



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

JÉSSICA PENA HENRIQUES

**PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE UM MODELO FÍSICO EM ESCALA  
REDUZIDA PARA EXPERIMENTAÇÃO EM GEOFÍSICA DE POÇO.**

Belém

2014

JÉSSICA PENA HENRIQUES

**PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE UM MODELO FÍSICO EM ESCALA  
REDUZIDA PARA EXPERIMENTAÇÃO EM GEOFÍSICA DE POÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. MSc. Alberto Leandro de Melo.

Belém – Pará

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

H519p    Henriques, Jéssica Pena

Projeto de construção de um modelo físico em escala reduzida para experimentação em geofísica de poço. / Jéssica Pena Henriques – 2014

85 f. : il.

Orientador: Alberto Leandro de Melo

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2014.

1. Geofísica. 2. Geofísica de poço. 3. Modelagem analógica. 4. Experimentação em geofísica. I. Título.

CDD 22. ed.: 551

---

JÉSSICA PENA HENRIQUES

**PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE UM MODELO FÍSICO EM ESCALA  
REDUZIDA PARA EXPERIMENTAÇÃO EM GEOFÍSICA DE POÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação: \_\_\_\_ / 04 / 2014

Conceito:

Banca Examinadora:

---

Prof. Alberto Leandro de Melo – Orientador  
Mestre em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. José Jadsom Sampaio de Figueiredo – Membro  
Doutor em Ciências e Engenharia do Petróleo.  
Universidade Federal do Pará

---

Profa. – Carolina Barros da Silva - Membro  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e Nossa Senhora de Nazaré por nunca faltarem em minha vida.

À minha mãe Ana Alzira Sandim Pena por ter sido/ser absolutamente tudo em minha vida, além de meu maior exemplo de pessoa e amor.

À minha família, em especial, meus avós Luzia Sandim (*In memoriam*) e Antenor Pena, tia Zélia, tio Edson e minha irmã de coração Rose e sua família pelo apoio, torcida, orientação e carinho.

À Universidade Federal do Pará, Faculdade de Geofísica, por ser, literalmente, minha segunda casa.

Ao meu orientador Alberto Leandro de Melo por ter sempre acreditado e confiado em mim, pelos conhecimentos compartilhados e pelo apoio incondicional neste e em tantos outros trabalhos.

Aos meus professores da Faculdade de Geofísica por todos os conhecimentos fornecidos em especial aos professores Lúcia Maria, Cristiano Martins, Geraldo das Virgens e André Andrade.

À professora Ellen Gomes por todo apoio e confiança.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET)-Geofísica pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Carlos Eduardo e João Alves que estiveram comigo desde o início superando juntos todas as dificuldades.

Aos amigos feitos no meio do caminho da graduação Jéssica Lia, Carol Sena, Bruce Fabini e Diogo Lopes que dividiram suas experiências e conhecimentos comigo.

À minha turma de 2010 por nunca deixar a rotina se instalar.

Às secretárias da Geofísica: Socorro, Elaine, Beni e Bela por toda a ajuda e apoio no dia-a-dia.

Às alunas Paula Franco e Luize Baltazar por me ajudarem na parte prática deste trabalho.

Aos meus amigos de infância que aguentaram todos os meus dramas mesmo sem entender do que se tratava.

Aos amigos que sempre acreditaram em mim.

Aos amigos do time de futsal feminino da UFPA, e todos os outros que fiz por meio dele, por me manterem feliz e sã nas horas mais difíceis.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra sempre criaram ambientes propícios para que eu chegasse até aqui.

*“Crê em ti mesmo, age e verá os resultados.  
Quando te esforças, a vida também se  
esforça para te ajudar.”*

*(Chico Xavier)*

## RESUMO

A modelagem analógica se mostrou muito eficiente em várias áreas do conhecimento e, em especial, na Geofísica. A partir dessa eficácia juntamente com a dificuldade de assimilar alguns conceitos e procedimentos da Geofísica de Poço percebidos pela autora, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um projeto de construção de um modelo físico em escala reduzida para experimentação em Geofísica de Poço. Apresentando os conceitos básicos que envolvem tanto o ambiente geológico exposto a perfilagem de poço quanto a própria perfilagem até as dificuldades para a montagem de um modelo em escala reduzida, seu comprometimento com a teoria da similitude e suas limitações. Desenvolvendo uma metodologia que parte desde pesquisa de alguns trabalhos de modelagem analógica até a as condições para construção do modelo passando, principalmente, por testes de vários tipos. A qual, além de tudo, o modelo deve ser validado com o desenvolvimento de uma sonda elétrica também em escala reduzida.

Palavras chaves: Geofísica. Geofísica de poço. Modelagem analógica. Experimentação em geofísica.

## **ABSTRACT**

The analog modeling proved very efficient in many areas of knowledge and, in particular, in Geophysics. From this effectiveness with the difficulty for understand certain concepts and procedures of Well Logging perceived by the author, this paper proposes the development of a project to build a physical model with small-scale experiments in Well Logging. Introducing the basic concepts involving the exposed geological environment logging, logging itself and the difficulties in build a small-scale model, its commitment to the theory of similarity and its limitations. Developing a methodology of research from some analog modeling work until the conditions for model building through mainly by various types of tests. Which, after all, the model should be validated with the development of an electric probe also scaled.

Key-words: Geophysics. Well Logging. Analog modeling. Geophysical experimentation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo de rocha para porosidade.....	17
Figura 2 - Modelo de rocha para argilosidade.....	18
Figura 3 - Modelo de rocha saturada com diversos tipos de fluído... ..	19
Figura 4 - Plote em escala logarítmica da razão entre resistividades versos saturação de água. ....	22
Figura 5 - Intervalo de resistividade de rochas mais comuns.....	24
Figura 6 - Fatores que alteram a seleção de sedimentos. ....	27
Figura 7 - Tipos de distribuição da argila. ....	28
Figura 8 - Diagrama de deformação x tensão nas rochas.....	30
Figura 9 - Tipos de falhamento.....	30
Figura 10 - Conjunto de relação das similitudes.....	31
Figura 11 - Representação espacial entre os planos C e M.....	33
Figura 12 - Esquema explicativo da similitude cinemática. ....	34
Figura 13 - Parâmetros de um condutor elétrico cilíndrico. ....	39
Figura 14 - Fluxo de corrente a partir de um único eletrodo na superfície. ....	41
Figura 15 - Configuração de eletrodos geral para medidas de eletrorresistividade... ..	42
Figura 16 - Fração de corrente penetrante a profundidade abaixo de Z com separação de eletrodos de L.....	43
Figura 17 - Esquema de oxi-redução responsável pelo efeito SP.....	44
Figura 18 - O ambiente do poço.....	47
Figura 19 - Forma geral do arranjo de eletrodos na perfilagem de eletrorresistividade com a área correspondente a sua energização. ....	49
Figura 20 - Perfil normal.....	50
Figura 21 - Perfil de eletrorresistividade da normal curta (16") e da longa (64"). .....	51
Figura 22 - Perfil de SP. ....	52
Figura 23 - Perfis de potencial espontâneo e resistividade. ....	53
Figura 24 - Sequência estratigráfica do bloco I. ....	56
Figura 25 - Sequência estratigráfica do bloco II. ....	57
Figura 26 - Sequência estratigráfica do bloco III. ....	58
Figura 27 - Sequência estratigráfica do modelo.....	60
Figura 28 - Estrutura metálica de contenção.....	61
Figura 29 - Esquema de fixação e proteção das placas.....	63

Figura 30 - Esquema explicativo de entrada e saída de fluido. ....	64
Figura 31 - Vista geral do mecanismo de injeção e retirada de fluido do modelo. ....	64
Figura 32 - Efeito da compactação mecânica nas camadas. a) Fluido aquoso de deposição b) sedimentos argilosos em suspensão c) precipitação da camada argilosa d) sedimentos arenosos em deposição e precipitação d) deposição da camada arenosa sobre a camada argilosa. ....	67
Figura 33 - Expansão da camada argilosa no poço. ....	68
Figura 34 - Amostras de teste. ....	69
Figura 35 - Amostra ótima. ....	70
Figura 36 - Efeito do poço de tubo furado. ....	73
Figura 37 - Efeito do poço de espiras. ....	74
Figura 38 - Diagrama de blocos do sistema de perfilagem geofísica de poço MICRORANGERII. ....	76
Figura 39 - Sonda elétrica ELXG (Robertson Geologging). ....	77
Figura 40 - Foto da placa NI MyDaq. ....	79
Figura 41 - Diagrama de blocos do sistema de perfilagem geofísica de poço no modelo. ....	80
Figura 42 - Sonda com pré-amplificador. ....	81
Figura 43 - Sinais nos eletrodos de corrente no eletrodo M16. (a) sem efeito SP e (b) com efeito SP. ....	82
Figura 44 - Perfil de potencial espontâneo e eletrorresistividade esperado para o modelo. ....	85

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
2.	HISTÓRICO.....	15
3.	PROPRIEDADES DAS ROCHAS .....	17
<b>3.1.</b>	<b>Propriedades petrofísicas .....</b>	<b>17</b>
3.1.1.	Porosidade .....	17
3.1.2.	Argilosidade .....	18
3.1.3.	Saturação de fluído.....	19
3.1.4.	Permeabilidade.....	19
3.1.5.	Lei de Archie.....	20
<b>3.2.</b>	<b>Propriedades elétricas.....</b>	<b>23</b>
3.2.1.	Resistividade das rochas e minerais .....	24
4.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	26
<b>4.1.</b>	<b>Categorias de rocha.....</b>	<b>26</b>
4.1.1.	Clásticas .....	26
4.1.2.	Rochas de carbonato.....	28
<b>4.2.</b>	<b>Ambiente deposicional .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.</b>	<b>Tipos de estruturas .....</b>	<b>29</b>
5.	TEORIA DA SIMILITUDE .....	31
6.	MÉTODOS ELÉTRICOS .....	36
<b>6.1.</b>	<b>Conceitos elétricos básicos .....</b>	<b>36</b>
6.1.1.	Cargas, Força elétrica, Lei de Coulomb e Campo Elétrico. ....	36
6.1.2.	Potencial Elétrico .....	37
6.1.3.	Corrente elétrica .....	38
6.1.4.	Lei de Ohm .....	38
<b>6.2.</b>	<b>Eletrorresistividade (ER) .....</b>	<b>40</b>
6.2.1.	Fluxo de corrente no solo .....	40
<b>6.3.</b>	<b>Potencial espontâneo (SP) .....</b>	<b>44</b>
7.	PERFILAGEM DE GEOFÍSICA DE POÇO .....	46
<b>7.1.</b>	<b>Perfilagem de ER.....</b>	<b>48</b>
<b>7.2.</b>	<b>Perfilagem de SP .....</b>	<b>52</b>
8.	METODOLOGIA.....	54
<b>8.1.</b>	<b>Protótipo geológico .....</b>	<b>54</b>

<b>8.2.</b>	<b>O Modelo</b> .....	58
8.2.1.	Construção estrutural .....	61
8.2.2.	Construção do modelo.....	65
8.2.3.	Construção do poço.....	72
<b>8.3.</b>	<b>Validação do modelo</b> .....	75
8.3.1.	Sonda .....	75
9.	RESULTADOS ESPERADOS .....	84
10.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade cada vez mais emergente de recursos minerais e energéticos vindas da subsuperfície, sobretudo o petróleo, tem aumentado a procura de profissionais das geociências ligados ao desenvolvimento de trabalhos nessa área, em especial, o geofísico. Porém a demanda é maior que a oferta e nesse contexto surgiu em 2006, pela Faculdade de Graduação de Geofísica da Universidade Federal do Pará, a exposição “O que é Geofísica?” na qual são expostos modelos visuais e físicos em escala reduzida que exemplificam diversos conceitos geocientíficos de forma didático com intenção de incentivar jovens a seguirem a carreira de geocientistas.

Um dos experimentos apresentados na exposição é o de geofísica de poço no qual um modelo geológico sedimentar em disposição estratigráfica sedimentar é montada em um pequeno tanque de acrílico com um poço para passagem de uma sonda. Esse experimento serviu como inspiração para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

O objetivo deste trabalho é apresentar um projeto viável para construção de um modelo físico de um ambiente geológico de rochas sedimentares horizontalmente estratificadas, em escala reduzida e utiliza-lo, principalmente, como uma ferramenta didática e experimental para que estudantes de graduação tenham maior compreensão sobre métodos geofísicos aplicados à perfilagem de poço com o qual o professor poderá explorar quais as relações e efeitos entre a geologia e os parâmetros físicos do ambiente simulado.

Além de servir como um laboratório didático e experimental será possível usar o modelo para teste de ferramentas de perfilagem, pois ao longo da montagem haverá diferentes tipos de comportamento geológico, além da possibilidade de injeção de fluidos (água doce, água salgada, óleo e gás) que permitirá alterar a resistividade de algumas camadas.

O trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 apresentará um rápido levantamento histórico que assegura a utilização da modelagem e da perfilagem de poço, o capítulo 3 definirá as propriedades petrofísicas e elétricas das rochas

necessárias à aplicação dos métodos que validam a modelagem, o capítulo 4 vai expor o contexto geológico que rochas sedimentares são submetidas, o capítulo 5 explicará a teoria da similitude que assegura o uso da modelagem analógica, o capítulo 6 demonstrará os conceitos elétricos e como os métodos elétricos funcionam, o capítulo 7 explicitará as características que envolvem a perfuração de poço e como os métodos elétricos funcionam neste ambiente, o capítulo 8 descreverá todos os mecanismos que envolvem a montagem do modelo e como este será validado, o capítulo 9 apresentará os resultados esperados para o modelo, por fim, o capítulo 10 pontuará as conclusões e recomendações acerca do trabalho desenvolvido.

## 2. HISTÓRICO

Há séculos o homem faz poços com diversos objetivos, principalmente, escavados para retirada de água da subsuperfície. Porém, os primeiros registros de poços avaliados com métodos geofísicos datam de 1927 conduzidos pelos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger e guiados por trabalhos com medidas de resistividade na superfície feitos em 1911 pelo próprio Conrad. A ideia de Conrad constituiu em realizar medidas diretas da resistividade em um poço em profundidade. Foi quando em 5 de setembro de 1927 uma equipe liderada pelo físico Henri Doll usou uma sonda elétrica e registrou várias medidas em um poço de 500 metros de profundidade em Pechellbronn na França surgindo assim o perfil de resistividade elétrica. A partir de então a perfilagem passou a ser uma ferramenta necessária para avaliação de formação.

A modelagem física, ou modelagem analógica, na Geofísica surge como uma ferramenta para auxiliar a interpretação de dados reais obtidos em campo e possibilitar a proposição de um modelo geológico válido. Além disto, a modelagem também possibilita a proposição de possíveis modelos geológicos a partir de experimentos laboratoriais.

É importante lembrar os trabalhos pioneiros na área da modelagem analógica em escala reduzida de métodos eletromagnéticos que serviram como base para confirmar a eficácia da modelagem na Geofísica. Dentre os primeiros trabalhos, Sinclair (1932) utilizou-se de um experimento simples: mensurou as respostas de esferas metálicas e camadas finas em experimentos de condutores ao ar livre, abrindo um leque de experimentação de modelos aplicados em ar livre destacando os trabalhos de Lowrie e West (1965), Silva (1981), Queiroz (1986).

Na Universidade Federal do Pará foram desenvolvidos vários trabalhos em modelagem entre eles, pode-se destacar o conjunto de estudos sobre os problemas de perfilagem de resistividade por de indução eletromagnéticas de poço de petróleo como, especialmente, a dissertação de mestrado de Salvadoretti (1990) e a tese de doutorado de Carvalho (2000), ambos orientados pelo professor PhD Om Prakash Verma.

Quanto aos métodos elétricos utilizados na modelagem analógica é importante lembrar-se da tese de doutorado do Silva (2011) que produziu um modelo de meios porosos para estudar o sinal elétrico de potencial espontâneo produzido pelo fluxo de água.

### 3. PROPRIEDADES DAS ROCHAS

Os métodos geofísicos são aplicados na terra devido a algumas características das rochas. Serão abordadas aqui as propriedades petrofísicas e elétricas devido aos métodos utilizados.

#### 3.1. Propriedades petrofísicas

Alguns termos utilizados neste trabalho como: porosidade, saturação, argilosidade e permeabilidade são propriedades físicas, chamadas petrofísicas, das rochas sedimentares. Estes princípios são importantes, sobretudo, na Geofísica de Poço.

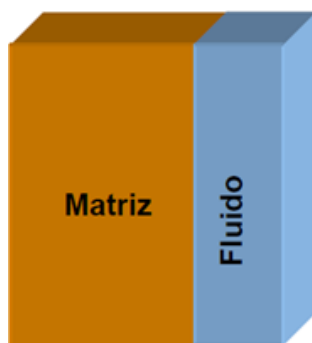
As propriedades petrofísicas são importantes, pois elas qualificam uma rocha. Ou seja, são conceitos que definem se a rocha é ou não um bom reservatório.

“São aquelas propriedades que identificam e definem as características de uma rocha sedimentar como reservatório de fluido (óleo, gás, água doce) e ainda, possibilitam a construção de uma escala de qualidade, que é fundamental para a definição das estratégias de exploração.” (ANDRADE, 2013, p. 43, não publicado)<sup>1</sup>.

##### 3.1.1. Porosidade

A porosidade ( $\emptyset$ ) expressa a capacidade de uma rocha armazenar um fluido. Uma rocha sedimentar pode ser dividida em duas partes: uma definida como volume da matriz (sedimentos) e outra como volume dos poros (espaços livres). Estes dois volumes somados resultam no volume total da rocha como mostra o modelo da Figura 1.

Figura 1 - Modelo de rocha para porosidade.



Fonte: Andrade (2013)

---

<sup>1</sup>ANDRADE, A. *Geofísica de poço*. Belém: Faculdade de Geofísica da UFPA 2013, 81 p. (Apostila do Curso de Geofísica).

A partir desses volumes, temos uma razão entre o volume dos poros ( $V_p$ ) e o volume total da rocha ( $V_t$ ),

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

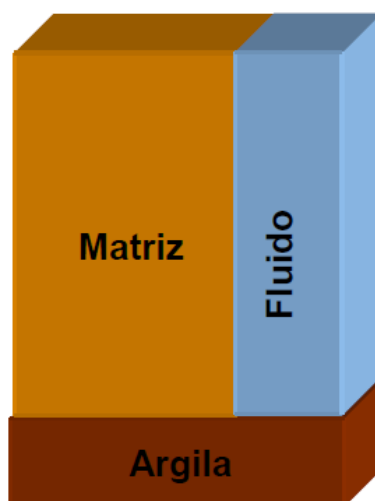
Muitos fatores influenciam na porosidade de uma rocha como fatores deposicionais e pós-deposicionais, incluindo o tamanho, a forma e o arranjo dos grãos ou partículas, a razão de soterramento, profundidade, compressibilidade do fluido intersticial, tipo dos sedimentos acima e abaixo (podem impedir o fluxo de fluido), grau de seleção e tipo de fluido percolante (determina a ocorrência e o tipo da cimentação).

### 3.1.2. Argilosidade

Argilosidade ( $V_{sh}$ ) é o parâmetro que mostra o volume de argila existente na rocha. A ocorrência da argila em uma rocha sedimentar reduz a porosidade e a permeabilidade, conseqüentemente, reduz o espaço disponível para fluidos afetando medidas diretas de resistividade.

O modelo de rocha usado para definir argilosidade é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo de rocha para argilosidade.



Fonte: Andrade (2013)

Assim como a porosidade, a argilosidade pode ser calculada pelos volumes do modelo de rocha, dado por

$$V_{sh} = \frac{V_a}{V_t} \quad (2)$$

no qual  $V_a$  é o volume de argila na rocha.

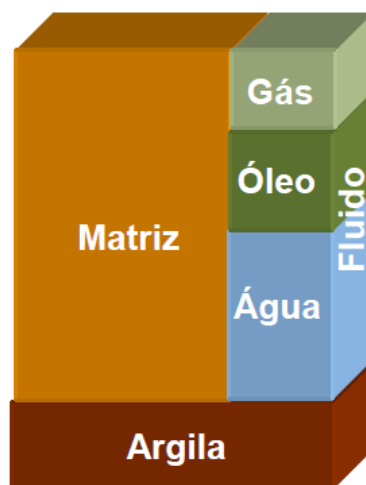
### 3.1.3. Saturação de fluido

A saturação de fluido ( $S_f$ ) é o valor relativo da quantidade de fluido presente na rocha. Seguindo o mesmo raciocínio das definições anteriores, sendo  $V_f$  o volume do fluido de interesse, tem-se

$$S_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (3)$$

Lembrando que a rocha sedimentar sempre vai estar saturada por fluido seja ele óleo, água ou gás como mostra a Figura 3

Figura 3 - Modelo de rocha saturada com diversos tipos de fluido...



Fonte: Andrade (2013)

### 3.1.4. Permeabilidade

Permeabilidade é a interconexão entre os poros da rocha facilitando a condução hidráulica de fluidos. No caso geológico, permeabilidade expressa a conexão, ou caminhos, entre os poros. Geralmente é associado à porosidade, porém uma rocha altamente porosa não, necessariamente, é bem permeável.

Em termos absolutos a permeabilidade ( $\kappa$ ) é dada por

$$\kappa = Cd_i^2 \quad (4)$$

onde C é uma constante adimensional que relacionada a complexidade do meio e a tortuosidade dos caminhos e  $d_i$  o diâmetro médio dos poros dado em m<sup>2</sup> e  $\kappa$  dado em darcy (=10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>).

Darcy (1856) através de experimentos desenvolveu a denominada Lei de Darcy e, como citou Girão Nery (2004, p.3), conseguiu explicar que a vazão de escoamento da água em um meio poroso é diretamente proporcional à seção transversal do meio e ao gradiente hidráulico em dois pontos, além de ser inversamente proporcional à distância percorrida pelo fluido. A constante de proporcionalidade da lei empírica de Darcy é a condutividade hidráulica que depende do meio (todas as características físicas e geológicas do meio) e do fluido.

Embora, conceitualmente, a permeabilidade tenha grande semelhança e dependência com a porosidade, muitos fatores interferem nesse parâmetro.

“Apesar de ser aparentemente simples, a definição da permeabilidade é na realidade bastante complexa. A vazão do fluido aumenta à proporção em que aumenta o diferencial da pressão exercido sobre o mesmo. Por outro lado, esse fluido terá maior dificuldade em escoar, à proporção que sua viscosidade aumenta. Por exemplo, o gás escoar mais facilmente do que a água, a qual por sua vez escoar mais facilmente que o óleo.” (GIRÃO NERY, 2004, p. 3).

### 3.1.5. Lei de Archie

Os métodos geofísicos são aplicados em subsuperfície para que a resposta geofísica seja correlacionada com as propriedades petrofísicas. Pois, como dito anteriormente, estas propriedades qualificam as rochas.

No caso da aplicação de métodos elétricos, que serão abordadas neste trabalho, existe uma correlação entre algumas propriedades petrofísicas e a resistividade. Essa via de relação é chamada de Lei de Archie e é de suma importância para avaliação de formação.

Archie a partir de experimentos físicos observou que a resistividade e a porosidade possuem uma correlação. Para isto, segundo Archie<sup>2</sup> (1942 apud BARROS, 2007), ele imaginou a rocha como sendo uma caixa d'água totalmente preenchida de água salobra de resistividade  $R_w$ . Neste caso a porosidade dessa caixa é 100% porosa, portanto  $\phi = 1$ . Ao adicionar grãos semelhantes aos sedimentos de areia (resistivos) é possível perceber uma nova resistividade  $R_0$  variando inversamente com a porosidade  $\frac{1}{\phi}$  e diretamente com a resistividade da água  $R_w$

$$R_0 \propto \frac{R_w}{\phi} \quad (5)$$

A partir de então, Archie definiu o fator de formação ( $F$ ):

$$F = \frac{R_0}{R_w} \propto \frac{1}{\phi} \quad (6)$$

Archie percebeu que o fator de formação  $F$  era relacionado à porosidade  $\phi$  através de uma função exponencial. E, posteriormente, viu que isto ocorria devido a litologia e a cimentação das rochas porosas. Introduzindo, então, duas constantes: o coeficiente litológico  $a$  que avalia a litologia das rochas porosas e o coeficiente de cimentação  $m$  que considera a tortuosidade dos caminhos para passagem de fluido na rocha. Estes possuem relação da seguinte forma:

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad (7)$$

onde

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (8)$$

logo, tem-se que

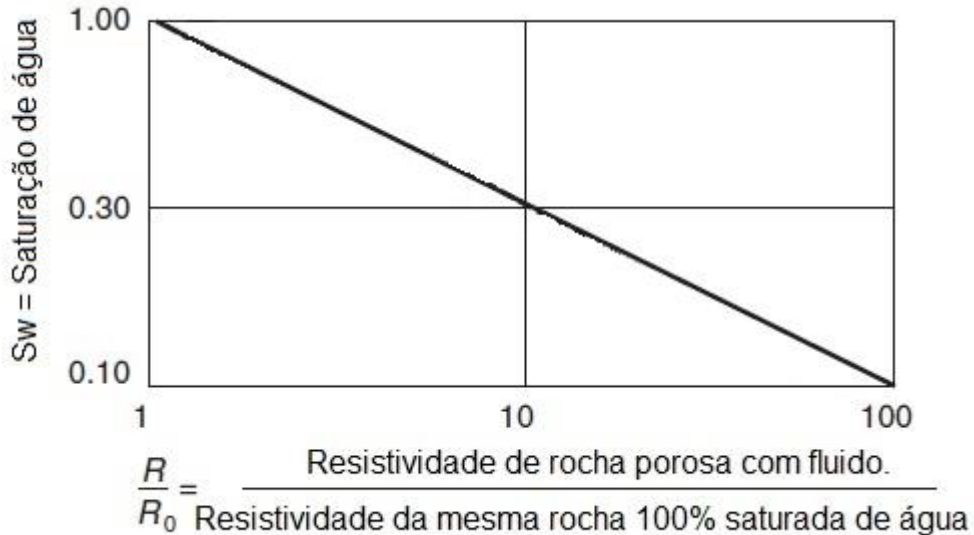
$$R_0 = \frac{a \cdot R_w}{\phi^m} \quad (9)$$

---

<sup>2</sup> ARCHIE, G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metal. Pet. Eng. Inc.* v.146, p. 54-62. 1942.

Como cita Ellis e Singer (1987), ainda segundo Archie, ao plotar valores, numa escala logarítmica, da razão entre a resistividade de uma rocha porosa contendo algum fluido ( $R_t$ ) e a resistividade desta mesma rocha contendo 100% de água do mesmo tipo ( $R_0$ ) versus a saturação de água ( $S_w$ ), como mostra a Figura 4:

Figura 4 - Plote em escala logarítmica da razão entre resistividades versus saturação de água.



Fonte: Modificado de Ellis e Singer (1987).

A linha resultante desse plote segue a seguinte relação:

$$S_w = \left[ \frac{R_t}{R_0} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (10)$$

O fator exponencial  $n$  é chamado de expoente de saturação e é aproximadamente 2 para a maioria dos casos. A partir de então, a eq. 10 pode ser reescrita, como

$$S_w \approx \sqrt{\frac{R_0}{R_t}} \quad (11)$$

Para uma rocha 100% saturada com água  $R_0$  pode ser relacionada ao fator de formação  $F$  por

$$S_w \approx \sqrt{F \frac{R_w}{R_t}} \quad (12)$$

Aplicando a eq. 8 na eq. 12, chega-se a forma geral da relação entre resistividade medida  $R_t$ , a saturação de água  $S_w$  e porosidade  $\phi$ , expressa por

$$R_t = \frac{a}{\phi^m} \frac{R_w}{S_w^2} \quad (13)$$

Os coeficientes  $a$  e  $m$  são determinados a partir de observações experimentais em laboratório. É muito comum no estudo de uma formação o uso de diferentes métodos geofísicos que medem diferentes propriedades físicas em um mesmo ambiente geológico, pois estes diferentes métodos são complementares na fase de análise.

### 3.2. Propriedades elétricas

O que torna métodos elétricos aplicáveis na Terra é a capacidade de cada rocha conduzir correntes elétricas: *“Basically, however, it is the enormous variation in electrical conductivity found in different rocks and minerals that makes these techniques possible.”* (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.283).

As propriedades físicas que estão diretamente ligadas à condução de corrente ou a propagação de campos eletromagnéticos nas rochas são: resistividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética. Propriedades estas denominadas propriedades elétricas constituintes da matéria.

A corrente pode fluir nas rochas por condução eletrônica, condução iônica (eletrolítica) e polarização dielétrica<sup>3</sup>. Dependendo dos minerais pertencentes à rocha, o tipo de rocha e os fluídos de percolação, as conduções mais prováveis são a eletrônica ou a iônica. No entanto, para o ambiente geológico sedimentar, que é reproduzido neste trabalho, destaca-se a condução iônica na qual a resistividade é a propriedade física determinante à sua ocorrência.

---

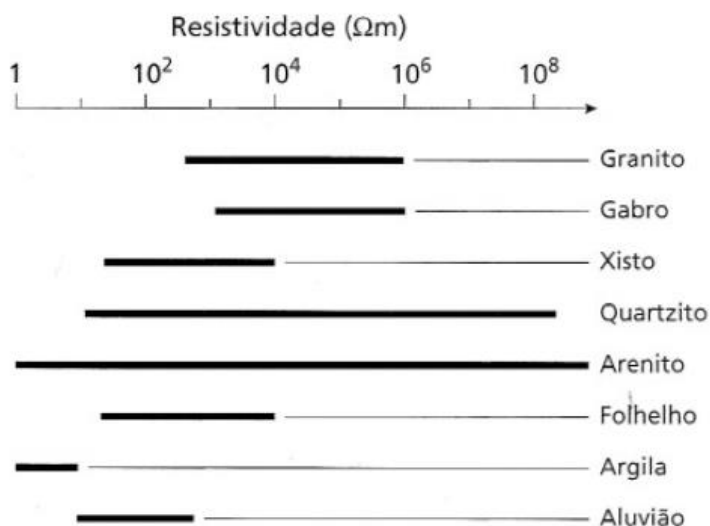
<sup>3</sup> Condução dielétrica surge em função de uma polarização elétrica em alta frequência.

### 3.2.1. Resistividade das rochas e minerais

Os minerais, assim como os materiais descritos anteriormente, podem ser classificados como: condutores metálicos - representado por elementos nativos (ouro, cobre, platina e prata) com resistividade inferior a  $10^{-5}$  ohm.m; semicondutores - maioria dos sulfetos metálicos (pirita, galena, pirrotita, calcopirita, etc.), óxidos (magnetita, ilmetita, cassiterita, etc) e grafita, com resistividade entre  $10^{-5}$  e  $10^5$  ohm.m; isolantes – silicatos (quartzo, feldspato, micas, piroxênios, etc) com valores de resistividade superior a  $10^5$  ohm.m.

A maioria das rochas constituintes da crosta é formada por silicatos que são caracterizados como isolantes. Porém, as medidas de resistividade realizadas neste tipo de rocha, variam entre 1 e  $10^6 \Omega.m$ . Ou seja, a condução elétrica nas rochas não é feita através desses minerais (eletrônica). Portanto, o maior responsável pela condução é a solução eletrolítica que a percola e preenche seus poros. “*A porous formation has an electrical conductivity which depends upon the nature of the electrolyte filling the pore space. Quite simply, the rock matrix is nonconducting, and the usual saturating fluid is a conductive brine.*” (ELLIS; SINGER, 1987, p. 8).

Figura 5 - Intervalo de resistividade de rochas mais comuns.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

Do ponto de vista dos tipos de rochas, a Figura 5 mostra alguns intervalos de resistividade, é esperado que a rocha sedimentar tenha os menores valores de resistividade, em condições normais, devido a sua maior porosidade e

permeabilidade. Os maiores valores de resistividade são esperados para rochas ígneas, pois são rochas de baixíssima porosidade. E as rochas metamórficas com valores intermediários. Por outro lado, é importante ressaltar que quando rochas ígneas e metamórficas estão fraturadas podem apresentar valores semelhantes às sedimentares.

A presença de argila aumenta a condutividade eletrônica nas rochas. Isso ocorre porque a argila é eletricamente negativa e atrai cátions proporcionando um caminho adicional aos proporcionados pelas soluções iônicas.

## 4. CONTEXTO GEOLÓGICO

O ambiente geológico explorado no modelo é essencialmente sedimentar e tem basicamente três tipos de sedimentos: areia, argila e calcário. Portanto, é interessante saber como estes sedimentos formam as camadas e os seus comportamentos geológicos.

### 4.1. Categorias de rocha

Segundo Jahn *et al* (2012), ambientes desse tipo são compostos por duas categorias de rochas: clásticas e de carbonato.

#### 4.1.1. Clásticas

“A deposição de uma rocha clástica é precedida de erosão [...] e transporte de material” (JAHN *et al*, 2012, p.114).

Para a formação do sedimento clástico, outra rocha, de qualquer origem, sofreu erosão, ou seja, foi quebrada, e seus fragmentos foram transportados até o local de deposição. Dependendo do ambiente onde a rocha está a erosão pode ser mecânica ou química.

A erosão mecânica ocorre quando a rocha está exposta a mudanças graves de temperatura ou quando a água contida nos poros e fendas congela ou, ainda, raízes vegetais forçando as rochas também podem causar esse tipo de processo.

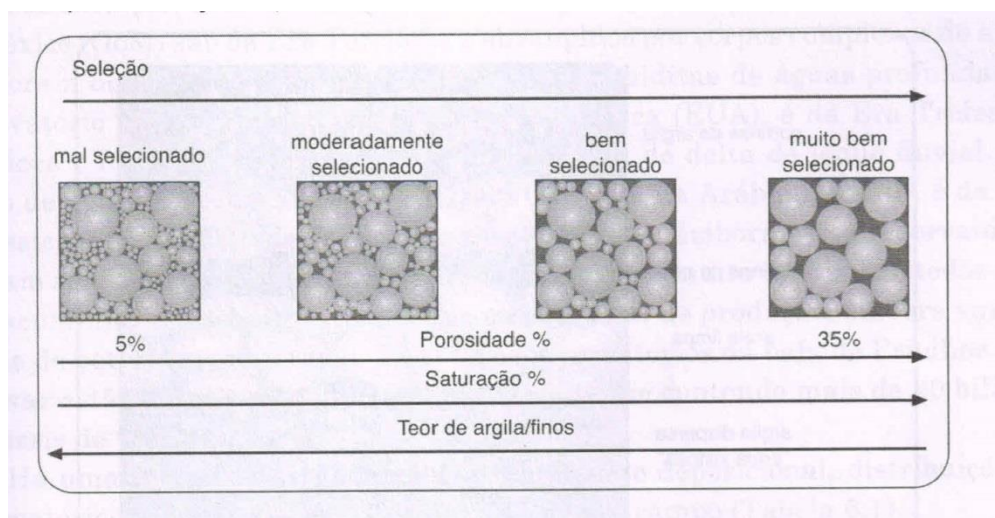
Na erosão química os minerais são dissolvidos pela ação da água e alguns, como o feldspato, são lixiviados. Estando diretamente ligados aos ambientes com alto índice pluviométrico.

A erosão é responsável pela fragmentação das rochas em componentes menores que podem ser transportados por agentes como a água (rios, correntes marinhas), vento e gelo. É interessante perceber a relação existente entre o modo de transporte e a energia aplicada na movimentação dos sedimentos.

A energia de transporte está diretamente ligada ao tamanho, forma e seleção de grãos de sedimentos. E esses três fatores são importante para as propriedades das rochas como a porosidade. A Figura 6 representa a relação entre os fatores citados.

Sedimentos bem selecionados resultam em rochas muito porosas assim como sedimentos mal selecionados resultam em rochas pouco porosas.

Figura 6 - Fatores que alteram a seleção de sedimentos.



Fonte: Jahn *et al* (2012)

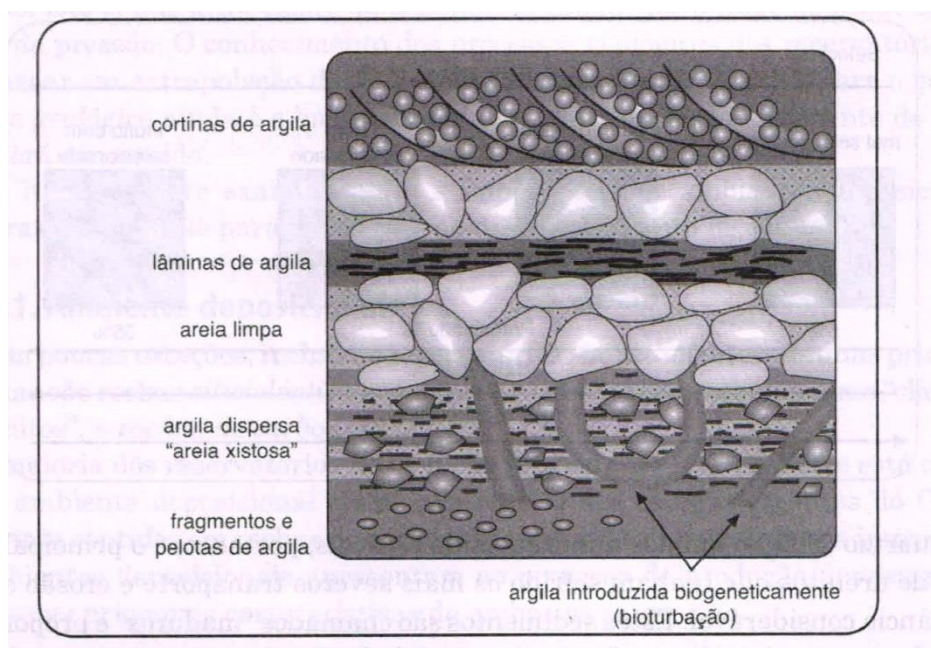
Um dos minerais mais estáveis e o principal constituinte de areias que tenham passado por severas condições de transporte e erosão é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Estes sedimentos são chamados “maduros” e formam camadas de alta qualidade chamadas “areias limpas”, pois em areias bem selecionadas com grandes componentes (alta granulometria) depositadas em regime de alta energia dificilmente se encontra sedimentos como areias muito finas e argila.

Porém, regimes propícios à formação de areias limpas são raros e normalmente ocorre alguma variação de argila nas camadas. Pois, assim como as areias, argilas são produtos de erosão de constituintes rochosos e sua presença nas camadas tem influencia decisiva na permeabilidade e na porosidade. A Figura 7 mostra como a argila pode se distribuir.

Quando a argila se deposita na forma de lâminas ou cortinas elas agem como barreiras horizontais ou verticais para o fluxo de fluido. Já as argilas dispersas ocupam os espaços dos poros que estariam disponíveis para fluidos podendo, também, obstruir gargantas de interporos impedindo, mais uma vez, a passagem de fluidos e reduzindo, portanto, a permeabilidade.

Além das formas de distribuição de argila citadas, a Figura 7 mostra também a bioturbação que é consequência de caminhos feitos por organismos vivos possibilitando a conexão entre camadas. Estas interconexões podem aumentar ou reduzir a permeabilidade da camada bioturbada.

Figura 7 - Tipos de distribuição da argila.



Fonte: Jahn *et al* (2012).

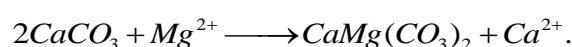
#### 4.1.2. Rochas de carbonato

As rochas de carbonatos, geralmente, não são resultados de sedimentos transportados de lugares distantes, podendo encontra-la na sua origem ou bem próxima. E costumam se formar em ambientes marinhos. O principal exemplo de rochas deste tipo é o calcário que é formado pela calcita, cuja composição química é o carbonato de cálcio.

A origem do carbonato pode variar desde fósseis de carapaças e esqueletos calcários de organismos vivos (ocorre quando os organismos morrem suas conchas e estruturas se depositam) até por precipitação química. No caso da precipitação química, o carbonato dissolvido na água precipita e se cristaliza formando as camadas. Em ambos os casos é necessário um ambiente raso e calmo (pouca energia) para favorecer a formação desse tipo de rocha.

Os carbonatos são quimicamente instáveis ao longo de uma faixa de pressões, temperaturas e pH<sup>4</sup>. Então, ao longo do tempo geológico, há tendência a mudança para uma variedade mais estável por mecanismos como a substituição.

Um exemplo importante de substituição, citado por Jahn *et al* (2012), é do íon de Ca<sup>2+</sup> no carbonato de cálcio por um íon de magnésio. O Mg<sup>2+</sup>, por sua vez, é menor e posterior a substituição surge um espaço não ocupado, ou seja, há aumento da porosidade ao fim da substituição. O mineral resultante neste processo é a dolomita e a substituição ocorre da seguinte forma:



#### 4.2. Ambiente deposicional

Erosão e transporte precedem a sedimentação do material que ocorre num ambiente deposicional. Este ambiente tem características e processos físicos, químicos, biológicos que determinam o tipo específico de rocha resultante.

Processos deposicionais controlam propriedades como a permeabilidade e porosidade. Informações sobre os ambientes onde esses processos ocorrem são essenciais para a locação dos poços, de exploração de fluido, terem maiores índices de produtividade.

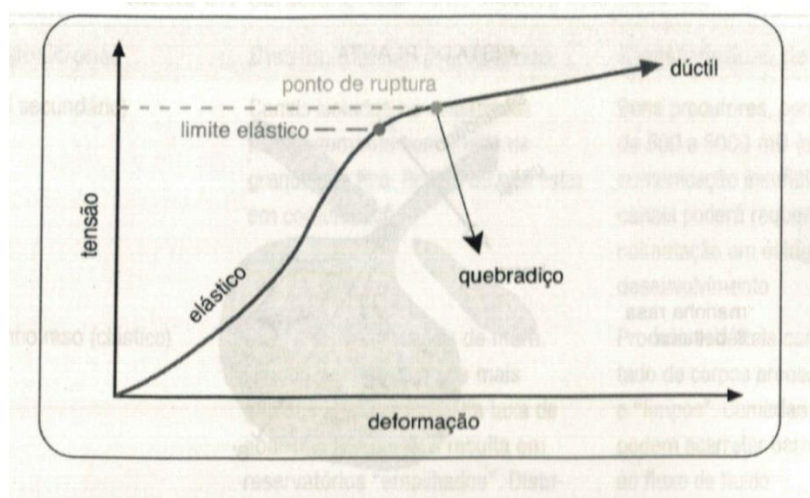
#### 4.3. Tipos de estruturas

As rochas da crosta terrestre estão vulneráveis a receber vários tipos de deformações mecânicas (tensões, distensões, torsões) e podem reagir tencionando-se com respostas elástica, dúctil ou quebradiça dependendo da amplitude da tensão como mostra o diagrama da Figura 8

---

<sup>4</sup> Pressão, temperatura e pH são fatores determinantes na erosão química.

Figura 8 - Diagrama de deformação x tensão nas rochas.



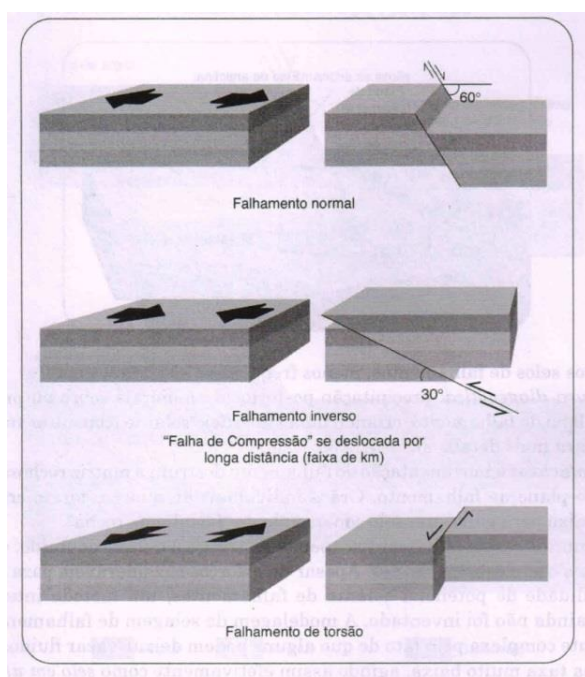
Fonte: Jahn *et al* (2012).

Se uma rocha consolidada for submetida a tensão crescente, eventualmente, o limite de ruptura será alcançado. A consequência disso é uma fratura que pode se tornar uma falha tendo, para isso, o desenvolvimento de um plano de falha.

Existem vários tipos de falhamentos como mostra a

Figura 9. Dentre esses tipos de falhas é importante destacar o falhamento normal que será explorado na modelagem deste trabalho.

Figura 9 - Tipos de falhamento.



Fonte: Jahn *et al* (2012).

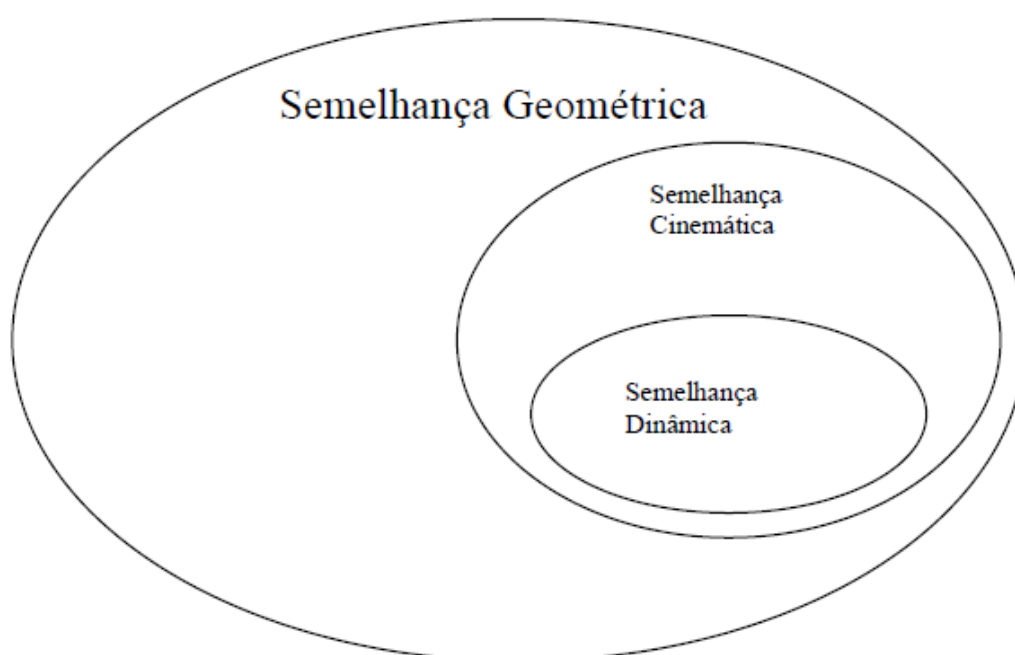
## 5. TEORIA DA SIMILITUDE

Alguns problemas, principalmente nas áreas das ciências exatas, dificilmente são resolvidas apenas com análise teórica analítica. Uma possível solução para estudar alguns destes problemas é a modelagem física, também denominada modelagem analógica, por se fazer correlação entre o modelo e o ambiente modelado por analogia.

A modelagem analógica consiste em construir um aparato físico que imite um sistema físico real, alvo de estudo, podendo ser realizada em escala diferente do ambiente real (denominada por protótipo), sendo em escala ampliada ou reduzida, de acordo com as conveniências.

Para que a modelagem analógica seja aceita como método válido de análise, ou seja, que o modelo seja comparado com o protótipo de maneira satisfatória é necessário que um conjunto de condições seja fisicamente semelhante. Neste contexto, há três tipos de semelhanças físicas (ou similitude) que devem ser aplicadas dependendo do tipo de modelagem: geométrica, cinemática e dinâmica. A relação entre as similitudes pode ser compreendida como mostra a Figura 10

Figura 10 - Conjunto de relação das similitudes.



Fonte: Melo (2013).

A similitude geométrica, como o próprio nome indica, é a semelhança de forma. Talvez a mais óbvia, pois se trata de fazer comparações das dimensões físicas entre o modelo e o protótipo. E é comparada por um fator de escala, ou seja, a razão entre qualquer comprimento do modelo e do seu correspondente no protótipo é uma constante.

Supondo que haja dois sistemas de coordenadas cartesianas: **C** representando o sistema do protótipo e **M** o sistema do modelo. Considerando que um ponto **P** ( $x, y, z$ ) no sistema **C** mapeia um ponto **P'** ( $x', y', z'$ ) no sistema **M** através de uma transformação linear, da mesma forma um ponto em **C** poderá ser mapeado a partir de um ponto no sistema **M**, também, por transformação linear como mostra a Figura 11.

Seja  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^3$  e  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$  tal que:

$$\mathbf{T}: \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{M}$$

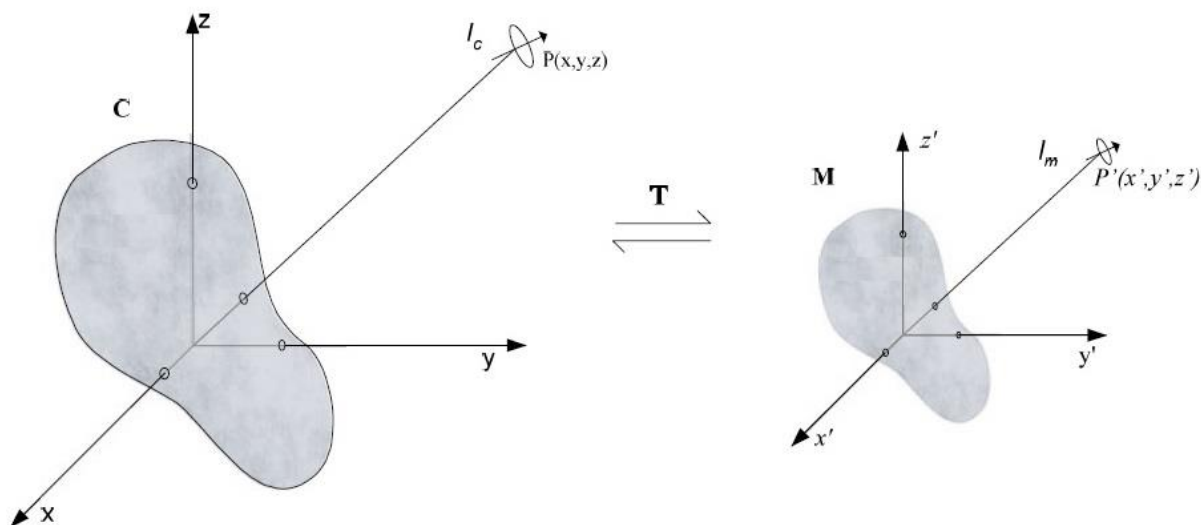
$$(x, y, z) \mapsto (x', y', z')$$

Pode-se afirmar que **T** é uma transformação linear isomórfica e inversível. Desta forma os espaços **C** e **M** estão correlacionados por um fator de escala linear da seguinte forma:

$$x_c = lx_m, y_c = ly_m, z_c = lz_m ,$$

onde  $x_c, y_c$  e  $z_c$  são as dimensões lineares no espaço **C**,  $x_m, y_m$  e  $z_m$  são as dimensões lineares no espaço **M** e  $l$  é o escalar que correlaciona os dois sistemas. A Figura 11 mostra a representação espacial da correlação e transformação citadas

Figura 11 - Representação espacial entre os planos C e M.



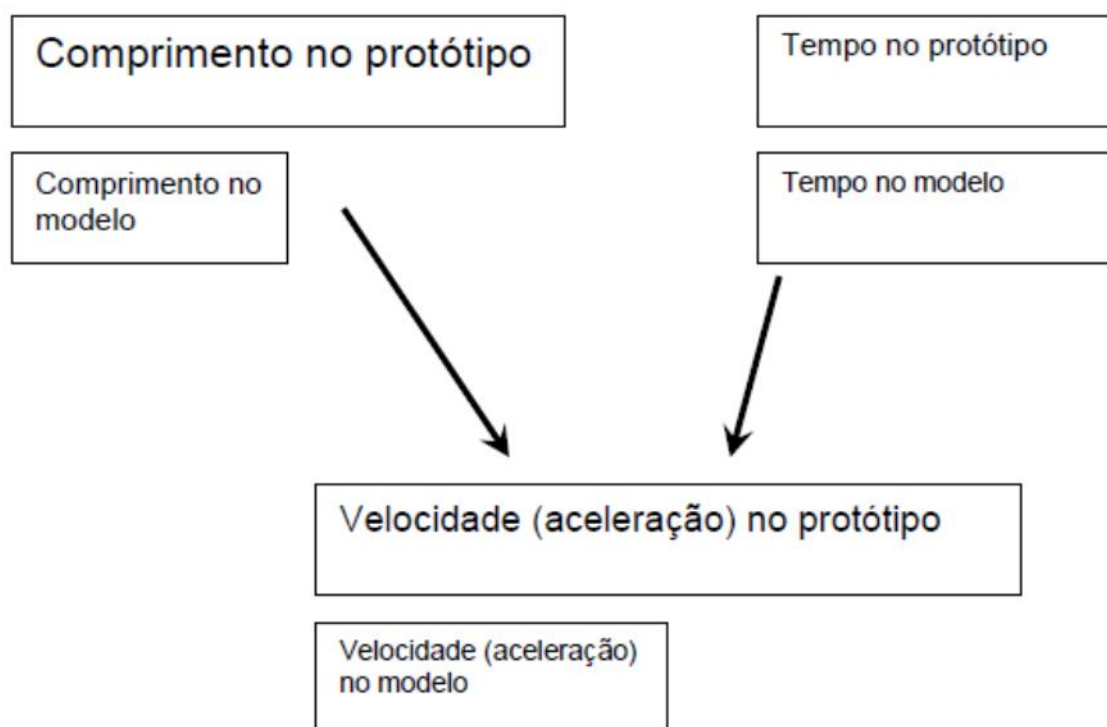
Fonte: Modificado de Melo (2004).

A similitude cinemática é a semelhança do movimento, portanto os movimentos que se deseja modelar deverá ter correlação entre modelo e protótipo.

Quando aplicada a similitude cinemática necessariamente a similitude geométrica também deverá ser satisfeita. Logo, há o comprometimento entre os comprimentos e os valores de tempo na correlação entre os dois.

A Figura 12 mostra uma maneira mais didática de entender como é feita essa semelhança:

Figura 12 - Esquema explicativo da similitude cinemática.



Fonte: Melo (2013).

Apesar do projeto de montagem do modelo deste trabalho prever fluxo de fluido, o escoamento não é modelado, pois o foco não é o movimento de fluidos. Portanto, o fluido no modelo será considerado, na modelagem, como em regime estático.

No mais, a cinemática relevante aqui é assegurar que o fluxo de íons tenha liberdade de movimentação assim como no protótipo o que é assegurado pelo uso de matéria prima natural e, assim, criando as linhas de fluxos semelhantes ao protótipo e necessárias a esta modelagem.

Como cita Melo<sup>5</sup> (2013, não publicado): “Semelhança dinâmica é a semelhança das forças. Dois sistemas são dinamicamente semelhantes quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas, estão numa razão fixa.”.

<sup>5</sup> Melo, A. L. *Modelagem eletromagnética analógica*. Belém: Faculdade de Geofísica da UFPA 2013, 24 p. (Apostila do Curso de Geofísica).

Ou seja, para que um modelo tenha um processo dinâmico totalmente válido é necessário garantir a semelhança geométrica e cinemática, portanto as forças no protótipo e no modelo devem ter correlação escalar também.

Dependendo do tipo de estudo a ser realizado no modelo e das relações entre o protótipo e o modelo, nem todos os três tipos de similitude poderão ser garantidas. Porém como quase todos os tipos de métodos geofísicos podem operar em sistemas invariantes no tempo é possível que o método geofísico escolhido possa ser contemplado com os três tipos de similitude.

## 6. MÉTODOS ELÉTRICOS

Neste trabalho a proposta de verificação e validação do modelo será baseada na aplicação dos métodos elétricos. Estes, por sua vez, utilizam-se dos princípios básicos dos conceitos elétricos, ou seja, analisa e estuda o comportamento do fluxo de corrente elétrica, e suas interações, dentro do ambiente geológico.

“A corrente elétrica pode ser gerada através de processos eletroquímicos que desenvolvem naturalmente nas rochas ou ser introduzida diretamente na subsuperfície através de contatos galvânicos” (LUIZ; COSTA E SILVA<sup>6</sup>, p. 1, não publicado).

Os métodos elétricos mais usados são: Potencial Espontâneo (SP), Eletroresistividade (ER) e Polarização Induzida. Porém, neste trabalho serão utilizados apenas ER e SP.

Para entender sobre os métodos utilizados é importante expor alguns conceitos básicos.

### 6.1. Conceitos elétricos básicos

#### 6.1.1. Cargas, Força elétrica, Lei de Coulomb e Campo Elétrico.

“A carga elétrica é uma propriedade intrínseca das partículas fundamentais de que é feita a matéria” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009, p. 2).

A partir disso, pode-se considerar que as partículas da maioria dos materiais podem possuir carga de dois tipos: positivas ou negativas. Quando os números de cargas positivas e negativas contidas no corpo são iguais o objeto é eletricamente neutro, quando elas não são iguais, portanto existem mais cargas de um tipo que de outro, o objeto é eletricamente carregado.

Pode-se classificar os materiais como condutores os quais as cargas elétricas podem circular facilmente no seu interior, não-condutores (isolantes) que são aqueles que as cargas não se movimentam e os semi-condutores que são aqueles matérias com propriedades elétricas intermediárias.

---

<sup>6</sup> LUIZ, G.; COSTA E SILVA, L. M. *Introdução aos Métodos Elétricos e Eletromagnéticos*. Belém: Faculdade de Geofísica da UFPA (Apostila do Curso de Geofísica).

Quando duas cargas são colocadas próximas uma força resulta da interação entre elas:

“Duas partículas carregadas exercem forças uma sobre a outra. Se as cargas das partículas têm mesmo sinal, as partículas se repelem, ou seja, são submetidas a forças que tendem a afastá-las. Se as cargas das partículas têm sinais opostos, as partículas se atraem, ou seja, são submetidas a forças que tendem a aproximá-las” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009, p. 6).

A Lei de Coulomb estabelece que a força eletrostática  $\vec{F}_e$  exercida por partículas carregadas é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$  (em metros) que separa duas cargas ( $q$  e  $q'$ ) e é dada por:

$$\vec{F}_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \vec{r} \quad (14)$$

No qual  $\epsilon_0$  é a permissividade dielétrica no vácuo igual a  $8,8541 \cdot 10^{-12}$  N.m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup> e  $\vec{r}$  é um vetor unitário da reta que liga as duas cargas.

Por outro lado, segundo Nussenzveig (1997), a força  $\vec{F}_e$  atuando sobre uma carga puntiforme  $q'$  é devida sua interação eletrostática com outra carga puntiforme  $q$  fixa em posição predeterminada. Este conceito é importante, pois cada carga produz um campo elétrico  $\vec{E}$  proporcional à  $\vec{F}_e$  por unidade de carga. Tomando  $q'$  como uma unidade elementar de carga elétrica com sinal positivo, tem-se que

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q'} \quad (15)$$

Assim,

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r} \quad (16)$$

sendo  $\vec{E}$  é dado em N/C.

### 6.1.2. Potencial Elétrico

Para movimentar uma carga  $q'$  sujeita a influência de um campo elétrico produzido por  $q$  um trabalho ( $W$ ) realizado pode ser expresso por

$$W = -\int F_e \cdot dr = -q' \int E \cdot dr \quad (17)$$

Sendo, então, o trabalho  $\Delta W$  realizado pelo deslocamento da carga puntiforme  $q'$  entre os pontos  $a$  e  $b$ , a partir da eq. 17, tem-se:

$$W_{ab} = \Delta W = -q' \int_a^b E \cdot dr \quad (18)$$

Onde a diferença de trabalho realizado por unidade de carga é definido, então, como diferença de potencial elétrico ( $\Delta V$ ):

$$V_{ab} = \Delta V = \frac{\Delta W}{q'} = -\int_a^b E \cdot dr \quad (19)$$

### 6.1.3. Corrente elétrica

Corrente elétrica é o movimento ordenado de partículas carregadas ou portadores de cargas  $Q$  que atravessa uma determinada superfície durante um intervalo de tempo  $dt$ , sendo dada por

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (20)$$

No ambiente geológico sedimentar o tipo de cargas predominante é o fluxo de íons que se movimentam em solução aquosa segundo um processo chamado de condução iônica. Os íons positivos (cátions) e negativos (ânions) se movimentam em sentidos oposto, porém produzem uma corrente em sentido único que, por convenção, é o sentido dos íons positivos.

A unidade dimensional de corrente elétrica no SI, na forma analítica, dada em C/s que é igual a Ampère (A), dada na forma sintética.

### 6.1.4. Lei de Ohm

Observações experimentais demonstram que a densidade de corrente  $\vec{J}$  ( $A/m^2$ ) é diretamente proporcional ao campo elétrico  $\vec{E}$ , sendo a constante de proporcionalidade denominada condutividade elétrica ( $\sigma$ ). A densidade de corrente  $\vec{J}$  expressa por

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

21

Esta relação é conhecida como lei de Ohm na forma pontual.

Já para circuitos elétricos a mesma lei demonstra que quando uma corrente  $I$  flui através de um material homogêneo, linear e isotrópico com resistência  $R$  é desenvolvida uma diferença de potencial  $\Delta V$  :

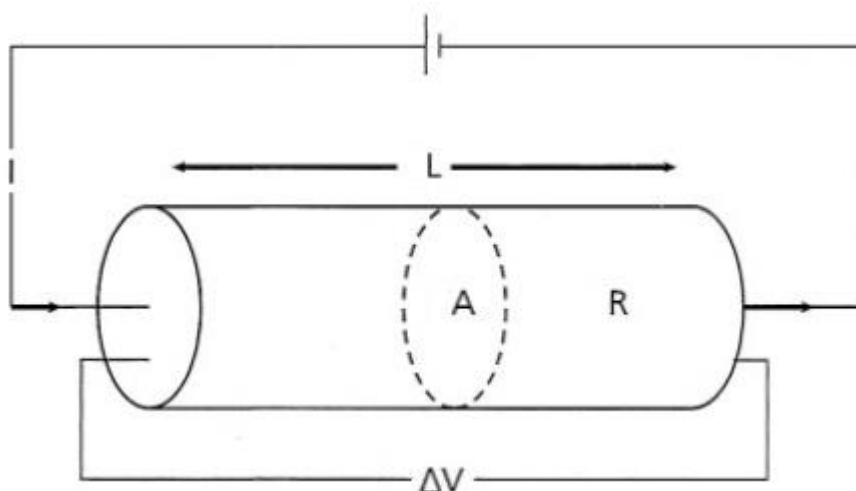
$$\Delta V = R.I \quad (22)$$

Sendo  $R$  dado em ohm ( $\Omega$ ).

A resistência elétrica é uma medida de quão impeditivo é o material a passagem de corrente. Quanto maior a resistência maior a dificuldade para corrente atravessar o meio.

Supondo um corpo material com resistência  $R$  e com geometria como mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Parâmetros de um condutor elétrico cilíndrico.



Fonte: Modificado do Kearey, Brooks e Hill (2009).

A resistência  $R$  é proporcional à resistividade (inverso de condutividade  $\sigma$ )  $\rho$ , e inversamente proporcional a área  $A$ . Portanto, para um condutor linear, homogêneo e isotrópico, como na Figura 13, de resistividade elétrica  $\rho$ , comprimento  $L$  e com área de seção transversal  $A$ , tem-se

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (23)$$

sendo a razão  $\frac{L}{A}$  denominada de fator geométrico.

Da medida de resistência elétrica  $R$ , pode-se determinar o valor da resistividade conhecendo-se o fator geométrico.

## 6.2. Eletrorresistividade (ER)

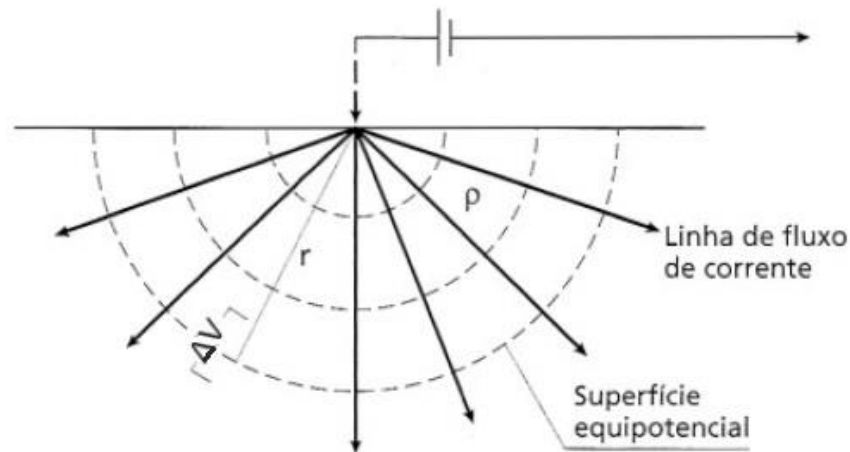
O método da eletrorresistividade consiste, basicamente, em injetar uma corrente elétrica controlada por intermédio de dois eletrodos em contato galvânico com o solo. Ao mesmo tempo é medida a diferença de potencial - por intermédio de outros dois eletrodos também em contato com o solo - desenvolvida pelo campo elétrico aplicado ao meio. A partir das medidas da diferença de potencial ( $\Delta V$ ), da corrente elétrica injetada ( $I$ ) e da distribuição espacial dos eletrodos de corrente e de potencial ( $k$ ), é possível estimar a resistividade ( $\rho$ ) dos materiais em subsuperfície.

Do ponto de vista teórico, a corrente utilizada é, na maioria dos casos, contínua. Por esse motivo o método também pode ser chamado de eletrorresistividade por corrente contínua. Na prática, contudo, alguns efeitos eletroquímicos impedem o uso de corrente contínua permanente.

### 6.2.1. Fluxo de corrente no solo

Considerando um eletrodo (fonte) de corrente fixado na superfície de um semi-espaço homogêneo de resistividade  $\rho$  e supondo outro eletrodo (sumidouro) muito distante também fixado no solo fecha o circuito, instantaneamente a corrente fluirá entre os eletrodos. Como os eletrodos estão distantes um do outro, as linhas de corrente fluindo a partir do eletrodo fonte, terão espalhamento radial e formarão as superfícies equipotenciais como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Fluxo de corrente a partir de um único eletrodo na superfície.



Fonte: Modificado do Kearey, Brooks e Hill (2009).

Como a distribuição de corrente ocorre no semiespaço, a partir do eletrodo fonte fixado na interface ar-semiespaço, um ponto na subsuperfície, forma-se uma superfície equipotencial no formato semiesférico com área  $2\pi r^2$ , sendo  $r$  a distância entre o eletrodo de corrente e a superfície equipotencial, a densidade de corrente ( $\vec{J}$ ) que atravessa a superfície dessa casca é dada por

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \vec{r}. \quad (24)$$

Aplicando a eq. 21 a eq. 24 e lembrando que  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  chega-se a relação

$$\vec{E} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \vec{r}. \quad (25)$$

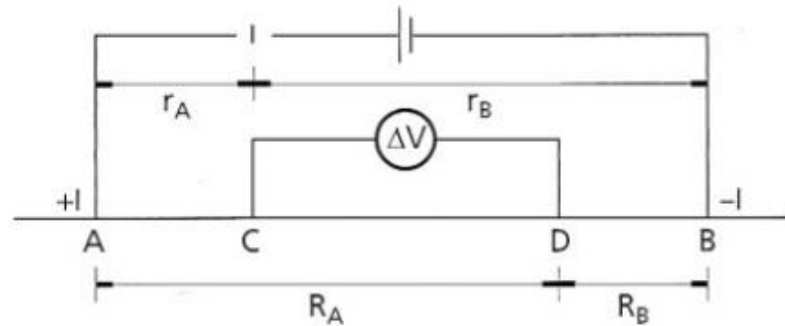
Por fim, aplicando a eq. 19 tem-se

$$V = -\frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (26)$$

Sendo a constante de integração é zero, pois  $V = 0$  quando  $r = \infty$ . Supõe-se aqui que o outro eletrodo de potencial também está no infinito junto ao eletrodo sumidouro. Dessa forma, mantém-se a medida da diferença de potencial entre dois pontos.

Se o eletrodo sumidouro (B) for aproximado do eletrodo fonte (A) com distanciamento apreciável, como mostra a Figura 15, o eletrodo de potencial C sofrerá influência pelos eletrodos de corrente em A e B. Dessa forma, o potencial em C será a contribuição dos dois (fonte e sumidouro).

Figura 15 - Configuração de eletrodos geral para medidas de eletrorresistividade.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

Assim, tem-se que o potencial no eletrodo em C é dado por

$$V_C = V_{CA} + V_{CB} \quad (27)$$

Aplicando a eq. 19, tem-se

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (28)$$

Se um segundo eletrodo de potencial é adicionado ao sistema, sendo posicionado no ponto D, seguindo o mesmo raciocínio, tem-se que

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \quad (29)$$

Com os valores absolutos de voltagem  $V_C$  e  $V_D$  é possível calcular a diferença de potencial

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\} \quad (30)$$

Aplicando a lei de Ohm, chega-se, a relação de resistividade

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\}} \quad (31)$$

levando em conta que:

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)}. \quad (32)$$

Tem-se a resistividade na forma simplificada

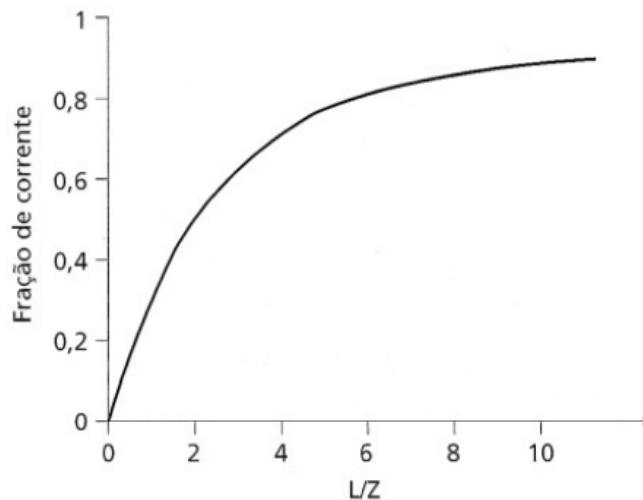
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} k \quad (33)$$

no qual  $k$  é um fator geométrico e depende apenas do arranjo dos eletrodos.

Se o meio é homogêneo a resistividade calculada para qualquer tipo de arranjo de eletrodos será a mesmo. Entretanto, o método é aplicado também em meio heterogêneo, neste caso a resistividade calculada dependerá do arranjo de eletrodos. Assim, a resistividade calculada é conhecida como resistividade aparente ( $\rho_a$ ).

A Figura 16 mostra a proporção de fluxo de corrente abaixo da profundidade  $Z$  e a distância dos eletrodos de corrente  $L$ .

Figura 16 - Fração de corrente penetrante a profundidade abaixo de  $Z$  com separação de eletrodos de  $L$ .



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

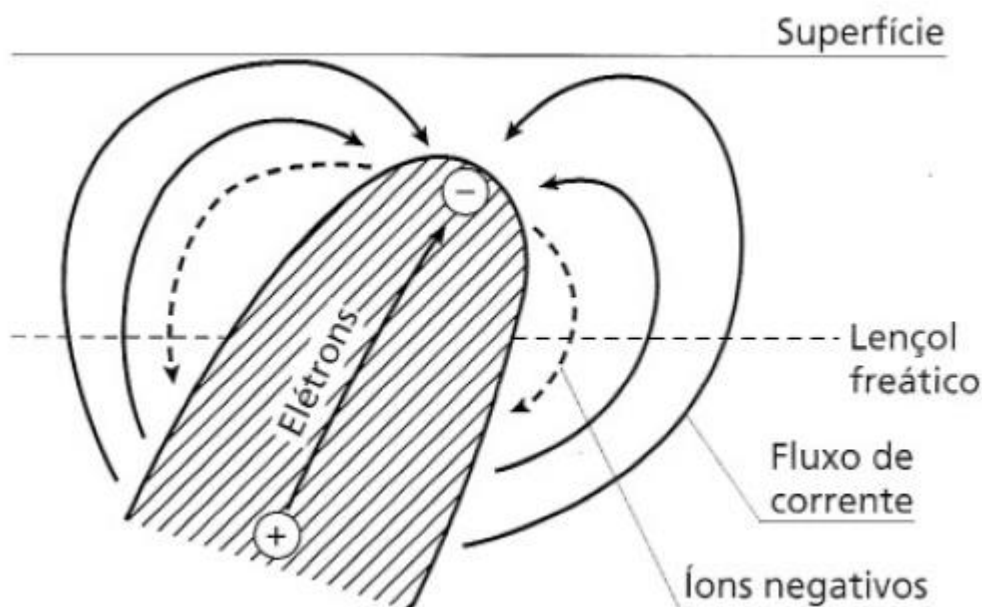
Essa relação é importante para saber qual a melhor distância dos eletrodos para investigar a profundidade desejada. Por exemplo, em um arranjo onde a separação é  $L$  apenas 30% da corrente fluirá em uma profundidade de  $Z > L$ . De maneira geral, para um bom levantamento é esperado que  $L$  seja três vezes maior que a profundidade de interesse  $Z$ .

### 6.3. Potencial espontâneo (SP)

O método de potencial espontâneo mede as diferenças de potenciais naturais resultantes de processos eletroquímicos na subsuperfície. Anomalias de SP podem apresentar várias centenas de milivolts de amplitude em relação ao solo estéril. São anomalias que variam pouco com o tempo, na maioria, negativas e são associadas, geralmente, a depósitos de sulfetos metálicos, magnetita ou grafite.

Várias teorias foram criadas para explicar o mecanismo que gera as anomalias de SP e a mais aceita hoje em dia é de Sato & Mooney (1960). A teoria diz que para que ocorra esta anomalia, o corpo causador deve estar parte numa zona de oxidação e parte numa zona de redução como mostra a Figura 17:

Figura 17 - Esquema de oxi-redução responsável pelo efeito SP.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

O corpo está localizado parte abaixo do lençol freático e parte acima. Abaixo, os eletrólitos do fluido contido nos poros sofre oxidação cedendo elétrons que sobem

pelo corpo de minério e ficam acima do lençol freático. No topo, os elétrons provocam a redução dos eletrólitos. Criando, assim, um circuito fechado e gerando uma diferença de potencial.

O topo do corpo será o terminal negativo o que explica as anomalias negativas. Sua estabilidade com o tempo pode ser compreendida, pois o corpo não sofre reação química, já que são os eletrólitos que cedem os íons para que o mecanismo aconteça.

As medidas de SP são preferencialmente realizadas com eletrodos não polarizados e um milivoltímetro de alta impedância.

## 7. PERFILAGEM DE GEOFÍSICA DE POÇO

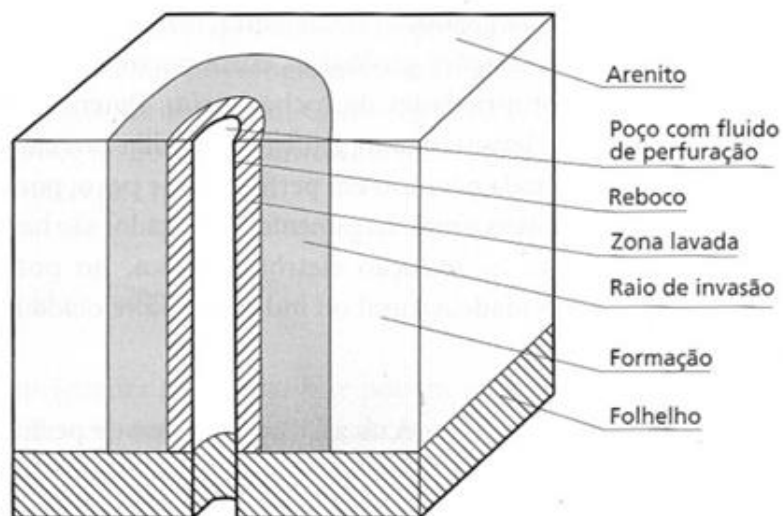
A perfilagem de poço (*well logging*) ou perfilagem de cabo (*wire-line logging*) é a primeira das três partes que formam a Geofísica de Poço (sendo as outras: Avaliação de formação e Produção). Ela é o conjunto de técnicas e métodos de aquisição das medidas das propriedades físicas das rochas em volta do poço. Compreendendo desde o desenvolvimento e a operação das ferramentas até as técnicas operacionais.

Depois de escolhido o local apropriado, faz-se a perfuração do poço através de um equipamento chamado sonda de perfuração. Esta sonda consiste de hastes verticais (ou semi verticais) com uma broca em sua extremidade. Internamente às hastes é injetado o fluido de perfuração que sairá pela broca retornando a superfície externamente a sonda.

A ação da rotação e o peso da sonda trituram a rocha e geram detritos que chegam à superfície trazidos pelo fluido de perfuração (ou lama de perfuração). A lama de perfuração é muito importante, pois, além de trazer os detritos, é responsável também por lubrificar e refrigerar a broca.

A densidade da lama é cuidadosamente controlada para que a diferença de pressão entre ela e os fluidos das formações seja a mínima evitando, assim, a produção descontrolada de fluidos (*blowout*). Entretanto o equilíbrio não é perfeito de tal forma que a pressão de lama deve ser ligeiramente superior a pressão de formação. Conseqüentemente, parte da lama invade os poros das rochas porosas da formação produzindo um reboco (*mudcake*) como ilustra a Figura 18:

Figura 18 - O ambiente do poço.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009)

A lama não forma apenas o *mudcake*, parte filtrada da lama penetra ainda mais em volta do poço empurrando completamente os fluidos da formação produzindo a zona lavada. A penetração do filtrado de lama continua de forma gradual até que a quantidade vai tendendo a zero dentro das rochas que circundam o poço em um raio de invasão chamada zona invadida. Para além da zona de invasão a região não é mais perturbada pelo filtrado de lama, sendo, então, denominada zona virgem.

As extensões do *mudcake*, da zona lavada e do raio de invasão dependem totalmente da pressão de lama, da porosidade e da permeabilidade das rochas da formação.

Os detritos citados anteriormente são chamados de amostras de calha e são de difícil interpretação, pois já foram misturados e lavados com a lama de perfuração. Além destas dificuldades, os detritos são separados pelos tamanhos e transportados com velocidades diferenciadas pela lama prejudicando ainda mais a interpretação.

Dada dificuldades, a perfilagem geofísica se mostra como ferramenta mais confiável para obter informações sobre a sequência de camadas, como cita Kearey, Brooks e Hill (2009, p. 400), “usada para se obter informações adicionais sobre a sequência de rochas cortada por um poço”.

De modo geral, a importância da perfilagem está na capacidade de definir as propriedades físicas das camadas geológicas e suas interfaces em profundidade, conforme a ferramenta utilizada.

São aplicáveis na perfilagem todos os métodos geofísicos, porém neste trabalho serão destacados apenas os métodos elétricos de contato galvânico: eletrorresistividade (ER) e potencial espontâneo (SP).

### 7.1. Perfilagem de ER

A perfilagem de ER segue os mesmos princípios ao que foi descrito nos métodos elétricos de eletrorresistividade para um arranjo de eletrodo como mostrado na Figura 19. Semelhante à eq. 31, a eq. de resistividade aparente para uma perfilagem é dada por

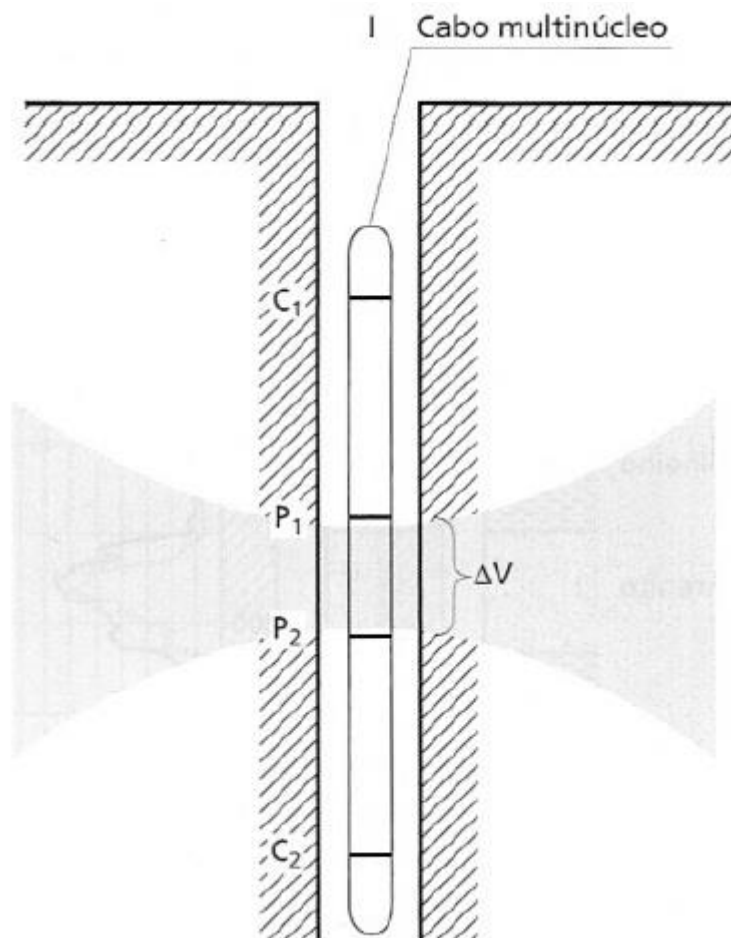
$$\rho_a = \frac{4\pi\Delta V}{I \left\{ \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right) - \left( \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \right\}} \quad (34)$$

sendo  $C_1$  e  $C_2$  eletrodos de corrente,  $P_1$  e  $P_2$  eletrodos de potencial entre eles há uma diferença de potencial  $\Delta V$ , e  $I$  é a corrente que flui no circuito. O que muda da eq. 31 para a eq. 34 é que na primeira, por ser aplicada a um semiespaço, apenas a metade da superfície esférica é formada pelas linhas de fluxo e a segunda, por ser aplicada ao espaço inteiro, a superfície esférica inteira é formada.

A possibilidade de montar diferentes arranjos geram informações sobre diferentes zonas ao redor do poço. Além da flexibilidade da sonda de poder encaixar vários conjuntos de eletrodos uma mesma descida pode gerar vários perfis diferentes.

Uma forma de entender a perfilagem elétrica é saber que a corrente é injetada e a diferença de potencial é medida. Como o arranjo de eletrodos é conhecido basta aplicar a eq. 34 e o resultado será a resistividade aparente. Portanto, como cita Kearey, Brooks e Hill (2009) “a zona energizada é, conseqüentemente, a região entre as superfícies equipotenciais sobre as quais se localizam os eletrodos de potencial” como pode ser observado na Figura 19

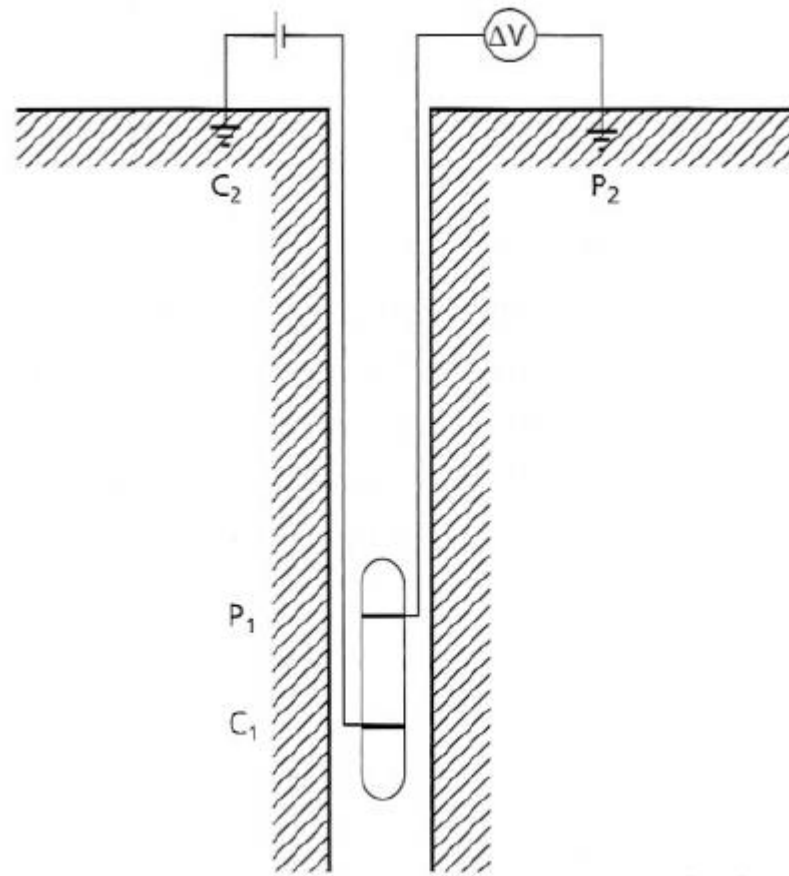
Figura 19 - Forma geral do arranjo de eletrodos na perfilagem de eletrorresistividade com a área correspondente a sua energização.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009)

Contudo, um dos arranjos de eletrodos mais utilizado na perfilagem é chamado de arranjo de perfil normal (*normal log*), no qual há na sonda apenas um eletrodo de corrente e um de potencial e os outros dois ficam no solo distante do poço como se vê na Figura 20.

Figura 20 - Perfil normal.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

Aplicando a eq. 34

$$\rho_a = 4\pi \overline{C_1 P_1} \frac{\Delta V}{I} \quad (35)$$

onde  $\rho_a$  depende da distância  $\overline{C_1 P_1}$  entre o eletrodo de corrente e de potencial e varia com  $\Delta V$ , já que a corrente  $I$  é constante.

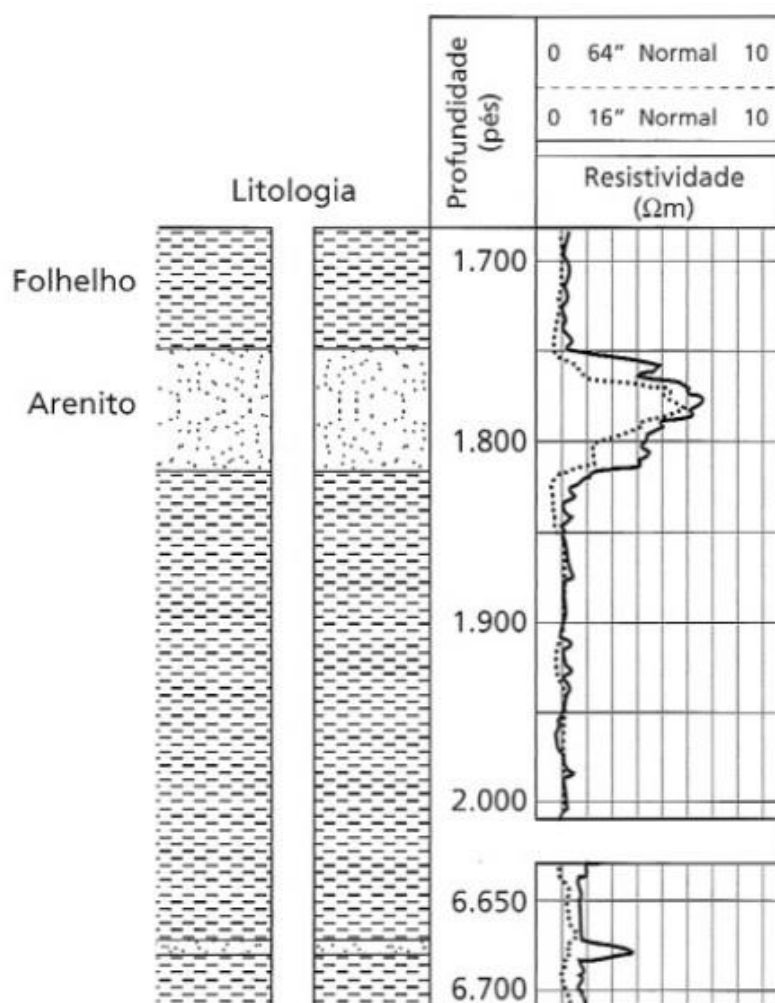
A zona energizada neste caso será uma casca esférica de diâmetro interno  $\overline{C_1 P_1}$  e diâmetro externo  $\overline{C_1 P_2}$  que varia conforme a descida da sonda. Logo, conforme o aumento da distancia para os eletrodos externos as medidas equivalerão a uma casca mais fina.

A distância  $\overline{C_1 P_1}$  pode varia conforme o levantamento. Os valores padrões são de 16 e 64 polegadas (também representada por “). A de 16” é chamada normal curta (*short normal*) e a de 64” é a normal longa (*long normal*). A diferença entre elas,

como foi citado anteriormente, é que a profundidade de investigação será maior para uma sonda de 64”.

A sonda de 64” tem maior penetração nas rochas circundantes do poço e podem chegar além do raio de invasão da lama de perfuração, diferentemente, da sonda de 16”, em geral, alcança no máximo a zona lavada. Por outro lado, camadas muito finas<sup>7</sup> que passam despercebidas pela sonda de 64” e podem ser notadas na sonda de 16” como exemplifica a Figura 21

Figura 21 - Perfil de eletrorresistividade da normal curta (16”) e da longa (64”).



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009)

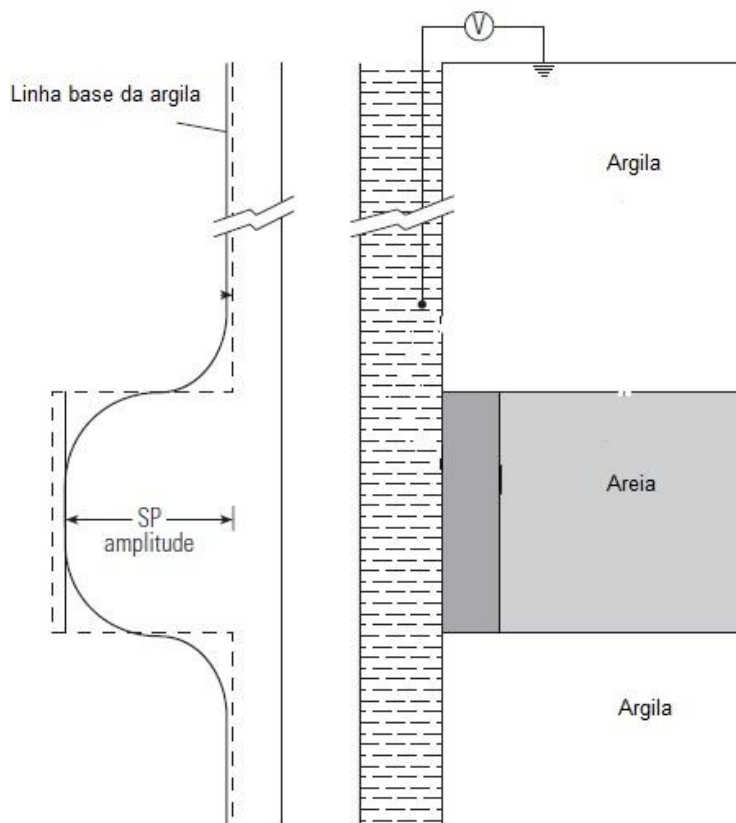
<sup>7</sup> Define-se muito fina, neste caso, como camadas com espessura muito menor que a distância dos eletrodos  $C_1P_1$ .

## 7.2. Perfilagem de SP

No perfil de potencial espontâneo as medidas de diferença de potencial são feitas em poços preenchidos com a lama de perfuração eletrolítica, pois o efeito é consequência da diferença de concentrações iônicas entre a lama no poço e a água de formação. Esta medida é realizada por um eletrodo de potencial na sonda e outro na superfície.

O efeito SP é percebido nas interfaces entre o folhelho e o arenito. Isso ocorre devido a maior penetração do concentrado de lama no arenito do que no folhelho, portanto as diferentes concentrações de íons na região de frente às camadas de arenito desenvolve a diferença de potencial que podem ser de dezenas a centenas de milivolts. Podendo ter uma deflexão mais para negativo ou mais para positivo em relação ao potencial diante da região de argila (folhelho). A deflexão vai depender das concentrações iônicas na lama de poço e na água de formação. A Figura 22 exemplifica o efeito SP.

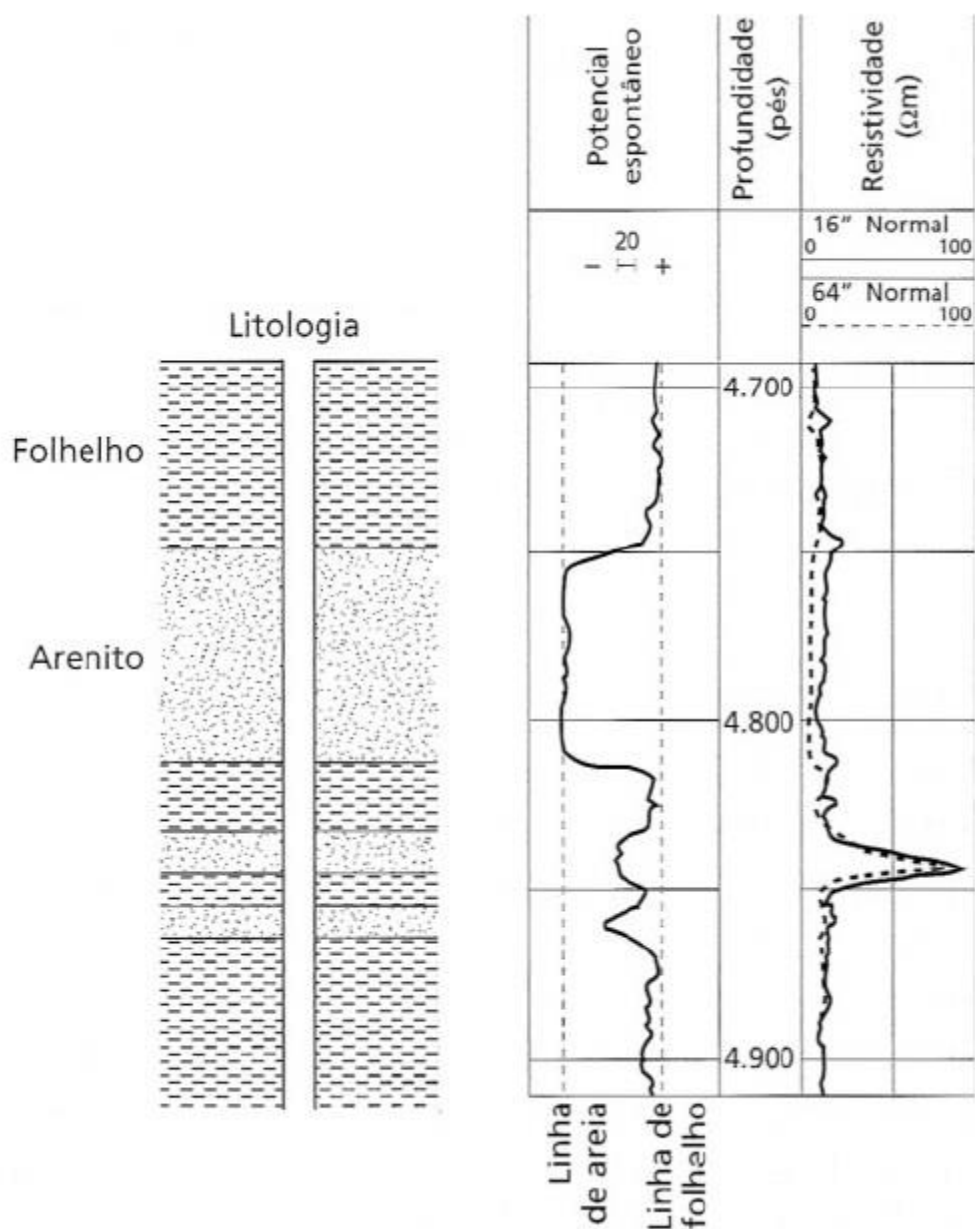
Figura 22 - Perfil de SP.



Fonte: Modificado de Ellis e Singer (1987)

Este tipo de perfil pode ser usado como um marcador de interfaces folhelho/areia ajudando na interpretação de outros perfis de poços. Isto é possível porque as respostas destes dois tipos de rochas são bem características: enquanto no arenito as anomalias são geralmente negativas, no folhelho são positivas, assim como exemplifica a Figura 23.

Figura 23 - Perfis de potencial espontâneo e resistividade.



Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

## 8. METODOLOGIA

Ao projetar um modelo geológico para fins de perfilagem de geofísica de poço é necessário que todos os fatores que envolvam a construção sejam considerados para que a modelagem tenha validade. Fatores estes que vão desde a seleção do material sedimentar e de que forma simular os processos naturais até a aplicação do método geofísico que valide o modelo.

Portanto, dividiram-se as etapas do projeto de construção em tópicos: protótipo geológico, o modelo e a validação do modelo.

### 8.1. Protótipo geológico

Evidentemente neste projeto busca-se um modelo em escala reduzida. Sendo assim, é necessário, primeiro, basear-se em um protótipo geológico. No caso deste trabalho, deseja-se reproduzir ambientes sedimentares diversos contidos no mesmo modelo na tentativa de simular as propriedades físicas e analisar como são suas respostas geofísicas. Portanto, não foi usada como base uma sequência geológica real.

Neste projeto, o ambiente geológico simulado consiste de formações, predominantemente, plano paralelas seguindo os três princípios que regem a organização de sequências sedimentares propostas por Nicolau Steno<sup>8</sup>: a superposição, a horizontalidade original e a continuidade lateral.

Superposição: em sequências de camadas a mais velha sempre está na base e a mais nova sucessivamente acima dela.

Horizontalidade original: depósitos sedimentares tendem a se acumular em camadas horizontais sucessivamente dispostas.

Continuidade lateral: camadas sedimentares são contínuas podendo, ainda, se afinar lateralmente.

Para melhor entendimento da sequência estratigráfica, dividiu-se o modelo em três blocos: I, II e III. Sendo, o mais profundo, o bloco I, o bloco II intermediário e o bloco III o mais raso.

---

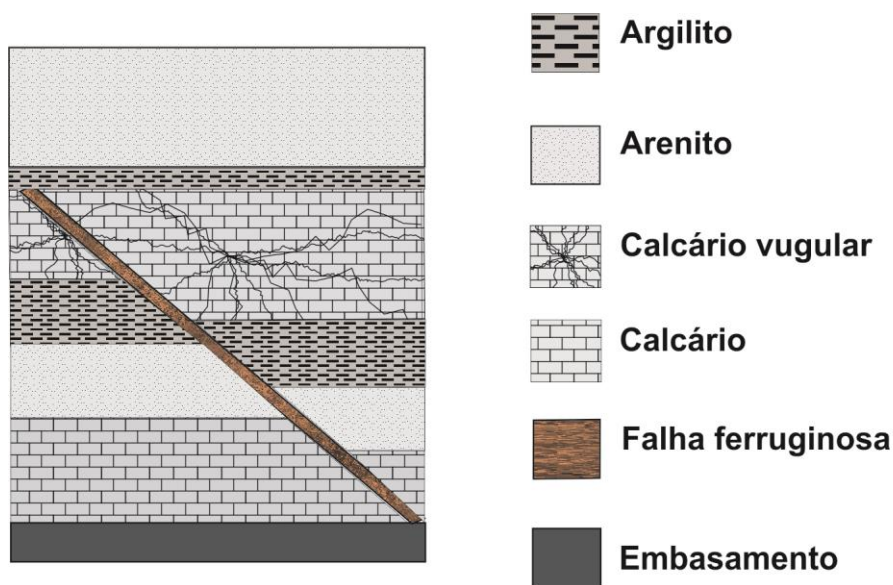
<sup>8</sup> O dinamarquês Nils Stensen, mais conhecido pelo nome latinizado de Nicolau Steno (1638-1686), foi quem primeiro enunciou os princípios da Geologia.

A sequência estratigráfica do bloco I, representado na Figura 24, simula um ambiente em que primeiro houve um derramamento de material ígneo, formando o embasamento, posteriormente ocorreram as deposições de calcário, areia e argila demonstrando que houve alteração dos ambientes deposicionais ao longo do tempo. Mais tarde no tempo geológico, houve nova deposição de calcário, sendo que nesta camada ocorreu uma erosão química tornando o calcário vugular. Após a deposição e consolidação de todas estas camadas ocorreu um falhamento normal com ângulo de 45°, deslocando todas as camadas e abrindo caminho para percolar fluidos hidrotermais ricos em metais dissolvidos. Os metais então foram precipitados na falha por agentes químicos.

Posterior ao falhamento e a intrusão de fluidos, um processo erosivo destruiu a parte superior da formação e, então, ocorreu a deposição da fina camada argilosa que, neste caso, serve como selante para limitar a percolação dos fluidos da falha e, por fim, deposição de uma camada espessa de areia.

Além das respostas geofísicas esperadas para as camadas sedimentares típicas como arenito, argilito e calcário, é interessante notar neste bloco como a falha será registrada nos levantamentos em poço, no caso deste trabalho, especificamente, a ferramenta proposta é uma sonda normal para obter o perfil de resistividade e uma sonda para registro de potencial espontâneo, e assim poderá ser demonstrado que somente com os registros destas ferramentas não darão indícios da existência de uma falha geológica. Isto demonstrará, portanto, a limitação da ferramenta para observar a distribuição de resistividade com assimetria radial.

Figura 24 - Sequência estratigráfica do bloco I.



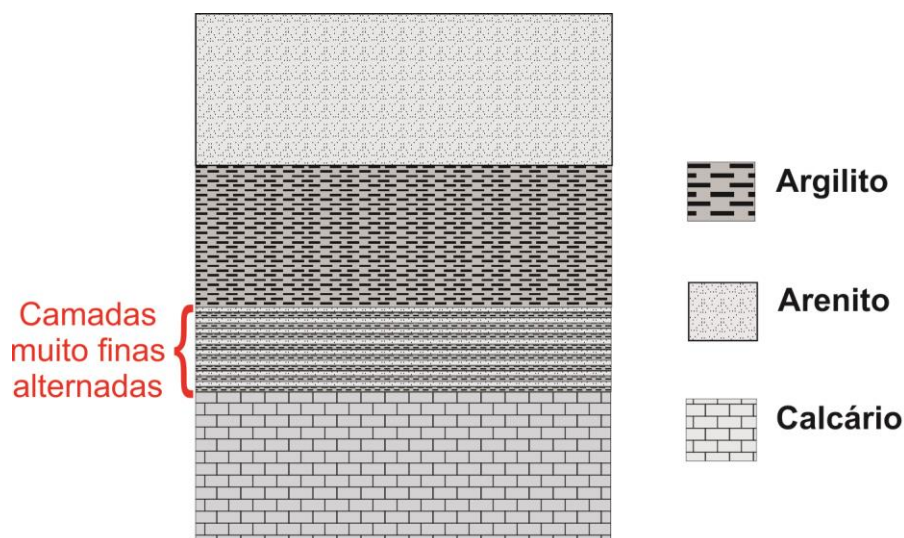
Fonte: Da autora.

Na história geológica do bloco II, como mostra a Figura 25, não houveram movimentos mecânicos como a falha do bloco anterior. Porém, destaca-se a ocorrência de sequência de camadas muito finas com seus parâmetros petrofísicos diferenciados (arenito e argilito), o que também terá efeitos no perfil elétrico.

Na formação, inicialmente ocorreu uma deposição de calcário registrando ambiente de baixa energia. Logo após, aconteceu a deposição de camadas muito finas intercalando arenito e argilito demonstrando sucessivas transgressões e regressões marinhas. Posteriormente, a deposição de camadas espessas de argila e de areia dando a entender que os avanços e as regressões do mar foram menos intensos ou que o ambiente esteve exposto a épocas mais chuvosas e menos chuvosas, respectivamente.

A sequência de camadas muito finas não conseguirá ser vista pela sonda proposta neste trabalho, pois as espessuras são bem inferiores que a menor distância dos eletrodos da sonda. A construção proposital dessas camadas também serve para demonstrar a limitação da ferramenta e possibilita a aplicação de ferramentas mais eficientes.

Figura 25 - Sequência estratigráfica do bloco II.

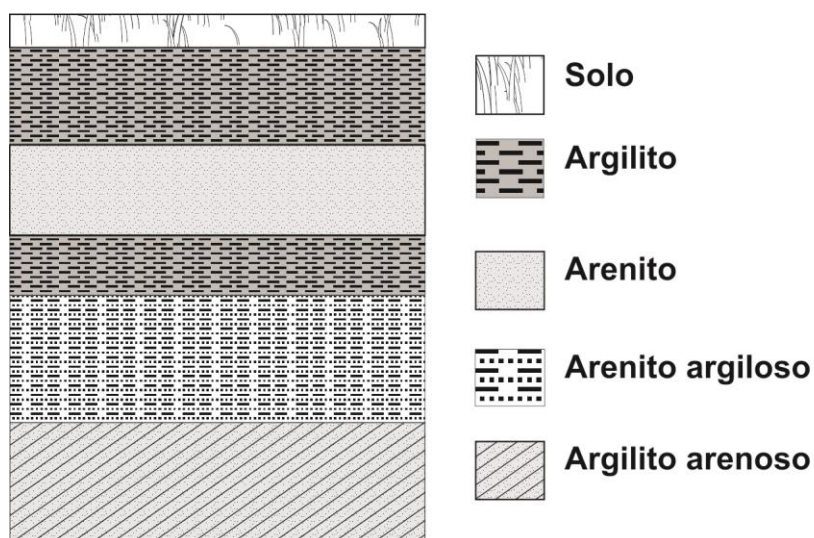


Fonte: Da autora.

Por fim, o bloco III, mostrado na Figura 26, começa com deposição de camadas impuras que são bem mais comuns do que camadas limpas. Primeiro uma camada argilo-arenosa (com variação gradativa de argilosidade na faixa de 75% a 100%) e depois uma camada areno-argilosa (com variação gradativa de argilosidade na faixa de 0 a 25%) buscando simular os padrões de energia os quais os sedimentos foram depositados.

Os registros destas camadas ficarão entre os extremos das linhas de argila e areia, assim como na Figura 22, nos quais as amplitudes dependeram da fração de cada sedimento na camada. Seguindo na história geológica, houve a deposição de camadas de argila, de areia e da argila, respectivamente, registrando, também, as mudanças energéticas até chegar à camada mais superficial.

Figura 26 - Sequência estratigráfica do bloco III.



Fonte: Da autora.

A escolha desse protótipo geológico, devidamente concebido, permitirá, também, que os métodos de prospecção geofísica aplicados no modelo possam ser avaliados quanto as suas capacidades de observação de certas estruturas.

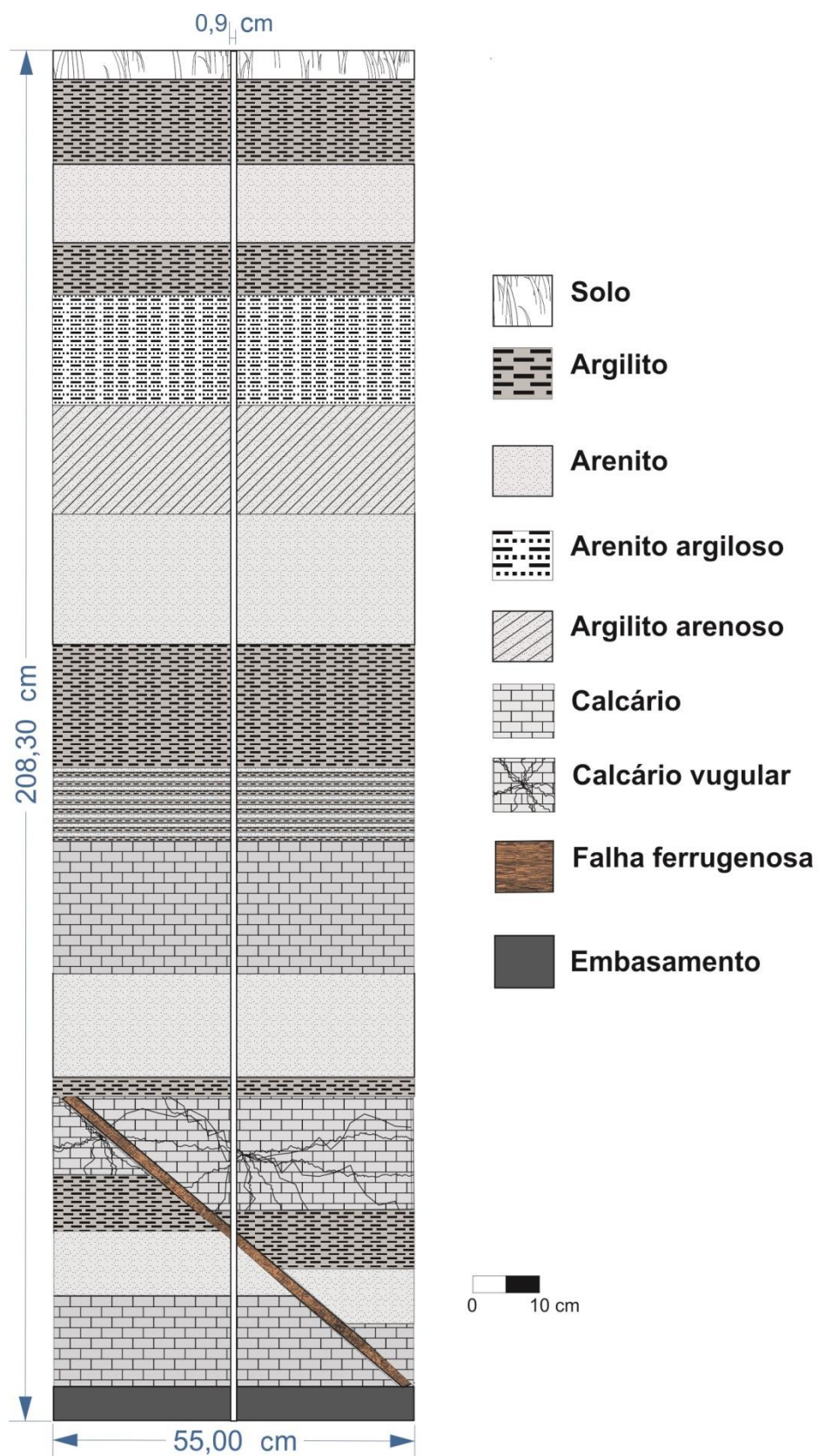
Observação: no protótipo não foram incluídas dimensões métricas das camadas porque as dimensões verticais dependerão, exclusivamente, da escala utilizada no modelo.

## 8.2. O Modelo

O modelo segue exatamente a sequência estratigráfica do protótipo, porém em escala reduzida obedecendo à similitude geométrica. Assim, o modelo é uma cópia em escala reduzida do protótipo, toda via, alguns fatores são diferentes nos dois. Como visto anteriormente, para que haja similitude é necessário que o modelo e o protótipo sejam correlacionados através de uma transformação linear. Porém, quando se aplica uma transformação linear geométrica, todos os parâmetros geométricos devem ser igualmente transformados. No caso da transformação linear do protótipo para o modelo, o tamanho, a forma e a disposição dos grãos não serão devidamente consideradas. Apesar disto, a porosidade e a cimentação serão garantidas, para a reprodução das propriedades físicas e assim a teoria da similitude, aplicada ao modelo é assegurada, pois as respostas geofísicas de

interesses são mais influenciadas pelo comportamento macroscópico dos parâmetros petrofísicos. As dimensões do modelo, das suas camadas e do poço podem ser observadas na Figura 27

Figura 27 - Sequência estratigráfica do modelo.



Fonte: Da autora.

A escala da Figura 27 está de 1 mm do desenho para 1 cm do modelo. Já as dimensões mostradas no desenho são apenas do modelo, sem a estrutura de contenção.

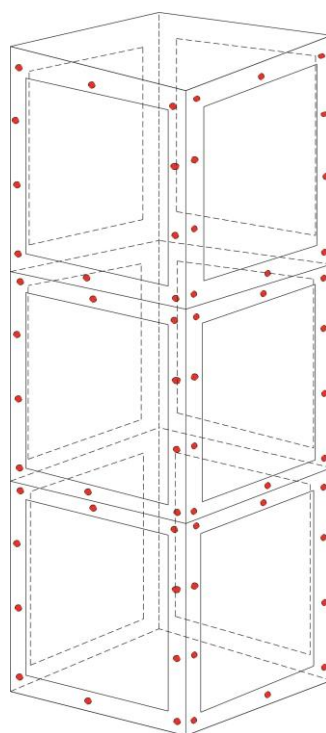
Para realizar a montagem do modelo dividiu-se a construção em etapas da seguinte forma: construção estrutural, construção do modelo e construção do poço.

### 8.2.1. Construção estrutural

Neste projeto foi concebida uma estrutura metálica que possa conter o modelo físico em escala reduzida com dimensões razoáveis para experimentações com diversas técnicas de perfilagem de geofísica de poço. Para isso, pretende-se uma estrutura em ferro reforçada com dimensões 210 x 61 x 61 cm e com cavidades laterais de 4 cm para alocação das paredes de contenção que serão presas à estrutura metálica por parafusos como mostra a Figura 28.

A estrutura é projetada em três blocos devida necessidade de acesso à parte interna durante a construção das camadas de baixo para cima.

Figura 28 - Estrutura metálica de contenção.



Fonte: Da autora.

Para facilitar a construção do modelo, propõe-se a construção de bloco após bloco. Posteriormente a construção do bloco inferior as paredes de cada bloco serão colocadas e inicia-se a montagem das camadas do bloco e assim por diante. Por exemplo, ao fazer as camadas do bloco I apenas as paredes deste bloco serão presas deixando os vãos livres para melhor acesso ao interior do bloco.

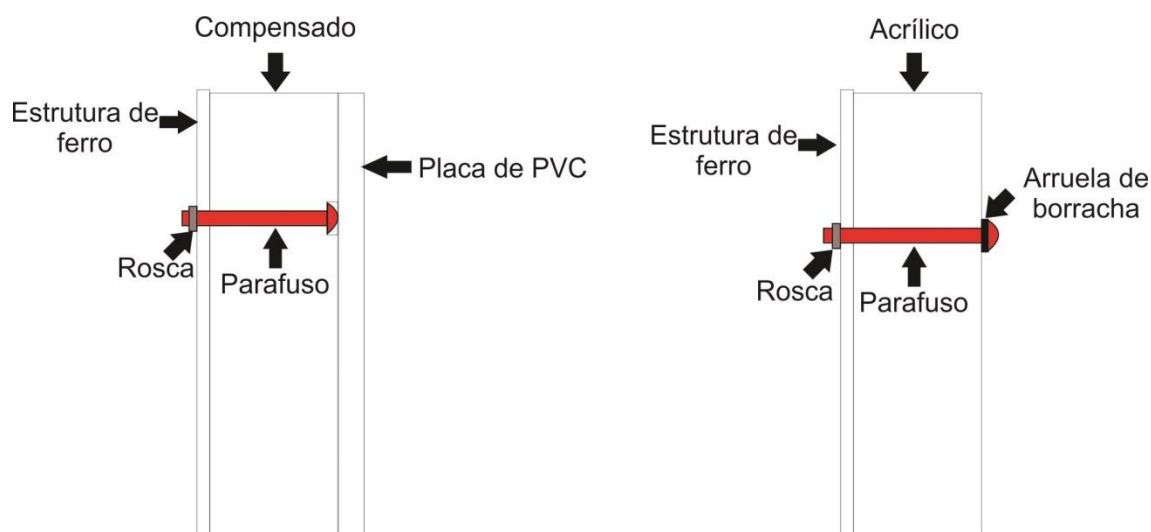
Idealmente é mais interessante que as paredes de contenção sejam de acrílico reforçado de 20 mm, tal qual foi feita na experiência previa com a exposição “O que é Geofísica?” permitindo a total visualização lateral do modelo. Porém a utilização de paredes em material acrílico tornará o projeto bastante oneroso.

Uma alternativa viável é a substituição do acrílico por compensados, de preferência, naval. Contudo o compensado naval não é tão acessível. Desta forma, substitui-se o compensado naval pelo normal. Sendo que, neste caso, o compensado deve ser devidamente selado e envernizado para tornar-se mais resistente a água. Além disto, a parte interna do tanque deve ser revestido com placas de pvc impermeáveis evitando, assim, o contato da água com o compensado aumentando a vida útil do modelo.

É interessante que, pelo menos, as placas frontais do modelo sejam de acrílico, pois, além de manter a visão da estratigrafia do modelo, possibilitarão o controle da deposição durante o processo de construção.

Estas placas, como mostra o desenho esquemático da Figura 29, serão fixadas conforme a montagem das camadas, através de parafusos nas bordas coincidentes das placas e da estrutura metálica.

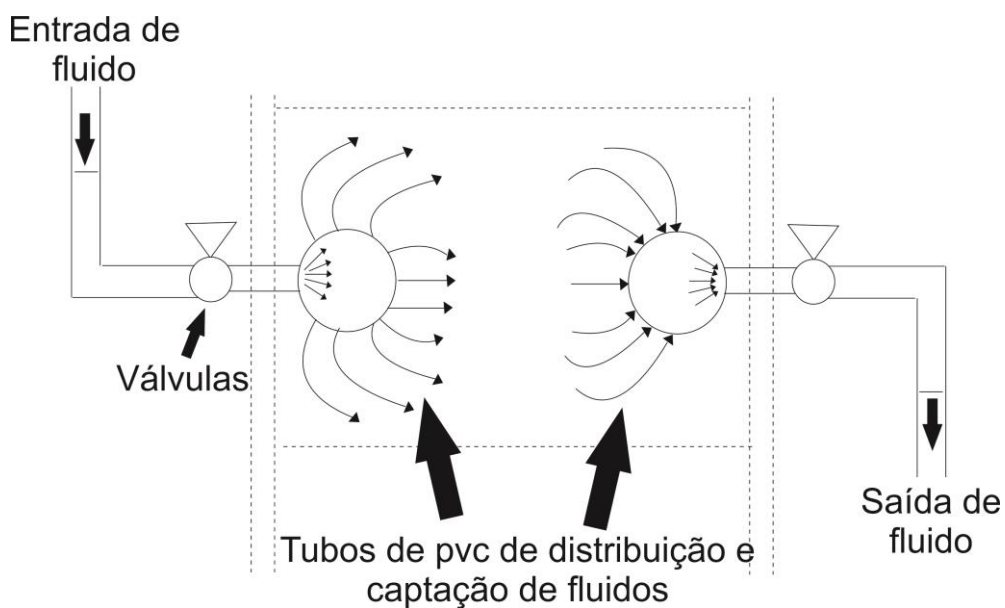
Figura 29 - Esquema de fixação e proteção das placas.



Fonte: Da autora.

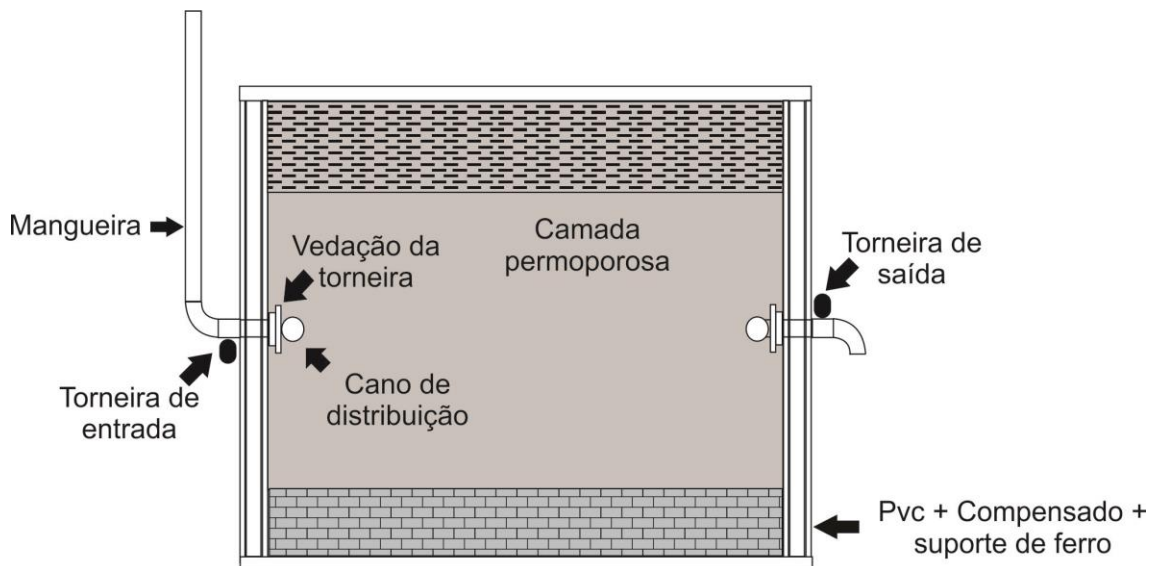
Acoplado às paredes laterais há um sistema de válvulas para permitir a injeção de fluido na falha e nas camadas permoporosas do modelo. A Figura 30 e a Figura 31 esquematizam o funcionamento desse sistema: uma torneira liga a parte exterior e interior do modelo. Na parte exterior a torneira está ligada a mangueiras que servirão para injetar o fluido ao distribuidor interno a camada, que consiste de um tubo de pvc de  $\frac{1}{2}$  polegada furado posicionado dentro das camadas permoporosas o qual possibilitará a distribuição uniforme do fluído ao longo da camada. No outro extremo da camada, um absorvedouro (sumidouro) construído da mesma forma que o distribuidor possibilitará a retirada de fluido da camada. O uso das torneiras em ambas os lados do modelo permitirá o controle de pressão hidráulica nos poros das camadas.

Figura 30 - Esquema explicativo de entrada e saída de fluido.



Fonte: Da autora.

Figura 31 - Vista geral do mecanismo de injeção e retirada de fluido do modelo.



Fonte: Da autora.

Ressaltando que os canos de distribuição estarão localizados na falha e nas camadas permoporosas.

Para evitar vazamentos é indispensável que todas as junções de paredes, os cantos, passagens para tubulações e qualquer caminho possível o qual a água

possa passar sejam completamente vedados com material impermeável como, por exemplo, o silicone. É importante que a cola de vedação seja flexível, pois após o preenchimento total do tanque, com as camadas, as paredes laterais podem sofrer ligeiro afastamento e a cola poderá trincar, se for do tipo rígida. Após vedação, deve-se encher o aparato de água para garantir que a estrutura esteja completamente livre de vazamentos.

### 8.2.2. Construção do modelo

Lembrando que o principal objetivo deste trabalho é possibilitar a montagem de um modelo que servirá tanto como meio didático quanto experimental, deve-se considerar a matéria prima utilizada e a cimentação. Além de destacar as possibilidades de deposição do material e o escorregamento lateral dos sedimentos.

Como foi explicado anteriormente, devido o modelo simular um ambiente geológico para fins de perfilagem de poço foi adotado o uso de matéria prima natural como areia, argila e o calcário conforme o corpo estratigráfico já determinado.

Depois de selecionado o tipo de material, é importante considerar de que forma será depositado. Tendo em vista os princípios de Steno, são consideradas duas possibilidades: (a) deposição por precipitação em meio aquoso, e (b) deposição do material na forma de massa levemente consolidado. As duas opções tem suas vantagens e desvantagens.

A deposição controlada por precipitação do material é o que reproduz com mais fidelidade o modo que ocorre naturalmente em um regime de baixíssima energia. Em termos práticos essa forma também vem da experiência com os trabalhos anteriores ocorrendo da seguinte forma: enche-se o aparato com água e os sedimentos secos são adicionados, espalhando-se de forma uniforme por toda a área do tanque e, então, descerão por ação da gravidade e se acomodarão uniformemente, formando uma camada homogênea. Por ser um processo que se aproxima do natural, a porosidade, devido ao acomodamento, vai ser semelhante a um meio de pouca energia. Principalmente para a formação de argila essa possibilidade é a melhor, pois sua deposição será na forma laminada, o que é determinante para simular as propriedades físicas. Porém, a maior desvantagem deste processo é tempo para finalização da camada. Depois de colocado todo o material desejado é necessário esperar alguns dias para que a camada se

estabeleça na melhor acomodação possível. Ao final, todo esse processo se torna muito mais longo.

Na segunda proposta, a construção da camada dar-se-á pela deposição direta da mistura de material levemente consolidado na forma de “massas” feitas de sedimentos, cimento e água. A mistura é depositada na estrutura e é moldada e compactada mecanicamente conforme o modelo geológico.

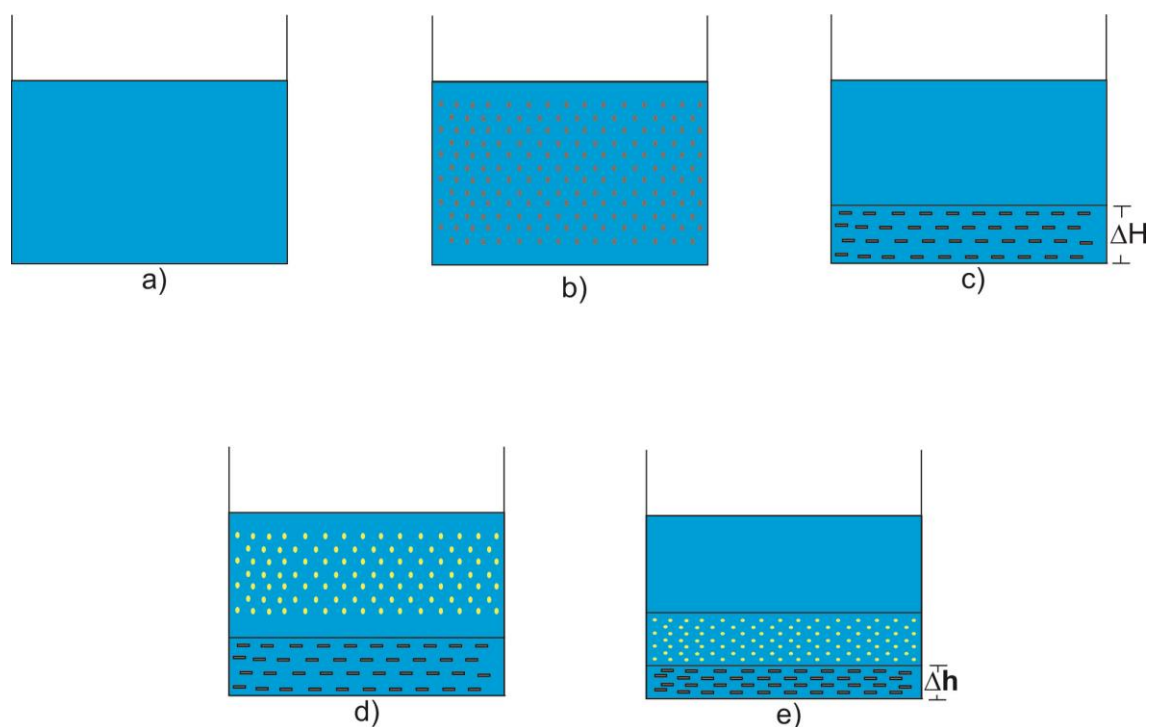
Nas camadas de argila, esta alternativa afeta a sua distribuição laminar que depende da precipitação. Além disto, a mistura e moldagem mecânica a torna mais homogênea, provavelmente destruindo as características anisotrópicas própria da argila.

Independentemente da forma de deposição após a construção das camadas deve ocorrer o processo de maturação que, segundo Teixeira *et al.* (2000), é a diagênese que é composto por quatro etapas: compactação, dissolução, cimentação e recristalização diagenética. Destes, a compactação e a cimentação certamente ocorrerão. Os outros dois dependerão de fatores não controlados.

A compactação mecânica é o resultado da sobrecarga das camadas acima que produzirão uma redução de volume em profundidade como pode ser visualizado na Figura 32. Como consequência, este processo levará a redução de porosidade e permeabilidade.

Para estimar quantitativamente os efeitos da sobrecarga é possível fazer um experimento simples que consiste em compactar uma amostra do mesmo tipo material referente à camada de interesse e submeter essa amostra a sobrecarga controlada em prensa mecânica. Posteriormente, analisar a amostra compactada obtendo sua porosidade e permeabilidade.

Figura 32 - Efeito da compactação mecânica nas camadas. a) Fluido aquoso de deposição b) sedimentos argilosos em suspensão c) precipitação da camada argilosa d) sedimentos arenosos em deposição e precipitação d) deposição da camada arenosa sobre a camada argilosa.



Fonte: Da autora.

A dissolução é o efeito do fluido intersticial sobre as camadas. E, também, ocorrerá naturalmente no modelo. É de interesse que a dissolução seja a mínima para que não altere profundamente as camadas permoporosas.

Naturalmente os sedimentos precipitados sofrem cimentação ao longo do tempo. “A cimentação é a precipitação química de minerais a partir dos íons em solução na água intersticial.” (TEIXEIRA *et al.*, 2000, p. 291). Sendo assim, a cimentação da rocha vai depender diretamente da composição química dos materiais presentes nessa camada. Além disso, ela tem como função consolidar os sedimentos, porém é um processo demorado.

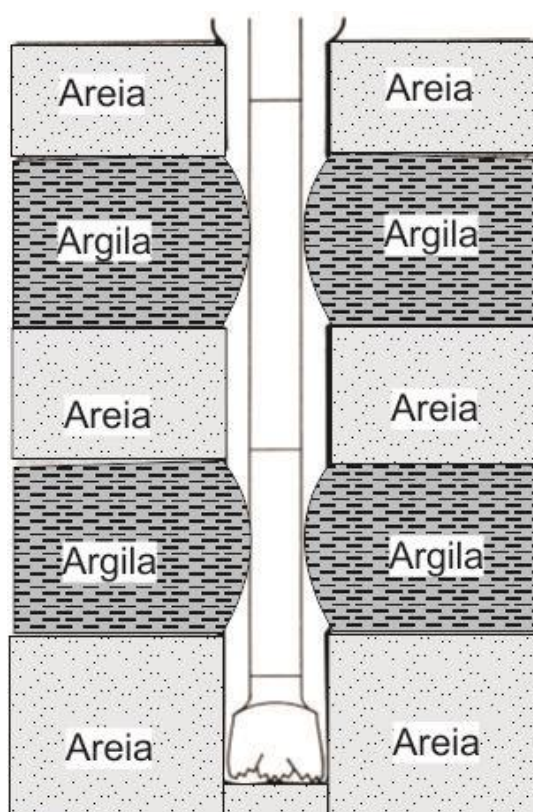
No modelo, contudo, a cimentação não ocorrerá de forma completamente natural. Logo, a saída encontrada foi: adicionar cimento da construção civil aos sedimentos. A razão desta cimentação acelerada nos dois tipos de rochas presentes tem como principal motivo manter a integridade do poço.

Nas camadas arenosas, sem a cimentação poderá ocorrer desmoronamento colapsando o poço, portanto reduzindo a vida útil do mesmo. Por outro lado, a

cimentação artificial deve ser controlada para que não afete profundamente as propriedades petrofísicas das camadas.

Já a necessidade de cimentação nas camadas argilosas é para diminuir o poder da argila de absorver água. Isto é importante, pois estas camadas ao serem perfuradas e atravessadas pelo poço podem sofrer alívio de pressão radial e também podem absorver água proveniente da lama de perfuração. O alívio de pressão e a hidratação extra, produzirá uma expansão lateral de camadas de argila para dentro do poço provocando possível fechamento como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Expansão da camada argilosa no poço.



Fonte: Modificado de Ellis e Singer (1987).

Para alcançar a cimentação adequada, alguns testes foram realizados adicionando três tipos de materiais para acelerar a cimentação: cimento branco, cimento Portland e argamassa para assentamento de tijolo de vidro.

Os testes foram feitos com o mesmo tipo de sedimento – mesmo tipo de grãos – e diversas porcentagens de cimento foram adicionados na mistura, com variação de 2 até 32% de massa total como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Amostras de teste.



Fonte: Da autora.

Inicialmente a mistura do sedimento mais cimento foi analisada para apenas cada tipo de cimento separadamente. A partir disso, as conclusões foram de que o cimento branco e o Portland deram os melhores resultados quanto à rigidez e porosidade nos testes, além de diminuir a faixa de porcentagem ótima para 10 a 15%. As amostras com argamassa mostraram-se muito friáveis para baixas concentrações e pouco porosas para as concentrações maiores.

Mas, foi a mistura dos dois que trouxe os melhores resultados: 90% sedimentos, 7% cimento Portland e 3% cimento branco em massa, o caso da Figura 35. As amostras ficaram rígidas, porém sem perder muito os valores de porosidades quando comparado com uma amostra 100% sedimento.

As medidas dos percentuais foram realizadas com uma balança semi-analítica da marca Shimadzu com precisão de 0,01 g.

Figura 35 - Amostra ótima.



Fonte: Da autora.

Para conhecer o quanto a cimentação afeta a porosidade, foram realizados alguns testes comparativos com e sem cimentação. Seguiu-se os seguintes procedimentos:

Para amostra não cimentada:

- a) Tomou-se um determinado volume de água ( $V_a$ ) e mediu-se a massa daquele volume ( $m_{ag}$ ).
- b) Adicionou-se areia na água até que o volume ocupado pela areia ( $V_{ar}$ ) fosse igual ao volume ocupado pela água anteriormente ( $V_a$ ), portanto,  $V_t = V_{ar} + V_a$  e mediu-se a massa total ( $m_t$ ) correspondente a massa de água mais a massa de areia ( $m_t = m_{ag} + m_{ar}$ ).
- c) Do volume total ( $V_t$ ) descartou-se o volume de água em excesso acima do volume de areia.
- d) Mediu-se a massa  $m_{ap}$  correspondente ao volume da areia saturada.
- e) Calculou-se  $m_{ap} - m_{ar} = m_p$ , no qual  $m_p$  corresponde a massa da água que ocupa os poros.
- f) Considerando a densidade da água igual a  $1\text{g/cm}^3$ , conclui-se que  $|m_p| = |V_p|$ .
- g) Aplica-se a eq. 1 e obtém-se a porosidade.

Para a amostra cimentada:

- a) Produziu-se a amostra ótima da misturados materiais e água.
- b) Colocou-se a amostra em uma estufa durante dois dias para secar.
- c) Após seca, mediu-se a massa da amostra  $m_{am}$  e o volume  $V_{am}$ .
- d) Saturou-se a amostra de água e a massa  $m_t$  foi medida.
- e) Calculando:  $m_t - m_{am} = m_p$ .  $m_p$  é a massa da água que ocupa os poros da amostra.
- f) Usando o mesmo valor anterior de densidade da água, chega-se ao volume dos poros  $V_p$ .
- g) Aplica-se a eq. 1 e obtém-se o valor da porosidade.

Ao aplicar os testes, os valores de porosidade encontrados para amostra não cimentada foi de 33% e da amostra cimentada 23%. Deve-se considerar que não houve sobrecarga extra para formação das camadas.

Apesar dos cuidados, alguns erros estão presentes nos procedimentos experimentais tais como: (1) o valor exato e preciso dos volumes e (2) a densidade da água utilizada. Para minimizar tais erros é necessário que haja total controle dos volumes medidos e a água usada no teste seja destilada garantindo o valor de densidade igual a  $1\text{g/cm}^3$  e a temperatura conhecida.

Mesmo adicionando cimentação extra para dar alguma consolidação às rochas, os movimentos de acomodação dos sedimentos permanecem. Um desses movimentos é o escorregamento lateral, que é previsto pelo princípio da horizontalidade original citado anteriormente, pois para manter a forma horizontal da camada os sedimentos que estão mais altos em relação à linha média do topo livre da camada tendem a escorregar lateralmente.

Ainda que o movimento lateral dos sedimentos seja pequeno quando comparados com a estrutura de contenção do modelo, o movimento de milhares de grãos de areia pode provocar aumento de pressão significativo nas paredes internas do modelo. Para reduzir o escorregamento e, portanto, reduzir a pressão nas paredes da base, ao construir as camadas deve-se colocar um tecido bem fino em intervalos de alturas constantes. O uso do tecido tem por função aumentar o atrito horizontal e assim reduzir o grau de liberdade de movimentação dos grãos em contato com ele.

O tecido deve ser sintético, de trama fina, colocado paralelamente à camada para que não prejudique a movimentação do fluido no sentido vertical.

É importante que, ao construir o modelo, amostras de todas as camadas sejam devidamente guardadas para posteriores testes experimentais com a finalidade de determinar as propriedades petrofísicas das amostras, quando submetidas a sobrecarga equivalente à sua posição no modelo e possível correlação com os perfis geofísicos que serão obtidos.

### 8.2.3. Construção do poço

O poço, um dos elementos mais importantes, deve atravessar todas as camadas sobrepostas que formam o modelo. Deve ser devidamente centralizado, vertical e estável. Para o modelo proposto adotou-se um poço com diâmetro de 9 mm, suficiente para a introdução de diversos tipos de ferramentas geofísicas em escala reduzida.

É oportuno considerar que ao adotar o diâmetro de poço em 9 mm para o modelo, significa dizer que a escalabilidade perfeita para um poço protótipo de 8" terá como fator de escala perfeita de  $l=22,6$  e para um poço protótipo de 22" a escala perfeita será de  $l=62,2$ . Contudo, o fator de escala deverá ser definido pela sonda utilizada na experimentação segundo seus aspectos teóricos. Assim, o fator de escala escolhido poderá não satisfazer a similitude perfeita para poços do protótipo com medidas 8" e 22", que são os padrões, devendo, então, o diâmetro do poço protótipo ser ajustado.

O poço do modelo deve ser preferencialmente do tipo *open hole* que garanta uma simulação mais próxima do real. Contudo, o poço deve obedecer duas importantes necessidades:

1. Garantia de que o poço seja estável por toda vida útil do modelo.
2. Garantia de os campos aplicados e/ou observados não sejam profundamente afetados por possíveis revestimentos de sustentação das paredes do poço.

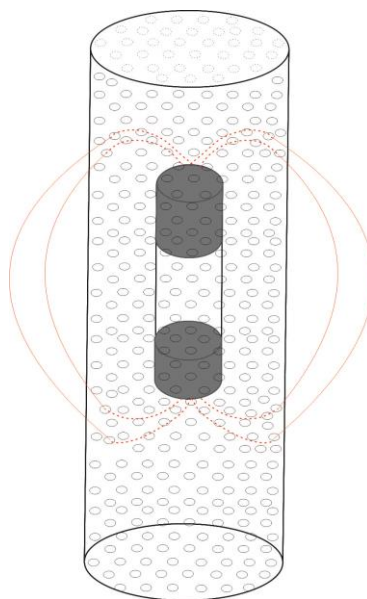
Para garantir estas necessidades simultaneamente, duas propostas foram pensadas: (1) poço com revestimento (2) poço sem revestimento.

No poço com revestimento para maior dar estabilidade ao poço, um tubo pode ser adequado, porém é necessário garantir que as linhas de fluxo atravessassem a parede do tubo. Pra isso dois tipos de revestimentos são apresentados:

1. Revestimento tubular com paredes perfuradas
2. Revestimento tubular espiralado.

O poço com revestimento tubular com paredes furadas pode ser construído com o uso de um tubo pvc completamente perfurado em toda sua extensão, com grande densidade de furos por área e diâmetro de furos inferior a 0,2 mm, representado na Figura 36, impedindo a entrada de grãos de areia no poço. Além do mais, a maior densidade de furos garante uma melhor continuidade das linhas de fluxo.

Figura 36 - Efeito do poço de tubo furado.

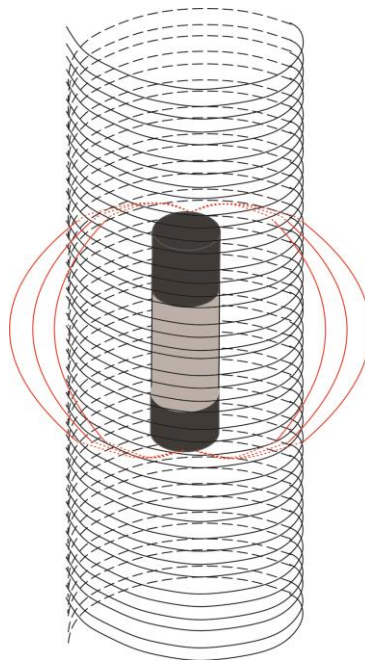


Fonte: Da autora.

O poço com revestimento espiralado pode ser construído com simples espiras de caderno. Para isso, são utilizadas quatro espiras entrelaçadas e unidas para formar uma coluna 210 cm. Para manter o afastamento constante entre as espiras e com eixo reto, o revestimento espiral deve ser montado entorno de um tubo rígido e reto e após a coluna espiral completada o tubo deve ser retirado, de tal forma que impeça a entrada de grãos no poço, além de garantir a passagem das linhas de fluxos como mostra a Figura 37. Este procedimento é mais difícil que o anterior,

porém dará melhores resultados, pois oferece obstáculos menores para as linhas de campo.

Figura 37 - Efeito do poço de espiras.



Fonte: Da autora.

Qualquer uma das duas propostas anteriores que faz uso de material estranho para estruturar o poço permanentemente, causaria algum efeito indesejado quando forem aplicados os métodos elétricos de contato galvânico, além disso, o uso desses tipos de revestimentos não garantirá que o *mudcake* será devidamente constituído pela circulação da lama.

Diante destas dificuldades, a construção do poço com revestimento plástico pode ser descartada, usando-se, a partir de então, o poço sem revestimento. Para isto, outras duas alternativas são possíveis:

- a) Poço *open hole* construído por perfuração mecânica a partir da superfície, após as camadas serem construídas e consolidadas.
- b) Poço *open hole* construído simultâneo com a construção das camadas

A abertura posterior à construção completa das camadas esbarra na dificuldade de perfurar as camadas, pois é necessária uma sonda de perfuração em escala reduzida com torque suficiente para atravessar as camadas, possibilidade de injeção

de lama e garantia de verticalidade. Problemas estes também recorrentes nas perfurações de poços em ambientes reais.

Para o caso do poço construído concomitante às camadas, precisa-se de um tubo que servirá de molde para o poço. O tubo deve ser rígido o suficiente para suportar a pressão radial das camadas em volta. Para isso, pode ser de cobre com diâmetro 7 mm e para evitar adesão de material na parede do tubo é importante que haja uma cobertura de material gelatinoso e solúvel em água como, por exemplo, sabão de coco. Esta cobertura é necessária para permitir a completa retirada do tubo posterior à construção das camadas. A cada camada construída o tubo deverá ser movimentado com um giro de tal forma a garantir que o mesmo não fique preso as camadas.

Após a construção completa, o tubo deverá se retirado por completo e será introduzida uma broca com lama de perfuração para eliminar o excesso de sabão e formação do *mud cake* e das zonas invadidas. Tendo, assim, a simulação mais fiel e segura possível da abertura do poço.

### **8.3. Validação do modelo**

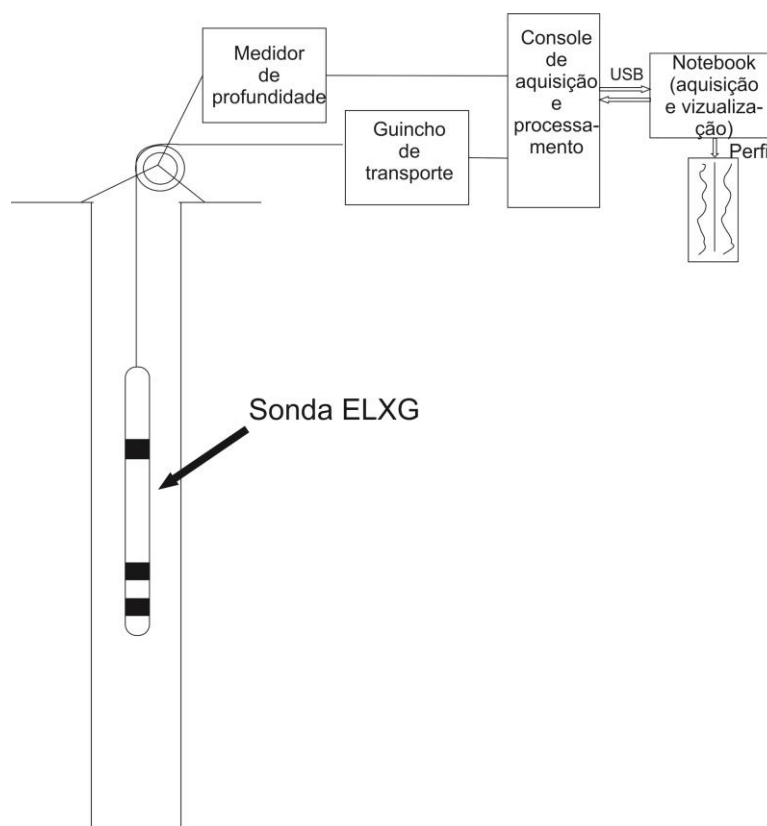
Para avaliar e validar o modelo geológico apresentado neste trabalho é necessário o auxílio de uma sonda que deve ser construída em escala reduzida, em correspondência com uma sonda geofísica real relacionada através de um fator geométrico ( $l$ ). Para a definição do fator geométrico devem ser levados em consideração os limites físicos impostos (dimensão lateral do modelo e diâmetro do poço).

#### **8.3.1. Sonda**

Uma sonda elétrica é proposta como uma ferramenta geofísica adequada para avaliar e validar o modelo em escala reduzida. Para isso, propõe-se uma cópia em escala reduzida da sonda elétrica ELXG, manufaturada pela Robertson Geologing Ltda. Esta sonda é composta por um conjunto de ferramentas destinadas às medidas de resistividade elétrica, potencial espontâneo e raios gama. A sonda real possui 2,60 metros de comprimento, ao longo da qual estão distribuídos os eletrodos

SPR (*single point resistance*), SHN (*short normal, 16"*), LN (*long normal, 64"*), SP (*spontaneous potential*) e um sensor GR (*gamma ray*). Um cabo elétrico com reforço de aço conecta a sonda ao console de superfície que é responsável pelo processamento dos dados enviados pela sonda deslocada no interior do poço. Um sistema de leitura de profundidade posicionado na boca do poço observa a posição da sonda em profundidade. Esta posição, por sua vez, é controlada por um guincho mecânico. O console é, então, conectado ao computador para a aquisição e visualização dos dados por intermédio de um software (*Winloger*) proprietário da Robertson Geologing. Na Figura 38 é mostrado o diagrama de blocos dos sistema de perfilagem geofísica de poço MicroLogger II, conectado à sonda ELXG.

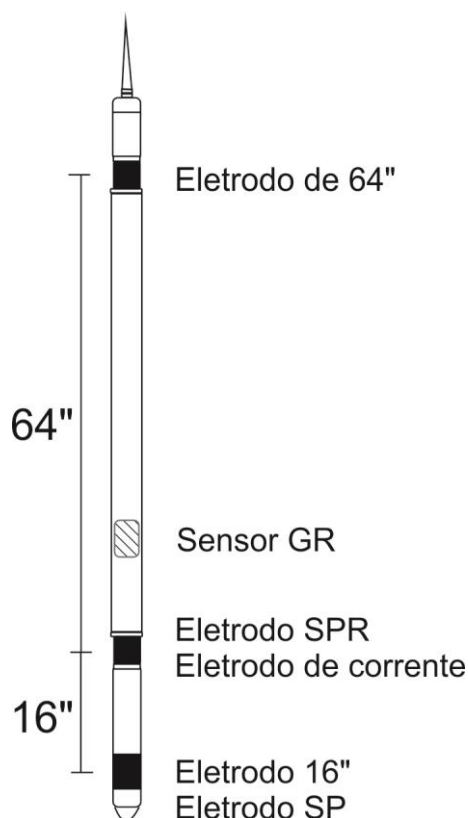
Figura 38 - Diagrama de blocos do sistema de perfilagem geofísica de poço MICRORANGERII.



Fonte: Da autora.

Na Figura 39, mostra-se a sonda real ELXG, com a distribuição dos eletrodos/sensor ao longo do corpo da sonda.

Figura 39 - Sonda elétrica ELXG (Robertson Geologging).



Fonte: Da autora.

Neste trabalho irão ser reproduzidos apenas os eletrodos de resistividade e de potencial espontâneo em correspondência à sonda ELXG. Conforme já foi mencionado, o fator de escala geométrico aplicado ao modelo é controlado pela escala da sonda. Portanto, para o modelo representar um protótipo com camadas finas ou espessas, basta modificar a escala da sonda. Por outro lado, os limites físicos impostos ao modelo devem ser observados.

O tamanho da sonda elétrica de modelo correlacionada com a sonda ELXG por um fator de escala ( $l$ ) será limitada entre dois extremos: (1) para a simulação da sonda de 64" ( $M_{64}$ ), as linhas de campo geradas pela sonda modelo, na região iluminada, não devem sofrer fortes distorções devido à presença da parede do modelo, e, (2) para a simulação da sonda de 16" ( $M_{16}$ ), a distância entre os eletrodos de corrente ( $C_1$ ) e de potencial de 16" ( $P_1$ ), deve variar entre os limites 0,75 até 2 vezes o diâmetro do poço.

Para obedecer ao primeiro ponto, é recomendável que a sonda modelo  $M_{64}$  não ultrapasse 50% do raio diametral do modelo. Como o modelo proposto terá uma

lateral de 55 cm, é recomendável que a sonda modelo  $M_{64}$  não ultrapasse a 27,5 cm de espaçamento entre os eletrodos de corrente ( $C_1$ ) e de potencial ( $P_1$ ). Assim os efeitos de borda do modelo serão reduzidos.

Para obedecer ao segundo ponto, o afastamento entre o eletrodo de corrente e de potencial  $M_{16}$  não deve ser inferior 0,5 diâmetro do poço, pois, caso isso aconteça, a observação ficará basicamente restrita no interior do poço, e o método não será reproduzido fielmente.

Os dados do eletrodo SPR, embora possa ser reproduzido, obtidos não serão fieis ao caso real, pois sofrerão os efeitos de sonda devido à dimensão limitada do modelo e por isso produzindo fortes distorções na linha de campo.

Em consideração às condições acima, a sonda modelo deverá fazer parte de um conjunto instrumental cuidadosamente implementado, que juntos permitirão a medição dos parâmetros geofísicos em profundidade no interior do poço.

Para construir uma sonda multi-eleto-rodo, um cabo fino multicondutor deve estar disponível, pois cada eletrodo disposto na sonda deve ser conectado a um dos condutores do cabo. Na ausência de um cabo fino multicondutor, um cabo simples do tipo utilizado nos *headphones* poderá ser utilizado como cabo de sonda. Neste caso, a sonda de-vera ser apenas dois eletrodos e o afastamento deles deverá ser ajustado a cada descida da sonda no poço para realizar os dois tipos de medidas – normal curta e normal longa.

A sonda é a parte mais simples dentro do conjunto instrumental da perfilagem elétrica na modelagem. Ela consiste de simples eletrodos passivos colineares isolados eletricamente um do outro, com os distanciamentos dados pelo fator de escala protótipo/modelo. O eletrodo de SP deve ser cuidadosamente coberto com negro de platina, ou chumbo, para evitar os efeitos de eletrodo. Os demais eletrodos podem ser construídos de aço ou de chumbo.

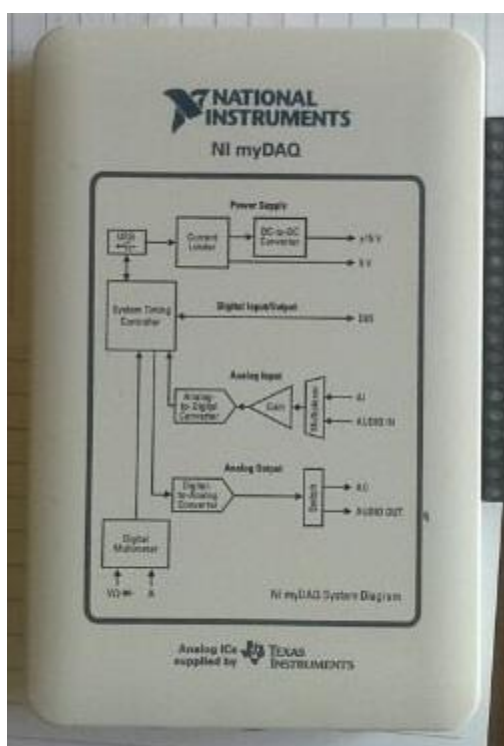
O cabo elétrico deve ser do tipo multicondutor (quando possível), bem isolado, de espessura mínima e com alguma resistência à atração, pois além de conduzir os sinais elétricos da sonda até a superfície, ele também servirá de cabo de transporte de sonda.

Um mecanismo de polia deve ser instalado na boca do poço para guiar o cabo de sonda durante a descida e subida. A polia deve ser conectada a um motor de baixa rotação (*step motor*) ou a um servo motor para a realização do trabalho de movimentação da sonda no interior do poço.

Um subsistema codificador angular deve ser acoplado, também a polia, para determinação da sonda em profundidade. O codificador deve ser capaz de gerar informações da direção e profundidade da sonda.

Para minimizar a construção de circuito eletrônico uma placa de aquisição de dados comercial NI MyDaq microprocessada, produzida pela National Instruments, destinada à área de automação, controle e aquisição de dado é adequada para ser utilizado com o sub sistema de aquisição de dados de sonda, controle de motor de guincho e leitura de posição da sonda. Esta placa contém conversores analógicos-digitais e portas de controle I/O necessários ao sistema instrumental de modelagem. A Figura 40 é a fotografia da placa com o diagrama de blocos impresso no corpo da mesma.

Figura 40 - Foto da placa NI MyDaq.

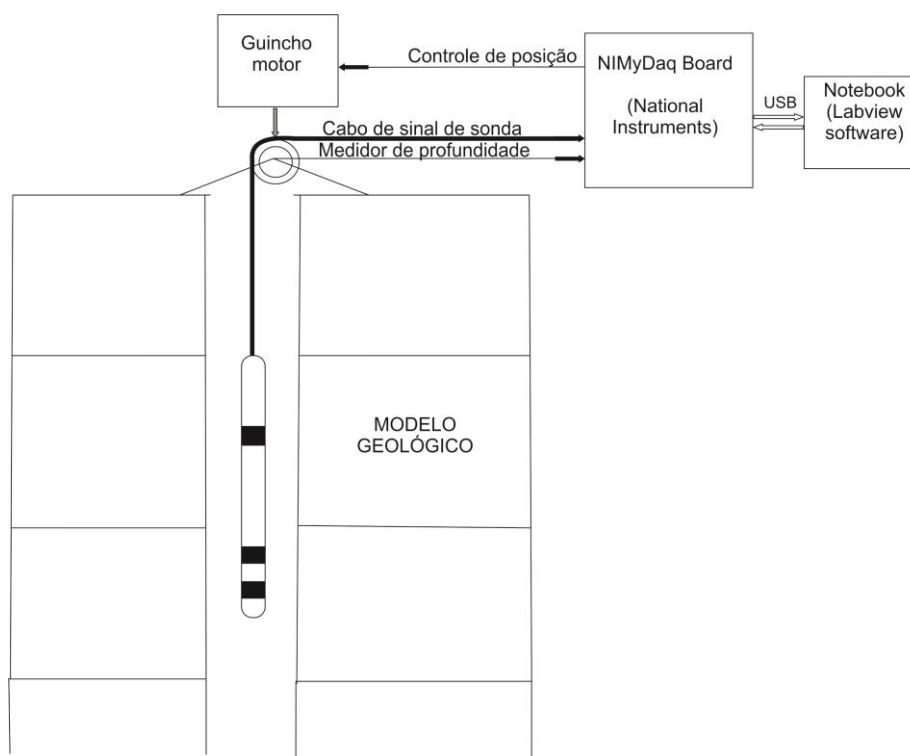


Fonte: Da autora.

A comunicação com um computador de controle geral é feita via interface USB. Um notebook deve ser utilizado para controle da placa NI MyDaq. O software Labview, previamente instalado no notebook, permitirá desenvolver toda a programação necessária que consiste de todos os procedimentos de controle, aquisição de dados, processamento digital dos dados e geração dos perfis de resistividade e de potencial espontâneo.

O diagrama de blocos Figura 41 demonstra o sistema de perfilagem geofísica de poço no modelo.

Figura 41 - Diagrama de blocos do sistema de perfilagem geofísica de poço no modelo.



Fonte: Da autora.

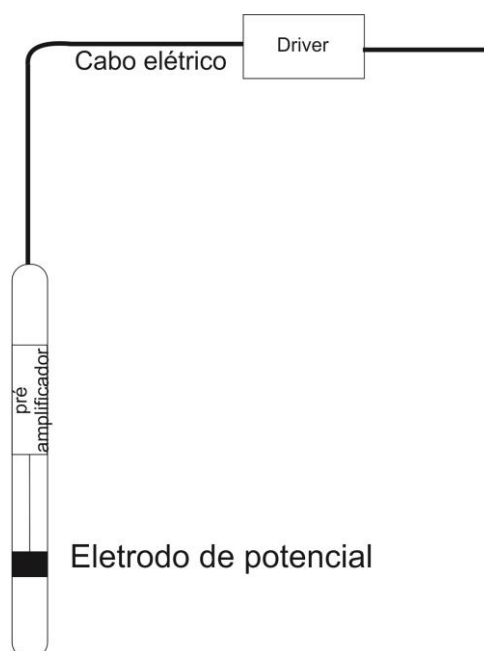
Geração do sinal de corrente – para energizar o meio no modelo geológico por imposição de um campo elétrico entre os eletrodos de corrente na sonda e na superfície é necessário fornecer energia ao sistema. Embora, toda a teoria do método elétrico até aqui foi desenvolvida utilizando uma fonte de energia de corrente contínua, na prática, contudo, não se deve utilizar corrente contínuas para evitar os efeitos de polarização de eletrodos. Para isso, faz-se uso de um sinal de corrente que alterna periodicamente, geralmente em torno de uns 100 Hz, assim os eletrodos de corrente trocam de polaridade alternadamente evitando os efeitos da polarização

de eletrodo. A placa NI MyDAQ é capaz de gerar os sinais de corrente necessária, porém um amplificador de áudio é requerido para fornecer potencia suficiente para energizar adequadamente. Assim uma corrente elétrica fluirá entre os eletrodos deslocando os íons no interior do modelo.

Sinal de potencial elétrico – Uma vez energizado o modelo, em regime estacionário, os íons em movimento produzirão as linhas de corrente, que, por sua vez, estabelecerão as superfícies equipotenciais. Os eletrodos de sonda localizados em posições pré estabelecidos “sentem” estas superfícies equipotenciais. Dessa forma, a diferença de potencial entre os eletrodos na sonda e o outro fixado na superfície, pode ser medida. A ddp medida ( $\Delta V$ ) refletirá os efeitos da distribuição espacial da resistividade dos sedimentos acamadas no modelo.

É importante frisar que os eletrodos são do tipo passivo, conectados a um longo cabo elétrico e por isso podem ocorrer acoplamento capacitivos indesejáveis. Para evitar isto, é recomendável que um pré-amplificador casador de impedância seja utilizado e localizado na própria sonda, como mostra a Figura 42.

Figura 42 - Sonda com pré-amplificador.

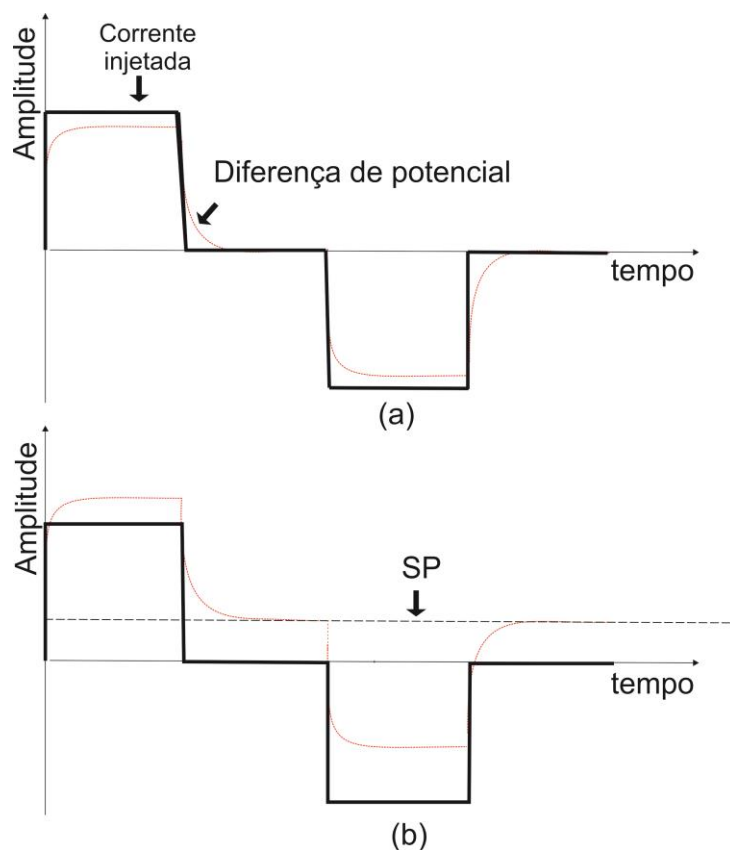


Fonte: Da autora.

O sinal de SP incorporado ao sinal de potencial medido deve ser obtido por processamento digital é o mais adequado, pois envolve menos custo instrumental.

Considerando que a corrente injetada no meio é do tipo pulsada com ou sem retorno ao zero (NRZ), o valor do sinal SP nada mais será que o valor médio de  $\Delta V$  medida no eletrodo  $M_{16}$ , como mostrado na Figura 43.

Figura 43 - Sinais nos eletrodos de corrente no eletrodo  $M_{16}$ . (a) sem efeito SP e (b) com efeito SP.



Fonte: Da autora.

Simple procedimentos matemáticos podem ser aplicados para a determinação de  $\Delta V_{16}$  e o valor de SP. Deve-se lembrar de que o efeito SP está presente em todo tipo de medida de diferença de potencial, pois é um efeito eletrolítico inerente a medida.

A corrente  $I$ , deve ser medida continuamente evitando que qualquer flutuação na corrente gerada possa induzir erros, o que pode acontecer se o procedimento for medir a corrente uma única vez.

A placa NI MyDAQ tem canal A/D suficiente para as medidas de  $I$ ,  $\Delta V_{16}$  e  $\Delta V_{64}$ .

Com estas medidas e as devidas filtragens o valor da resistividade  $\rho_{a_{16}}$  e  $\rho_{a_{64}}$  podem ser determinados por:

$$\rho_{a_{16}} = k_{16} \frac{\Delta V_{16}}{I} \text{ e } \rho_{a_{64}} = k_{64} \frac{\Delta V_{64}}{I} \quad (36)$$

Os dados obtidos devem ser plotados versus a profundidade obtida pelo codificador angular. Por fim o perfil geofísico pode ser obtido.

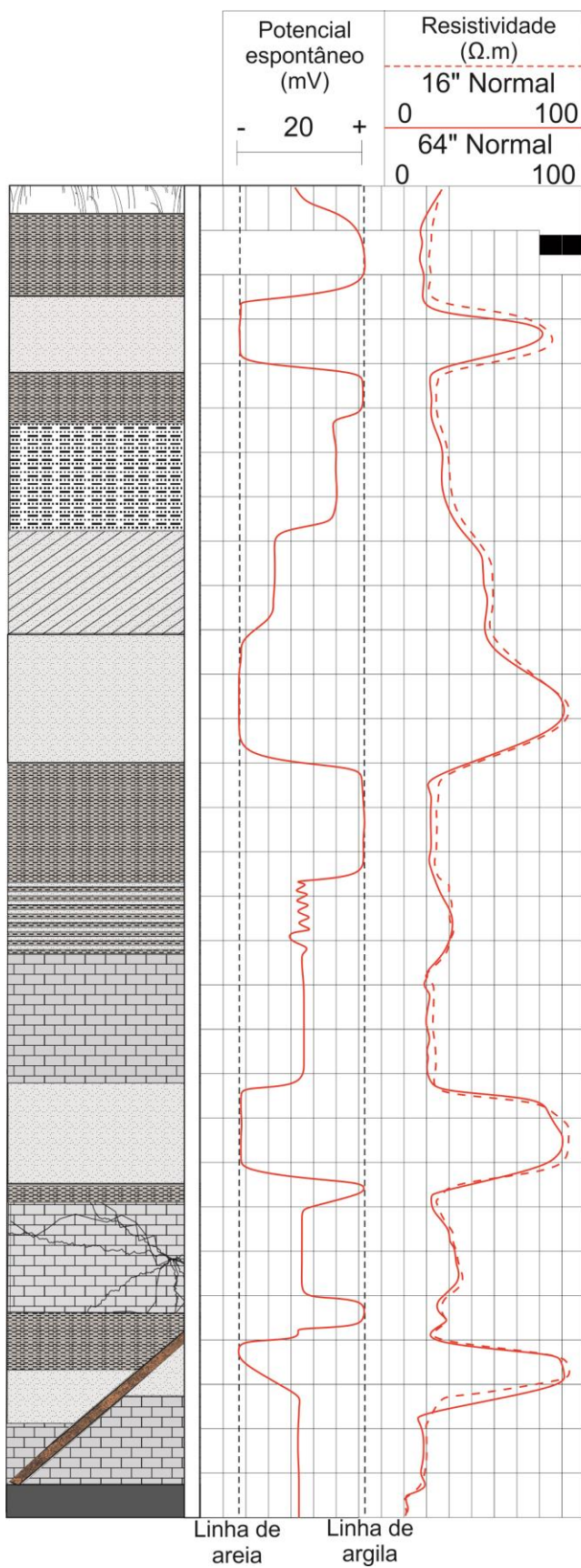
## 9. RESULTADOS ESPERADOS

Embora este trabalho seja um projeto, portanto ainda sem dados reais, há como prevê-los de tal maneira que o modelo seja válido. Para isto, a resposta do modelo será perfil elétrico semelhante a qualquer um que sairia de uma perfilagem elétrica nas mesmas condições do protótipo.

A Figura 44 exibe um perfil imaginado a partir da observação de outros perfis reais com camadas semelhantes às descritas no protótipo que pode ser resultado da aplicação elétrica no modelo. Vale enfatizar que esse resultado esperado é estimado, podendo mudar em amplitudes, devido, principalmente, as resistividades dos fluidos que poderão ser injetados (fluidos de formação) e da lama de perfuração. No caso do perfil de ER a lama de perfuração é, provavelmente, mais resistiva que o fluido de formação o que explica as maiores amplitudes no levantamento de 16”.

Ainda considerando a Figura 44 e baseando-se no conhecimento de perfis reais, pode-se presumir que as camadas mais próximas à superfície, provavelmente, terão medidas de ER distorcidas em relação às medidas de profundidade, pois a perfilagem se comportará como um levantamento em semi-espaço livre.

Figura 44 - Perfil de potencial espontâneo e eletrorresistividade esperado para o modelo.



Fonte: Da Autora

## 10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou uma maneira viável de construção um modelo físico em escala reduzida para aplicação da perfilagem de geofísica de poço. Depois de construído o modelo poderá ser usado como um laboratório didático para melhor explicar como ocorre uma perfilagem real, além disto, poderá ser utilizado para testes de outras ferramentas aplicadas em poço.

Considerando que este projeto honra as premissas da modelagem analógica, espera-se que o modelo construído comporte-se de forma similar ao caso real, com poucas diferenças. Pois a escolha de materiais naturais, tais aqueles encontrados em ambientes geológicos reais, permitirá que o conjunto de modelagem (modelo e sonda) gere dados com alto grau de fidelidade para fins didáticos e de testes.

Tendo em vista todo o embasamento teórico, materiais possíveis de utilização, processos de montagem e aplicação do método, conclui-se que a montagem do modelo e o uso da modelagem analógica para perfilagem de poço são viáveis.

A ferramenta proposta para validação do modelo é elétrica. Entretanto, recomenda-se que outras ferramentas sejam produzidas e testadas. Ainda com aplicação elétrica, poderão ser desenvolvidas ferramentas de microrresistividade e *lateral log*. Além destas, outras ferramentas poderão ser produzidas, tais como: sônicas, de indução (eletromagnéticas), de temperatura e magnéticas, sendo esta última mais voltada à mineração. Com ressalva apenas para uso da ferramenta radiométrica, que embora seja de extrema importância na geofísica de poço, pois, na escala reduzida deste projeto, sua construção torna-se difícil devido a indisponibilidade de sensores radiométricas, com boa sensibilidade, com diâmetros inferiores ao do poço do modelo.

Espera-se que este projeto possa estimular a construção do modelo e que este seja aplicado para a difusão de conhecimentos sobre a geofísica de poço.

## REFERÊNCIAS

- BARROS, C. da S. *Interpretação do gráfico de Hingle através de rede competitiva angular*. 2007, 66 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2007.
- CARVALHO, P. R. *Respostas eletromagnéticas dos arranjos coplanar e coaxial em poço*. 2000, 80 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2000.
- ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. *Well logging for earth scientists*. 1. ed. Nova York: Elsevier, 1987.
- GIRÃO NERY, G. Petrofísica. In: GIRÃO NERY, G. *Perfilagem geofísica*. HYDROLOG Serviços de Perfilagens Ltda, 2004. p. 1-19.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. v. 3: *eletromagnetismo*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- JAHN, F. *et al. Introdução à exploração e produção de hidrocarbonetos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. (Série Engenharia de Petróleo).
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- LOWRIE, W.; WEST, G. F. The effect of a conducting overburden on electromagnetic prospecting measurements. *Geophysics*, v.30, n.4, p.624-632. 1965.
- MELO, A. L. *Desenvolvimento de um conjunto de modelagem de alta resolução para métodos eletromagnéticos indutivos*. 2004, 101 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 2004.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica 3 – eletromagnetismo*. 1. ed. São Paulo: Editora Bluncher, 1997.
- QUEIROZ, J. C. B. *Estudo de anomalias eletromagnéticas de um condutor tabular vertical sob camadas parcialmente condutiva em multifrequências e multiseparação através de modelamento analógico*. 1986, 99 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 1986.
- SALVADORETTI, P. *Construção de um modelo experimental simulando condições de perfilagem de indução*. 1990, 54 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 1990.
- SILVA, M. C. *Efeito do manto de intemperismo sobre anomalias eletromagnéticas provocadas por corpos tabulares inclinados – um estudo através de modelo reduzido*. 1981, 115 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 1981.

SILVA, N. *Estudo do sinal elétrico de potencial espontâneo associado ao fluxo de água em meios porosos*. 2011, 98 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2011.

SINCLAIR, G. Theory of models of electromagnetic systems. *IEExplore*, Proc. Inst. Radio Eng. p. 1364-1370, Nov. 1948. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1697563>> . Acesso em 20 de jan. de 2014

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TELFORD, W. M.; GELDART, L., P.; SHERIFF, R. E. *Applied geophysics*. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1990.