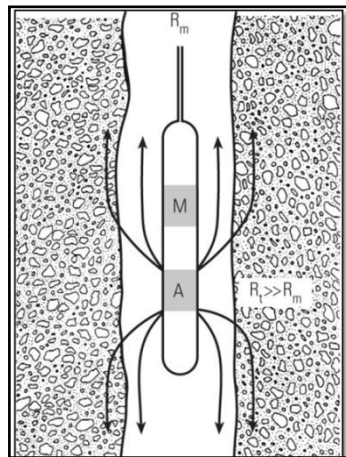
$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \vec{E} \quad (2)$$

Onde “ $\vec{j}$ ” é a densidade corrente,  $\sigma$  (onde são apresentados os valores de cada componente do tensor de acordo com a direção) é o valor da condutividade e “ $\vec{E}$ ” é o vetor campo elétrico.

O que torna o problema de solução mais complexa. Desta forma, através dos perfis de eletrodo, raramente é obtida a resistividade real do sistema, mas sim, o contraste de resistividade entre as camadas de diferentes materiais geológicos atravessados pelo poço, o que permite inferir a natureza do fluido presente nos poros destas camadas.

Devido à simplicidade destas ferramentas, elas possuem certas limitações associadas ao ambiente do poço.

A **primeira limitação** é relacionada às propriedades da lama de perfuração, que deve ser condutora, uma vez que a mesma será o meio pelo qual irá ocorrer o contato elétrico entre ferramenta / formação, porém, caso possua uma resistividade ( $R_m$ ) muito menor do que a do fluido contido nas formações ( $R_t$ ), a corrente tenderá a seguir pela lama, ao invés de penetrar na formação, de forma a dar origem a uma resistividade aparente que se afastará muito do valor que deveria ser observado (Figura 5).

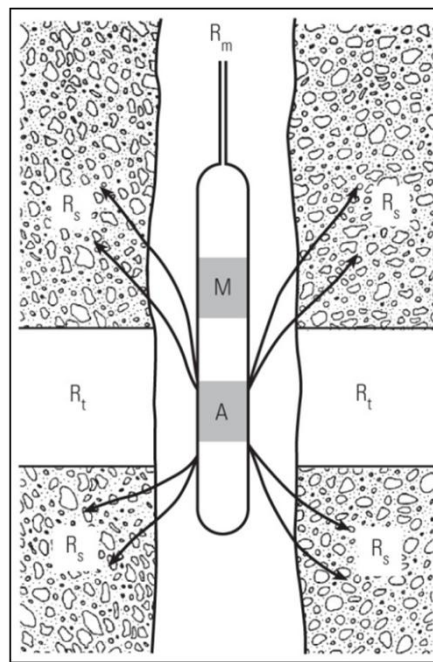


**Figura 5 – Caminho realizado pela corrente caso  $R_t \gg R_m$ . Na figura é mostrado somente um dos eletrodos (Ellis & Singer, 2008).**

A **segunda limitação** é associada à relação das resistividades da camada de interesse e das camadas encaixantes (camada acima e abaixo da zona de interesse) no caso de camadas muito delgadas em relação a ferramenta ou próximo as fronteiras entre as camadas..

No caso das camadas encaixantes possuírem uma resistividade ( $R_s$ ) muito menor do que a da camada de interesse ( $R_t$ ), a corrente tenderá a percorrer estas camadas, e o valor gerado referir-se-á a elas e não à zona de interesse (Figura 6).

Outro fator a ser observado é a resolução vertical, pois camadas muito finas, com espessura inferior ao espaçamento entre os eletrodos, irão gerar valores que serão a composição da resistividade da camada de interesse com forte influência das camadas encaixantes.



*Figura 6 – Caminho percorrido pela corrente no caso de camada fina e mais resistiva do que as encaixantes (Ellis & Singer, 2008).*

É possível estimar a influência do tamanho do poço nos valores de resistividade obtidos (Ellis & Singer, 2008).

Para realizar este procedimento, considera-se que o potencial gerado pela introdução da corrente elétrica no meio seja esférico, e que o poço seja considerado como uma pequena fuga de corrente. O modelo do conjunto poço-ferramenta será um circuito resistivo em paralelo

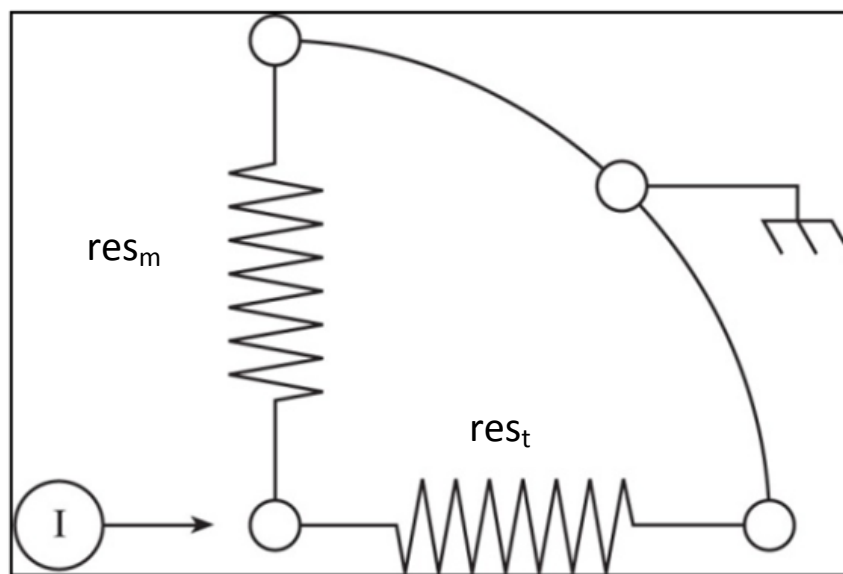
(Figura 7), composto por uma resistência equivalente  $res_t$ , que representará a formação de resistividade  $R_t$ , e uma resistência  $res_m$ , que será a resistência efetiva do poço na região compreendida entre o eletrodo de leitura e o eletrodo de injeção de corrente.

O potencial esférico a uma distância “ $r$ ” pode ser escrito em termos de  $R_t$ .

$$V = \frac{IR_t}{4\pi r} \quad (3)$$

Desta forma, a resistência equivalente  $res_t$  será dada por :

$$res_t = \frac{R_t}{4\pi r} \quad (4)$$



*Figura 7 – Modelo de circuito elétrico para estimativa da influencia da geometria do poço nos perfis normais(Ellis & Singer, 2008).*

Para a obtenção do valor de  $res_m$ , deve-se considerar as geometrias da ferramenta e do poço.

Em primeiro lugar, o raio “ $r$ ” da equipotencial será igual à separação entre o eletrodo fonte e o eletrodo de medida, o que fornecerá o comprimento do “resistor” que os separa. A área deste resistor deverá ser a área ocupada pelo fluido na região do poço entre ambos os eletrodos (considerando somente o espaço entra a sonda e a parede do poço). Considerando

$r_{bh}$  como o raio do poço, e “ $r_s$ ” como o raio da sonda, chega-se ao resultado encontrado para  $res_m$ :

$$res_m = R_m \frac{r}{\pi(r_{bh}^2 - r_s^2)} \quad (5)$$

Calculando a resistência equivalente para o circuito em paralelo, é obtido o seguinte resultado (onde  $R_{xx}$  pode ser a resistividade para 16” ou 64”):

$$\frac{1}{R_{xx}} = \frac{1}{4\pi r} \left[ \frac{1}{res_t} + \frac{1}{res_m} \right] \quad (6)$$

Substituindo  $res_t$  e  $res_m$  pelos valores calculados, encontra-se a seguinte expressão:

$$\frac{1}{R_{xx}} = \frac{1}{4\pi r} \left[ \frac{4\pi r}{R_t} + \frac{\pi(r_{bh}^2 - r_s^2)}{rR_m} \right] \quad (7)$$

Reorganizando a Equação 7 chega-se ao seguinte resultado :

$$\frac{1}{R_{xx}} = \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_m} \left[ \frac{1}{4} \frac{\pi(r_{bh}^2 - r_s^2)}{r^2} \right] = \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_m^*} \quad (8)$$

Obtendo-se a relação entre a resistividade obtida pelo perfil ( $R_{xx}$ ) e a resistividade da lama de perfuração ( $R_m$ ):

$$\frac{R_{xx}}{R_m} = \frac{R_t}{R_m} \frac{R_m^*}{R_t + R_m^*} \quad (9)$$

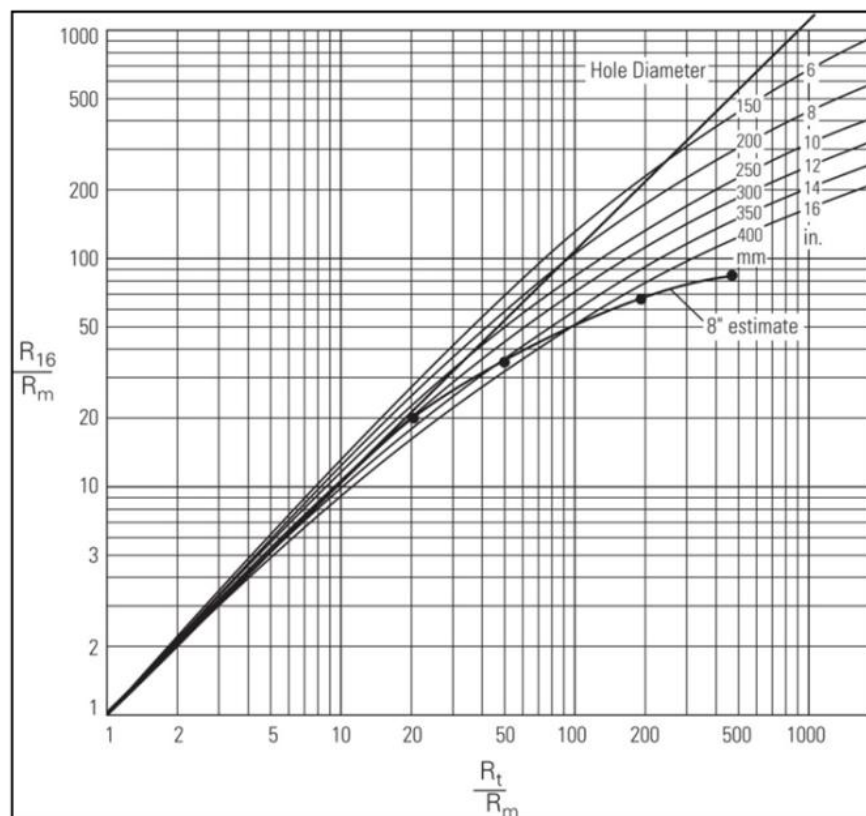
A Equação 9 fornece uma primeira estimativa dos efeitos do poço nos resultados obtidos pela sonda.

Este resultado foi demonstrado em (Ellis & Singer, 2008) para o caso de uma sonda normal curta (16”) de 4 polegadas de diâmetro e um poço de raio 8 polegadas. A análise



gráfica (Figura 8) demonstra que este modelo se torna mais ineficiente à medida que aumenta o contraste entre as resistividades da formação e da lama.

Para um valor mais aprimorado da correção é necessário resolver o Laplaciano para o potencial ( $\nabla^2 V$ ). Na Figura 8 observa-se o exemplo citado em uma carta de correção da empresa Schlumberger (Ellis & Singer, 2008).



*Figura 8 – Carta de correção (Schlumberger) para perfil de eletrodo normal curto, com exemplo de falha na correção do modelo de circuito em paralelo. Extraído de Ellis & Singer, 2008.*

## 2.4 O PERFIL DE INDUÇÃO FOCADO

Durante o processo de perfuração de um poço, nem sempre é viável a utilização de lamas a base de água. Desta forma, os perfis de eletrodo galvânico se tornam ineficazes para a obtenção de dados sobre as propriedades elétricas das formações atravessadas pelo poço.

Como a resistividade é fator importante para a diferenciação entre reservas de água ou hidrocarbonetos, fez-se necessário o desenvolvimento de outras técnicas que não fossem afetadas pela ausência de um fluido condutor.

Sabe-se que campos elétricos, magnéticos ou eletromagnéticos não necessitam de meios materiais para se propagarem, e são capazes de afetar as configurações eletrônicas dos meios por onde transitam. Outro fato conhecido, expresso pelas Equações A3 e A4 (Apêndice I), é que variações temporais do campo elétrico ou magnético são capazes de gerar variações dos campos magnético ou elétrico no espaço.

Estes conceitos são à base do princípio de funcionamento das ferramentas de indução.

Os campos magnéticos diferem dos campos elétricos por não possuírem uma unidade de carga fundamental (monopolo magnético), sendo gerados por um fluxo de cargas (corrente elétrica) em um corpo condutor. Alguns resultados importantes no desenvolvimento do modelo teórico das ferramentas de indução são demonstrados abaixo, permitindo uma melhor compreensão dos mecanismos operacionais relacionados a estes perfis:

Inicialmente, pode-se calcular o campo magnético gerado por uma distribuição de correntes através da Lei de Ampère abaixo (GRIFFITHS,1999):

$$\int_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{I}{\epsilon_0 c^2} \quad (10)$$

Esta expressão revela que o campo magnético que passa por um caminho fechado “ $\Gamma$ ” é proporcional à corrente total que passa pela área delimitada por este caminho.

Um exemplo clássico de cálculo do módulo do campo magnético seria o campo gerado por uma espira de raio “ $r$ ”, dado em módulo por:

$$B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{2I}{r} \quad (11)$$

A Lei de Ampère pode ser generalizada para um sistema qualquer, o que leva à Lei de Biot-Savart:

$$\vec{B} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \int \frac{Id\hat{r} \times d\hat{l}}{r^2} \quad (12)$$

Através da Lei de Biot-Savart (Equação 12) é obtido o campo gerado por uma espira na direção perpendicular ao seu plano (Figura 9), o que levará ao seguinte resultado:

$$dB \propto \frac{I_0 a d\phi}{a^2 + z^2} \quad (13)$$

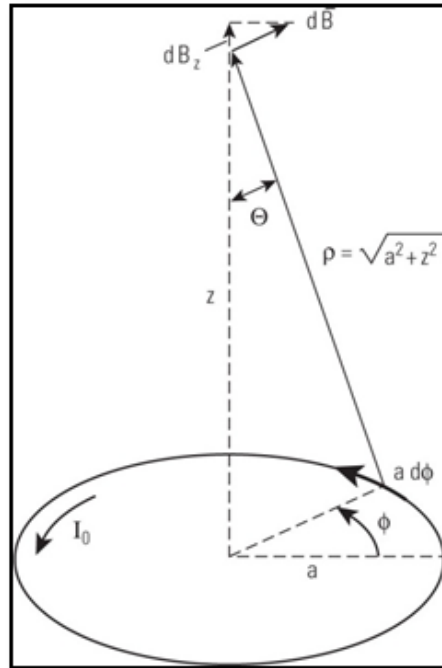


Figura 9 – Geometria utilizada para o cálculo do campo magnético produzido por uma espira. (Ellis & Singer, 2008).

A projeção do campo na direção z será dada por:

$$dB_z = dB \sin \Theta = dB \frac{a}{\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (14)$$

Integrando em todo o loop, encontra-se o campo total na direção z:

$$B_z = \int_0^{2\pi} \frac{I_0 a^2}{(a^2 + z^2)} d\phi = \frac{2\pi I_0 a^2}{\rho^3} \quad (15)$$

No eletromagnetismo clássico (Griffiths, 1999) o campo elétrico pode ser obtido através do potencial elétrico, que é uma função escalar, sendo, geralmente, de mais fácil tratamento do que cálculos envolvendo funções vetoriais.

Isto é feito através da relação:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (16)$$

Para o campo magnético, foi desenvolvido o chamado potencial vetor  $\vec{A}$ :

$$\vec{A} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \int \frac{\vec{j} dV}{r} \quad (17)$$

Através do potencial vetor, calculasse o campo magnético gerado por uma distribuição de correntes em um volume:

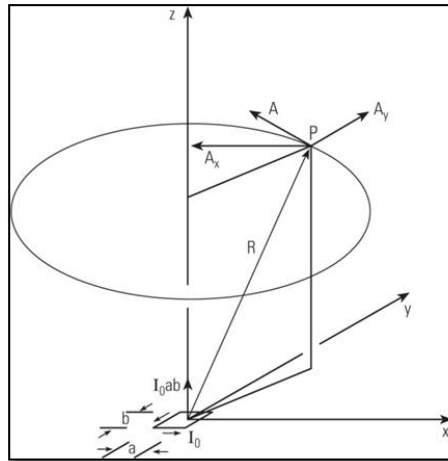
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (18)$$

Sendo a componente “z” dada por:

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (19)$$

Através deste resultado, pode-se obter o campo gerado pelo *loop* da Figura 10, e usando uma analogia com o potencial elétrico gerado por um dipolo:

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r} \quad (20)$$



**Figura 10 – Geometria utilizada para o cálculo do potencial vetor. (Ellis & Singer, 2008)**

Onde o momento de dipolo “ $p$ ” é o produto entre a carga pela separação entre os polos, considerando que, no caso do *loop* de corrente, a carga será dada pela corrente, e associando a Equação 20 com a componente do potencial vetor na direção z (Equação 19), chegasse aos seguintes resultados:

$$A_x = -\frac{I_0 ab}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{y}{R^3} \quad (21)$$

$$A_y = \frac{I_0 ab}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{x}{R^3} \quad (22)$$

Logo, a contribuição geométrica do campo na direção z em um ponto R qualquer do espaço será dada por:

$$B_z \propto \frac{1}{R^3} - \frac{3z^2}{R^5} \quad (23)$$

Tais resultados serão aplicados no modelo discutido a seguir.

### 2.4.1 Sonda de duas bobinas

O modelo da ferramenta de indução mais simples é a composta por duas bobinas paralelas.

Tanto neste modelo quanto em outros mais complexos, a ideia básica de funcionamento é associada à propagação do campo eletromagnético no espaço, da seguinte forma: A ferramenta irá gerar um campo magnético, denominado primário – através do fluxo de uma corrente alternada de frequência conhecida através de uma espira com geometria também conhecida. Este campo irá se propagar através da formação, e irá gerar como descrito mais a frente, um novo campo magnético, denominada de campo secundário, o qual irá se propagar por todo espaço e induzir uma corrente em outra espira, localizada na ferramenta, e denominada de bobina receptora. Através da leitura do valor de corrente induzido, pode ser obtido um valor aproximado para a condutividade do meio. Este processo é explicado com a utilização do modelo da sonda de duas bobinas, podendo ser estendido a ferramentas com geometrias mais complexas.

No modelo ora analisado, considerasse duas bobinas separadas. Uma fará o papel de transmissora, e a outra de receptora (Figura 11).

A bobina transmissora será percorrida por uma corrente elétrica alternada de frequência conhecida e expressa matematicamente por:

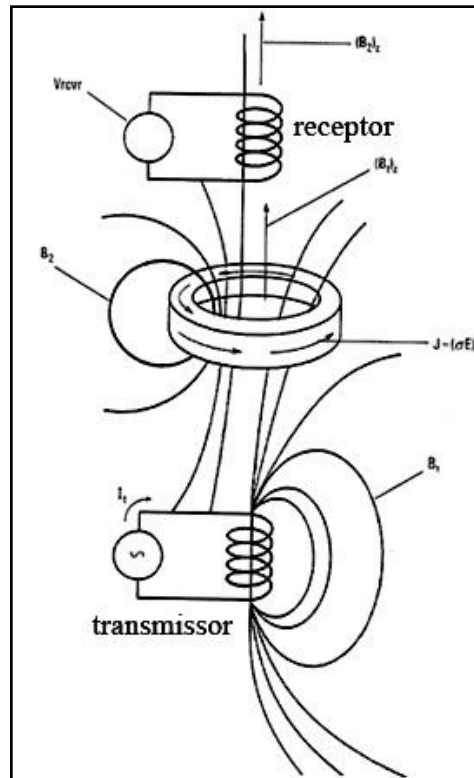
$$I_t = I_0 e^{-i\omega t} \quad (24)$$

Desta forma tem-se um campo magnético (somente a componente z – eixo das bobinas) com uma dependência temporal dada por:

$$(B_t)_z \propto I_0 e^{-i\omega t} \quad (25)$$

Nesta etapa a formação será modelada como uma espira concêntrica às duas bobinas da ferramenta (Figura 11).

A condutividade desta espira irá depender das propriedades da rocha que a compõe (permeabilidade, porosidade, tipo de fluido, composição mineralógica da matriz, etc.) como anteriormente exposto.



*Figura 11 – Modelo de Ferramenta de Indução de duas bobinas. (Ellis & Singer, 2008).*

A Equação A4 (Apêndice I) mostra que a variação temporal do campo magnético irá gerar um campo elétrico no espaço. Logo, a espira (formação geológica analisada) sentirá a presença de um campo elétrico com a seguinte dependência temporal (em módulo):

$$E \propto -\frac{\partial(B_t)_z}{\partial t} \propto i\omega I_0 e^{-i\omega t} \quad (26)$$

A Lei de Ohm (Equação 2) diz que a densidade de corrente elétrica é linearmente proporcional ao campo, sendo a constante de proporcionalidade a condutividade do meio, então, a formação será percorrida por uma densidade de corrente dada por:

$$J \propto \sigma E \propto i\sigma\omega I_0 e^{-i\omega t} \quad (27)$$

A Equação 25 mostra que este fluxo de corrente no meio irá gerar um campo magnético, denominado de campo secundário ( $\vec{B}_2$ ), que irá se propagar pelo meio, tendo sua componente na direção z dada por:

$$\left(\vec{B}_2\right)_z \propto i\sigma\omega I_0 e^{-i\omega t} \quad (28)$$

A componente “z” do campo magnético gerado pela formação induzirá uma corrente elétrica na bobina receptora, que possui resistência elétrica conhecida. Desta forma a tensão gerada será dada por:

$$V_{rcvr} \propto -\sigma\omega^2 I_0 e^{-i\omega t} \quad (29)$$

Nota-se que a tensão medida na bobina receptora será diretamente proporcional à condutividade do meio. Como todos os outros valores são conhecidos (frequência e amplitude da corrente na bobina transmissora) a condutividade do sistema será dada por:

$$\sigma \propto -\frac{1}{\omega^2 I_0 e^{-i\omega t}} V_{rcvr} \quad (30)$$

Devido à ausência de controle da propagação do campo magnético, a bobina receptora será atravessada pelo campo primário proveniente da bobina transmissora e pelo campo secundário oriundo da formação, porém, devido a uma diferença de fase entre os sinais, é possível o processamento e correção dos dados de forma a se obter o resultado esperado.

Este modelo considera somente uma espira, porém, deve-se levar em conta que a formação será representada pela integral na direção radial de infinitas espiras assim como na direção z.

Desta forma, deve-se obter e avaliar o “fator geométrico” do sistema, o qual pode ser mais bem compreendido através da Figura 12.

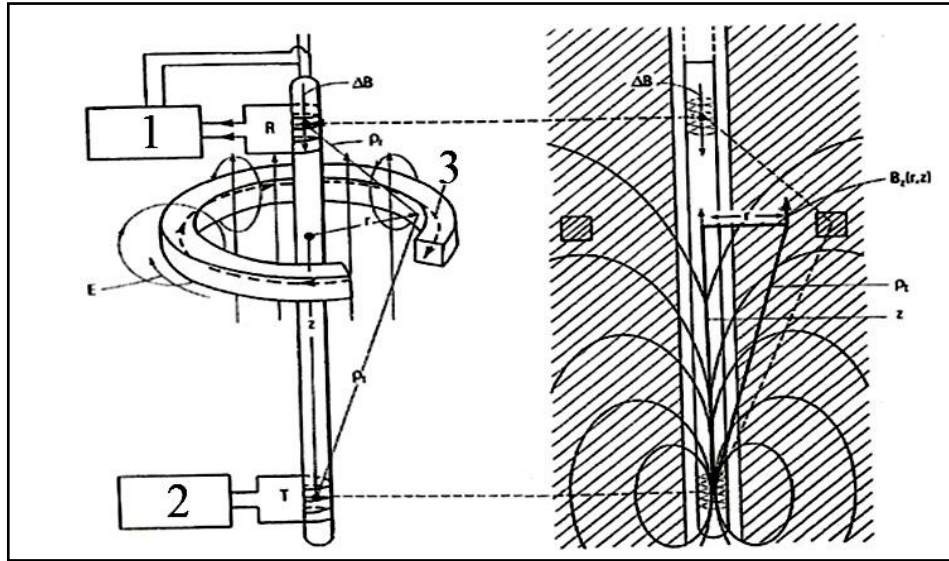


Figura 12 – Geometria para determinação do fator geométrico para a ferramenta de indução de duas bobinas onde 1 é o amplificador, 2 o oscilador e 3 a corrente  $J$ , gerada na formação. (Ellis & Singer, 2008).

Para a obtenção do fator geométrico, deve-se considerar o caso estático para o campo magnético. Neste modelo,  $\rho_t$  será o vetor que liga a fonte do campo primário à formação (espira de raio  $r$ ), e  $\rho_r$  o vetor que liga a formação à bobina receptora.

A bobina transmissora pode ser tratada como um dipolo magnético, orientado na direção  $z$ . Se esta bobina possuir um número de espiras  $n_1$  e uma área  $A_1$ , seu momento de dipolo será dado por  $n_1 A_1 I_0$ .

Utilizando o resultado obtido na Equação 23, o campo em um ponto de coordenadas  $(\rho_t, z)$  será dado por:

$$(B_z)_t \propto n_1 A_1 I_0 e^{-i\omega t} \left( \frac{1}{\rho^3} - \frac{3z^2}{\rho^5} \right) \quad (31)$$

Como o objetivo é determinar o peso da geometria do sistema, este resultado será aplicado na forma integral da Equação A3 (Apêndice I), levando ao seguinte resultado:

$$E \propto \frac{r^2}{\rho_t^3} \quad (32)$$

E conseqüentemente, o potencial gerado na bobina receptora será dado:



$$V_{rcvr} \propto \frac{\sigma r}{\rho_t^3} \frac{r^2}{\rho_r^3} \quad (33)$$

O resultado acima leva à seguinte expressão:

$$V_{rcvr} \propto g(r, z) \propto \frac{L}{2} \frac{r}{\rho_t^3} \frac{r^2}{\rho_r^3} \quad (34)$$

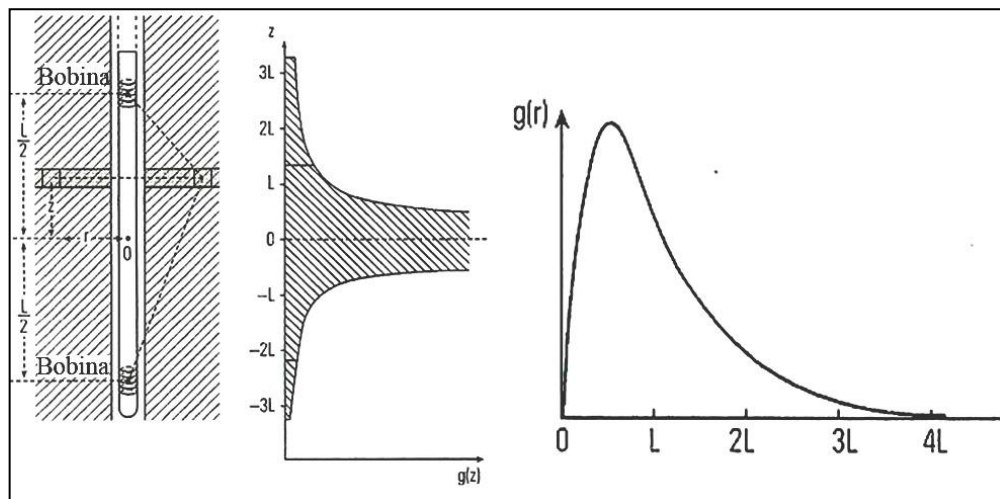
Onde  $g(r, z)$  é o fator geométrico diferencial ou fator geométrico de Doll. Este termo informa a contribuição individual de cada espira de formação de coordenadas  $(r, z)$ . Nesta equação  $L/2$  (onde  $L$  é a separação entre as bobinas da ferramenta) é um termo de normalização, caso este resultado fosse integrado sobre todos os  $r$ 's e  $z$ 's possíveis.

A componente radial ( $g(r)$ ) e vertical ( $g(z)$ ) do fator geométrico são obtidas por integração simples:

$$g(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(r, z) dz \quad (35)$$

$$g(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(r, z) dr \quad (36)$$

O fator geométrico radial fornece a contribuição de cada casca cilíndrica concêntrica ao eixo da ferramenta e o fator geométrico vertical a contribuição de cada camada vertical da formação (Figura 13).



**Figura 13 – Modelo geométrico e gráficos de peso dos fatores geométricos vertical e radial (sem considerar o skin effect) (Ellis & Singer, 2008).**

Uma estimativa do efeito das camadas encaixantes na resposta da ferramenta é obtida através da integração das expressões para  $g(r)$  e  $g(z)$ , o que leva aos chamados fatores geométricos integrais vertical  $G_s$  (Figura 14) e radial  $G_r$  (Figura 15) representados abaixo.

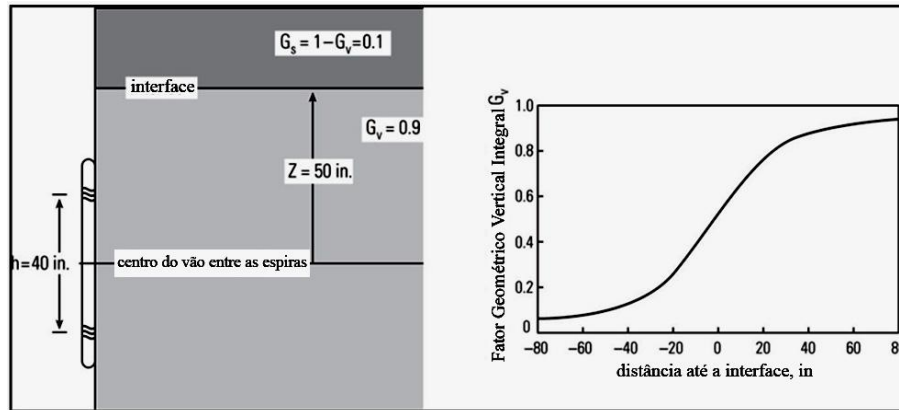


Figura 14 – Fator Geométrico Integral Vertical (Ellis & Singer, 2008).

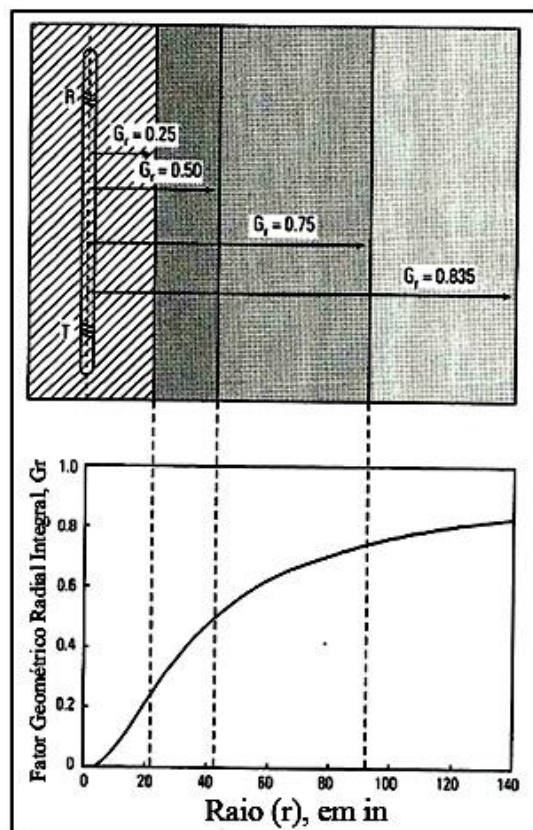


Figura 15 – Fator Geométrico Integral Radial (Ellis & Singer, 2008).

### 2.4.2 Sonda de duas bobinas focadas

Através da observação dos resultados acima, é possível perceber a grande influência da geometria na resposta obtida (condutividade associada a profundidade). Desta forma, quanto menor a influência das camadas radiais curtas e das camadas verticais sobrepostas e suprapostas, mais próximo da realidade do sistema será a condutividade fornecida pela ferramenta.

Para minimizar estes efeitos, foram desenvolvidas as ferramentas focadas, onde conjuntos de novas bobinas são adicionados de forma a minimizar os campos secundários provenientes de regiões fora da zona de interesse.

Para a compreensão do processo de focalização será estudado o modelo mais simples, que é a ferramenta de duas bobinas focada.

O método de focalização mais simples consiste em adicionar uma nova bobina receptora, que deverá ficar um pouco mais próxima da transmissora do que a receptora principal. Com o estudo correto das propriedades desta bobina (localização, número de voltas, etc) é possível obter um sinal que possua forte influência das regiões mais próximas à parede do poço (Figura 16). Desta forma, subtraindo o sinal da bobina de foco (segunda bobina) da receptora, parte do sinal oriundo das regiões radiais mais próximas ao poço (zona invadida) será eliminado.

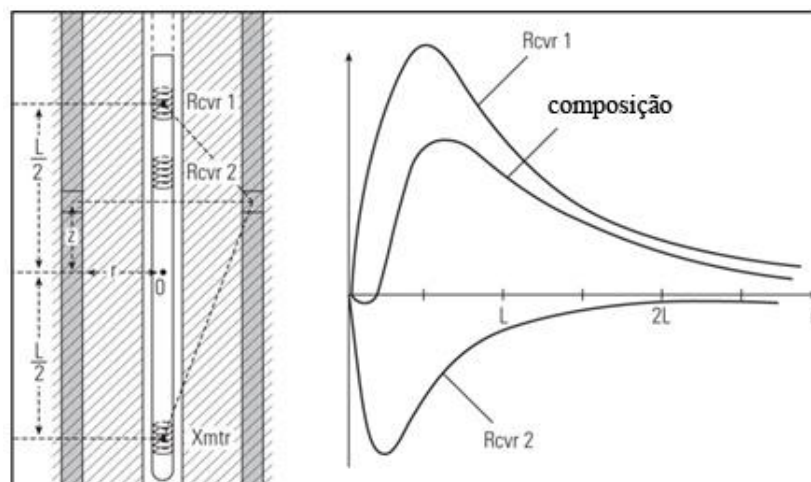


Figura 16 – Ferramenta de duas bobinas focada, com gráfico da soma dos sinais dos receptores (Schön,1998).

Um procedimento semelhante é realizado para se diminuir a influencia dos sinais provenientes de zonas abaixo e acima da zona de interesse.

Atualmente são utilizadas ferramentas do tipo “multi espiras”, planejadas de forma a eliminar o máximo de interferências na busca pela condutividade real da formação. A ferramenta *Slim Induction Tool*®, utilizada nesta pesquisa é desta família.

### 2.4.3 Skin effect

Campos eletromagnéticos em propagação são descritos por uma equação de onda proveniente da resolução das Equações de Maxwell, sendo, para o vácuo (Griffiths,1999) descritas pelas equações:

$$\vec{\tilde{E}}(\vec{r}, t) = \tilde{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \hat{n} \quad (37)$$

$$\vec{\tilde{B}}(\vec{r}, t) = \frac{1}{c} \tilde{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} (\hat{k} \times \hat{n}) \quad (38)$$

Onde  $\vec{\tilde{E}}(\vec{r}, t)$  e  $\vec{\tilde{B}}(\vec{r}, t)$  são os campos elétricos e magnéticos em suas formas complexas,  $\tilde{E}_0$  e  $\frac{1}{c} \tilde{E}_0$  as amplitudes complexas do campo elétrico e do campo magnético, sendo “c” a velocidade da luz no vácuo (nota-se a dependência entre os dois campos e o quanto a amplitude do campo magnético é menor do que a do campo elétrico),  $\vec{k}$  é o vetor de onda (informa a direção de propagação do campo eletromagnético, que por ser uma onda plana, é perpendicular ao plano formado pelos campos elétrico e magnético) e  $\hat{n}$  é a direção do campo elétrico.

Considerando agora a solução para meios materiais, tendo em mente um meio condutor, e utilizando a equação de continuidade de cargas (Equação A9 – Apêndice I) associada à definição de densidade de corrente (Equação A7 - Apêndice I), a função de onda obtida (para o caso do campo elétrico possuir orientação  $x$  e o magnético  $y$ ) será:

$$\vec{\tilde{E}}(\vec{r}, t) = \tilde{E}_0 e^{-\kappa z} e^{i(kz - \omega t)} \hat{x} \quad (39)$$

$$\vec{\tilde{B}}(\vec{r}, t) = \frac{1}{c} \tilde{E}_0 e^{-\kappa z} e^{i(kz - \omega t)} \hat{y} \quad (40)$$

Onde surge o termo  $e^{-\kappa z}$ . Matematicamente, este termo mostra um decaimento exponencial da amplitude do campo eletromagnético conforme a onda se propaga na direção “z” dentro do meio material. Quanto maior o valor de “ $\kappa$ ”, mais rapidamente a amplitude da onda irá diminuir, chegando ao ponto de amplitude nula (processo de dispersão de ondas eletromagnéticas).

O fator de atenuação “ $\kappa$ ” é função da condutividade do material:

$$\kappa \equiv \omega \sqrt{\frac{\epsilon \mu_0}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\epsilon \mu_0} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

Onde “ $\omega$ ” é a frequência de oscilação do campo, “ $\epsilon$ ” é a permissividade dielétrica do meio e “ $\sigma$ ” é a condutividade do material.

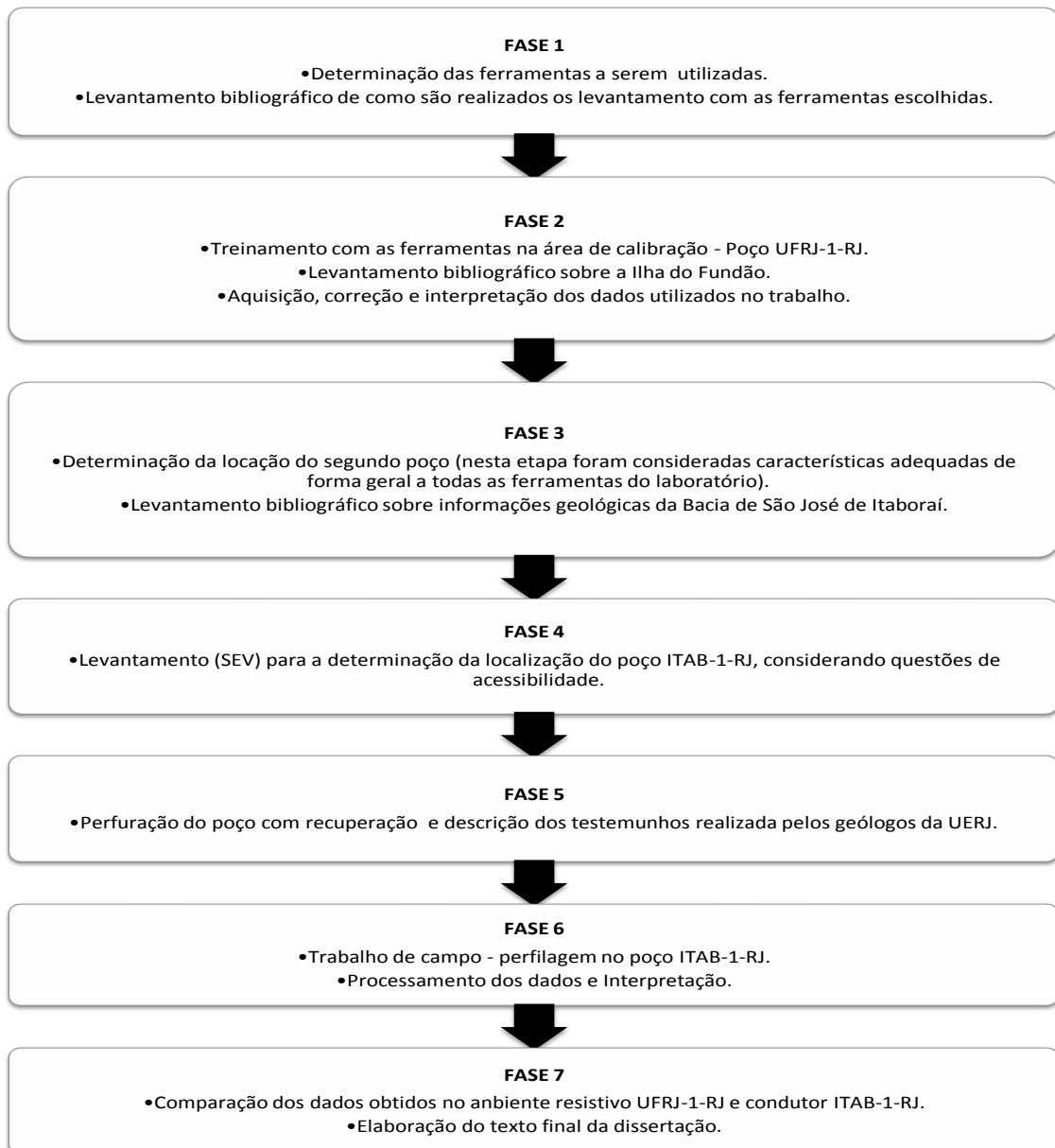
No caso do material ser um isolante perfeito, o termo entre colchetes é nulo e o fator de atenuação vai à zero. No caso de um condutor ideal, este termo vai a infinito, de forma a termos uma atenuação instantânea da amplitude do campo.

Este fundamento é de extrema importância para as ferramentas de indução, pois irá influenciar diretamente na profundidade de investigação (por exemplo, uma formação onde a matriz possua uma proporção elevada de elementos condutores, o campo irá se dissipar rapidamente) por esse motivo, essa técnica não é eficiente em poços com revestimentos metálicos (bons condutores).

## CAPÍTULO 3 CONTEXTO GEOLÓGICO E MATERIAL DE ESTUDO

### 3.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO

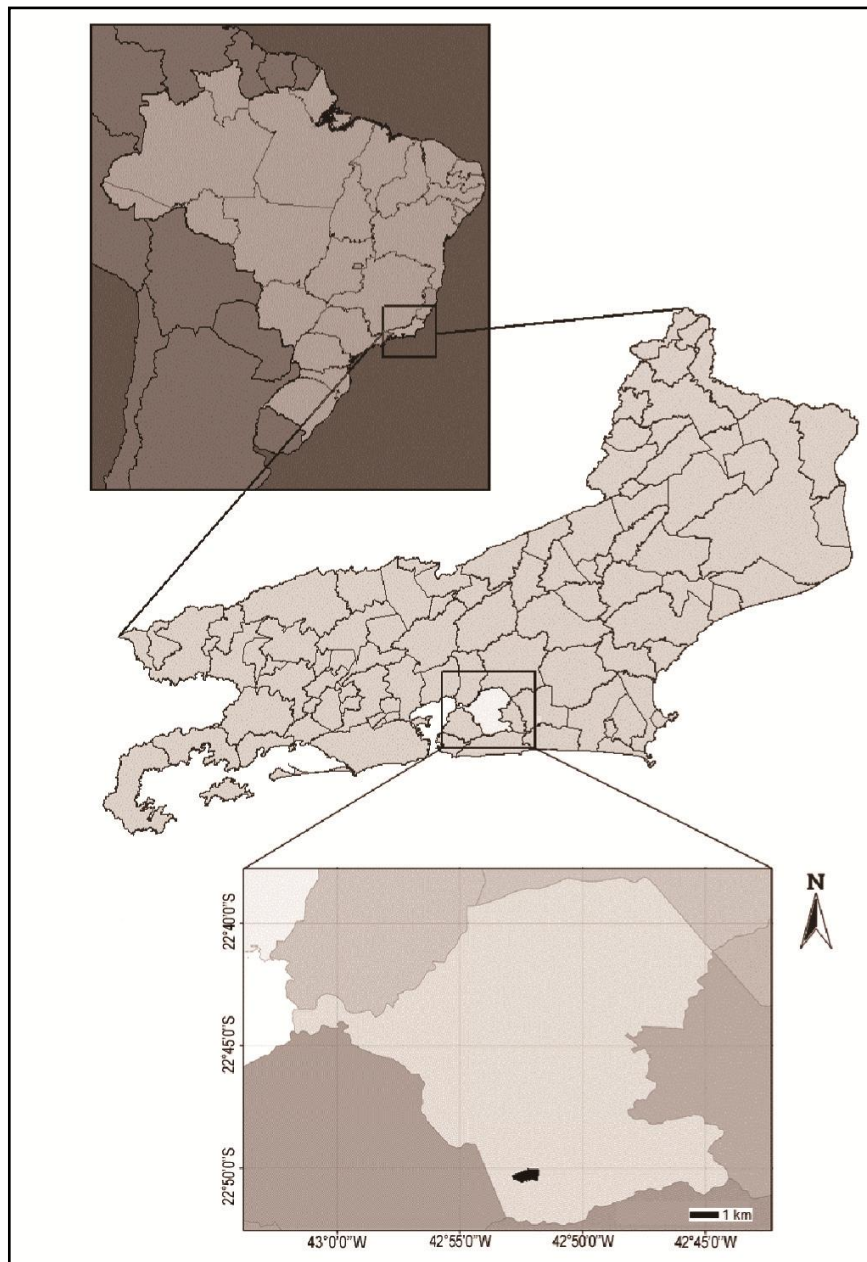
O desenvolvimento deste trabalho pode ser representado pelo fluxograma apresentado abaixo:



*Figura 17 – Fluxograma do trabalho.*

### 3.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA BACIA DE SÃO JOSÉ DE ITABORAÍ

O poço ITAB-1-RJ foi perfurado na Bacia de São José de Itaboraí que é considerada uma das menores bacias sedimentares do Brasil, de forma aproximadamente elíptica com dimensões máximas de 1.400 m x 500 m e orientação do eixo principal ENE. Está localizada no Estado do Rio de Janeiro, no Município de Itaboraí, e dista da cidade do Rio de Janeiro pela BR101 cerca de 60 km (Figura 18). Os sedimentos depositados possuem uma espessura máxima de 125 metros (Brito, 1989).



*Figura 18 – Mapa de localização da Bacia de São José de Itaboraí, extraído de BERGQVIST, ALMEIDA & ARAÚJO, 2011.*

Apesar de suas pequenas dimensões, esta bacia sempre apresentou grande importância científica e econômica. Ela foi descoberta em 1928, pelo engenheiro Carlos Euler, que analisou um material (suposto caulim) encontrado na Fazenda São José pelo seu proprietário na época. A bacia começou então a ser explorada pela Companhia Nacional de Cimento Portland Mauá, no período de 1933 a 1984 (Figura 19).

Uma das características desta bacia era a grande quantidade de calcário presente. Análises posteriores mostraram que este calcário era adequado para a produção de cimento do tipo Portland, o que deu início ao processo de exploração comercial pela empresa Companhia Nacional de Cimento Portland Mauá, no período de 1933 a 1984 (BERGQVIST *et al.*, 2008).

Dois exemplos da grande quantidade de calcário presente na bacia foram a produção do cimento utilizado na construção da Ponte Presidente Costa e Silva (ponte Rio Niterói) e do Estádio Mario Filho (Maracanã). Embora possa ser citada a importância econômica desta bacia para o Estado do Rio de Janeiro, o seu valor não se encontra apenas neste aspecto, mas sim na grande quantidade de material fóssil encontrado durante a sua exploração. Este material paleontológico possuía grande riqueza em número de espécies, quantidade e qualidade, principalmente fósseis de mamíferos, recebendo então a bacia a denominação de “Berço dos mamíferos no Brasil”. Devido a isto a área foi transformada em um Parque Paleontológico protegido por lei (BERGQVIST, MOREIRA & PINTO, 2006).

O processo de exploração do calcário retirou a maior parte do material geológico da bacia, sendo os estudos atuais baseados em dados e amostras antigas. A perfuração de um poço estratigráfico, realizado para este estudo, na borda ainda preservada, permitiu a aquisição de novos dados, os quais poderão complementar as informações já existentes sobre este importante sítio paleontológico brasileiro.





*Figura 19 – Bacia de São José de Itaboraí no ano de 1957, durante o período de exploração – (BERGQVIST et al., 2008).*

#### Segundo FRANCISCO (1989), a estratigrafia da Bacia de São José

“...embora aparentemente bastante simples, na verdade é muito complexa quando se desce as particularidades, em razão dos diversos eventos locais e regionais que a afetaram ao longo de sua história geológica. Esta, aliais, está inserida em um contexto regional mais amplo, que é a borda leste da América do Sul, a qual por sua vez é integrante da Placa Tectônica Sul Americana”.

“A história da Bacia de São José remonta aos primórdios da separação das placas tectônicas africana e sul-americana que se deu no final do Jurássico e se intensificou no Cretáceo surgindo em consequência o Oceano Atlântico. O tectonismo decorrente gerou inúmeras bacias, inclusive a do tipo rift do vale do Paraíba do Sul e a própria bacia de São José de Itaboraí”.

O embasamento desta bacia possui composição de gnaisses, migmatitos, granitos, pegmatitos, rochas cálcio-silicáticas, mármore, anfíbolitos, etc. (FRANCISCO, 1989).

Segundo BERGQVIST *et al.*, 2008 esta bacia pertence a um conjunto de bacias associadas ao “Evento Sul-Americano” e a “Reativação Wealdeniana”, durante o Cenozóico, eventos tectônicos afetaram a margem leste da Plataforma Sul-Americana, eventos estes

relacionados à evolução do Oceano Atlântico Sul após a separação da Pangea. Estes eventos criaram o Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (SRCBSB), que é uma depressão alongada de direção ENE com dois segmentos, a zona de Riftes do Vale do Paraíba e o Gráben da Guanabara.

O Gráben da Guanabara é constituído pelo segmento nordeste do SRCBSB, sendo um semigráben de blocos adernados para NW e limitados por falhas de direção NNE. Nestas falhas ocorreu a instalação das Bacias de São José de Itaboraí e de Macacu .

MEDEIROS & BERGQVIST, 1999, dividem as rochas que preencheram a bacia em litofácies, agrupando estas litofácies em associações de fácies de acordo com suas relações genéticas. Estas associações então reunidas em três sequencias estratigráficas S1, S2 e S3. O Quadro I resume o texto abaixo.

A sequência mais profunda (S1) está depositada sobre um embasamento Pré-cambriano e possui composição que varia de fácies carbonáticas terrígenas até químicas e detríticas. Encontramos travertinos, calciruditos, calcarenitos, calcilutites, margas, argilitos, calcários oolíticos e pisolíticos e lignito. Nesta sequencia, as litofácies se encontram intercaladas entre si e possuem origem relacionada à sismicidade e aumento de fluxo de detritos durante atividades tectônicas assim como, alterações nas atividades químicas do sistema. No inicio do seu processo de preenchimento ocorreu o depósito de lamas de cal e de carbonatos cinzentos, associados à matéria orgânica (conchas de gastrópodes). Estes eventos foram seguidos pela precipitação de travertinos intercalada com a deposição de material clástico provenientes de atividades tectônicas nas margens da bacia. Nesta sequencia são bem distinguidas três fácies: travertino (fácies A), calcário cinzento (fácies B) e calcários oolíticos-psiolíticos (fácies C).

A sequência intermediária (S2), ricamente fossilífera, tem por principal característica a presença de fissuras preenchidas por sedimentos. Estas fissuras começaram a se desenvolver após o término dos depósitos de carbonatos da sequencia S1, sendo geradas pela dissolução de material. O relevo do entorno da bacia permitiu o transporte de material clástico, por processos de inundações e fluxo gravitacional. Os sedimentos que formam essa sequencia são agrupados em somente uma fácies D, que representa as margas e calciruditos que preenchem as fissuras. Esta fácies é caracterizada por sua cor que vai de acinzentada a amarelada, possuir carbonatos que se apresentam em forma lamacenta até arenosa e lama de cal. São encontrados clastos de calcário cinzento e travertino, erodidos da fácies inferior. Em termos composicionais, esta fácies é extremamente semelhante a fácies B, sendo a diferença marcada pela baixa consolidação do material.

A última sequência (S3) teve sua formação por deposição após o fim dos ciclos tectônicos, sendo considerada somente a presença de uma fácies (fácies E), composta basicamente de conglomerados. Possui depósitos de ruditos, incluindo conglomerados de lama e matriz arenosa.

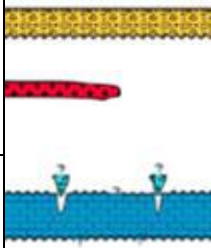
Pode-se observar um resumo das sequências estratigráficas no Quadro 1 (LEINZ, 1938 *apud* MEDEIROS & BERGQVIST, 1999):

**Quadro 1: Sequências estratigráficas da Bacia de São José de Itaboraí. (LEINZ, 1938 in MEDEIROS & BERGQVIST, 1999).**

Sequência inferior – (S1)	Mais antiga, carbonática, com predomínio do calcário travertino intercalado com leitos do calcário clástico argiloso cinza, bancos de oolitos e psólitos, além de outros tipos de rochas.
Sequência intermediária – (S2)	Constituída de marga e por calciruditos, variando de material fino a grosseiro erodidos da sequência (S1), e depositado (S2) nas fissuras geradas pela dissolução ao longo das fraturas.
Sequência superior – (S3)	Não contém carbonatos, sendo constituída quase que totalmente por depósitos areno-argilosos.

A Figura 20 a seguir apresenta a divisão em fácies da Bacia de São José de Itaboraí, associada a divisão cronológica. Esta figura foi adaptada de BERGQVIST et al., (2008)

Com o fim do processo exploratório, a depressão causada pela retirada do calcário foi preenchida por água formando um reservatório que atualmente serve às famílias da região.

Tempo Milhões de anos	Período	Época	idade	Litoestratigrafia Litologia	Sequências deposicionais	Fácies		
0,5	quaternário	Pleistoceno						
1,6								
	neogeno	Plioceno			S3	conglomerados e brechas		
		mioceno					Rochas vulcânicas extrusivas Ankaramito	
		oligoceno						
55		eoceno						
	paleoceno		SUPERIOR	RC	S2	margas e ruditos fossilíferos		
57					S1	travertino e calcário cinzento		
59					NEO	IT		
	INFERIOR		EO					
62					PE			
64								






	conglomerados e brechas
	calcários
	preenchimento de canais
	canais de dissolução
	derrame de ankaramito

Figura 20 – Coluna estratigráfica da Bacia de São José de Itaboraí. Adaptado de Bergqvist et al., 2008.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO POÇO ITAB-1-RJ

O poço ITAB-1-RJ possui cerca de 75 metros de profundidade, sendo os primeiros 30 metros revestidos com aço com diâmetro de 75mm.

Devido às características do material geológico atravessado pelo poço, houve baixa recuperação, tornando inviável uma correlação rocha-perfil. Outro fator a se considerar é sua localização com referencia a bacia, pois, estando na borda da mesma, os testemunhos não correspondem às sequencias descritas em trabalhos anteriores, como MEDEIROS & BERGQVIST,1999.

Para a determinação da locação do ITAB-1-RJ dentro da bacia foram considerados alguns aspectos, como acessibilidade, conhecimentos prévios da geologia da área e dados provenientes de sondagens elétricas verticais (MENEZES, 2009).Este poço foi testemunhado (Figura 21) e a descrição do testemunho foi realizada pelo Professor Sergio Bergamaschi (FGEL/UERJ) (Tabela 1).

Os dados da perfilagem compreendem o intervalo de 30 a 50 m. Devido ao risco de desmoronamento foi colocado um revestimento metálico no início do poço (até 30 m), e devido à produção de detritos que se alocaram no fundo do poço as medições só puderam ser feitos até a profundidade máxima de 50 metros, de forma a se evitar possíveis acidentes, com chances reais de perda dos equipamentos.



*Figura 21– Caixas dos testemunhos do poço ITAB-1-RJ.*

**Tabela 1 - Transcrição da descrição dos testemunhos do poço ITAB-1-RJ feita pelo professor Sergio Bergamaschi (FGEL/UERJ). São apresentados os dados a partir da profundidade de 30 pois acima disto o poço possui revestimento metálico, devido a segurança, os perfis foram feitos até a profundidade máxima de 50 metros.**

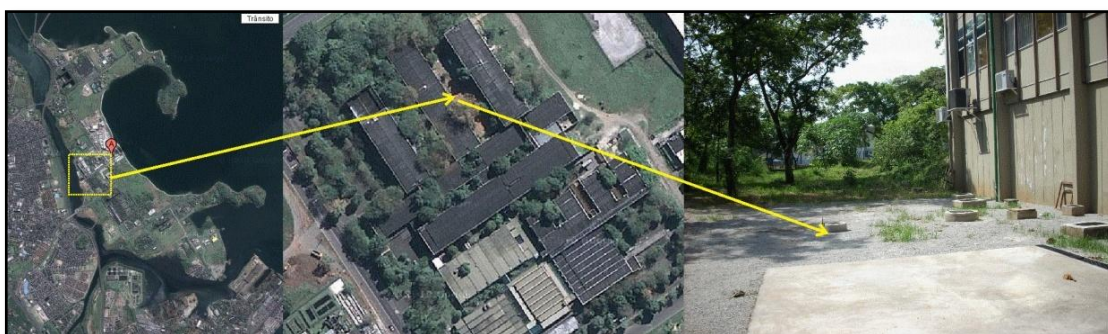
Profundidade (m)	Descrição da rocha
0-30	Revestimento metálico
30 – 30,40	Calcário argiloso (marga), creme esbranquiçado, com alternância de níveis mais argilosos e níveis mais carbonáticos
30,40 – 30,60	Conglomerado fino, matriz carbonática, cinza escuro, com clastos de quartzo e feldspato, pequenos fragmentos vegetais oxidados.
30,60 – 31,50	Sem recuperação
31,50 - 32	Calcarenito argiloso com grânulos de quartzo e feldspato, creme
32-33	Calcarenito, conglomerático, maciço (clastos de quartzo e feldspato de até 1 cm), com matriz argilosa / carbonática. Ciclo de finning-up
33-33,80	Sem recuperação
33,80 – 34,50	Conglomerado com matriz areno-argilosa / carbonática, clastos de feldspato, quartzo, fragmentos de gnaissse com até 3 cm de diâmetro. O tamanho dos clastos aumentam em direção a base da camada.
34,50 – 35,80	Sem recuperação
35,80 – 36	Fragmentos de gnaissse
36 – 38,80	Sem recuperação
36,80 – 39,20	Biotita gnaissse, com porfiroblastos de k-feldspato
39,20 – 41	Sem recuperação
41 – 41,20	Biotita Gnaissse
41,20 – 43	Sem recuperação
43 – 44	Biotita Gnaissse
44 – 45	Sem recuperação
45 – 46	Conglomerado carbonático, cinza médio, maciço, com clastos de quartzo e feldspato e matriz areno-argilosa-carbonática
46 – 47,90	Sem recuperação
47,90 – 48,20	Biotita Gnaissse
48,20 – 50	Sem recuperação
50 – 50,50	Biotita Gnaissse
50,50 - 51	Sem recuperação
51 – 51,20	Material areno-conglomerático, cinza escuro, com clastos de quartzo e feldspato, fracamente reativo.
51,20 – 52,30	Sem recuperação
52,30 – 52,80	Material arenoso-conglomerático, quartzo, feldspato, biotita (гнаissse muito fragmentado?)
52,80 – 54	Sem recuperação
54 – 54,20	Fragmentos de gnaissse, cristais grandes de k-feldspato (pegmatito)
54,20 – 54,90	Sem recuperação
54,90 – 55	Fragmentos de gnaissse
55 – 56	Sem recuperação
56 – 56,20	Biotita gnaissse, granulação mais fina e róseo
56,20 – 57,30	Sem recuperação
57,30 – 58	Biotita gnaissse
58 – 58,20	Sem recuperação
58,20 – 60	Gnaissse
60 – 60,20	Sem recuperação
60,20 – 61	Gnaissse
61 – 63,20	Sem recuperação
63,20 – 63,70	Gnaissse alterado (?)
63,70 – 64,80	Mármore cristalino, duro, cinza. Reage com HCl
64,80 – 65	Gnaissse alterado (?)
65,5 – 66,20	Mármore alternado
66,20 – 66,50	Sem recuperação



### 3.4 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA LOCAÇÃO DO POÇO UFRJ-1-RJ

O poço UFRJ-1-RJ foi perfurado na área externa do Instituto de Geociências da UFRJ que fica localizado na Ilha do Fundão. Esta ilha foi criada artificialmente no século passado, na década de 50, através do processo de terraplanagem de um arquipélago formado pelas ilhas do Bom Jesus, do Fundão, do Pinheiro, Ferreira, França, Catalão e das Cabras (ROCHA et al., 1998 e 2003).

As Figuras 22a e 22b mostram a localização da Ilha do Fundão e o ponto onde está o poço UFRJ-1-RJ (pátio externo do Instituto de Geociências). Pode-se observar em detalhe o poço e a área de testes utilizada para as ferramentas nucleares (indicado pela seta em amarelo).



*Figura 22a – Ilha do Fundão, com destaque para o Poço Escola IGEO/UFRJ. Fonte: Google Maps (fotos de satélite) e A. M. GAUZA.*



*Figura 22b – Área de treinamento em perfilagem, IGEO-UFRJ, com detalhe do poço UFRJ-1\_RJ indicado pela seta em vermelho e da área de calibração das ferramentas nucleares indicada pela seta em amarelo (Fotos A. M. GAUZA).*

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DO POÇO UFRJ-1-RJ

Todo o treinamento na utilização das ferramentas estudadas neste trabalho foi realizado no poço UFRJ-1-RJ, localizado no Campus da Ilha do Fundão – UFRJ, descrito acima e em Gauza *et al.* (2010).

O poço UFRJ-1-RJ tem profundidade aproximada de 49 metros com um diâmetro final de 75 mm. Podendo ser dividido basicamente em duas zonas, a primeira zona, correspondente aos primeiros 9 metros do poço, que atravessa material proveniente do processo de aterro que deu origem a Ilha do Fundão, e é uma zona revestida, devido à baixa resistência do material que a compõe.

A segunda zona, localizada entre 9 metros e 49 metros atravessa rocha compacta do embasamento cristalino, composta basicamente de gnaiss, sendo então, extremamente resistiva. Uma descrição do testemunho deste poço está na Tabela 2 (OLIVEIRA *et al.*, 2010). As fotos dos testemunhos estão na Figura 23.

*Tabela 2: Descrição dos testemunhos em profundidade (OLIVEIRA et al., 2010)*

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Litologia</b>
0-9	Revestimento do poço. PVC para perfis pos – Julho 2009 e aço para perfis em Julho 2009.
9 – 13	Biotita Gnaiss mesocrático média a grossa.
13 – 15	Biotita granito fino (Haloleucocrático);
15 – 20	Biotita gnaiss médio laminado (meso a leucocrático);
20 – 27.50	Biotita Gnaiss médio mesocrático dobrado;
27.50 – 30	Biotita Gnaiss dobrado (médio a fino) laminado
30 – 33.25	Biotita granito fino
33.25 – 35	Pegmetito hololeucocrático
35 – 37.5	Biotita gnaiss fino laminado mesocrítico
37.5 – 40	Biotita gnaiss homogêneo
40 – 43.55	Biotita gnaiss fino melanocrático;





*Figura 23 – Caixas dos testemunhos do poço UFRJ-1-RJ.*

### **3.6 AS FERRAMENTAS DE PERFILAGEM**

Em seguida serão apresentados alguns detalhes da utilização das ferramentas *Electric Log® (E-Log®)*, *Slim Induction Tool® (SIND®)* e também da ferramenta cáliper.

Todas as ferramentas utilizadas neste trabalho podem apresentar os dados de profundidade, via configuração do software de aquisição, em unidades de centímetro ou polegadas. Outra característica importante é o intervalo de aquisição dos equipamentos, sendo realizadas medidas a cada 1cm, o que pode ser considerado como uma medida contínua,

levando em consideração as dimensões dos sistemas para as quais elas foram planejadas – de dezenas a centenas de metros.

O perfil de gama natural está presente em todas as ferramentas utilizadas neste trabalho. Este perfil tem por objetivo realizar a contagem da emissão de radiação gama de minerais que compõem as rochas. Este dado pode ser aplicado para diferenciar tipos de litologia como, por exemplo: folhelhos de não folhelhos além de permitir o ajuste em profundidade de outros perfis obtidos por ferramentas diferentes ou pela mesma ferramenta realizadas em várias épocas.

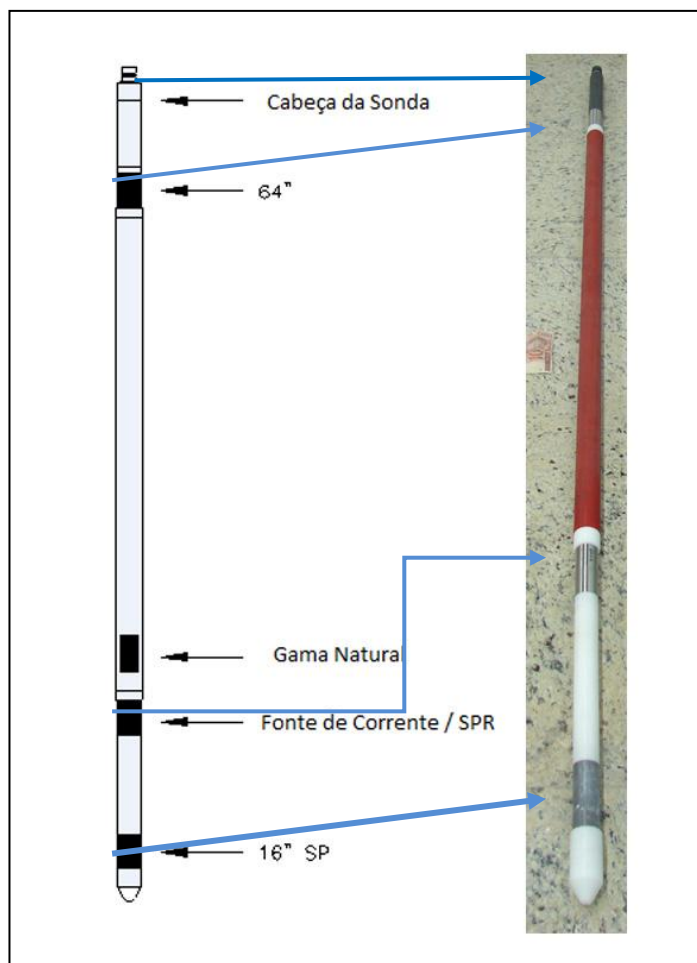
O perfil calíper tem por objetivo a determinação do diâmetro do poço, sendo útil na identificação das zonas de desmoronamento, o que é de extrema importância para a análise dos dados de perfis de resistividade obtidos com a ferramenta de eletrodo, uma vez que os mesmos são fortemente afetados pela geometria do sistema.

A ferramenta *E-Log*® (Figura 24) fornece dados da resistividade normal curta (SHN) e longa (LON). Além disto, ela fornece informações sobre a resistência elétrica pontual (SPR) da parede do poço, potencial espontâneo (SP) e valores de gama natural (NGAM). Esta ferramenta possui três eletrodos, sendo o eletrodo central a fonte da corrente alternada que irá penetrar na formação (ROBERTSON GEOLOGGING , 1999).

A corrente proveniente deste eletrodo irá percorrer a formação e gerar uma diferença de potencial entre a formação e a superfície (referencial considerado infinito). Os outros dois eletrodos irão ler esta diferença de potencial, sendo o mais próximo ao eletrodo central o responsável pela leitura normal curta (SHN) e o mais distante pela normal longa (LON).

Teoricamente o alcance de investigação deveria ser proporcional a separação entre os eletrodos de medida e o eletrodo fonte de corrente (modelo de potencial esférico), porém, como discutido no Apêndice I, esta profundidade irá depender das características do sistema (permeabilidade, porosidade e salinidade da água de formação) e do fluido de perfuração (salinidade). Os dados de tensão são então convertidos para resistividade e transmitidos para a superfície.

O potencial espontâneo é obtido através da medida de diferença de potencial entre o eletrodo SHN e a superfície. Devido à natureza de seu processo de geração, este sinal é contínuo, sendo então facilmente distinguido do potencial utilizado na determinação da resistividade normal curta.



**Figura 24 – Ferramenta Electric Log® e esquema da ferramenta. Estão indicados as posições dos eletrodos. (ROBERTSON GEOLOGGING LTD, 1999).**

A *Electric Log*® é indicada pelo fabricante para determinação de porosidade, correlação estratigráfica entre poços e para identificação de fronteiras entre camadas (ROBERTSON GEOLOGGING, 1999).

O cabo responsável pela alimentação, retorno dos dados e descida da ferramenta é revestido por um material isolante em seus primeiros dez metros, e a região de conexão entre a cabeça do cabo e a ferramenta deve ser isolado eletricamente com fita isolante do tipo auto fusão (Figura 25), para evitar o retorno de corrente por este ponto, o que acarretaria dano permanente a ferramenta.

Devido a utilização da zona não revestida do cabo como caminho de retorno da corrente, os dados obtidos só serão validos para profundidades de 10 m abaixo do nível da água contida no poço. O guincho deve ser aterrado eletricamente para que se possa criar um referencial para a diferença de potencial elétrico (Figura 26).



*Figura 25 – Preparação da ferramenta E-Log com fita auto fusão, com detalhe da aplicação da fita na zona de conexão entre o cabo e a cabeça da ferramenta. Se este procedimento não for realizado, ocorrerá dano permanente a ferramenta. Foto Paula Rocha, 2009.*



*Figura 26 – “Fish” utilizado para o aterramento elétrico da ferramenta E-LOG® indicado pela seta em branco.*

Através das informações sobre resistividade obtidas no processo de perfilagem, é possível determinar variações nas propriedades dos fluidos contidos no interior das formações, desde a determinação de regiões de maior salinidade, assim como mudanças



bruscas do tipo de fluido (água/hidrocarbonetos) ou das estruturas geológicas (variações de porosidade e/ou permeabilidade bruscas).

O potencial espontâneo é gerado pelos processos de interações eletroquímicas, ou seja, pela interação entre o fluido contido na rocha e sua matriz. Os argilominerais possuem propriedades de seleção iônica, logo, uma diferença de salinidade entre a água de formação e o fluido de perfuração favorecerá o surgimento do potencial espontâneo. Nos perfis de SP, as regiões com presença de argilominerais se mostrarão mais “negativas” do que regiões onde as rochas sejam classificadas como “limpas”, permitindo então determinar as regiões estratigráficas com presença de argilominerais.

A ferramenta de Indução (*Slim Induction Tool*® ou *SIND*® – Figura 27) pertence à classe de ferramentas de indução focada. Esta ferramenta é de pequena dimensão, o que pode limitar a sua utilização em poços de grande profundidade, devido a seu pequeno peso.

Esta ferramenta é indicada pelo fabricante para se obter dados sobre limites de camadas e correlação entre poços.

Ao contrário da *E-LOG*®, a ferramenta *SIND*® executa somente medidas de condutividade, porém, devido ao seu princípio de funcionamento, discutido no Apêndice I, pode ser utilizada em poços secos ou com fluidos não condutores, assim como em poços revestidos, desde que este revestimento não seja metálico.



**Figura 27 – Ferramenta *Slim Induction Tool*® com detalhe para a parte não condutora (indicada pela seta em vermelho), onde se localizam as bobinas. Foto: Geneci Coelho, 2010.**

Este equipamento é sensível a presença de campos eletromagnéticos externos, sendo necessário o cuidado com fontes de interferência. Devido a sua sensibilidade, a ferramenta vem com um anel de calibração de forma a assegurar uma boa resposta da condutividade (Figuras 28 e 29). É indicada a calibração anual da ferramenta, ou em casos de ambientes com grandes quantidades de elementos de interferência eletromagnética no entorno do poço.



*Figura 28 – Anel de Calibração com detalhe do seu valor de condutividade – 3300 mS/m.*



*Figura 29 – Procedimento de calibração da ferramenta SIND, Foto de Ana Gauza 2010.*

A conversão da resposta da ferramenta de condutividade para resistividade do meio é efetuada através da função abaixo, onde SIND representa os valores obtidos pela ferramenta:

$$\rho = \frac{1000}{SIND} \quad (42)$$

### 3.7 O LABORATÓRIO MÓVEL

Devido às dimensões e peso de todos os equipamentos envolvidos no processo de perfilagem, faz-se necessária a utilização de um laboratório móvel, instalado em um caminhão de pequeno porte (Figura 30). Este laboratório móvel foi projetado de forma a ter um local adequado para o transporte seguro das ferramentas de perfilagem, do transdutor (Microllogger®) e do controle do guincho. Além de uma bancada para trabalho (Figura 31).



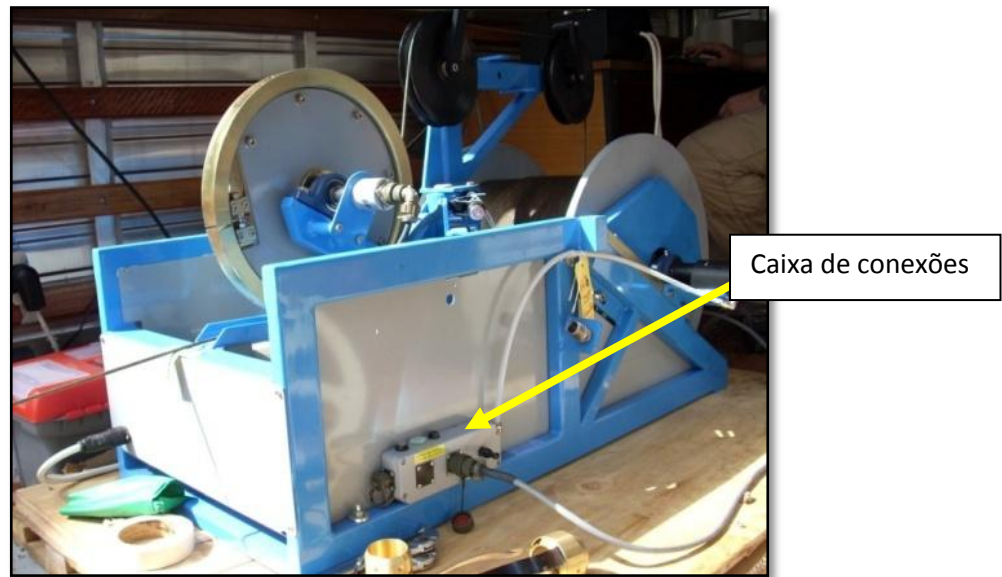
*Figura 30 – Vista lateral do Laboratório Móvel do LPP. Foto Paula Rocha, 2009.*



*Figura 31 – Bancada / armário sendo utilizada em operação de perfilagem. Foto Paula Rocha, 2010.*

Para que a ferramenta de eletrodo possa ser utilizada, é necessário acoplar ao guincho (Figura 32) um fio terra (*fish*) que deve ser preso ao solo (pode ser molhado para facilitar o contato elétrico) (Figura 33) e ativar no próprio guincho a opção de aterramento. Segundo recomendação do fabricante a não execução deste procedimento acarreta em dano permanente a ferramenta (ROBERTSON GEOLOGGING , 1999).





*Figura 32 – Guincho utilizado para descer as ferramentas no poço. Note na lateral a caixa de conexões onde o fio terra deve ser acoplado e ativado. Foto Paula Rocha, 2009.*



*Figura 33 – Aterramento sendo feito durante processo de perfilagem. A haste do aterramento está indicada pela seta em branco. Foto: Paula Rocha, 2010.*

O Microllogger® (Figura 34) é o equipamento responsável pela interface entre as ferramentas e o computador para aquisição e armazenamento dos dados, possuindo uma saída USB para conexão ao computador e conectores para se ligar o transdutor ao guincho e a alimentação de 12 volts (em campo é utilizado a própria bateria do caminhão para a alimentação).



*Figura 34 – Micrologger®. Foto: Ana Gauza, 2009.*

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o *software* WinLogger ® que acompanha as ferramentas. Este *software* possui funções básicas para aquisição e *replay* do perfil, assim como a entrada de equações de calibração. Funções mais complexas necessárias para a análise não podem ser processadas neste pacote, de forma que os dados obtidos foram exportados e processados no *software* WellCAD ®.

Um cuidado que deve ser tomado no processo de aquisição é referente à profundidade inicial da medida:

- Em primeiro lugar, todas as ferramentas em uma corrida devem ter um ponto de partida inicial próximo, de forma que o ponto zero do perfil seja o mesmo em todas as corridas (Figura 35). Este ponto zero pode ser definido utilizando como referencia um ponto específico do cabo – no nosso caso uma diferença de espessura do cabo do guincho e o cano do revestimento como indicado pelas setas na Figura 35.

- Outra forma de correção de profundidade entre as ferramentas pode ser feita através dos dados de gama natural. Caso todas as ferramentas utilizadas no estudo possuam gama natural, isso pode ser feito correlacionando o gama natural de todas as ferramentas e consequentemente, o nivelamento em profundidade de todos os dados. A correção de profundidade real (*TVD – True Vertical Depth*) pode ser feita posteriormente, via *software*, com o conhecimento do valor de “*shift*” do referencial zero e da superfície do solo.



*Figura 35- Vista da boca do poço, com revestimento aparente. Nota-se nas setas o que pode servir como referencial para o ponto zero do perfil*

## CAPÍTULO 4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DOS DADOS DO POÇO UFRJ-1-RJ

Como foi dito antes, o poço UFRJ-1-RJ foi construído para treinamento e aferição de ferramentas de perfilagem. Desta forma, as ferramentas elétricas foram primeiramente testadas neste poço. As características da área onde o poço foi perfurado já foram descritas anteriormente no Capítulo 3.

Nos dados do Poço UFRJ-1-RJ, eram esperados que os valores de resistividade tivessem baixa variação, uma vez que o mesmo atravessa uma região onde as variações do ponto de vista elétrico são praticamente nulas (Tabela 2) e, além disto, a porosidade das rochas atravessadas pelo poço é baixíssima. Como discutido anteriormente, os sinais elétricos dependem fortemente da existência de um fluido condutor no interior das rochas (espaço poroso) que será o meio pelo qual a corrente irá fluir gerando a diferença de potencial que será lida pela ferramenta.

Na Figura 36, são apresentados os dados deste poço na zona não revestida – de zero a nove metros, onde a curva SPR (vermelho) mostra a resistência da parede do poço e as curvas SHN (azul) e LON (verde) indicam o valor da resistividade nas profundidades radiais aproximadas de 0,40 m e 1,30 m respectivamente. Na última coluna estão os dados de porosidade calculados por SILVA *et al.* (2010).

Conforme pode ser constatado nos dados SHN e LON (Figura 36) devido à baixa porosidade os sinais associados à penetração de corrente na formação terão um pequeno alcance, lendo zonas radiais próximas a parede, gerando respostas praticamente iguais, com pequenas variações provenientes das diferenças geométricas entre as duas medidas (afastamento do eletrodo central). Se não há poros preenchidos com fluidos não há penetração de corrente elétrica na formação.

Entretanto, a análise dos dados contradiz em parte o esperado, pois se observa uma variação de amplitude, dividindo os perfis elétricos basicamente em duas zonas, uma acima e outra abaixo dos 27 m. Este comportamento é observado nos dados da SPR, SHN e LON (Figura 36). Apesar dos perfis normais de resistividade (SHN e LON) apresentarem valores muito próximos também se observa esta variação. O poço atravessa um gnaiss que está

descrito na Tabela 2 (OLIVEIRA *et al.*, 2010) e a pequena variação mineralógica não seria suficiente para que ocorresse alteração tão significativa nos valores lidos pela ferramenta de eletrodo na profundidade de 27 m.

Até à profundidade de 25 m observa-se um valor médio para a resistividade aparente (SHN e LON) de 16000  $\Omega\text{m}$ , no entorno de 27 m esta resistividade cai bruscamente para cerca de 4000  $\Omega\text{m}$  e depois volta a subir para 26000  $\Omega\text{m}$ .

Estes dados parecem indicar que a grande diminuição dos valores de resistividade nesta profundidade de 27 m seja decorrência de uma zona de fratura preenchida por água salgada. Neste ponto vale recordar que a atual Ilha do Fundão foi formada artificialmente por volta de 1950 através de um aterro hidráulico de um arquipélago de pequenas ilhas e que é possível que haja água salgada em algumas fraturas.

SILVA *et al.* (2010) já mostraram através da aplicação de sismograma sintético as profundidades onde estão as fraturas mais significativas do poço UFRJ-1-RJ entretanto, nesta profundidade de 27m embora não hajam fraturas aparentemente importantes é possível a existência de fraturas pequenas com maior quantidade de água salgada o que explicaria a baixa resistividade.

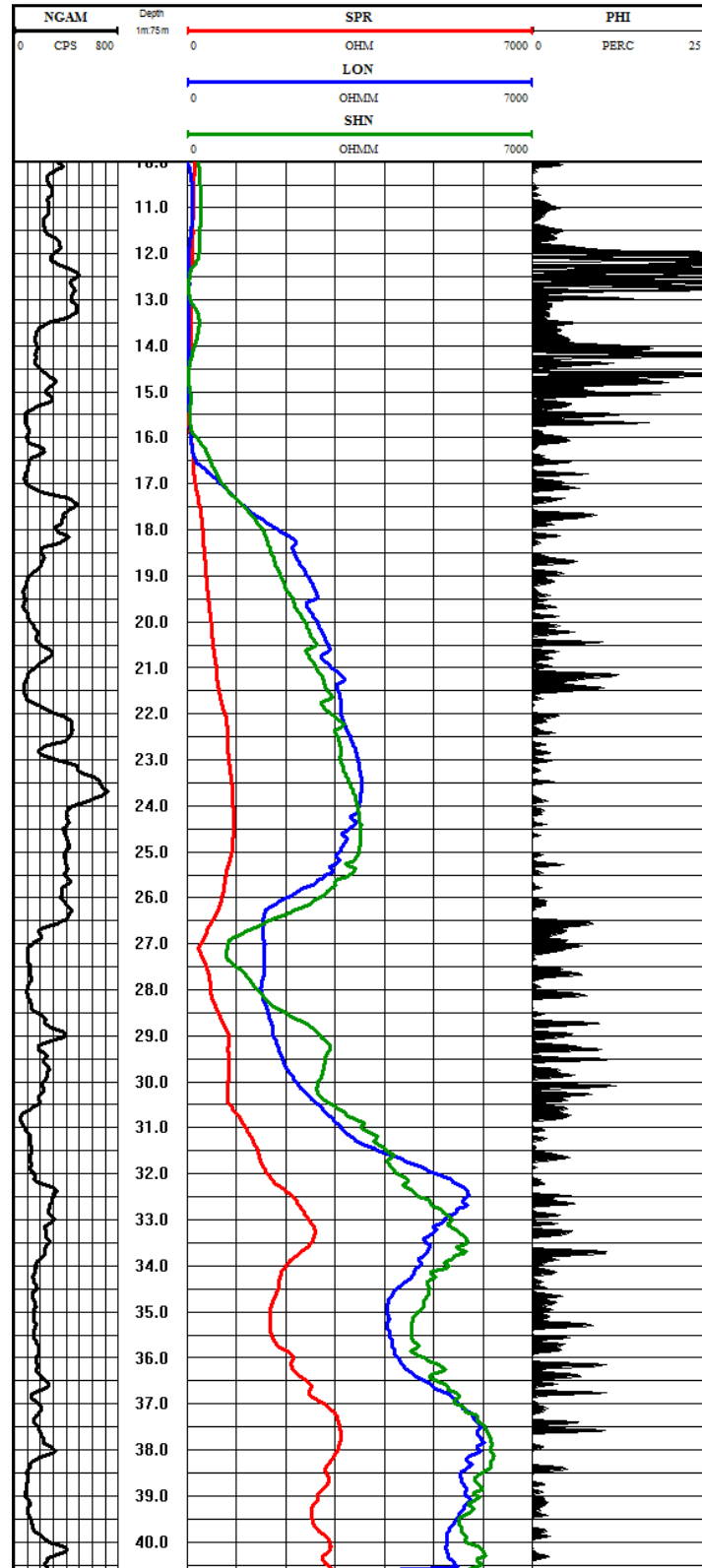


Figura 36 – Perfis Geofísicos de Poço UFRJ-1-RJ desenhado com o software WellCAD®. A curva SPR (vermelho) mostra as medidas de resistência da parede, as curvas SHN (azul) e LON (verde) são medidas da resistividade da formação em 0,40 m e 1,30 m, segundo o manual das ferramentas. Na última coluna são apresentados dados de porosidade obtidos em SILVA et al. (2010).

A Figura 37 abaixo mostra os dados do perfil com a interpretação das duas zonas com resistividades diferentes. A zona de baixa resistividade está indicada com Ha (cor amarela) e a de mais alta resistividade Hb (cor lilás). Na profundidade em torno de 27 m está indicada a zona de alta condutividade (cor azul).

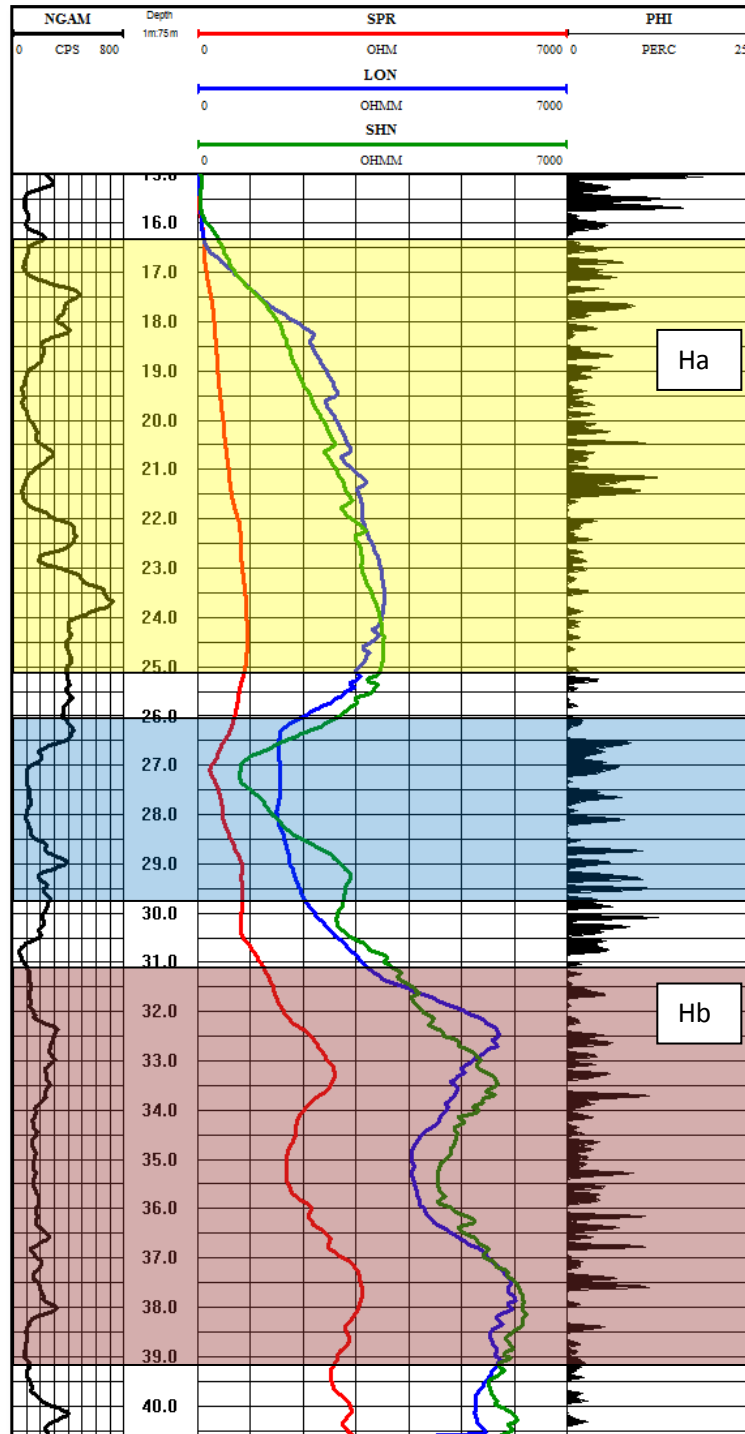


Figura 37 – Mostra o perfil com os dados de resistividade interpretado segundo as variações na resistividade e a correlação com os dados de porosidade calculada por SILVA et al. 2010.

## 4.2 ANÁLISE DOS DADOS DO POÇO ITAB-1-RJ

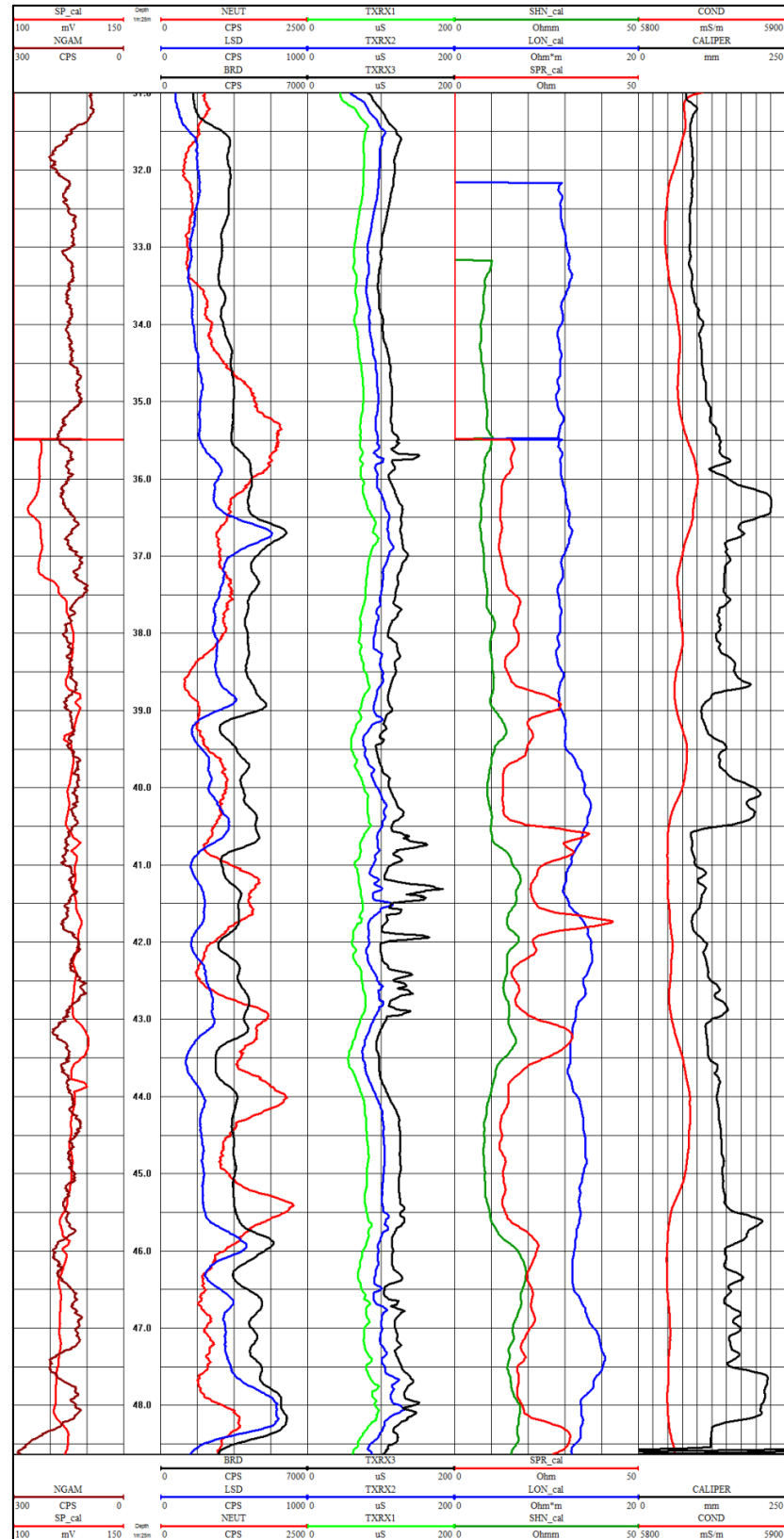
Na revisão bibliográfica (Capítulo2) foi discutido que as ferramentas elétricas foram desenvolvidas para identificar o tipo de fluido dentro das rochas, ou seja, é muito utilizada na separação água x óleo e água salgada x água doce. Nenhum destes casos ocorre no poço ITAB-1-RJ.

No poço UFRJ-1-RJ que atravessa uma mesma litologia (gnaisse) foi possível identificar zonas diferentes devido às diferenças de condutividade em cada uma delas. No caso do poço ITAB-1-RJ a recuperação do testemunho foi muito baixa e isto pode indicar que as rochas atravessadas pelo poço são friáveis e isto facilita a percolação de fluidos (água) e, portanto os valores de resistividade esperado nestes casos devem ser baixos e talvez não haja grandes variações ao longo do perfil.

Como já foi dito, a descrição dos testemunhos foi feita pelo professor Sergio Bergamaschi (FGEL/UERJ) e a parte que foi perfilada pelas ferramentas elétricas estão na Tabela 1 no Capítulo 3. A transcrição da descrição dos testemunhos começa na profundidade de 30 m, pois em profundidades superiores não foram realizadas medidas devido ao revestimento metálico.

O poço ITAB-1-RJ foi perfilado em outubro de 2009 com as ferramentas nucleares (Gama-gama e Neutrão) e Sônica e em junho de 2011 com as ferramentas E-LOG®, SIND® e Cáliper. A Figura 38 mostra o perfil do poço com os dados obtido em 2009 e 2011 na zona de interesse para as ferramentas elétricas. O objetivo deste trabalho são as ferramentas elétricas e por isto os dados principais das ferramentas sônica e nucleares (perfis de gama-gama e neutrão) não foram discutidos, pois são objetos de estudos de uma dissertação de mestrado (SILVA, 2012) e uma tese de doutorado (OLIVEIRA, 2012) respectivamente, sendo somente utilizados os dados de gama natural (um perfil tido como “acessório” em quase todas as ferramentas). No futuro os resultados destes trabalhos serão integrados em um único trabalho.





**Figura 38 – Perfil do poço com dados obtido em 2009 (curvas NGAM, BRD, LSD, NEUT, TXR1-3) e 2011 (SPR\_cal, LON\_cal, SHN\_cal, CALIPER E COND) das ferramentas: E-LOG®, SIND®, Gama-gama, Neutrão, Sônica e Cáliper.**

A seguir, são discutidos os dados das ferramentas objeto deste estudo (*E-LOG®* e *SIND®*) foi incluída a ferramenta Cáliper por ser uma informação necessária à análise dos dados.

#### A) CURVAS DE GAMA NATURAL (*SIND®*) E CÁLIPER

Ao contrário do poço UFRJ-1-RJ o poço ITAB-1-RJ não teve boa recuperação e isto dificultou a interpretação rocha x perfil. Nos dados de 2009 não há o perfil de cáliper e, portanto não é conhecida as condições das paredes do poço-naquela época. Esta informação seria importante para avaliar o quanto o desmoronamento poderia afetar as medidas de gama feitas em 2011.

A hipótese inicial foi a seguinte: este poço possui dados de gama natural obtidos em outubro de 2009 (ferramenta de Gama-gama) e como também há dados de gama obtidos em junho de 2011 pela ferramenta *SIND®*, a primeira análise foi identificar se há diferenças entre os valores de gama adquiridos nos dois trabalhos.

Com os dados de cáliper obtido em 2011 sabe-se que devido ao estado das rochas atravessadas pelo poço, o mesmo tem sua parede com muitos desmoronamentos que são visíveis nas medidas de junho de 2011. Este desmoronamento é mostrado na Figura 37, onde pode ser observada na curva CALIPER. Nesta curva, a zona em vermelho claro representa o diâmetro do poço sem desmoronamento, e a zona azul a parede do poço, desta forma, as zonas brancas são representações dos desmoronamentos ocorridos e que podem ter afetado as medidas elétricas.

O objetivo foi verificar se o desmoronamento afetou as medidas do gama natural supondo que as paredes do poço estavam mais preservadas, ou seja, que o diâmetro do poço era mais constante, e próximo dos 7,5 cm quando foi corrido o perfil de gama em novembro de 2009. Por isto, este dado foi tomado como base para a análise.

Os dados de Cáliper são mostrados na Figura 39. Para melhor visualização, foi inserida uma coluna rosa que representa o diâmetro esperado (75 mm) do poço, e para facilitar a visualização da parede, a área posterior ao diâmetro obtido foi pintada de azul, desta forma, as zonas brancas entre a coluna vermelho claro e a área azul representam os desmoronamentos presentes no poço.

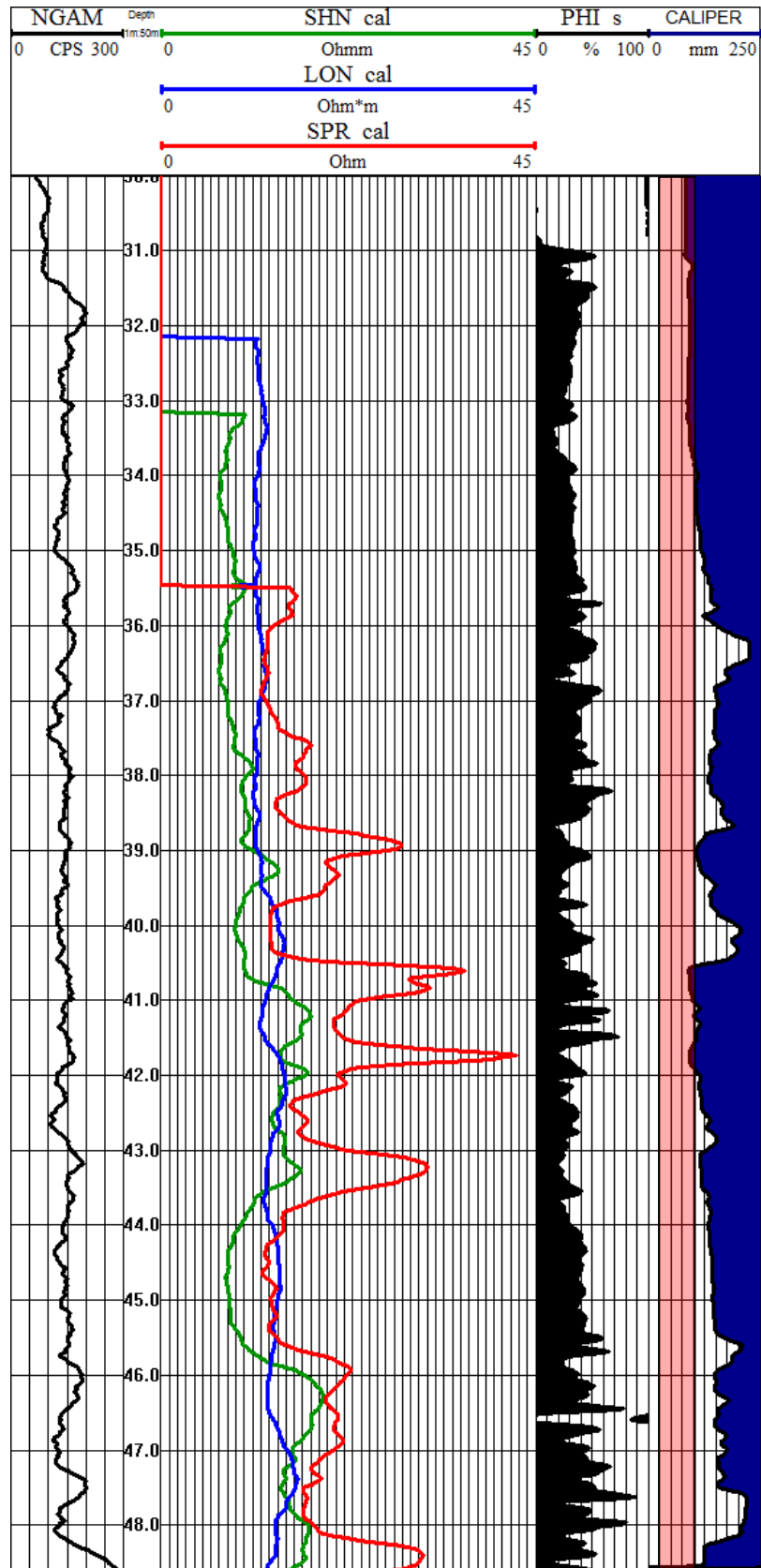
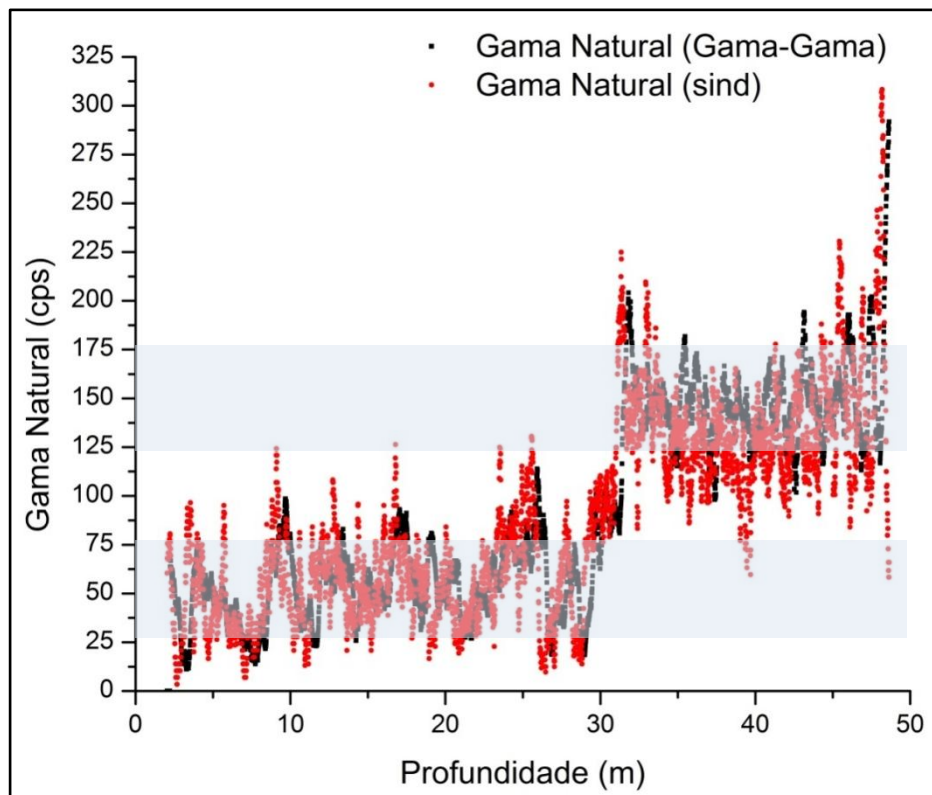


Figura 39 – Perfil do Poço ITAB-1-RJ obtido em junho de 2011. Estão desenhados os dados da ferramenta elétrica – E-LOG® (vermelho, verde e azul) com os dados de gama natural e cáliper, sendo, no dado do cáliper, indicado em vermelho claro o diâmetro que o poço deveria caso não houvesse ocorrido desmoronamento e em azul a zona posterior ao diâmetro do poço.

A Figura 40 mostra os valores obtidos com cada ferramenta respectivamente sendo os dados em vermelho (*SIND*® - 2011) e dados em preto (Gama-gama-2009).

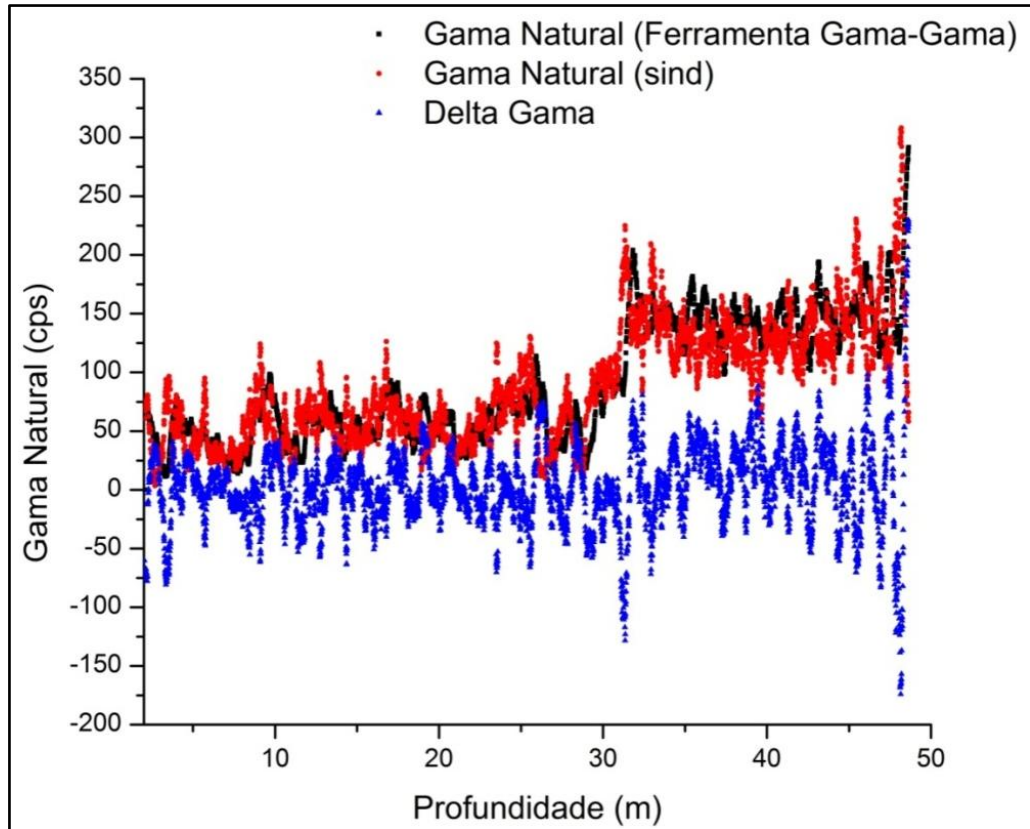
Os dados obtidos em outubro de 2009 e junho de 2011 têm um comportamento muito parecido e grosseiramente podem ser agrupados em dois grandes intervalos na profundidade de 30m: o primeiro entre 25 e 75 cps e segundo entre 125 e 175 cps.

Esta mudança nos patamares dos valores de gama natural pode ser explicada pelo revestimento que existe no poço que é metálico e que vai da superfície até à profundidade de 30 metros.



**Figura 40** – Os dados obtidos em outubro de 2009 (preto) e junho de 2011 (vermelho) tem um comportamento muito parecido e grosseiramente podem ser separados na profundidade de 30m em dois grandes intervalos: o primeiro entre 25 e 75 cps e o segundo entre 125 e 175 cps (zonas marcadas em azul claro).

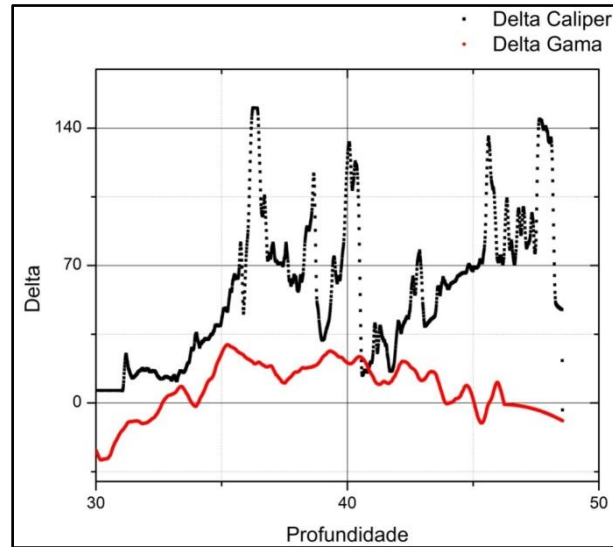
Em seguida foi feito o gráfico das diferenças (em azul) entre os valores de Gama-gama (2009) e *SIND*® (2011) o resultado está apresentado na Figura 41 .



*Figura 41- Gráfico das diferenças (Delta Gama - em azul) entre os valores de 2009 e 2011.*

Na Figura 41 observa-se que a diferença entre os valores medidos em 2009 e 2011 está próxima de zero mostrando que em média os dados de gama natural não foram muito afetados pelo desmoronamento das paredes do poço.

O passo seguinte foi comparar os valores da diferença dos dados de gama (2009 e 2011) com os valores acima do diâmetro normal do poço (75 mm) obtidos com Cáliper em 2011 a fim de verificar se haveria correlação entre os locais onde ocorreram desmoronamentos e os altos valores da diferença entre os dados de gama natural de 2009 e 2011. A Figura 42 abaixo mostra esta relação que só tem importância para profundidades abaixo de 30 m quando não há revestimento e percebe-se que as diferenças nos valores de gama (2009-2011) não são diretamente afetadas pelos desmoronamentos.



**Figura 42** – Gráfico mostrando os valores suavizados da diferença dos dados de gama (2009 e 2011 – vermelho- Delta Gama) e os valores obtidos com a ferramenta calíper acima do diâmetro normal do poço (75 mm- Delta Caliper) para profundidades abaixo de 30 m.

Geralmente o perfil de gama natural é inserido nas ferramentas para ser utilizado como calibrador de profundidade uma vez que pode servir para ajustar o zero dos perfis caso haja alguma divergência. No nosso caso, o perfil de gama serviria também para separar litologias com altas e baixas radioatividades. Em geral, este perfil pode ser utilizado para classificar as rochas como folhelho (altos valores) e não folhelho (baixos valores).

O Poço ITAB-1-RJ atravessa basicamente carbonato com variações de marga, calcarenito, diamictito com matriz de marga, desta forma estas rochas poderiam ser associadas a intervalos com alta radioatividade. Assim, o perfil de gama natural pode servir para identificar este tipo de litologia e ajustar as profundidades na descrição dos testemunhos.

Entretanto, como as ferramentas elétricas não são utilizadas para identificação de litologias os dados de gama natural obtidos com as ferramentas do LPP foram foco de trabalho de doutorado (OLIVEIRA, 2012) que teve como objetivo estudar as ferramentas nucleares que são boas para identificar litologias.

## B) CURVAS SPR, SHN, LONG (E-LOG®) E CONDUTIVIDADE (SIND®)

Ao contrário do observado no Poço UFRJ-1-RJ, é possível observar um comportamento distinto entre as curvas de resistividade (SHN e LON). Este comportamento, que é esperado, é um indicativo de penetração de corrente elétrica na formação o que é desejado. Também é observada a concordância entre o comportamento do perfil de resistividade curto (SHN) e o perfil de resistência pontual (SPR), perfis estes que fornecem informação rasa do poço.

Os altos valores do Cáliper indicam um desmoronamento da parede do poço e isto pode ter influenciado os valores lidos pela ferramenta. Como não há dados das ferramentas elétricas em 2009 não há como comparar os dados a exemplo do que foi feito nos dados de gama. Este efeito da influência na geometria do poço é discutido no Apêndice I. Outro fato a ser observado foi a ausência de leituras no trecho de zero (superfície) até a profundidade de trinta e um metros devido ao revestimento metálico do poço que impede o contato do sinal da ferramenta com a formação.

A seguir será feita uma análise dos dados de cada ferramenta. A resposta elétrica foi dividida em intervalos com valores semelhantes que podem ser melhor visualizados no perfil mostrado na Figura 43. Os valores do perfil caliper foram pintados de preto e uma linha em amarelo indica o que seria o diâmetro do poço sem desmoronamento (75mm).

Os perfis SHN e LON não são muito influenciados pela parede do poço. O primeiro faz leitura na profundidade radial de 0,40 m e o segundo de 1,3 m. Os baixos valores registrados indicam a presença de água em um material muito friável motivo pelo qual a recuperação dos testemunhos foi muito baixa.

O dados da ferramenta SHN foram divididos em quatro intervalos, a saber: Intervalo I (35,5 - 40,0m); Intervalo II (40,0 – 44,0 m); Intervalo III (44,0 - 45,5 m) e Intervalo IV (45,5 – final).

Os dados da ferramenta LON foram divididos em cinco intervalos, a saber: Intervalo I (35,5-39,5 m); Intervalo II a (39,5– 41,3 m), Intervalo II b (41,3 – 43,0 m), Intervalo III (43,0 -46,5 m) e Intervalo IV (46,5 – final).

A ferramenta SPR, como já foi explicado, mede a resistência da parede do poço e, portanto, é esperado que os dados possam refletir os desmoronamentos. Os dados foram divididos em oito intervalos, a saber: Intervalo I a (35,5-38,5); I b (38,5-40,0); Intervalo II a

(40,0 – 41,5 m); Intervalo II b (41,5 – 42,5 m); Intervalo II c (42,5 – 44,0 m); Intervalo III (44,0 -45,5 m) e Intervalo IV a (45,5 – 48,0) e Intervalo IV b (48,0 – final).

As subdivisões dos intervalos nos dados do perfil SPR parecem mostrar as variações na espessura do poço (desmoronamentos).

Os dados da ferramenta *SIND*® foram divididos em quatro intervalos, a saber: Intervalo I (35,5-40,5 m); Intervalo II (40,5– 43,0 m), Intervalo III (43,0 -45,5 m) e Intervalo IV (45,5 – final).

Observa-se que os dados da ferramenta *SIND*® parecem deslocados na vertical e isto deve ser um efeito da geometria de aquisição. As ferramentas de indução focada foram desenvolvidas para poços onde não é utilizado lama a base de água, por motivos de segurança (explosões). Conforme já explicado no Apêndice I, esta técnica consiste em emitir um campo primário que induz uma corrente na formação que por sua vez produz um campo secundário que é medido pela ferramenta. Este campo secundário ao ser detectado pela ferramenta gera uma corrente proporcional à condutividade da rocha na unidade de mS/m.

Observa-se pelo perfil que a ferramenta possui baixa variação, aproximadamente  $\pm 14$  mS/m, ao longo de todo o perfil. Este resultado, indica uma condutividade de aproximadamente 5900 mS/m  $\pm 14$ mS/m em toda a extensão do poço, apresentando leves oscilações nos pontos onde são observados os sinais mais marcantes do perfil LON. Este resultado já era esperado face à baixa recuperação dos testemunhos devido ao estado friável em que se encontram as rochas.



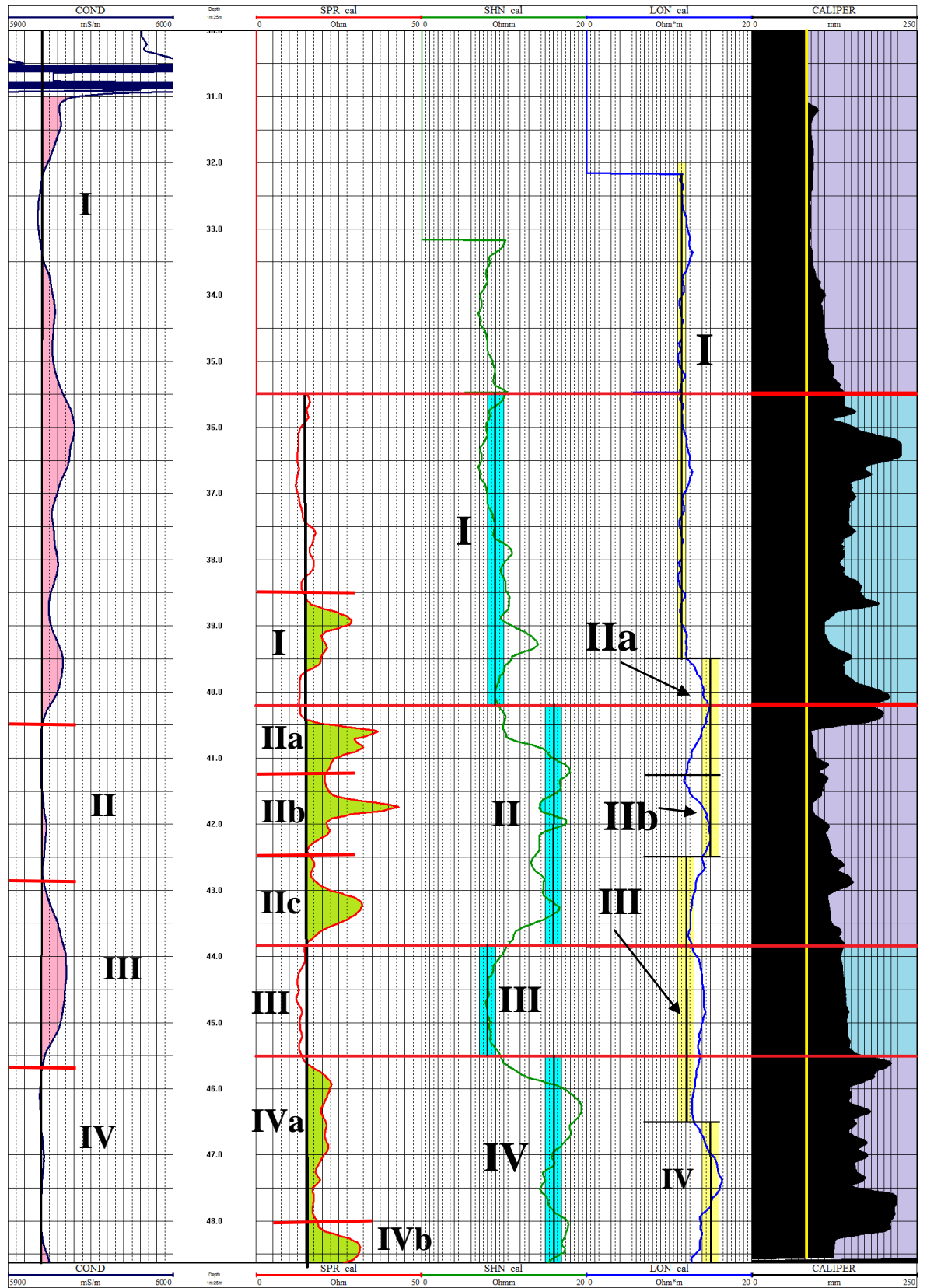


Figura 43 – Perfil do poço ITAB-1-RJ, com interpretação das zonas resistivas. Os valores do perfil caliper foram pintados de preto e uma linha em amarelo indica o que seria o diâmetro do poço sem desmoronamento (75mm).

### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DA FERRAMENTA DE ELETRODO EM AMBIENTES DE BAIXA E ALTA RESISTIVIDADES

Neste trabalho, foram apresentados dados de resistividade obtidos com a ferramenta de eletrodo normal (*E-LOG*®) obtidos em dois poços pertencentes a UFRJ.

Como discutido anteriormente, o poço UFRJ-10-RJ encontra-se em uma região composta basicamente por um gnaíse em bom estado de conservação e apresentando poucas fraturas. Desta forma, observou-se que os valores de resistividade lidos foram extremamente altos, com o sinal possuindo pouca invasão na formação, fato este que pode ser observado pela análise do comportamento idêntico das curvas de resistividade normal curta e longa (média e alta penetração) com os valores de resistência pontual (alcance curto). Embora os valores das curvas normais longa e curta possuam uma amplitude maior, as três curvas concordam em toda a região perfilada, sendo as diferenças de amplitude justificadas pela geometria associada ao processo de medida.

De forma oposta, pode-se observar no poço ITAB-1-RJ uma variação do comportamento das três curvas citadas, indicando a penetração da corrente elétrica em diferentes profundidades na formação.

Com o intuito de se comparar as respostas nos dois tipos de ambientes, foi criado um perfil utilizando valores de resistividade dos dois poços, como pode ser visto na Figura 44.

Este perfil foi feito através da criação de um arquivo padrão utilizado em perfilagem (arquivo \*.las) que contém os dados referentes ao poço e as curvas, em forma de tabela, associadas às suas profundidades. Foi utilizada uma profundidade aleatória, e feito os perfis em escala logarítmica, de forma a se observar as variações em ordem de grandeza. As curvas seguidas de “PE” representam os dados de resistividades obtidos no poço UFRJ-1-RJ (Poço Escola).

Pode-se observar neste perfil, que existe uma diferença de cerca de duas ordens de grandeza entre os dados, ou seja, o ambiente do poço UFRJ-1-RJ possui valores de resistividade cerca de 100 vezes maiores do que o do poço ITAB-1-RJ.

Como visto no Capítulo 2, esta ferramenta possui como uma de suas limitações ambientes com resistividade muito maior do que a lama de perfuração, e através desta comparação, pode-se verificar a diferença em ordens de grandeza entre os dois meios e

consequentemente, a diferença de amplitude e comportamento da ferramenta em ambos os casos.

Um fato importante e que não deve ser esquecido operacionalmente é que, a lama de perfuração, mesmo sendo à base de água, sempre deverá ser menos condutora que a formação, evitando assim o efeito de fuga de corrente no poço e consequentemente, uma repetição do ocorrido no poço UFRJ-1-RJ.

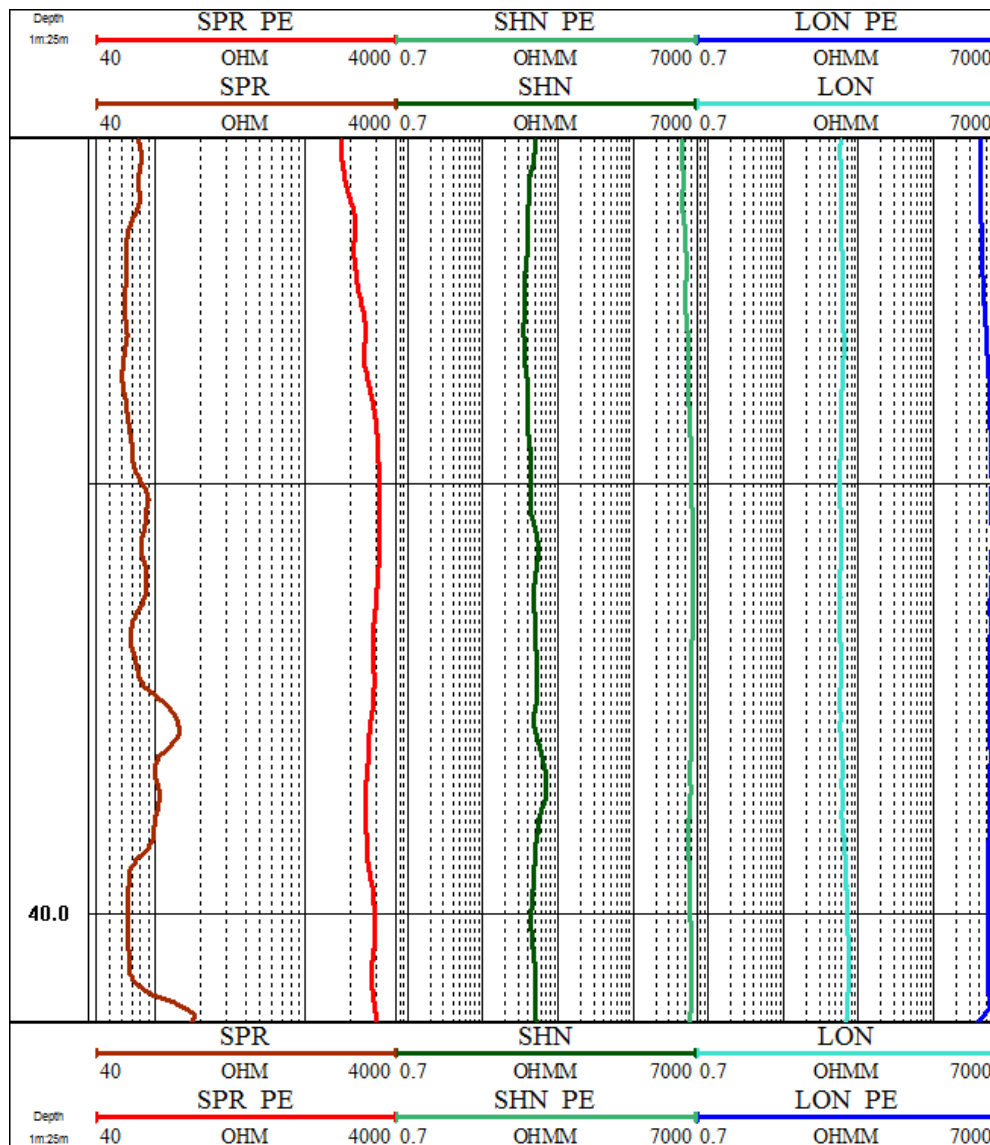


Figura 44 – Comparação entre os dados dos poços ITAB-1-RJ e UFRJ-1-RJ, representado em escala logarítmica, onde pode ser observado a diferença de escala da ferramenta nos dois ambientes.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi à análise e comparação de duas técnicas de perfilagem que objetivam a determinação da resistividade elétrica de formações geológicas atravessadas por um poço (perfil de eletrodo galvânico e perfil de indução focado). Para isto, foi feito um estudo teórico sobre as características destas técnicas, sendo abordadas as suas bases teóricas de funcionamento e suas limitações, limitações estas que puderam ser observadas com a aplicação de ambas em ambientes extremos: o primeiro de caráter extremamente resistivo, e o segundo, de baixa resistividade.

No primeiro caso, a ferramenta de eletrodo, apesar da baixa penetração do sinal, devido à baixa porosidade do meio, foi capaz de “perceber” mudanças no sistema. Tais mudanças foram associadas à porosidade secundária, e ao possível acúmulo de água de maior salinidade do que a contida no poço. Esta resposta foi satisfatória, uma vez que este é o comportamento esperado desta ferramenta. No mesmo ambiente, a ferramenta de condutividade focada, devido ao seu maior alcance horizontal, e aos ruídos provenientes do meio (interferências devido a redes elétricas e estruturas metálicas em sub superfície), não apresentou uma resposta que pudesse ser interpretada, e os dados de condutividade, neste caso, foram desconsiderados.

O segundo ambiente estudado, possuía uma maior variação litológica, porém, um material friável, o que acarretou um maior distanciamento entre as ferramentas e a parede do poço, e conseqüentemente, maior influencia da lama de perfuração nos valores de resistividade /resistência obtidos.

Neste caso, a ferramenta de eletrodo foi capaz de distinguir a existência de diversas camadas diferentes do ponto de vista elétrico, e variações radiais na resistividade. Este resultado é esperado, uma vez que uma das aplicações deste tipo de perfil é a determinação de fronteiras de camadas.

Porém deve ser salientado que, devido à baixa recuperação e aos grandes “rombos” na parede do poço, estes dados só podem ser considerados de forma qualitativa e não quantitativa, uma vez que estes fatores impedem um possível cálculo de valores mais próximos da resistividade real do meio.

Com relação ao perfil de condutividade focado, foi observada uma tendência dos dados em acompanhar o comportamento do perfil de resistividade normal longo. Devido aos baixos

contrastes da água de formação nas camadas, não são observados saltos ou quedas bruscas na condutividade. Estas variações mais bruscas, que foram observadas nos resultados dos perfis de eletrodo, são resultados da influencia geométrica do poço nesta resposta.

As aplicações destas técnicas, nos dois ambientes, mostraram, de forma prática, as limitações e as características de cada uma delas:

Foi possível observar, no ambiente resistivo (poço UFRJ-1-RJ) os efeitos de fuga de corrente no poço devido ao alto contraste de resistividade entre a água do poço e a formação (de baixa porosidade), e conseqüentemente, a baixa penetração do sinal.

No ambiente de baixa resistividade (poço ITAB-1-RJ) foi possível determinar possíveis contatos entre camadas devido à variação de resistividade embora não sejam dados que possam ser utilizados de forma quantitativa devido à baixa recuperação e ao alto grau de desmoronamento.

Devido à natureza experimental do presente trabalho, foi possível observar as limitações intrínsecas das técnicas utilizadas. Deve-se sempre ter em mente que ambas foram desenvolvidas para sistemas onde ocorram variações bruscas da resistividade, associadas a variações das formações atravessadas pelo poço. No caso deste estudo, nenhum dos ambientes seria considerado adequado à utilização destas ferramentas, porém, foi possível obter informações sobre o comportamento elétrico dos meios atravessados pelos poços de forma qualitativa.

Através dos resultados, pode-se concluir que mesmo com as limitações impostas por suas características e pelas características dos poços, ambas as técnicas mostraram a sua utilidade na determinação de contatos entre camadas e na determinação da variação de fluidos contidos no interior de formações (caso do poço UFRJ-1-RJ, onde foi possível a determinação de uma zona com variação do fluido de formação em termos de salinidade).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASQUITH, G.; GIBSON, C. **Basic Well Log Analysis for Geologists**. 01 ed. Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologist, 215p. ISBN 0-89181-652-6. 1982
- BERGQVIST, L.P.; MOREIRA, A. L.; PINTO, D. R. **Bacia de São José de Itaboraí: 75 anos de história e ciência**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 84p, 2006.
- BERGQVIST, L.P.; MANSUR, K.; RODRIGUES, M.A; RODRIGUES-FRANCISCO, B.H.; PEREZ, R.A.R.; BELTRÃO, M.C.M.C. **Bacia São José de Itaboraí, RJ - Berço dos mamíferos no Brasil**. 2008. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E.T.; (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Acesso: março de 2010. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio123/sitio123.pdf>
- BERGQVIST, L.P.; ALMEIDA, E. B.; ARAÚJO, H. E.; **Tafonomia da assembleia fossilífera de mamíferos da “fenda 1968”, Bacia de São José de Itaboraí, Estado do Rio de Janeiro, Brasil**, Rev. bras. paleontol. 14(1):75-86, Janeiro/Abril, 2011.
- BRITO, I.M. **Geologia e paleontologia da Bacia Calcária de São José de Itaboraí, Estado do Rio de Janeiro**. Brasil. (1989). Anuário do Instituto de Geociências. UFRJ. p. 56-64.
- ELLIS, DARWIN V. & SINGER, JULIAN M. **Well Logging for Earth Scientists**. Springer, Second Edition, 2008 – 685pg
- FRANCISCO, B.H.R. **Estratigrafia da Bacia de São José de Itaboraí**. Rio de Janeiro, Brasil: Anuário do Instituto de Geociências, 1989. 12: 65-69.
- GAUZA, A. M. *et al.* **Poço Escola: Perfuração e Perfilagem**. Simpósio Temático SP30 – Ensino e Educação em Geologia do 45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém-PA, outubro de 2010.

- GIRÃO, G. N. **Apostilas de Perfilagem em Geofísica de Poços**. Disponível em <<http://geraldogirao.com/apostilas.htm>>. Acesso em Abril de 2009.
- GRIFFITHS, D. J., **Introduction to Electrodynamics**, Third Edition, Prentice Hall 1999, 576p.
- KELLER, G. V. **Electrical properties in: Pratical Handbook of physical properties of rocks and minerals**. (Ed.: Carmichael, R. S.) CRC Press, 1989, Boca Raton.
- MEDEIROS,R.A.; BERGQVIST,L.P. **Paleocene of the São José de Itaboraí basin, Rio de Janeiro, Brazil: lithostratigraphy and biostratigraphy**. *Acta Geologica Leopoldensia* (1999), **22**(48): 3-22.
- MENEZES, 2009 **Levantamento por Eletrorresistividade na Bacia de São José de Itaboraí - Rio de Janeiro-** Trabalho de conclusão de curso de graduação- Geologia – UFRJ
- MEDEIROS,R.A.; BERGQVIST,L.P.. **Paleocene of the São José de Itaboraí basin, Rio de Janeiro, Brazil: lithostratigraphy and biostratigraphy**. *Acta Geologica Leopoldensia*, 22(48): 3-22. 1999
- OLIVEIRA, M. F.S. ; LOPES, R. T. ; ROCHA, P. L. F. ; ABREU, C. J. ; LIMA, I. ; SILVA, E. A. ; LUNA, J. L. . **Avaliação do Poço UFRJ-1\_RJ como Ambiente de Aferição para Ferramentas de Perfilagem Nuclear**. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010.
- ROBERTSON GEOLOGGING LTD.. **Documentation Set. Operating and technical manual**. 1999
- ROCHA, P.L.F.; SILVA, G.C da; POLIVANOV, H.; RIBEIRO, N.M.S.; MORES, E.O. & SOBREIRA, G.V.A. – **Enviromental and Engineering Geophysics - 4rth Meeting - EEGS'98-European Section, Barcelona (Espanha), 1998**.

- ROCHA, P.L.F., **Aplicações de Técnicas Geofísicas na Parte Emersa da Baía de Guanabara: uma Revisão Bibliográfica.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ Volume 26 / 2003. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, CCMN/UFRJ. Disponível em: <[www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario/anuario\\_igeo\\_2003\\_paula.pdf](http://www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario/anuario_igeo_2003_paula.pdf)> Acesso: em 2 de fevereiro de 2011.
- SILVA, E. A. ; LUNA, J. L. ; ROCHA, P. L. F. ; GAUZA, A. M. **Aplicação de Sismograma Sintético para Identificação de Fraturas no Poço UFRJ-1-RJ. 2010.** IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010.
- SCHÖN, J.H. **Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics**, Vol. 18, of Handbook of Geophysical Exploration, Oxford: Elsevier Science Ltd., 2nd edn. 1998, 583p. ISBN 0-08-044346-X
- SERRA, O. **Fundamentals of well-log interpretation.** ,V.1., Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1984, 423p. ISBN 0-444-43132 -7, 1984
- SCHLUMBERGER. **Log Interpretation Principles/Applications.** Texas: Schlumberger, 1989, 240p.



**APÊNDICE A**  
**PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS ROCHAS**

## APÊNDICE A PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS ROCHAS

### A.1 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS ROCHAS

Dentre as diversas áreas de estudo da física, a responsável pela compreensão da interação da matéria com campos elétricos e magnéticos é o eletromagnetismo clássico. Nesta área, são estudados os princípios de formação dos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos e seus efeitos nos corpos materiais.

Praticamente todo o eletromagnetismo clássico é resumido em um conjunto de equações denominadas de Equações de Maxwell, as quais revelam as relações entre campos, cargas e correntes (Griffiths, 1999):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (A1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (A2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (A3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (A4)$$

A equação (A1) mostra que um conjunto de cargas localizado em um ponto do espaço gera um campo elétrico, a equação (A2) mostra a inexistência de monopólos magnéticos, ou seja, a não existência de uma unidade de carga magnética, a equação (A3) correlaciona os campos elétricos e magnéticos, mostrando que a variação temporal de um campo magnético produz o surgimento de um campo elétrico no espaço e a equação (A4) mostra que campos magnéticos podem ser produzidos pelo deslocamento de cargas (corrente elétrica) e/ou pela variação temporal de um campo elétrico.

Outras equações de extrema importância são a de definição de potencial elétrico (A5) e (A6), densidade de corrente (A7), corrente elétrica (A8) e a equação de continuidade de cargas (A9), dadas por (Griffiths, 1999):

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (A5)$$

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (A6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (A7)$$

$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{a} \quad (A8)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial}{\partial t} \rho \quad (A9)$$

As equações (A5) e (A6) definem o potencial elétrico, que nada mais é do que a energia por unidade de carga necessária para se produzir trabalho sobre corpos carregados na presença de um campo elétrico, sendo uma grandeza de fácil medida.

A equação (A5) permite calcular o potencial gerado por uma distribuição de cargas em um ponto distante “r” desta distribuição e a equação (A6) permite obter a diferença de potencial entre dois pontos de uma região do espaço onde existe um campo elétrico presente.

A equação (A7) é a definição de densidade de corrente elétrica, ressaltando as seguintes questões:

Nota-se que a densidade de corrente será proporcional ao campo elétrico presente no espaço onde o meio material se encontra, sendo esta proporcionalidade definida por um parâmetro  $\sigma$ , denominado de condutividade e que será uma característica deste meio material. Ao se realizar a integração da equação A7 é obtida a corrente elétrica que irá atravessar esta área.

A equação (A9) nada mais é do que a equação de continuidade de carga, que demonstra que a variação espacial da corrente elétrica será igual à variação temporal da quantidade de cargas disponíveis no material.

Após as breves alterações acima referidas, no que concerne aos meios materiais, as equações de Maxwell assumem a forma abaixo descrita (Griffiths,1999):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_b \quad (A10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{e} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad \rightarrow \text{permanecem}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad \rightarrow \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (A11)$$

Em (A10) e (A11) são observadas duas novas identidades  $\vec{D}$  e  $\vec{H}$ , onde  $\vec{D}$  é a Polarização do material submetido aos campos e  $\vec{H}$  é o campo magnético auxiliar (Griffiths,1999):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{A12})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{A13})$$

Nesta definição é observado o surgimento de dois parâmetros novos, a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética do material.

De forma geral, as variações da permeabilidade magnética na matéria e no vácuo são muito pequenas, de forma a ser adotado o valor da permeabilidade magnética do vácuo ( $\mu_0$ ) sem perdas práticas.

## A.2 CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE

Para que seja possível uma boa compreensão dos perfis elétricos (e eletromagnéticos) é necessário saber que as propriedades elétricas das rochas são baseadas na capacidade do meio ser condutor (transporte de cargas) e de ser polarizável (polarização dielétrica – separação das cargas). Propriedades estas descritas pelas equações (A7) e (A12) já abordadas.

Em estudos geofísicos, os perfis de indução medem a condutividade do meio, enquanto os perfis de eletrodo aferem a resistividade, que nada mais é do que o valor recíproco da condutividade  $\sigma$ , expresso por

$$\rho = 1/\sigma \quad (\text{A14})$$

A resistividade é tradicionalmente mais empregada do que a condutividade, sendo expressa em unidades de ohm\*metro, e a condutividade em unidades de Siemens/metro.

Os materiais podem, então, ser classificados de acordo com a sua resistividade ou condutividade (Olhoeft, 1985 apud Schön,1998) nos seguintes grupos:

**Condutores Metálicos:** Materiais onde há distribuição uniforme de elétrons de valência que são fracamente ligados ou associados a um átomo em particular. Seu movimento é restringido por colisões entre elétrons-phonons, elétron-elétron, e por colisões com imperfeições ou impurezas no material. A condutividade neste material cresce conforme a temperatura diminui (exceto próximo do zero absoluto).

**Não-Condutores:** Neste material os elétrons são fortemente ligados a um átomo específico devido a barreiras energéticas entre os átomos da rede. Neste material ocorre o aumento da condutividade devido ao aumento da temperatura, pois os elétrons adquirirão energia cinética suficiente para ultrapassar as barreiras de energia entre os átomos. A maioria dos minerais e rochas pertence a essa categoria, com as seguintes subdivisões:

**Isolantes:** São materiais cujas barreiras de energia são extremamente grandes, de forma que a probabilidade de um elétron conseguir romper tais barreiras é praticamente nula. Assim os elétrons raramente se tornam transportadores de carga;

**Semicondutores:** as barreiras de energia são levemente maiores do que a energia térmica de ativação a temperatura ambiente. Em altas temperaturas os elétrons passam a ter energia suficiente para romper tais barreiras. Em baixas temperaturas o transporte de cargas pode ocorrer pelo fluxo de elétrons ou buracos, utilizando caminhos proporcionados por impurezas associadas ao material (dopagem), que diminuem as barreiras de potencial.

**Eletrólitos:** ocorre dissociação iônica quando tratados apropriadamente, ou seja, quando há dissolução ou quando derretidos. O movimento dos portadores de carga é dificultado por interações inter partículas (colisões, viscosidade do meio, etc). Neste caso, a condutividade elétrica irá aumentar junto com a temperatura até um ponto crítico a partir do qual a condutividade irá decair com qualquer aumento da temperatura.

O comportamento pode ser definido de forma geral através da Tabela A1.

*Tabela A1 - Classificação de comportamento elétrico de acordo com a condutividade (Schön,1998)*

<b>Tipo de Comportamento</b>	<b>Condutividade (S/m)</b>
Condutores	$\sigma > 10^5$
Semicondutores	$10^5 > \sigma > 10^{-8}$
Não-Condutores	$10^{-8} > \sigma$

Poucos são os condutores metálicos em condições ambientes, como por exemplo o ouro, a prata e o cobre. A maioria dos minerais apresenta comportamento semicondutor (sulfetos e óxidos – range de  $10^4 > \rho > 10^4$ ) ou isolante (a maioria dos silicatos com range de  $10^{17} > \rho > 10^9$ ).

Para a água é observada a variação da condutividade com a salinidade, de forma que temos valores numa faixa que abrange desde a água pura até a água extremamente saturada de sais ( $5 \times 10^{-6} < \rho < 10^2$ ).

A associação destes materiais varre o range de resistividade entre  $10^{17} < \rho < 10^{-8}$  Ohm\*m.

Para cada tipo de condução descrita, podem ser citados os seguintes exemplos de rochas ou minerais:

- Condução Metálica (metais nativos): cobre, ouro e grafite;
- Condução Eletrônica Semicondutora: ilmenita, magnetita, pirita e galena;
- Condução Eletrolítica, neste caso observa-se a seguinte subdivisão:
  - Eletrólitos Sólidos (cristais iônicos): Segundo Keller (1989) apud Schön, 1998, a maioria dos minerais formadores de rochas funciona como eletrólitos sólidos através do transporte de corrente pela rede cristalina tendo íons como portadores de carga;
  - Solução Eletrolítica em Água: em rochas aquíferas a condução eletrolítica é o fator predominante da condutividade da rocha, em decorrência da água com sais dissolvidos nos poros. Cumpre registrar que a condutividade da água irá depender das suas condições de saturação e temperatura.

### **A.3 POLARIZAÇÃO DIELÉTRICA**

A polarização dielétrica é uma redistribuição das cargas de um corpo em decorrência de fatores externos (campos elétricos ou eletromagnéticos) gerando, assim, uma polarização em um corpo eletricamente neutro. Esta nova configuração poderá então afetar o campo total e conseqüentemente a corrente elétrica (Griffiths, 1999).

Em rochas, a polarização poderá ocorrer por um dos mecanismos abaixo elencados, aparecendo na ordem de maior para menor ocorrência (Schön, 1998):

- Polarização Eletrônica: Ocorrerá a distorção da nuvem eletrônica do átomo, em resposta a presença de um campo elétrico externo, de forma que o átomo passa a ter uma distribuição assimétrica das cargas, embora continue com carga total neutra.
- Polarização Molecular: Observa-se um efeito semelhante ao acima descrito, porém, ao invés da distorção de um átomo, ocorrerá a distorção de uma molécula inteira;
- Polarização Iônica: Ocorrerá uma distribuição dos íons presentes no material em virtude da presença de um campo elétrico externo;
- Polarização de Orientação: Caso o material possua moléculas polares, tais moléculas se alinharão de acordo com a orientação do campo elétrico externo. Neste caso não ocorre deformação das mesmas;
- Polarização Interfacial: Separação e acúmulo de cargas em regiões onde ocorram mudanças das propriedades elétricas do material devido à migração de cargas em resposta a um campo elétrico externo.

#### **A.4 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA**

As rochas são definidas como agregados de minerais, sendo a maioria destes, classificados como dielétricos com valores de resistividade bem definidos.

Carbonetos e silicatos, por exemplo, têm resistividades superiores a  $10^9 \Omega m$  de forma a constituírem materiais isolantes. Os minerais condutores, por sua vez, são comparativamente raros na crosta terrestre.

Os minerais foram classificados por Kobranova (1989) apud Schön, 1998 em três grupos:

- Metais Nativos (em sua sequencia natural e o grafite): resistividade elétrica na faixa de  $10^{-8}$  até  $10^{-5} \Omega m$ ;
- Grupos de sulfetos e alguns óxidos: resistividade elétrica na faixa de  $10^{-6}$  até  $10^{11} \Omega m$ ;

- Não Metais Nativos (enxofre, diamante e selênio, exceto grafite, silicatos, carbonatos, cloretos, fosfatos, e minerais de outras classes): resistividade na ordem de  $5 \times 10^7$  até  $2,7 \times 10^{16} \Omega\text{m}$ . São encontrados principalmente valores acima de  $10^{11} \Omega\text{m}$ .

Mesmo nesta divisão em grupos, é possível observar que um único mineral pode apresentar um longo range de valores para sua resistividade. Este fato é decorrente da presença de impurezas na estrutura do cristal, que pode gerar efeitos de anisotropia.

A Figura A1 mostra o range de resistividade de alguns minerais.

Mineral	Log $\rho$ (Ohm m)	
Grafite	-6,5 até ~ -1,5	
Magnetita	-5 até -4	
Covelita	-7 até -4	
Cobre	~8	
Hematita	-2,5 até 2	
Pirita	-5 até 0	
Galena	-5 até -1	
Calcopirita	-4 até -2	
Bornita	-5 até -3	

*Figura A1– Range de valores de resistividade elétrica para alguns minerais (adaptado de Schön, 1998).*

No que concerne à permissividade dielétrica, são encontradas variações entre 4 e 10 para os principais formadores de rochas, embora os grupos dos sulfetos e dos óxidos possuam valores superiores.

Pode ser citado como exemplo dos efeitos da anisotropia o grafite, que possui resistividade em direções paralelas aos planos de clivagem com um range entre  $36 \times 10^{-8}$  -  $10^{-6}$  Ohms m e em direções perpendiculares valores na faixa de  $18 \times 10^{-6}$  -  $99 \times 10^{-4}$  Ohms m, e o



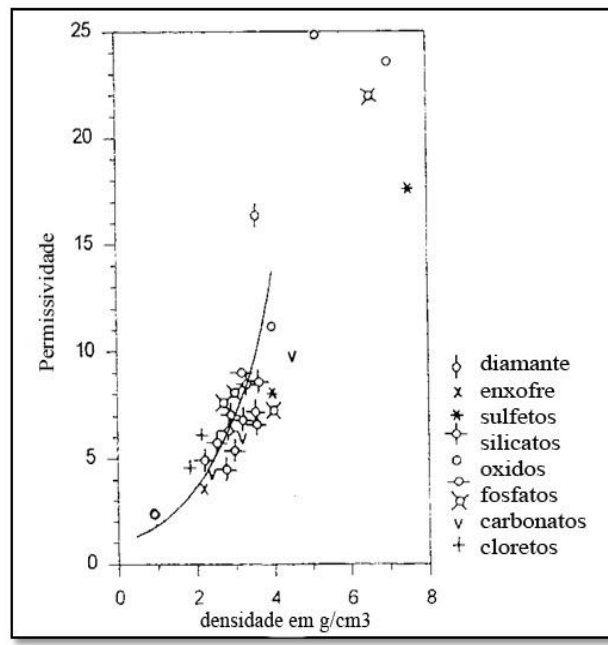
quartzo, que possui constante dielétrica de 4,96, perpendicular ao eixo ótico e de 5,05 paralelo ao mesmo (Schön, 1998).

A permissividade dielétrica pode ser associada à massa da amostra, uma vez que o número de unidades de carga por volume é proporcional à densidade. É observado tal fato na Figura A2, de onde pode ser obtida a seguinte correlação:

$$\epsilon_r = (1,93 \pm 0,17)^d \quad (A15)$$

Onde “d” é densidade do material.

Caso o mineral possua água ou um semiconductor (sulfetos), esta aproximação perderá sua validade.



*Figura A2 – Relação entre permissividade dielétrica e densidade para grupos de minerais (Keller, 1989) onde a curva representa o modelo teórico (adaptado de Schön, 1998).*

## A.5 INFLUÊNCIA DO FLUIDO CONTIDO NOS POROS

Os componentes que formam as rochas são, em sua maioria, materiais não condutores. Considerando esta informação, tem origem a seguinte questão: Como as rochas podem conduzir correntes elétricas?

A resposta a esta indagação é fornecida pela estrutura das rochas.

Em geral, são encontradas nas rochas regiões “vazias”, não preenchidas pelo material da matriz (parte sólida da rocha), sendo estas regiões denominadas poros.

A quantidade de poros irá depender dos processos de formação da rocha (porosidade primária) ou de eventos posteriores a sua consolidação (porosidade secundária). Os aspectos relevantes de cada tipo de porosidade serão discutidos mais adiante, e nesta etapa, será dada atenção exclusiva na presença destes espaços vazios.

Os referidos espaços vazios podem, então, ser preenchidos por outros elementos, como, por exemplo, o ar próximo à superfície terrestre, que possui resistividade da ordem de  $10^{14}$   $\Omega\text{m}$  (gases de hidrocarbonetos apresentam valores semelhantes) ou por óleo, que apresenta resistividade da ordem de  $\rho_{\text{óleo}} \gg 10^9 \dots 10^{16}$  Ohms m (Schön, 1998).

Na hipótese de poros preenchidos por soluções de água com sais, irá ocorrer o processo de condução eletrolítica. Este será o mecanismo predominante no caso de rochas fraturadas ou porosas e irá determinar a condutividade do material, sendo influenciado pelo tipo, concentração e temperatura dos fluidos, pelo volume ocupado (porosidade e saturação) e distribuição do eletrólito na rocha.

A condutividade da solução eletrolítica será governada pelos seguintes fatores: concentração iônica (sal por unidade de volume e dissociação), número de carga e mobilidade dos íons dissolvidos; temperatura (energia cinética) e processos de interações entre os íons da solução no caso de altas concentrações.

Em relação à influência da permissividade dielétrica, a água apresenta grande contraste com a maioria dos fluidos, possuindo um valor de aproximadamente 81, enquanto outros fluidos, geralmente, situam-se na faixa de 1 a 3.

Na Tabela A2 é possível observar o valor da permissividade dielétrica relativa para diversos materiais.

**Tabela A2 – Permissividade dielétrica relativa de alguns fluidos encontrados em poros. As referências dos valores são: E – Ebert (1976), Le – Lexikon der Physik (1972), Ly – Lytle (1974), R – Rshewki and Novik (1978), W – Western Atlas (1992), S – Schlumberger (1989) e U – Urban et al (1994). (adaptado de Schön,1998)**

Fluído	$\epsilon_r$	Ref.
Água	80,8	Le
Glicerina	56,2	U
Nitrobenzeno	36,4	E
Etanol	25,8	U
Acetona	21,5	E
Diesel	2,0 - 2,4	U
Óleo Natural	2,0 - 2,7	R
	2,0 - 2,4	W,S
Petróleo	2,0 - 2,2	E
Ar	1,0006	L
Gelo	3,1	E
Gelo, feito de água destilada pura	4,15 (-12°C, 10 <sup>6</sup> Hz)	Ly
	3,45 (-12°C, 10 <sup>8</sup> Hz)	
	3,2 (-12°C, 10 <sup>9</sup> Hz)	
Neve, recém precipitada	1,20 (-20°C, 10 <sup>6</sup> ⇔ 10 <sup>9</sup> Hz)	Ly
Neve, altamente compactada, seguida de chuva	1,55 (-6°C, 10 <sup>6</sup> Hz)	

Uma das possíveis aplicações da medida de permissividade dielétrica é na determinação de processos de contaminação do solo.

A Tabela A3 traz os valores dos principais elementos contaminantes (determinados pelo índice de ocorrências de acidentes).

**Tabela A3 – Permissividade dielétrica relativa e outras propriedades de alguns dos contaminantes orgânicos mais comuns. Extraído de Schön,1998**

Químico	CAS RN	dg/cm <sup>3</sup>	solEm H2O%	vapEm kPa	$\epsilon_r$	log $\rho$
Tricloreteno (TCE)	79-01-6	1,46	0,11	8	3,42	6
Dicloreto metano	75-09-2	1,32	1,5	50	9	8
Tetracloro eteno (PCE)	127-18-4	1,62	0,01	2	2,3	7
Tolueno	108-88-3	0,87	0,05	4	2,4	7
1,1-Dicloroetano	75-34-3	1,17	0,5	10		7
Benzeno	71-43-2	0,879	0,17	10	2,28	9
cloroforme	67-66-3	1,49	0,8	4,8	20	8

Outro fator que tem grande peso na condutividade das rochas é associada à salinidade da água contida nos poros. Abaixo pode ser visto um gráfico que associa o valor da salinidade (em PPM) e a temperatura (em °F ou °C) com a resistividade da solução (Figura A3).

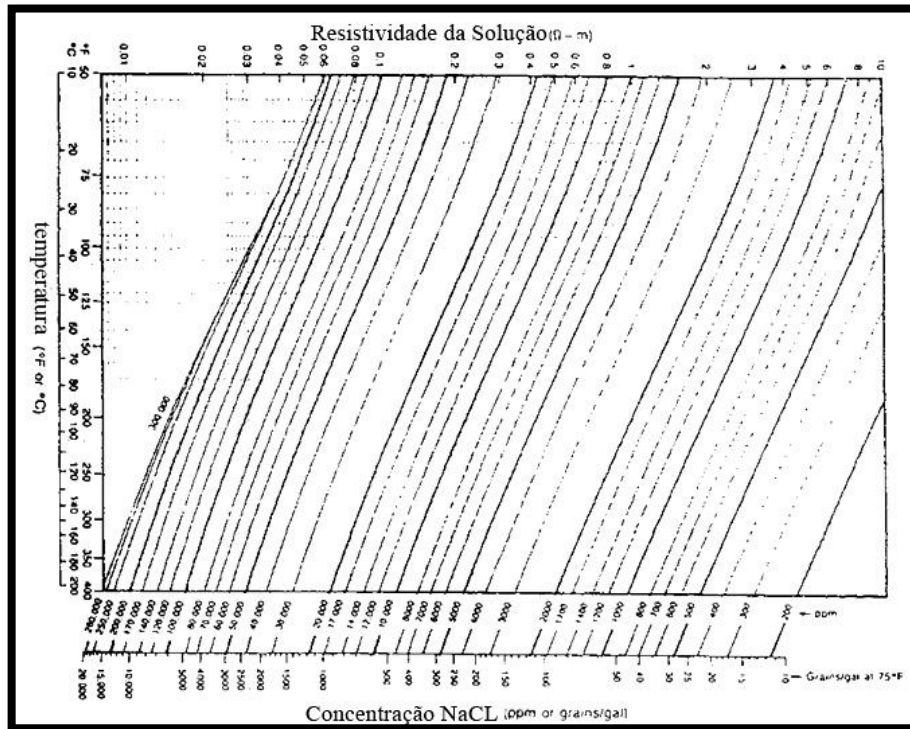


Figura A3 – Relação entre salinidade, temperatura e resistividade de soluções. Extraído de Schön, 1998.

Estes resultados são obtidos para o NaCl. No caso de outros sais, procedimentos matemáticos são utilizados de forma a obter o valor equivalente em NaCl do sal dissolvido na solução.

## A.6 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS ROCHAS

Nos itens anteriores, foram abordados fatores que influenciam nas propriedades elétricas das rochas, sendo observado que de forma geral, os seus minerais formadores possuem resistividades extremamente altas, o que levaria a conclusão de que, se a rocha estudada for completamente seca, valores altos de condutividade serão encontrados.

No caso de rochas fraturadas ou porosas, a condutividade elétrica será governada pela condutividade do fluido presente e das interações do mesmo com a matriz. Desta forma, as rochas serão divididas em dois grandes grupos:

Rochas porosas, rochas fraturadas ou rochas densas totalmente secas;

Rochas porosas ou rochas fraturadas, em ambos os casos, preenchidas por água.

Na Figura A4, são apresentados intervalos de resistividade e permissividade dielétrica relativa de diversos tipos de rochas.

Pode-se notar como a presença de água influencia diretamente estes valores, gerando uma sobreposição dos mesmos, de forma que sua utilização para distinguir entre os tipos de rochas não é muito precisa.

Ainda na Figura A4 sob análise, pode ser observada a ocorrência de um decréscimo da resistividade conforme se verifica o aumento da porosidade (ou fraturas), assim como a ocorrência de um aumento da permissividade acompanhando este aumento de porosidade. Estes dois fatos são esperados, pois, quanto mais poros existirem, maior a quantidade de água associada a saís, melhor a condutividade e maior a influência da permissividade da água (~81), muito maior, portanto, em média, do que a da matriz.

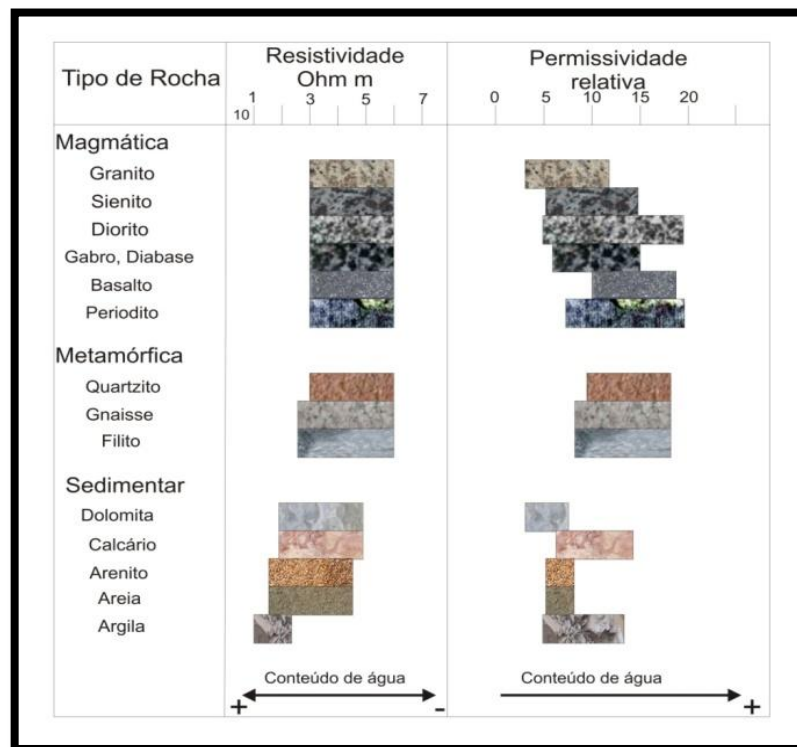
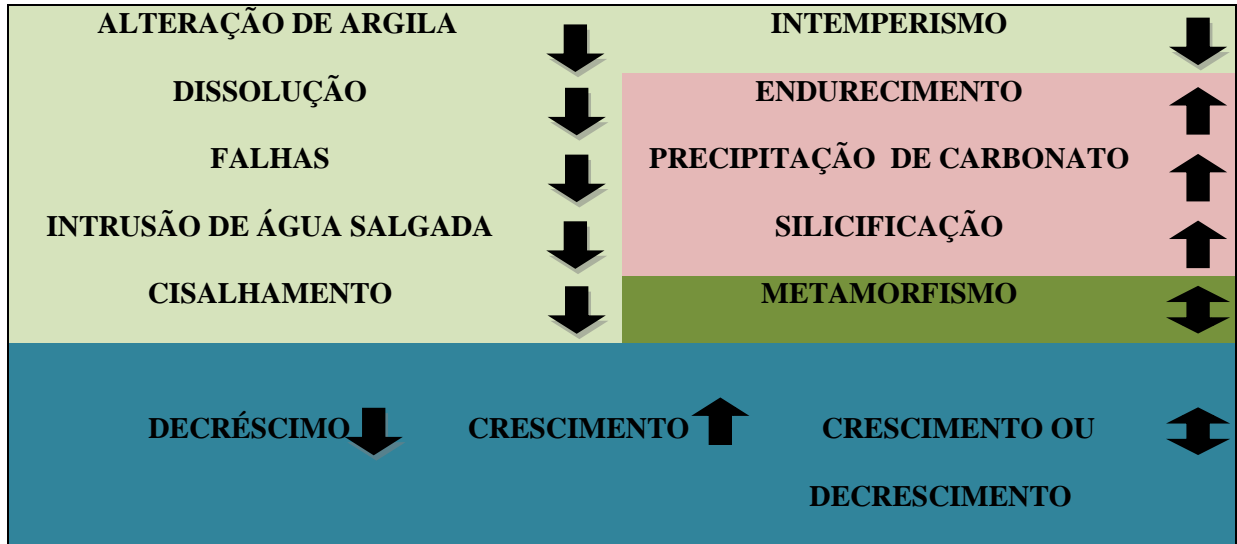


Figura A4 – Range de resistividade específica e permissividade dielétrica para diversos tipos de rochas – adaptado de Schön,1998.

Ward (1990) (apud Schön, 2004) elaborou um diagrama (Figura A5) que descreve os efeitos de vários processos geológicos na resistividade elétrica das rochas, onde pode ser observado que a grande maioria destes processos reduz os valores de resistividade.



*Figura A5 – Variação de resistividade causada por efeitos geológicos, adaptado de Schön, 1998.*

Em todo estudo de uma propriedade física, é necessário o desenvolvimento de modelos e técnicas matemáticas adequadas à descrição do sistema em questão. Desta forma, no estudo das propriedades elétricas das rochas, foram desenvolvidos diversos modelos, que podem ser divididos basicamente em dois grupos: modelos baseados na descrição individual dos componentes elétricos (condutividade, permissividade dielétrica e fenômenos de interface) e modelos baseados na descrição das interações ou efeitos complexos do elemento elétrico ativo (por exemplo, a descrição da interação entre o material eletrolítico e efeitos de superfície considerando condições de contorno).

## **A.7 ROCHAS DENSAS OU FRATURADAS SEM CONTEÚDO DE ÁGUA**

A ocorrência de rochas densas (sem fraturas ou poros) ou completamente secas nas regiões mais superficiais da crosta é extremamente pequena, e as mesmas possuem resistividades extremamente altas, em faixas superiores a  $10^4$  Ohm\*m, salvo nos casos em que as mesmas contenham grafite ou minerais condutores em abundância em suas matrizes.

Nestas rochas, a permeabilidade dielétrica relativa é geralmente baixa, e se encontra na faixa do mineral mais abundante em sua composição, exceto nos casos em que existam

minerais acessórios, minérios ou grafite, o que fará com que o sistema possua uma permeabilidade alta.

Na Tabela A4, são encontrados os valores para alguns minerais e minérios.

*Tabela A4 – Resistividade para alguns minerais e minérios (Schön,1998).*

Mineral / Minério Principal	Resistividade elétrica específica	
	Minério	Mineral (puro)
Pirita	$10^{-4} \dots 10^1$	$5 \times 10^{-5} \dots 5 \times 10^{-2}$
Calcopirita	$10^{-4} \dots 10^{-1}$	$10^{-4} \dots 7 \times 10^{-4}$
Pirrotita	$10^{-5} \dots 10^{-3}$	$10^{-5} \dots 5 \times 10^{-5}$
arsenopirita	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	$3 \times 10^{-4}$
galena	$10^{-2} \dots 3 \times 10^2$	$3 \times 10^{-5} \dots 3 \times 10^{-4}$
magnetita	$10^{-1} \dots 10$	$10^{-4}$

A condução elétrica será controlada pelas propriedades da matriz rochosa, semi-condução, defeitos da rede e materiais acessórios condutores). Isto acarreta três importantes observações:

Valores altos de resistividade absoluta;

Temperatura x Resistividade: redução da resistividade com o aumento da temperatura;

Pressão x Resistividade: queda não linear da resistividade com o aumento de pressão.

A alta resistividade é explicada pela ausência de água; a queda da resistividade com a temperatura ocorre devido à maior energia cinética dos átomos das redes dos minerais formadores da rocha, o que facilita a fuga de elétrons; com o aumento da pressão, fraturas e micro fraturas tendem a se fechar. Estes elementos atuam na rocha seca como regiões mais resistivas do que a matriz da rocha, de forma que, ao se fecharem, a resistividade da rocha como um todo irá diminuir.

## **A.8 ROCHAS POROSAS OU FRATURADAS COM ÁGUA**

Para rochas fraturadas ou porosas com água os fatores dominantes da resistividade elétrica são as propriedades do fluido.

Como se sabe a água é extremamente mais condutora do que a matriz de rocha, de forma que os efeitos resistivos da matriz terão pouco peso sobre a resistividade total do sistema. Isto só não se aplica no caso de existir minérios ou grafite na composição da matriz, os quais contribuem significativamente para a queda da resistividade.

A água contida no interior das rochas normalmente possui sais dissolvidos, o que acarreta a criação de ânions e cátions provenientes da dissociação destas moléculas.

Ânions e cátions podem contribuir de duas formas para a condutividade do sistema (Schön,1998):

Condução eletrolítica intrínseca: a geometria do espaço poroso (interconectividade entre poros ou fraturas) determina o caminho da corrente elétrica. Assim, porosidade e tortuosidade da rocha são os fatores de grande peso para a condutividade do sistema. A condutividade se torna função das propriedades eletrolíticas do fluido e da geometria interna da rocha;

Interações eletroquímicas: neste caso, tais interações ocorrem devido ao contato entre o fluido e a matriz. O caminho para a corrente elétrica é definido pelas propriedades da superfície interna da rocha. A condutividade de interface poderá então ser considerada totalmente independente da condutividade eletrolítica.

Nas chamadas rochas limpas (sem a presença de argilas ou xisto) a condução eletrolítica será predominante enquanto o processo de interação eletroquímica será dominante em rochas que contenham argilas ou xistos.

Nas rochas onde o processo de interação eletroquímica foi observado, a interface possuía características comportamentais de materiais condutores e de capacitores, o que demonstra a complexidade deste tipo de condução. A resistividade destas rochas pode ser obtida através da equação de Archie, desenvolvida para rochas limpas, e depois estendida para o caso de termos argilas na matriz.

Na tabela A5 pode ser observado os valores de resistividade obtidos para diversos tipos de rochas com origens e idades diferentes (com água natural em seus poros) a uma temperatura de 20° C (Schön,1998).



**Tabela A5 – Resistividade Específica (Valor Médio e Range) (Schön,1998)**

Fonte das amostras de água	n	Resistividade Específica	
		Média	Range
Rochas Ígneas, Europa	314	7,6	3,0 – 4,0
Rochas Ígneas, África do Súl	175	11	0,5 – 80
Rochas Metamórficas, África do Sul	88	7,6	0,86 – 80
Rochas Metamórficas, Pré-cambriano australiano	31	3,6	1,5 – 8,6
Sedimentos continentais recentes e do pleistoceno, Europa	610	3,9	1,0 – 27
Sedimentos recentes e do pleistoceno, Austrália	323	3,2	0,38 – 80
Sedimentos do Terciário, Europa	993	1,4	0,70 – 3,5
Rochas do Terciário (Mioceno e Oligoceno), Austrália	240	3,2	1,35 – 10
Rochas Sedimentares do Mesozóico, Europa	105	2,5	0,31 – 47
Rochas Sedimentares do Paleozóico, Europa	161	0,93	0,29 – 7,1
Águas com cloreto vindas de campos de petróleo	967	0,16	0,049 – 0,95
Águas com sulfato vindas de campos de petróleo	256	1,20	0,43 – 5,0
Águas com bicarbonato vindas de campos de petróleo	630	0,98	0,24 – 10

## A.9 ANISOTROPIA DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS

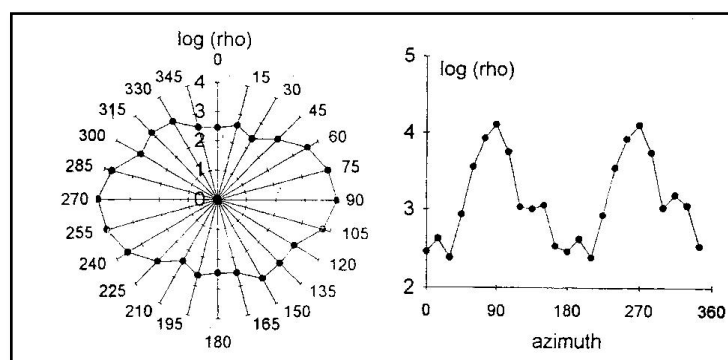
A anisotropia da condutividade (ou resistividade) elétrica em rochas é causada pelos seguintes fatores:

Orientação preferencial de minerais ou acessórios condutores (grafite, minérios, etc);

Orientação preferencial de poros ou rachaduras úmidas ou saturadas de água;

Camadas finas de componentes da rocha que possuam condutividades diferentes (“junção” em camadas de areia e argila).

A seguir é observada a resistividade específica azimutal de uma amostra de rocha carbonática com baixa porosidade. A anisotropia registrada é causada pela distribuição de fraturas saturadas de água.



**Figura A6 - Resistividade específica obtida de uma amostra de rocha carbonática de baixa porosidade. Os valores menores de resistividade indicam a orientação de microfraturas (adaptado de Schön, 1998).**