Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp

Mestrado
Engenharia Civil e Ambiental

MARLUCI CRISTINA PREGNOLATO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO DISPOSITIVO DE MEDIDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO

Bauru

2014

MARLUCI CRISTINA PREGNOLATO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO DISPOSITIVO DE MEDIDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Profa. Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto



Bauru

2014

Pregnolato, Marluci Cristina.
Avaliação de desempenho do dispositivo de medida de resistividade elétrica em laboratório / Marluci Cristina Pregnolato, 2014
122 f.

Orientador: Anna Silvia Palcheco Peixoto

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Resistividade elétrica. 2. Instrumentação. 3. Potencial elétrico. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARLUCI CRISTINA PREGNOLATO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de agosto do ano de 2014, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO MOREIRA do(a) Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARLUCI CRISTINA PREGNOLATO, intitulada "AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO DISPOSITIVO DE MEDIDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO MOREIRA

Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

Dedicatória

Primeiramente a Deus, pela infinita bondade em me ensinar a superar as dificuldades e me dar sempre bons motivos para continuar a sorrir. A minha mãe, que pelo exemplo, me fez ser uma pessoa justa e a nunca desistir dos meus sonhos. A meu pai, pelo carinho e atenção dedicados durante toda a sua vida a mim e aos meus estudos. A minha irmã Gabriela, que sempre me apoiou e incentivou os meus estudos. Amo muito vocês, estaremos sempre unidos.

Aos meus amigos, que entenderam o meu período de dedicação ao desenvolvimento das atividades do mestrado e me apoiaram na sua elaboração, me desculpem os momentos de ausência e muito obrigada pela amizade.

"E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria."

1 Coríntios 13:2

AGRADECIMENTOS

À professora Anna, minha orientadora e amiga, as muitas lições que ensinou não somente quanto a boa técnica mas também quanto às lições de vida. Meu muito obrigada, por me apoiar, incentivar e instruir durante esses últimos seis anos. Saiba que parte do que sou é graças a você.

Ao professor Heraldo Luiz Giacheti, a quem tenho um imenso carinho e uma profunda admiração pelo seu trabalho e postura profissional. Agradeço muito por todo apoio e confiança depositados em mim desde a minha graduação e, por sempre estar presente e colaborando para o meu desenvolvimento profissional.

À Luciana Garcia Campos e a Marcia Tiemi Yamasaki por toda amizade e incentivo a elaboração desse trabalho. Vocês são pessoas brilhantes, obrigada pela contribuição no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UNESP/ Campus de Bauru, Guaratinguetá e Sorocaba, pela dedicação e ensinamentos transmitidos durante o programa.

A todos os técnicos de laboratório da Unesp de Bauru, que sempre foram muito prestativos e atenciosos no apoio à elaboração dos ensaios.

A todos os professores da Unesp de Bauru, obrigada pela contribuição para minha formação profissional.

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP/Campus de Bauru, por zelar pela formação profissional dos seus alunos e possibilitar o nosso desenvolvimento através de toda a estrutura, equipamentos, funcionários e docentes.

Enfim, a todos que ajudaram direta ao indiretamente na realização desse sonho, muito obrigada!

RESUMO

A resistividade elétrica vem sendo cada vez mais utilizada nos ensaios de investigação ambiental, sendo essa grandeza uma importante medida para a análise qualitativa da presença de contaminantes no subsolo. No entanto, muito são os fatores intervenientes na resistividade elétrica, os quais são geralmente estudados de forma isolada em laboratório para possibilitar a interpretação dos resultados de campo. Assim, o objetivo dessa dissertação de mestrado é descrever o funcionamento e as características construtivas do dispositivo de resistividade visando contribuir para a construção de um dispositivo para uso em campo e avaliar, em laboratório: a resposta do dispositivo através da obtenção das curvas de verificação desse equipamento para as temperaturas de 19 a 25°C; realizar o estudo do potencial elétrico do dispositivo em meio aquoso para quatro concentrações diferentes; e avaliar o impacto do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica pelo módulo de resistividade e pelas placas circulares de cobre. Os resultados de potencial elétrico em meio aquoso apresentaram uma redução do raio de tensões resultantes do funcionamento do dispositivo com o aumento da concentração do meio em virtude da maior facilidade de propagação dos elétrons para valores de resistividade elétrica menores. As análises de potencial elétrico em meio aquoso possibilitaram o dimensionamento corpo de prova para realização dos ensaios em laboratório, sendo este de 155mm de diâmetro. Com os resultados obtidos para a areia estudada verificou-se que a geometria do corpo de prova se sobrepõe a técnica utilizada para a realização da medida em laboratório. Isso ocorre devido à diferente distribuição das tensões no interior dos corpos de prova, ou seja, os valores de resistividade elétrica obtidos no corpo de prova maior são inferiores aos valores obtidos no corpo de prova menor para a mesma condição de ensaio, sendo uma possível explicação o maior volume de solo no corpo de prova maior para a propagação das linhas de corrente e, consequentemente, os elétrons percorrem caminhos com menores resistências até o eletrodo receptor, resultando em resistividades menores.

Palavras chave: resistividade elétrica, instrumentação, potencial elétrico.

ABSTRACT

The electrical resistivity has being used in tests for environmental site characterization once this measure is a qualitative manner to asses of the presence of contaminants in the subsurface. However, there are many intervenient factors in the electrical resistivity, which are usually studied separately in the laboratory in order to lead the interpretation of field test data. The goal of this master thesis is to describe the operation and the characteristics of resistivity device designed to contribute to the construction of in situ test tool. Furthermore, evaluate in the laboratory: the response of this tool through the curves of verification equipment for temperatures 19-25 ° C; make the study of the electrical potential of these tool in an aqueous medium for four different concentrations and evaluate the impact of the diameter of test body in obtaining the electrical resistivity by the resistivity module and circular copper plates. The results electrical potential in an aqueous sample showed a reduction of the radius of the voltages resulting from the response device with the concentration of salt in the water due to the ease of propagation of electrons to values lower electrical resistivity. Analyses of the electrical potential in aqueous medium allowed the sizing test body for the tests in the laboratory, which is 155mm in diameter. The results obtained with sand studied led to conclusion the geometry of the specimen overlies the technique used to perform the measurement in a laboratory sand. It is due to different distribution of stresses within the specimens, e.g. , the values of electrical resistivity obtained in the larger sample are lower than the values obtained in the lower sample of evidence for the same test condition. Probably it happens because the major sample has a greater volume of soil and so the soil available for the propagation of the streamlines and hence the electrons cross paths with lower resistance to the receiving electrode, resulting in lower resistivity.

Keywords: electrical resistivity, instrumentation; electrical potential.

SUMÁRIO

RESUMO VII

ABSTRACT VIII

SUMÁRIO IX

ÍNDICE DE FIGURAS I

ÍNDICE DE TABELAS IV

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS V

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Objetivos 3

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1. Conceitos básicos de eletricidade 6

2.2. Fatores intervenientes na resistividade do solo 11

2.3. Aspectos elétricos das ponteiras de resistividade 22

2.4. Aparatos desenvolvidos para o estudo da medida de resistividade elétrica 27

3. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE RESISTIVIDADE 40

3.1. Aspectos construtivos 40

3.2. Funcionamento do dispositivo de resistividade de 20 mm de diâmetro 42

3.3. Considerações para a construção de uma ponteira de campo 44

4. MATERIAIS E MÉTODOS 49

4.1. Materiais 49

4.1.1. Instrumentos para obtenção das medidas elétricas e acessórios 49

4.1.2. Caracterização da areia de cava 55

4.2. Métodos 56

4.2.1. Verificação do dispositivo de resistividade 57

4.2.2. Ensaios de potencial elétrico em meio aquoso 59

4.2.3. Avaliação do diâmetro na obtenção da medida de resistividade elétrica em meio particulado 61

4.2.4. Formulação para determinação das constantes da Lei de Archie 66

5. RESULTADOS E ANÁLISES 69

5.1. Verificação do dispositivo de resistividade 69

5.2. Potencial elétrico em meio aquoso 72

5.2.1. Água destilada 73

5.2.2. Água potável 75

5.2.3. Concentração de 250 ppm de cloreto de sódio 77
5.2.4. Concentração de 500 ppm de cloreto de sódio 79
5.2.5. Interpretação dos resultados de potencial elétrico em meio aquoso 80
5.3. Avaliação do diâmetro na obtenção da resistividade elétrica em meio particulado 84
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE 92
6.1. Sugestões para atividade futuras 93
BIBLIOGRAFIA 95
ANEXO 1 100
ANEXO 2 104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da corrente elétrica e das linhas equipotenciais (adaptado de Aquino, 1999). 5

Figura 2: Piezocone de resistividade (modificado de Mondelli et al., 2007). 6

Figura 3: Representação do campo elétrico, (a) desenho esquemátic das linhas de campo elétrico de um dipolo; (b) linhas de campo em uma suspensão de fragmentos de fibra em óleo (extraido de Tippler, 1999)..... 10

Figura 4: Representação esquemática do desenvolvimento das linhas de campo e de corrente. (a) no modelo idealizado – meio aquoso, (b) em meio particulado – solo (PACHECO, 2004). 11

Figura 5: Grau de saturação versus resistividade elétrica para corpos de prova com mesmo índice de vazios extraído de Aquino (2010). 13

Figura 6: Sensibilidade da Lei de Archie para a variação da porosidade e do grau de saturação, adaptado de Daniel et al. (2003). 18

Figura 7: Gráfico do efeito da polarização nos eletrodos internos e externos apud Weemees (1990). 23

Figura 8: Arranjo Schlumberger. 25

Figura 9: Arranjo de Wenner. 25

Figura 10: Representação esquemática das equipotenciais desenvolvidas pelo cone resistivo (Pacheco, 2004). 26

Figura 11: Curva de verificação do dispositivo de resistividade (Bollini e Peixoto, 2011). 27

Figura 12: Corpo de prova de medida de resistividade elétrica em laboratório utilizados (Abu-Hassanein & Benson,1994). 28

Figura 13: Equipamento para medida da resistividade elétrica em laboratório em amostras compactadas: a) molde de compactação, b) aparato de medida montado apud Daniel (1997). 30

Figura 14: Piezocone de Resistividade desenvolvido na University of British Columbia, apud Campanella (2008)..... 30

Figura 15: Medidas equipotenciais realizadas em torno do piezocone de resistividade da University of British Columbia (Daniel et al., 2003). 31

Figura 16: Aparato de medidas de resistividade em laboratório apud Pacheco (2004). 32

Figura 17: Diagrama Esquemático do sistema RSDMT apud Bang et al.(2008). 33

Figura 18: Módulo de resistividade e calibração empírica para a obtenção do fator geométrico (Bang et al., 2008). 33

Figura 19: Sistema para medidas de resistividade elétrica: a) desenho esquemático da montagem, b) imagem da realização das medidas (Aquino, 2010). 34

Figura 20: Correlações entre a resistividade elétrica e índices físicos: a) teor de umidade gravimétrica, b) teor de umidade volumétrica, c) grau de saturação (Aquino, 2010). 35

Figura 21: (a) Peso aparente específico seco (γd) versus resistividade elétrica, (b) índices de vazios (e) versus resistividade elétrica (Aquino, 2010). 35

Figura 22: Pseudo resistividade para área de pesquisa. 'X' indica os locais onde as amostras foram extraídas para a análise laboratorial (adaptado de Adli et al., 2010). 36

Figura 23: Comparação entre a resistividade de campo e a de laboratório na distância específica do levantamento (Adli et al., 2010). 37

Figura 24: Local de retirada das amostras (Long et al., 2012). 37

Figura 25: Relação entre a resistividade e quantidade de sal contido no fluído nos poros do solo (Long et al., 2012). 38

Figura 26: Resistividade elétrica em função da quantidade de argila (Long et al., 2012). 39
Figura 27: Dimensões de projeto do protótipo do dispositivo de 20 mm de diâmetro. 40
Figura 28: Representação da blindagem dos fios de cobre utilizados. 41
Figura 29: Dispositivo de resistividade elétrico com a terminação sem articulação. 42
Figura 30: Conectores de cinco pinos utilizados para instrumentação do dispositivo. 42
Figura 31: Instalação do dispositivo de resistividade nos corpos de prova. (a) Furo a trado na região central do corpo de prova. (b) Cravação do dispositivo de resistividade no corpo de prova, adaptado de Yamasaki (2009)..... 42
Figura 32: Caixa de instrumentação conectada ao dispositivo de resistividade, multímetros e gerador de sinais. 43
Figura 33: Montagem do circuito elétrico para obtenção da resistividade elétrica pelo dispositivo de resistividade. 44
Figura 34: (a) Cabo blindado tipo espiral flexível, (b) detalhe mostrando a malha interna de blindagem do cabo..... 47
Figura 35: Placas de cobre diâmetro de 111,0 mm. 50
Figura 36: Recipiente utilizado para a verificação do dispositivo de resistividade. (a) Vista frontal do corpo de prova. (b) Vista em planta, mostrando a região central com as peças para fixação do dispositivo de resistividade. 51
Figura 37: Peça para fixação do dispositivo de resistividade nos ensaios em meio aquoso. 52
Figura 38: Recipiente para realização dos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso. (a) montagem do corpo de prova para a realização do ensaio. (b) desenho esquemático das dimensões do molde do corpo de prova de 310 litros..... 52
Figura 39: Recipientes utilizados nos ensaios de avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica. 53
Figura 40: Recipiente maior de 450 mm de diâmetro. (a) Vista em planta com o colarinho (b) Vista frontal com colarinho (c) Detalhe do corpo de prova sem colarinho. 54
Figura 41: Recipiente menor de 154,6 mm de diâmetro. (a) Detalhe do corpo de prova sem colarinho, altura de 196 mm. (b) Corpo de prova com colarinho, altura total de 270 mm. 55
Figura 42: Sistema de verificação do dispositivo de resistividade (modificado de Peixoto et at., 2010). 57
Figura 43: Montagem do ensaio de potencial elétrico para o dispositivo de resistividade. 60
Figura 44: Aparato de pluviação utilizado no peneiramento da areia e na realização do ensaio. 62
Figura 45: Preparo do corpo de prova menor (azul) pelo método de pluviação modificado. 63
Figura 46: Avaliação do diâmetro na obtenção da medida de resistividade elétrica pelo dispositivo. (a) corpo de prova grande. (b) corpo de prova pequeno. 63
Figura 47: Posicionamento das placas circulares no fundo dos recipientes dos corpos de prova. 64
Figura 48: Posicionamento das placas de cobre no topo do corpo de prova com a massa padrão para garantir o contato da placa com o solo. 65
Figura 49: Montagem do circuito elétrico para obtenção da resistividade elétrica pelas placas. 65
Figura 50: Curva de verificação do dispositivo de resistividade nas temperaturas de 19°C, 20°C, 21°C, 22°C, 23°C, 24°C comparado com a temperatura de referência 25°C. 70
Figura 51: Verificação do dispositivo de resistividade em função da temperatura de 19° C a 25° C. 71
Figura 52: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a água destilada. 73
Figura 53: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a água potável. 76

Figura 54: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a concentração de 250 ppm. 78
Figura 55: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a concentração de 500 ppm. 79
Figura 56: Resultado para o expoente m de porosidade com grau de saturação acima de 94%. 85
Figura 57: Resultado para o expoente s do grau de saturação com valor de m= - 1,894..... 86
Figura 58: Resultado do coeficiente a para m= -1,894 e s= -1,258. 87
Figura 59: Avaliação da geometria do corpo de prova maior e menor nos ensaios de resistividade elétrica com as placas de cobre. 88
Figura 60: Avaliação da geometria do corpo de prova maior e menor nos ensaios de resistividade elétrica com o dispositivo de resistividade. 89
Figura 61: Valores de resistividade elétrica obtidos pelo dispositivo de resistividade e pelas placas de cobre para ambos os corpos de prova. 89
Figura 62: Resultado do ajuste de resistividade elétrica pelo diâmetro de corpo de prova utilizando as duas técnicas de medida de resistividade para obtenção da curva..... 90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resumo de algumas medidas de resistividade elétrica em solos saturados e no fluido de saturação (extraído de Campanella, 2008). 12

Tabela 2: Resistividade so solo saturado (ρsat), condutividade elétrica da água (Cw), resistividade da água no fluído de percolação (ρw), fator de formação da lei de Archie (F) e fator de formação de Waxman e Smits (1968) (F*) (adaptado de Peixoto et al., 2014). 19

Tabela 3: Métodos de medida de sucção adaptado de Ridley & Wray (1995). 21

Tabela 4: Propriedades índices dos solos analisados (extraído de Perez et al., 2009). 22

Tabela 5: Relação das resistividades normalizadas versus frequência para cada teor de umidade apud Peixoto et al. (2010). 24

Tabela 6: Diferença em porcentagem entre ensaio de campo e laboratório (ADLI et al., 2010). 36

Tabela 7: Descrição e tamanho das dimensões do recipiente utilizado nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso, de acordo com as especificações do fabricante. 53

Tabela 8: Dimensões dos recipientes utilizados nos ensaios de avaliação do efeito de borda do molde de compactação para a verificação do campo elétrico em meio particulado. 55

Tabela 9: Ensaios de caracterização geotécnica realizados para a areia de cava. 56

Tabela 10: Resultado dos ensaios de caracterização da areia de cava. 56

Tabela 11: Dimensões relevantes dos corpos de prova e das placas de cobre para obtenção da razão d_{placas}/h_{cp}. 66

Tabela 12: Comparação entre o coeficiente angular das retas de verificação do dispositivo em função da temperatura 71

Tabela 13: Resultados de resistividade elétrica obtidos nos ensaios de potencial elétrico. 81

Tabela 14: Resultados de resistividade elétrica corrigidos para a temperatura de 25°C obtidos nos ensaios de potencial elétrico do dispositivo de resistividade. 82

Tabela 15: Desvios relativos entre as resistividades obtidas nos ensaios de potencial elétrico dentro da faixa de verificação do dispositivo. 83

Tabela 16: Relação dos conjuntos de ensaios obtidos em função do teor de umidade, índice de vazios e grau de saturação com suas respectivas temperaturas. 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ρ. resistividade elétrica

E. campo elétrico

F. força eletrostática

a. *constante dependente da porosidade do solo*

A. área seção transversal disponível para condução elétrica

a *priori*. antes, em princípio

A_{placas}. área das placas de cobre

c. distância entre eletrodos

d. raio do eletrodo

ER. eletrorresistividade

et al.. e outros

F. fator de formação

f_s. *atrito lateral*

H_{CP}. altura do corpo de prova

i. corrente elétrica

IE. imageamento elétrico

$i_{máx}$. valor máximo de corrente elétrica em circuitos alternados

i_{med}. corrente elétrica em circuitos alternados

i_{rms}. corrente elétrica rms, em circuitos alternados

k. fator geométrico, fator geométrico de escala

kHz. quilo Hertz

l. comprimento total que a corrente elétrica percorre no circuito

m. *constante da Lei de Archie*

m/s. metros por segundo, unidade de velocidade

m^2. metro quadrado

n. porosidade

q_0. valor carga de prova introduzida num campo elétrico

q_c. *resistênciade ponta*

R. resistência elétrica

R_0. resistividade areia saturada com solução de água e cloreto de sódio

R^2. coeficiente de determinação

RCPTU. piezocone de resistividade

rms. raíz quadrada do valor médio ao quadrado

RSDMT. dilatômetro sísmico e de resistividade

R_w. resistividade da solução de água e cloreto de sódio

SEV. sondagem elétrica vertical

Sr. *grau de saturação*

U. *poro-pressão*

V. diferença de potencial elétrico

V_{med}. diferença de potencial, em circuitos alternados

Δq. variação de carga

Δt. intervalo de tempo

ε. diferença de potencial em corrente alternada

ψ. potencial total de água no solo

ψg. potencial gravitacional de água no solo

ψm. potencial matricial de água no solo

ψos. potencial osmótico de água no solo

ψpn. potencial pneumático de água no solo

Ω.m. Ohm multiplicado por metro, unidade de medida de resistividade elétrica

ε_{rms}. diferença de potencial em rms em circuitos alternados

μS/cm. micro Simens por centímetro, unidade de medida de condutividade

ρ_{1000}. resistividade medida na frequência de 1kHz

ρ_{ap}. resistividade aparente

ρ_b. *resistividade aparente do solo*

ρ_f. *resistividade do fluído intersticial*

ρ_n. resistividade normalizada

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há um enorme apelo à preocupação ambiental, principalmente, pela mídia e por grandes empresas que incorporam valor de mercado associando ações ecologicamente corretas a sua linha de produção. Outro aspecto que tem levado à reflexão sobre o meio ambiente são as catástrofes naturais, as quais tem atingindo diferentes locais e afetado muitas pessoas. Nesse sentido, são crescentes as exigências legais e a fiscalização para o cumprimento das leis em prol do meio ambiente.

Por isso, torna-se cada vez mais relevante o aprimoramento de técnicas adequadas de engenharia para prevenir e tratar problemas ambientais. Nesse contexto, se insere a investigação geoambiental, tendo por finalidade a realização de estudos multidisciplinares para diagnosticar o subsolo uma determinada área, contaminada ou não, e fornecer subsídios, quando necessário, para sua remediação.

A multidisciplinaridade da investigação geotécnica consiste em utilizar de maneira combinada diferentes métodos de prospecção *in situ*: invasivos, superficiais, diretos e indiretos, juntamente com ensaios de laboratório por meio de amostras de solo, gás e líquidos para caracterização de uma região. Os ensaios realizados em laboratório, isto é, em condições controladas, contribuem de forma a fornecer subsídios para a interpretação dos resultados obtidos em campo.

Dentre os ensaios que podem ser realizados numa investigação ambiental, tem-se o ensaio de RCPTU, que consiste em acoplar um módulo de resistividade atrás do piezocone padrão, possibilitando obtenção de medidas contínuas de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), poro- pressão (U) e resistividade elétrica do solo.

Apenas as medidas realizadas pelo piezocone padrão (resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão) são suficientes para definir o perfil estratigráfico do subsolo e a posição do nível d´água. Assim, a incorporação da medida de resistividade elétrica contribui para uma melhor caracterização do subsolo, em especial quanto as perspectivas de aplicação dos resultados para avaliação de áreas contaminadas.

A grandeza resistividade elétrica independe das características geométricas do material, ou seja, é uma propriedade intrínseca de cada material. No entanto, muitos são os fatores intervenientes que modificam os valores de resistividade elétrica principalmente quando essa grandeza é avaliada em solo. Esses fatores intervenientes estão relacionados principalmente com o tipo de solo e o fluído intersticial presente na amostra ensaiada, entre outros.

Assim, o valor de resistividade elétrica para uma determinada área corresponde a uma faixa de valores e não a um valor absoluto, que varia com a mineralogia do solo, a salinidade da área, o grau de saturação, entre outros fatores. Dessa forma, quando se conhece as características naturais da área investigada, é possível comparar os valores de resistividade elétrica de uma área livre de contaminantes com uma área possivelmente contaminada e, por meio de uma análise comparativa, obter um indicativo de que a região em análise pode ou não estar contaminada.

As características naturais da área investigada podem ser estudadas em laboratório para controlar os parâmetros a serem analisados. Contudo, para que ocorra a mínima distorção possível, é preciso que as condições simuladas em laboratório descrevam de forma fidedigna as condições de campo.

Em laboratório pode se utilizar duas técnicas diferentes para obter a resistividade elétrica: placas condutoras instaladas no topo e na base de um corpo de prova, como utilizaram Abu-Hassanein & Benson (1994) e Aquino (2010), ou utilizar o próprio módulo de resistividade cravado em um corpo de prova, conforme utilizaram Daniel (1997) e Pacheco (2004). Essas técnicas descrevem de maneira distinta a variação da resistividade elétrica pois possuem características geométricas, elétricas e físicas diferentes.

Dentro desse contexto e visando contribuir para a investigação geoambiental, o presente trabalho estudou o funcionamento do dispositivo de resistividade de 20 mm de diâmetro desenvolvido na Unesp de Bauru por Peixoto (2007) com o objetivo de colaborar, futuramente, para a construção de uma ponteira para utilização em campo.

1.1. Objetivos

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo a avaliação de desempenho do dispositivo de resistividade elétrica de 20 mm de diâmetro desenvolvido na Unesp de Bauru por Peixoto (2007). Assim foram definidos como objetivos específicos:

- Descrição das características e do funcionamento desse dispositivo de resistividade elétrica, bem como os aspectos relevantes considerados na construção desse protótipo visando contribuir para a construção de um dispositivo para uso em campo;
- Obtenção de curvas de verificação do dispositivo de resistividade elétrica para as temperaturas de 19°C a 25°C com variação unitária de temperatura.
- Estudo do potencial elétrico produzido pelo dispositivo de resistividade em meio aquoso para quatro concentrações diferentes: água destilada, água de abastecimento público e para as concentrações de 250 ppm e 500 ppm de cloreto de sódio;
- Avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica de uma areia de cava pelo dispositivo de resistividade e pelas placas de cobre para o estudo das distribuições de tensões elétricas em meio particulado utilizando a Lei de Archie para compatibilizar e comparar os resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Medidas de resistividade elétrica estão sendo empregadas rotineiramente em Engenharia Geotécnica e Geofísica para caracterização do subsolo e também em análises de solo (BRYSON & BATHE, 2009). Nas últimas décadas, o levantamento da resistividade elétrica foi utilizado com a finalidade de resolver problemas ambientais, de Agronomia (Corwin & Lesch, 2005), Engenharia, Arqueologia, Geologia (Schoor, 2002).

Em agronomia, de acordo com Corwin & Lesch (2005) a condutividade elétrica do solo, grandeza inversa à resistividade elétrica, é destaque por apresentar aplicações onde ela tem sido utilizada como um indicador no monitoramento de características do solo.

Nesse sentido, a condutividade elétrica está sendo utilizada no monitoramento da salinidade, textura e estratificação, umidade, densidade, matéria orgânica e derivados, lixiviação, partição de doses de herbicidas, definição de bordas em classificação de solos, classes de drenagem, recarga de lençol freático, entre outras (MOLIN & RABELLO, 2011).

Em Engenharia, a medida de resistividade pode ser utilizada em métodos de investigação indireta e direta. Uma das técnicas de investigação indireta são os métodos geofísicos, que consistem na aquisição de dados do subsolo a partir de equipamentos instalados na superfície, caracterizando-os como métodos não invasivos ou não destrutivos.

Na literatura científica, são encontrados trabalhos relatando a utilização de métodos geofísicos em estudos de contaminação ambiental em áreas de disposição de resíduos, principalmente o método da eletrorresistividade (ER), aplicado com as técnicas do imageamento elétrico (IE) e/ou da sondagem elétrica vertical (SEV), isoladamente ou associado a outros métodos complementares (BORTOLIN & MALAGUTTI, 2010).

Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos em relação aos métodos diretos de investigação de subsuperfície (por exemplo, as sondagens e os poços de monitoramento) é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor e, a *priori*, por não alterarem o meio físico (BORTOLIN & MALAGUTTI, 2010).

As características subsuperficais são mensuradas pela aplicação de corrente elétrica (i) através de eletrodos de corrente. A diferença de potencial causada pelo fluxo de corrente entre dois pontos em linha reta com os eletrodos de corrente são mensuradas por eletrodos que realizam medidas de diferença de potencial elétrico (V), Figura 1. Sendo o valor de corrente e tensão elétrica conhecidos, bem como o espaçamento entre os eletrodos, é possível determinar a resistência elétrica em um ponto na subsuperfície. Em solos homogêneos, a profundidade de penetração é diretamente proporcional ao espaçamento dos eletrodos e a variação do espaçamento entre os eletrodos fornece informações sobre a estratificação do solo (ADLI *et al.* 2010).

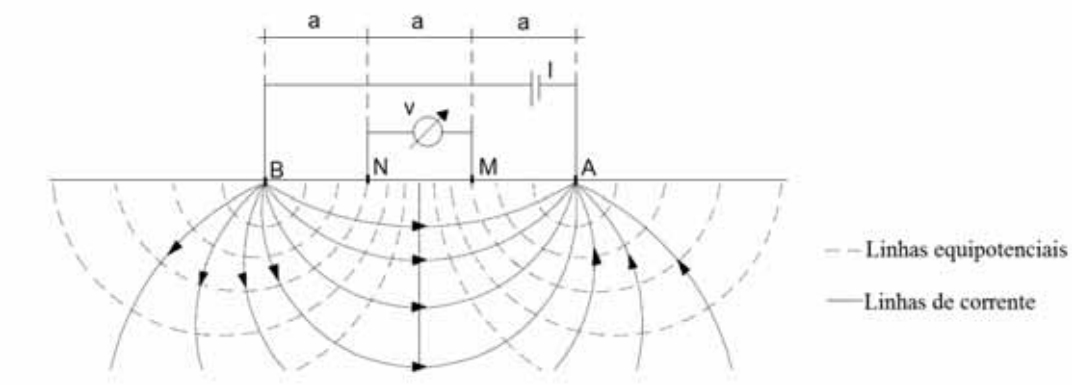


Figura 1: Distribuição da corrente elétrica e das linhas equipotenciais (adaptado de Aquino, 1999).

Em ensaios de investigação direta, a resistividade elétrica, ou, o seu inverso, condutividade elétrica, pode ser obtida através do piezocone de resistividade ou piezocone resistivo (RCPTU), o qual trata-se de uma ferramenta comercializável. Assim, o piezocone de resistividade é uma ferramenta instalada atrás do piezocone padrão, Figura 2, o qual possibilita a obtenção de medidas contínuas de resistividade elétrica do solo por uma aquisição de dados.

O emprego de sondagem com o piezocone de resistividade e amostradores especiais de água, solo e gás, juntamente com uma campanha de geofísica superficial, tem apresentado resultados promissores nos países da Europa e América do Norte (BOLINELLI JR. *et al.*, 2002). No entanto, a utilização dessa ferramenta em solos tropicais ainda apresenta restrições devido à falta de parâmetros de referência para sua aplicação em ensaios de campo.

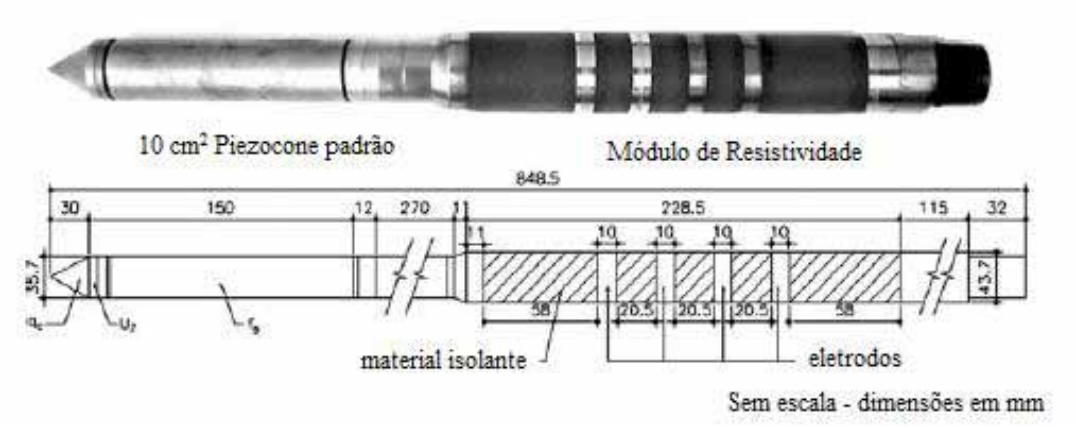


Figura 2: Piezocone de resistividade (modificado de Mondelli *et al.*, 2007).

Essa dificuldade em obter parâmetros de referência está intimamente relacionada com os diversos fatores intervenientes que afetam a obtenção da medida de resistividade elétrica. Assim, muitos estudos de resistividade elétrica em laboratório trouxeram importantes resultados acerca de fatores intervenientes como: Abu-Hassanein & Benson (1994) estudaram argilas compactadas e mostraram a influência do teor de umidade, da energia de compactação e da saturação inicial do corpo de prova na resistividade elétrica; Daniel (1997) estudou solos residuais em laboratório e avaliou o impacto do grau de saturação, porosidade e tipo de fluído intersticial na obtenção da resistividade elétrica em ensaios de penetração com o piezocone; Aquino (2010) estudou argila compactada característica do centro-oeste do Brasil e correlacionou a resistividade elétrica com as propriedades índice do solo; Long *et al.* (2012) estudaram argilas marinhas e mostraram o influência na resistividade elétrica em função da quantidade de sal no fluído intersticial e da quantidade de percentual de argila na amostra.

2.1. Conceitos básicos de eletricidade

Para melhor compreender as grandezas a serem analisadas nessa pesquisa, foi realizada uma breve revisão dos principais conceitos físicos relevantes.

A corrente elétrica (i) é definida como sendo a taxa de passagem de carga através da área da seção de um condutor. Assim, para uma variação de carga Δq que passa por uma determinada área A, num dado intervalo de tempo Δt, tem-se a eq. 01.

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \tag{01}$$

A corrente elétrica contínua é gerada a partir de uma fonte composta por dois terminais com polos positivos e negativos fixos, gerando uma corrente de fluxo unidirecional e uma diferença de potencial constante.

No caso da corrente elétrica alternada, o deslocamento das partículas não ocorre em um único sentido devido a alternância dos polos positivos e negativos, ou seja, há uma inversão do fluxo de elétrons com a modificação das cargas dos polos decorrente da polarização da fonte que varia com o tempo. Dessa maneira, o valor absoluto da corrente alternada não é constante e varia de acordo com uma determinada função, por exemplo, de uma onda senoidal. A alternância de uma onda senoidal é caracterizada por ε que varia na mesma frequência que a corrente elétrica.

Assim, devido a alternância dos polos tem-se o valor *rms* que é uma abreviação de uma expressão proveniente da língua inglesa *root mean square*, ou seja, a raiz quadrada do valor médio ao quadrado. Esta grandeza vem a ser o valor da tensão (V_{med}) ou corrente alternada (i_{med}) medida por meio de voltímetros e amperímetros comumente comercializados e não os valores de pico. Assim, o valor *rms* de uma corrente, i_{rms}, é definido pela eq.02 (PACHECO, 2004).

$$i_{rms} = \sqrt{i_{med}^2} \tag{02}$$

Para uma corrente alternada senoidal pode-se obter a máxima corrente, $i_{máx}$, através da corrente i_{rms} pela eq.03.

$$i_{máx} = \sqrt{2} * i_{rms} \tag{03}$$

Nessa pesquisa, o dispositivo de resistividade funciona alimentado por um gerador de sinal que emite uma onda senoidal na frequência de 1kHz, isto é, através de uma corrente alternada senoidal. Portanto, é necessária uma equação que relacione a corrente alternada com a resistência do sistema. Assim, os eletrodos, por serem materiais ôhmicos, seguem a Lei de Ohm, que é descrita pela eq.04.

$$i_{rms} = \frac{\varepsilon_{rms}}{R} \quad (04)$$

Em que ε_{rms} é a tensão *rms* aplicada ao circuito de corrente alternada e R é resistência elétrica do circuito.

Fisicamente, a resistividade elétrica é definida como a medida de quão bem a corrente elétrica passa pelo solo (Perez *et al.*, 2009), isto é, quanto maior a resistividade elétrica de um solo, menor a quantidade de elétrons que passará por ele. Assim, a resistividade é uma característica do material, eq.05, que constitui um meio condutor e independe da sua forma geométrica, ou seja, a resistividade é uma característica intrínseca de cada material. Para Pacheco (2004), o valor da resistividade do solo é afetado pela sua composição trifásica: sólida, líquida e gasosa.

$$\rho = \mathrm{R}\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{l}} \quad (05)$$

Em que: ρ é resistividade elétrica (Ohm.m); R a resistência elétrica (Ohm); A área da seção transversal (m^2) e *l* o comprimento (m).

Assim, a resistividade elétrica (de unidade usual Ω.m)ou condutividade elétrica (mensurada geralmente em μS/cm) é medida por um par de eletrodos montados no fuste do cone e se relacionam de acordo com a eq. 06.

$$Condutividade\left(\frac{\mu S}{cm}\right) = \frac{10\,000}{Resistividade\ (\Omega.m)} \quad (06)$$

A resistência elétrica, diferentemente da resistividade elétrica, depende de aspectos geométricos do condutor e, de acordo com a Primeira Lei de Ohm, pode ser calculada através da eq.07.

$$R = \frac{V}{i} \quad (07)$$

Sendo *V* a tensão medida em um par de eletrodos alimentado por uma corrente elétrica contínua *i*.

A definição de resistência elétrica se aplica quando ocorre a circulação de uma corrente elétrica contínua através da aplicação de uma diferença de potencial entre os

extremos de um resistor. Nesse sentido, qualquer material pode ser considerado um tipo de resistor, sendo que materiais que possuem resistência muito alta ao fluxo de corrente elétrica são classificados como isolantes.

O campo elétrico, $\vec{E}$, grandeza vetorial, descreve a condição que um sistema de cargas estabelece no espaço (TIPPLER,1999). Assim, uma carga carregada eletricamente dentro de um campo elétrico originado por outro corpo carregado sofre uma ação de atração ou repulsão, dependo da interação entre a carga geradora do campo e a carga elétrica introduzida nele, eq. 08.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \tag{08}$$

Na qual $\vec{F}$ é a força eletrostática entre a carga de prova q_0 e a carga geradora do campo elétrico $\vec{E}$.

Portanto, se essas cargas forem de mesmo sinal a interação entre elas será de aproximação, mas se os sinais forem opostos atuará uma força $\vec{F}$ de repulsão entre as partículas resultando no afastamento delas.

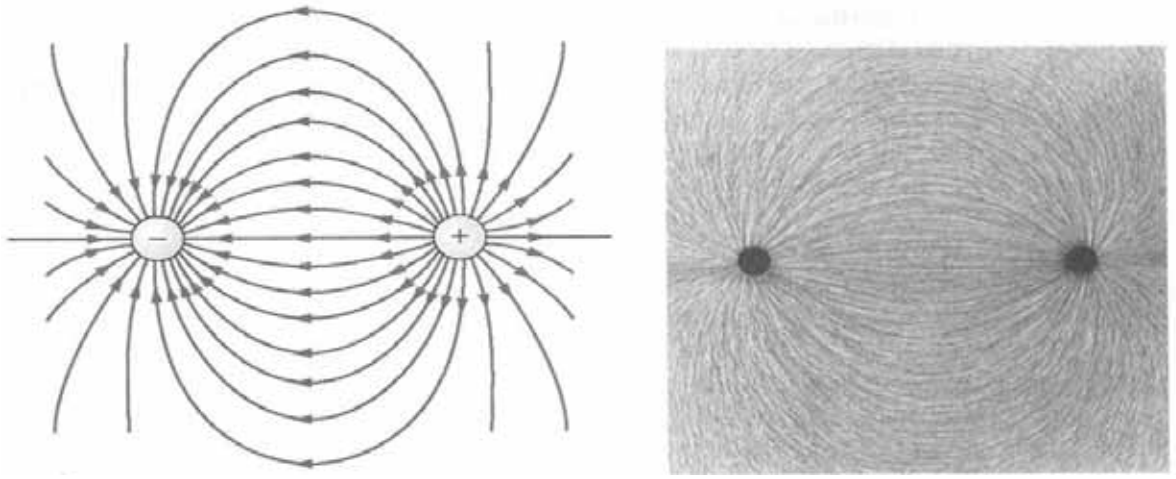
Num condutor metálico, o movimento dos elétrons livres é desordenado, com velocidade da ordem de 10^6 m/s. Como as direções dos deslocamentos não são as mesmas a carga gerada é nula (Δq=0). Quando um campo elétrico é aplicado os elétrons sofrem uma aceleração devido à força, dada pela eq. 08, gerando assim a corrente elétrica *i* (TIPPLER, 1999).

Na região do espaço compreendido na vizinhança da partícula geradora do campo elétrico surgem linhas de força, que são também chamadas linhas de campo elétrico, as quais mostram, em cada ponto, a direção da força que se exerce sobre uma carga de prova.

O campo elétrico no cone resistivo possui uma distribuição mais complexa do que a simples distribuição de cargas de um dipolo. No entanto, ao entender o funcionamento de um dipolo, torna-se mais fácil a interpretação do efeito do campo elétrico no cone resistivo.

No dipolo as linhas de campo elétrico próximas à região carregada positivamente se direcionam para fora da partícula. Já na região carregada negativamente, as linhas de campo elétrico se direcionam para dentro da partícula. Próximo a uma partícula carregada, uma região do espaço fica sujeita a um campo elétrico que parte da partícula para todas as direções tridimensionalmente em linha reta. Assim, pontos equidistantes da partícula carregada possuem um mesmo potencial, formando uma superfície no espaço em torno da partícula

chamada de superfície equipotencial (PACHECO, 2004). Na Figura 3 tem-se a representação esquemática de um campo elétrico gerado por um dipolo num meio homogêneo.

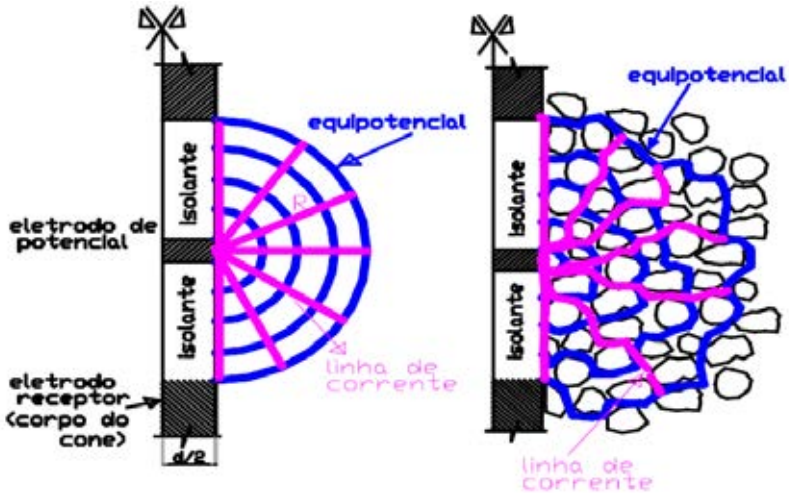


(a) (b)

Figura 3: Representação do campo elétrico, (a) desenho esquemátic das linhas de campo elétrico de um dipolo; (b) linhas de campo em uma suspensão de fragmentos de fibra em óleo (extraido de Tippler, 1999).

No cone resistivo ocorrem também superfícies de mesmo potencial cujas as forças se decompõem tridimensionalmente. No entanto, as superfícies equipotenciais apresentam-se em diferentes composições espaciais que variam de acordo com a configuração dos eletrodos instalados no fuste do sensor.

O fenômeno da condução elétrica depende do meio no qual se propaga a corrente elétrica. Em meios aquosos, também designados meios ideais, essa propagação ocorre uniformemente formando linhas equipotenciais esféricas, ou seja, não há barreiras físicas que alterem a trajetória dos elétrons. Para meios particulados, como é o caso de solos, há vários fatores, como a composição trifásica do solo e a condutividade do fluído intersticial, que alteram a trajetória dos elétrons e, por consequência, acabam distorcendo as linhas equipotenciais. Na Figura 4 tem-se a representação esquemática das linhas equipotenciais desenvolvidas pelo cone resistivo em meios aquosos e particulados.



(a) (b)

Figura 4: Representação esquemática do desenvolvimento das linhas de campo e de corrente. (a) no modelo idealizado – meio aquoso, (b) em meio particulado – solo (PACHECO, 2004).

2.2. Fatores intervenientes na resistividade do solo

Os solos naturais possuem diferentes propriedades elétricas em consequência dos diferentes tipos de formações, composições, estruturas, quantidade água e temperatura. Assim sendo, os materiais e propriedades do solo estão fortemente relacionados e podem ser quantificados por meio das propriedades geo-elétricas, as quais são relevantes para a investigação indireta do solo (KONG *et al.* 2012). Essas propriedades elétricas são aplicadas em vários contextos, como propriedades físicas do solo (Archie, 1941), contaminação do solo e das águas subterrâneas (Campanella & Weemees 1990), melhoramento do solo e estabilização (Liu *et al.* 2006 e 2007), liquefação da areia (Arulmoli *et al.* 1985), e microestrutura do solo (Fukue *et al.* 1999).

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca de um material. No entanto, o subsolo é, geralmente, composto por uma complexa distribuição de diferentes materiais com resistividades diferentes e, portanto, a resistividade elétrica do subsolo é uma composição das resistividades desses diferentes materiais.

Assim, devido à grande variação de materiais presentes no subsolo, tem-se a denominação de resistividade aparente que leva em consideração a complexidade dos componentes do subsolo, podendo ser calculada aritmeticamente, de forma simplificada, como a média volumétrica do meio ou, ainda, de forma mais complexa, em função de

ponderação, a qual envolve também as configurações dos eletrodos (COMPARE *et al.* 2009).

Tem-se ainda, o conceito de resistividade verdadeira, o qual se aplica a condição ideal, isto é, na situação de materiais homogêneo (ADLI *et al.* 2010). No entanto, essa situação não é comum de ser encontrada em solos de clima tropical.

Há vários fatores que podem afetar a resistividade elétrica do solo (KIBRIA & HOSSAIN, 2012). O teor de umidade é identificado como um dos principais fatores que causam a mudança de resistividade do solo (Mc Carter, 1984) juntamente com o grau de saturação (Abu-Hassanein & Benson, 1996); a densidade e a estrutura dos poros (Gupta & Hanks 1972); o teor orgânico (Ekwue & Bartholomew, 2010); a composição da água contida nos poros do solo (Kalinski & Kelly, 1993); e formação geológica (Giao *et al.*, 2003) também são fatores importantes.

A composição trifásica do solo é outro fator relevante na análise da resistividade elétrica. A distribuição da corrente elétrica ocorre nas três fases componentes do solo, isto é, na parte líquida, sólida e gasosa. No entanto, a maior parte da corrente elétrica é conduzida pelo fluído intersticial, pois é no meio líquido que corre mais facilmente o transporte de cargas, por condução eletrolítica (LUNNE *et al*,1997).

É importante ressaltar que para uma mesma amostra de solo, ou seja, de mesma composição mineralógica e mesmo fluído intersticial, o valor da resistividade elétrica oscila entre uma faixa de valores, como exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo de algumas medidas de resistividade elétrica em solos saturados e no fluido de saturação (extraído de Campanella, 2008).

Tipo de material	Resistividade solo ρb (Ω.m)	Resistividade fluído ρf(Ω.m)
Areias delataicas com intrusão de água salgada	2	0.5
Areia com água potável	>50	>15
Típico chorume de aterro	1-30	0.5-10
Barragem de rejeito (metal) com chorume de sulfeto oxidado	0,01-20	0.005-15
Barragem de rejeito (metal) sem chorume de sulfeto oxidado	20-100	15-50
Areia e pedregulho contaminados por arsênico	1-10	0.5-4
Área industrial – Contaminantes inorgânicos em areias	0.5-1.5	0.3-0.5
Área industrial – Areias e siltes contaminados por creosoto	200-1000	75-450
Área industrial – Detritos de madeira em siltes argilosos	300-600	80-200

Assim sendo, faz-se necessário um aprofundado estudo dos fatores intervenientes na resistividade do solo. A seguir, estão apresentados alguns desses fatores e o tipo de interferência que provocam na leitura da resistividade elétrica.

Grau de saturação

Em condições parciais de saturação, o solo é composto por duas fases praticamente isolantes, a sólida e a de ar, e por uma fase condutora, que é a líquida. Assim, quanto menor for o grau de saturação do solo, menor será a condução eletrolítica, o que implica em maior resistividade.

Aquino (2010) estudou em laboratório um solo argiloso compactado característico do Distrito Federal e relacionou a resistividade elétrica com o grau de saturação para corpos de prova com mesmo índice de vazios, Figura 5. Nesse estudo, a resistividade elétrica variou exponencialmente com o grau de saturação, sendo esta relação inversamente proporcional.

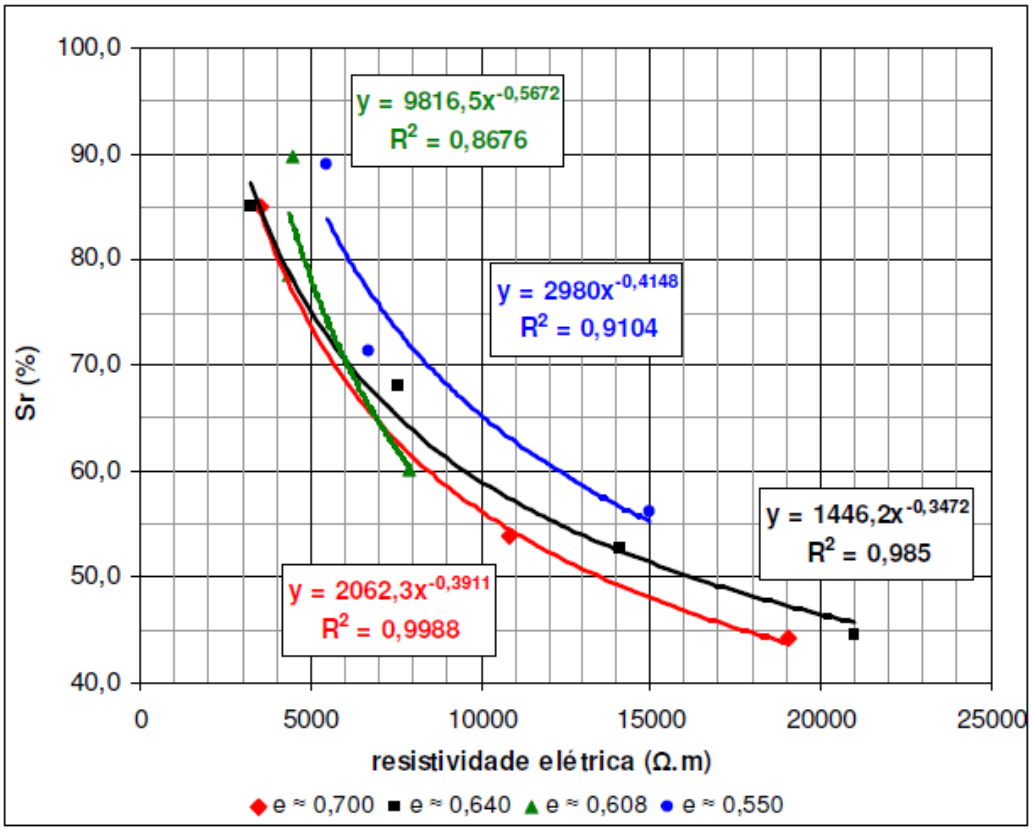


Figura 5: Grau de saturação versus resistividade elétrica para corpos de prova com mesmo índice de vazios extraído de Aquino (2010).

Teor de umidade

Solos com baixo teor de umidade apresentam resistência elétrica muito alta. Alguns minerais são como isolantes, apesar de alguns solos poderem conduzir uma pequena quantidade de corrente através da superfície de suas partículas. Portanto, o valor obtido para a condutividade elétrica de um solo é principalmente devido ao seu teor de água e de sais dissolvidos. (FREELAND (1989) *apud* PINCELLI (2004)).

Tipo de solo

O tipo de solo é outro fator que altera a resistividade elétrica devido, principalmente, a forma e composição dos grãos. Assim, um aumento no índice de vazios provoca um aumento na área de passagem da corrente, caso estejam saturados, o que provoca um aumento na condutividade elétrica.

Segundo Weemees (1990), no caso de solos finos, que apresentam grãos de forma lamelar, ocorre uma maior interação entre as partículas, isto é, há uma maior área de contato entre elas. Isso interfere no comportamento resistivo, pois essa maior interação resulta no acúmulo de cargas elétricas na superfície dos argilominerais, devido à elevada capacidade de troca catiônica ou elevado potencial de matéria orgânica presente nesses solos.

Para Pacheco (2004), as partículas fração de areia, em geral, são formadas por partículas de quartzo e feldspato e podem ser consideradas como elementos isolantes dentro de um meio condutor, caso o meio esteja saturado. Esse mineral se caracteriza por ser constituído de uma estrutura cristalina polimérica (tetraedros de silício e oxigênio), altamente isolantes.

Quando se introduz o cone no solo, ocorrem sucessivos processos de ruptura no solo e isso muda o estado de compacidade próximo ao corpo do cone. Nesse processo de ruptura os solos fofos tendem a sofrer compressão e os mais compactados tendem a se expandir. Portanto, existe uma alteração entre os resultados medidos para areias no estado intacto e outro após a ruptura (PACHECO, 2004).

A resistividade elétrica nas rochas é conhecida por ser altamente variável entre outras propriedades físicas intrínsecas. Em alguns casos, para um mesmo tipo de rocha os valores extremos que a caracterizam podem variar em ordem de grandeza (GRANT & WEST, 1965).

Grau de compactação

O processo de compactação dos solos tem como objetivo reduzir o volume de vazios, assim sendo, para Pacheco (2004), num mesmo teor de umidade a redução do índice de vazios provoca um aumento no grau de saturação; como a condutividade elétrica é maior para solos próximos a saturação o aumento do grau de compactação diminui a resistividade.

O grau de compactação está diretamente relacionado com a umidade de compactação. Assim, quanto maior a umidade de compactação menor é a resistividade. No entanto, para umidades inferiores a umidade ótima tem-se pequenas variações do teor de umidade acarretando em grandes alterações de resistividade, pois a quantidade de ar presente no solo atua como um isolante.

Temperatura

A temperatura é um fator que altera a mobilidade de íons de maneira indireta, alterando assim, a resistividade do meio. A aceleração das partículas em um campo elétrico imerso em uma solução sofre uma resistência devido ao atrito viscoso do meio (PACHECO, 2004).

Segundo Abu-Hassanein & Benson (1996) há uma redução da resistividade elétrica com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque a temperatura do fluído afeta consideravelmente a viscosidade do mesmo e consequentemente sua resistividade, ou seja, a viscosidade afeta o grau de agitação dos íons na solução eletrolítica.

Para Miranda *et al.* (1997), a resistividade das soluções intersticiais varia com a temperatura, isto é, para temperaturas mais elevadas a energia cinética média é maior nos compostos iônicos, o que aumenta capacidade de condução iônica.

Mais recentemente, Kishimoto (2011) verificou a influência da temperatura em uma faixa de 10°C a 30°C na resistividade elétrica de um fluído em diferentes concentrações de cloreto de sódio. Esse estudo mostrou que em concentrações mais elevadas a variação da temperatura influencia menos na resistividade elétrica, pois a concentração dos íons presentes no fluído predomina sobre o efeito causado pela temperatura.

Fluído intersticial

Em um meio poroso saturado, em geral, a maior parte do transporte de íons ocorre na porção líquida por condução eletrolítica. Assim o tipo de líquido e sua composição é, portanto, uma variável extremamente importante para a interpretação dos resultados.

Geralmente, quanto mais íons presentes no fluído intersticial, maior será a condutividade. Entretanto, considerando um íon específico, há outros fatores que afetam a condutividade eletrolítica como o tamanho do íon e a sua valência (AQUINO, 2010).

Em caso de meios em que o fluído é muito condutivo, o tipo de solo tem pouca influência em situações saturadas, isso ocorre porque a condução acontece mais facilmente pelo fluído por haver muitos íons na solução intersticial. Por exemplo, regiões próximas ao mar podem não apresentar diferenças significativas de resistividade para diferentes extratos de solo.

Fator de formação

A expressão "fator de formação de resistividade" (F) é uma tradução literal da expressão inglesa *formation resistivity fator*. Esse fator foi estudado, pioneiramente, por Archie (1941) a partir da determinação da resistividade elétrica em laboratório de um grande número de amostras de areias saturadas com soluções de água e cloreto de sódio, de 20.000 mg a 100.000 mg de NaCl por litro, e com a porosidade variando entre 10% e 40%.

Assim, Archie (1941) estabeleceu como sendo o fator de formação de resistividade elétrica a razão entre a resistividade da areia saturada com solução de água e cloreto de sódio (R_0) e a resistividade da solução de água e cloreto de sódio (R_w), eq. 09.

$$F = \frac{R_0}{R_w} \tag{09}$$

O fator de formação está relacionado com a forma dos grãos, e nesse equacionamento considera-se que a condução elétrica varia exclusivamente em função da geometria dos canalículos formados entre os grãos e, consequentemente, a mineralogia. De acordo com Weemees (1990), considera-se fundamental que não exista condução elétrica pelas partículas, sendo portanto uma formulação restrita aos arenitos.

No caso de solos com quantidades significativas de argilominerais, isto é, que podem conduzir carga elétrica pela superfície de suas partículas, a realização de medidas de resistividade não distingue os fenômenos de condução, assim, a resistividade mensurada leva em consideração um fator de formação aparente (JACKSON *et al.* 1978). Portanto, a formulação para obtenção do fator de formação depende do tipo de solo em análise, a qual pode ter equações mais complexas para materiais argilosos ou mais simples para materiais arenosos.

Archie (1941), com base em observações empíricas, relacionou o fator de formação com a porosidade das areias estudas, eq. 10, sendo esta a primeira relação matemática conhecida como Lei de Archie.

$$F = n^{-m} \tag{10}$$

Em que m é uma constante determinada experimentalmente e n é a porosidade do solo.

A constante *m* foi caracterizada por Archie (1942) como sendo dependente do grau de cimentação individual das partículas; depois Guyod (1944) descreveu *m* como sendo controlada pelo tipo de rocha de origem do solo (JACKSON *et al.* 1978).

Taylor-Smith (1971) usando os resultados de sedimentos marinhos sugeriram duas formulações simples para descrever os resultados de materiais coesivos (argilas ricas em sedimentos) e não coesivos, sendo elas: $F=n^{-1,5}$ com n <0,6 para as areias e $F=n^{-2,0}$ com n <0,6 para as argilas (JACKSON *et al.* 1978).

A formulação de Archie (1941), eq. 10, sofreu alterações através da inclusão da constante *a* de juste, proposta por Winsauer (1952) conforme relataram Jackson *et al.* 1978, e também pelo estudo em condições não saturadas resultando na eq. 11.

$$\rho_b = a * \rho_f * n^{-m} * Sr^{-s} \tag{11}$$

Em que: a e s são constantes que podem ser determinadas experimentalmente, ρ_b é a resistividade aparente do solo, ρ_f é a resistividade do fluído intersticial e *Sr* é o grau de saturação do solo.

Dessa forma, a relação apresentada na eq. 11 é uma relação empírica importante nos estudos das areias, a qual pode ser considerada como uma relação indireta da Lei de Archie, que vem sendo bastante utilizada por outros autores, como por exemplo, Daniel *et al.* (2003), Pacheco (2004) e Oliveira (2004).

O parâmetro *a* é uma constante que depende da porosidade do solo cujo valor para solos não adensados varia em torno de 1,0 (OLIVEIRA, 2004).

Jackson *et al.* (1978) estudaram a influência das formas em partículas naturais e artificiais no fator de formação, além do tamanho e distribuição granulométrica, e mostraram que o expoente *m* depende inteiramente da forma das partículas. Nesse estudo, os valores de *m* para areias marinhas variaram entre 1,2 e 1,9, sendo que esses valores não foram afetados pela dispersão do formato das partículas dentro da areia, embora a magnitude de *m* tenda a aumentar com o aumento percentual do desvio da esfericidade.

De acordo com Daniel *et al.* (2003) os valores das constantes *m* e *s* variam de 1,3 a 2,2 e de 1,0 a 2,5, respectivamente. Já nos estudos realizados por Archie (1941) para arenitos consolidados e areias lavadas não consolidadas armazenadas em laboratório a constante *m* variou entre 1,3 e 2,0 e a constante *s* apresentou valores próximos a 2,0 para a condição saturada.

Daniel *et al.* (2003) mostraram também que a variação do fator Sr^{-s} é muitas vezes maior do que a do fator n^{-m}, apesar dos expoentes *m* e *s* serem de mesma grandeza, Figura 6. Isto ocorre porque o grau de saturação (Sr) pode variar de zero até um para qualquer solo enquanto a porosidade do solo (n) geralmente varia entre 0,25 e 0,50.

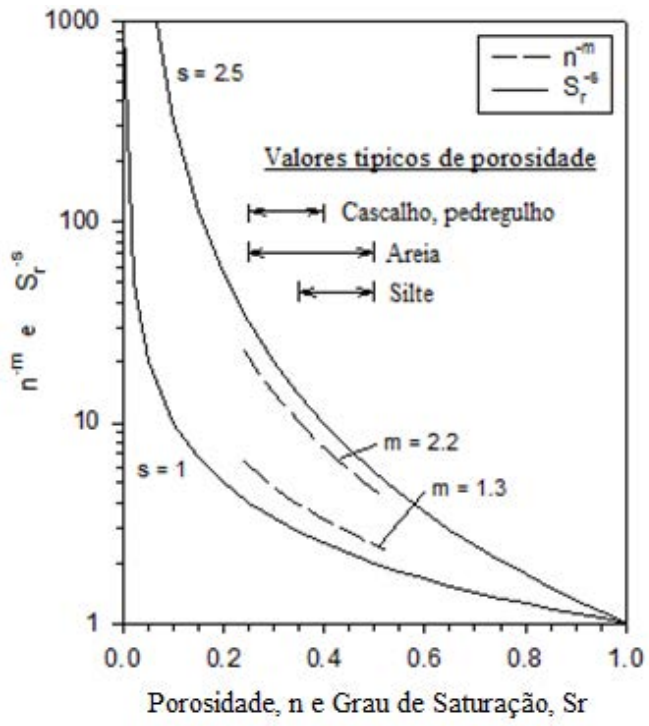


Figura 6: Sensibilidade da Lei de Archie para a variação da porosidade e do grau de saturação, adaptado de Daniel *et al.* (2003).

Recentemente Peixoto *et al.* (2014) estudaram o fator de formação em uma areia sedimentar saturada a partir de ensaios de permeabilidade com diferentes concentrações dos fluídos de percolação, Tabela 2. O resultado do fator de formação F* calculo por Waxman e Smits (1968) resultou em 7,0 bastante semelhante ao calculado pela Lei de Archie (F), mostrando a aplicabilidade da Lei de Archie em solo arenoso.

Tabela 2: Resistividade so solo saturado (ρsat), condutividade elétrica da água (Cw), resistividade da água no fluído de percolação (ρw), fator de formação da lei de Archie (F) e fator de formação de Waxman e Smits (1968) (F*) (adaptado de Peixoto *et al.*, 2014).

Concentração	ρsat (Ω.m)	Cw (μS/cm)	ρw (Ω.m)	F	F*
Água destilada	680.37	1.00	10000.00	0.07	-
Água de abastecimento	577.26	133.6	74.87	7.71	
250 PPM	146.39	523.5	19.11	7.67	7.02
500 PPM	71.05	1025.7	9.75	7.29	

Quantidade de compostos iônicos

A resistividade elétrica é alterada pela presença de contaminantes, que através da sua formação química podem aumentar ou reduzir o fluxo de corrente elétrica em solos contaminados. Assim, a quantidade de compostos iônicos presentes no fluído intersticial determina sua resistividade elétrica, e um acréscimo no teor de íons ou na quantidade de sólidos dissolvidos no fluído intersticial produz um decréscimo na sua resistividade elétrica. Caso contrário, se um contaminante isolante está presente no fluído intersticial, ocorre um acréscimo na resistividade elétrica deste.

Segundo estudos realizados por Boszczowski & Silva (2008), em amostras deformadas, a resistividade do solo está relacionada com a quantidade dos principais íons presentes no solo (cloreto, fluoreto, nitrito, brometo, nitrato, fosfato e sulfato). Observou-se também a influência da estrutura, visto que as curvas de resistividade das amostras deformadas e indeformadas apresentaram comportamento diferente, principalmente em umidade acima de 30%.

De acordo com Oh *et al.* (2008), compostos inorgânicos em fase aquosa tem condutância alta e diminuem a resistividade do solo. Assim, a aplicação do cone de resistividade para a avaliação de possíveis contaminantes requer o controle quantitativo da resistividade do solo com tal contaminante.

Sucção Matricial

Durante muitos anos, as análises dos problemas geoambientais foram dominadas por soluções desenvolvidas segundo a mecânica dos solos clássica, onde o solo é considerado totalmente saturado ou seco, condições nas quais a solução é simples. No entanto, muitos dos problemas geotécnicos, é necessário lidar com os solos não saturados para os quais a solução é mais complexa devido ao fato de estarem envolvidos dois fluídos para descrever o seu desempenho: água e ar, (PEREZ *et al.*, 2009).

Um dos principais conceitos na teoria dos solos não saturados é a sucção, que pode ser determinada em campo ou em laboratório. No estudo dos solos, a resistividade elétrica tem sido amplamente estudada para a determinação da capacidade do solo de retenção de água, no entanto, em Geotecnia não foi aproveitado muito de desse parâmetro (PEREZ *et al.*, 2009).

Assim sendo, a sucção é definida como pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas que fazem com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. (MIGUEL *et al.*, 2006).

Outra importante definição relacionada a sucção é o de potencial total da água no solo (ψ), que se compõe basicamente pela soma dos potenciais gravitacional (ψg), matricial (ψm), osmótico (ψos) e pneumático (ψpn). Portanto, o estado energético da água no solo envolve parcelas referentes à posição da partícula de água, aos fenômenos osmóticos, capilares, de adsorção e à pressão externa sobre ela exercida.

Uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção de água no solo, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo.

Durante as últimas duas décadas, estudos laboratoriais têm sido executados para melhor compreender a contribuição de sucção matricial para o comportamento mecânico de solos não saturados (DAICHAO *et al.*, 2011).

Existe uma grande variedade de métodos para a determinação da sucção. Dentre os principais métodos de laboratório tem-se: o método do papel filtro e a panela de pressão, os quais se diferem no tempo de resposta e na faixa de precisão associado a cada uma das técnicas. Na Tabela 3 estão relacionadas as principais diferenças entre esses métodos.

Tabela 3: Métodos de medida de sucção adaptado de Ridley & Wray (1995).

Método	Componente da sucção	Intervalo de aplicação (kPa)	Tempo de equilíbrio
Papel filtro (em contato)	Matricial	30 – 30.000	7 dias
Papel filtro (sem contato)	Total	400 – 30.000	7 – 14 dias
Placa de pressão	Matricial	0 - 1500	Dias

Soto (2004) relaciona algumas vantagens do método do papel filtro, tais como: o tempo de resposta do papel é relativamente curto para cada equilíbrio sendo da ordem de uma semana (tempo mínimo recomendado) quando medida a sucção matricial; torna possível a medição da sucção osmótica indiretamente pela diferença das medidas da sucção total e matricial; e o procedimento do ensaio é simples. Entre as desvantagens tem-se: a necessidade de um manuseio delicado do papel e a precisão na pesagem numa balança com resolução de quatro casas; o tempo de resposta do papel é relativamente longo para sucções inferiores a 100 kPa sendo que cada equilíbrio possui um tempo da ordem de 30 dias (tempo mínimo recomendado) quando medida a sucção total; e os resultados dependem de cuidados na execução, que embora sejam simples requerem atenção para um bom contato entre o papel e o solo.

O método da panela de pressão consiste em uma câmera composta por uma placa de pedra porosa com alta pressão de entrada de ar na base, sobre a qual são dispostas as amostras. Esse sistema previne a cavitação e utiliza a técnica de translação de eixos, a qual consiste em uma mudança no referencial de pressão (pressão atmosférica), ou seja, aumenta-se artificialmente a pressão do ar existente nos poros do solo. Assim, produz-se um aumento de igual proporção na água, permanecendo a mesma diferença entre pressão no ar e na água, isto é, permanece a sucção e a pressão na água é aumentada, levando-a até valores mensuráveis (VILAR, 1997).

Dessa maneira, para esse método é importante ressaltar a importância das placas porosas de alta pressão de entrada de ar, as quais permitem o fluxo de água, mas não o de ar. A sucção máxima a ser aplicada depende da pressão de entrada de ar das placas porosas, que podem atingir até 1.500 kPa.

Em síntese, o estudo do efeito da sucção pode melhorar a interpretação dos resultados de resistividade nos solos não saturados. Perez *et al.* (2009) estudaram a relação entre o efeito da sucção e da resistividade elétrica para três tipos de solos: silte de baixa plasticidade (ML), um silte plástico (MH) e uma argila plástica (CH), com as características apresentadas na Tabela 4. O estudo apontou para a necessidade de se isolar outros fatores intervenientes

e a necessidade de se desenvolver mais estudos nessa área para a obtenção da relação entre a sucção e a resistividade elétrica.

Tabela 4: Propriedades índices dos solos analisados (extraído de Perez *et al.*, 2009).

Classificação	Limites de Attenberg			Compactação		
				Proctor Normal		Gs
SUCS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$W_{ótimo}$(%)	$\gamma_{dmáx}$(kN/m^3)	
ML	46,5	36,0	10,5	36,5	12,32	2,66
MH	54,0	34,0	20,0	38,5	12,34	2,64
CH	72,0	26,0	46,0	34,0	12,55	2,59

2.3. Aspectos elétricos das ponteiras de resistividade

Estudos realizados mostraram que a utilização de medidas de condutividade elétrica com frequências relativamente baixas, isto é, inferior a 100 kHz, demonstram ser uma medida eficaz para caracterizar solos e rochas porosas para estudos hidrogeológicos (Kelly & Reiter; 1984, Mazac *et al.*,1985; Gorman & Kelly, 1990).

Assim, com o aumento da importância do estudo da resistividade elétrica, surgiram diferentes cones resistivos. Os cones de resistividade possuem um comportamento diferenciado dependendo do tipo de arranjo dos sensores e espaçamento dos eletrodos. Esse comportamento está relacionado com a geometria do dispositivo e também suas configurações elétricas.

Dependendo da interação entre esses fatores, pode ocorrer ou não a polarização dos eletrodos. O efeito de polarização é provocado pela introdução de corrente no meio, podendo ser contínuo no caso de uma solução aquosa ou descontínuo no caso de um solo não saturado. Com o passar do tempo, a polarização altera a distribuição de íons e provoca o acúmulo de cargas positiva na região dos eletrodos negativos e cargas negativas na região de eletrodos positivos.

Dessa maneira, a polarização está diretamente relacionada com a quantidade de corrente que atravessa os eletrodos. Logo, um decréscimo no valor da corrente que alimenta um circuito de alta tensão implica numa diminuição significativa do efeito de polarização dos eletrodos (WEEMEES, 1990).

O efeito da polarização dos eletrodos foi estudado por Weemees (1990) em função da resistividade normalizada, eq. 12.

$$\rho_n = {}^{\rho}/_{\rho_{1000}} \quad (12)$$

Em que: ρ_n é a resistividade normalizada, ρ é aresistividade medida e ρ_{1000} a resistividade medida na frequência de 1000 Hz.

Assim, Weemees (1990) mostrou o efeito da polarização na Figura 7, na qual se tem um gráfico de resistividade normatizada *versus* a frequência para três diferentes configurações de eletrodos. Para o sistema de quatro eletrodos, com pares de eletrodos afastados de 3,5cm, a potência independe da frequência, mostrando que não há polarização dos eletrodos internos. Já para a configuração de dois eletrodos, o efeito da polarização depende da frequência que alimenta o sistema, de modo que, para as configurações dos dois eletrodos apresentados a frequência de 1 kHz é o valor no qual o efeito de polarização decresce, pois nessa frequência os íons não têm tempo para se depositarem nos eletrodos. Portanto, a configuração de dois eletrodos pode ser bem sucedida desde que seja empregada numa frequência adequada, já que tal arranjo oferece uma maior facilidade, em relação ao de quatro eletrodos, na sua fabricação (WEEMEES, 1990).

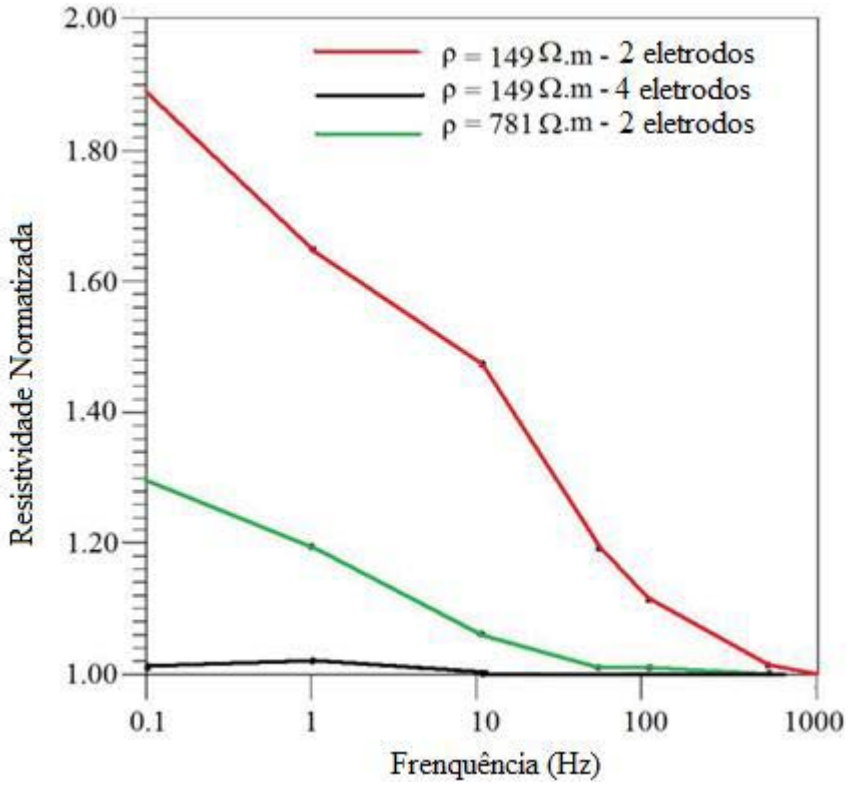


Figura 7: Gráfico do efeito da polarização nos eletrodos internos e externos *apud* Weemees (1990).

Esse efeito foi também avaliado por Peixoto *et al.* (2010), em que uma areia de cava foi analisada a cinco teores de umidade diferentes e, para cada umidade, a frequência foi alterada de 60 Hz até 245 kHz, Tabela 5. Observou-se com esse estudo que as resistividades normatizadas, para os cinco teores de umidade, não apresentaram diferenças significativas até 3 kHz. No entanto, para valores superiores a essa frequência de 3 kHz a resistividade normatizada apresentou variações significativas.

Tabela 5: Relação das resistividades normalizadas *versus* frequência para cada teor de umidade *apud* Peixoto *et al.* (2010).

Frequência	Resistividade Normalizada (ρ_n)				
(Hz)	w=0,8%	w=7,3%	w=18,0%	w=27,9%	w=35,5%
60	1,00	1,04	1,05	0,99	1,09
120	1,04	1,03	1,03	1,02	1,03
240	1,03	1,02	1,02	1,01	1,03
480	1,02	1,01	1,01	1,00	1,02
960	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00
1.920	0,98	0,99	0,99	1,00	0,97
3.840	0,92	0,98	0,99	1,00	0,91
7.680	0,83	0,98	1,00	1,03	0,78
15.360	0,72	1,04	1,08	1,16	0,79
30.720	0,71	1,32	1,43	2,06	0,94
61.440	1,04	2,58	2,98	9,38	1,04
122.880	4,27	12,06	10,10	42,72	2,51
245.760	15,60	62,01	30,84	114,22	3,93

Existem duas configurações mais usuais para investigações leituras de resistividade em uma dimensão o arranjo de Schlumberger e o de Wenner. A escolha do tipo de arranjo influencia no equacionamento da obtenção da resistividade.

No arranjo de Schlumberger, assim como no Wenner, são utilizados quatro eletrodos, sendo dois eletrodos externos (*AB*) para transmissão de corrente elétrica, e os eletrodos centrais (*MN*) para leitura de potencial. Os eletrodos (*MN*) são fixos e os eletrodos (*AB*) possuem semi-espaçamentos crescentes. Na Figura 8 está ilustrado o arranjo de Schlumberger em que os eletrodos *A* e *B* são espaçados *2s* e *MN*, espaçados de *g*. Nesse caso, o cálculo da resistividade aparente é feito de acordo com a eq.13, derivada a partir da Lei de Ohm (TELFORD *et al*., 1990).

$$\rho_{ap} = \left(\frac{V}{i}\right).k \qquad (13)$$

Em que: ρ_{ap} é a resistividade aparente (Ω.m); V a diferença potencial medida (mV) e i é a intensidade de corrente (mA); k é o fator geométrico de escala.

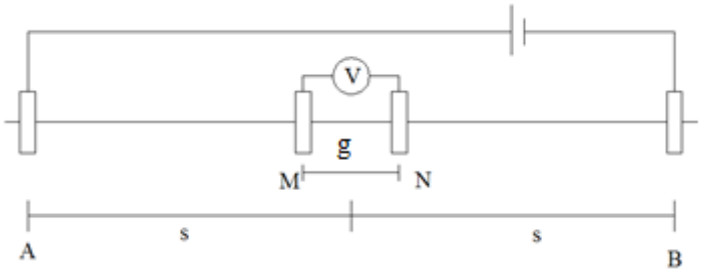


Figura 8: Arranjo Schlumberger.

O dispositivo de resistividade utilizado nesta pesquisa, desenvolvido na Unesp Bauru, possui o arranjo de Wenner, o qual dispõe de quatro eletrodos igualmente espaçados como apresentado na Figura 9.

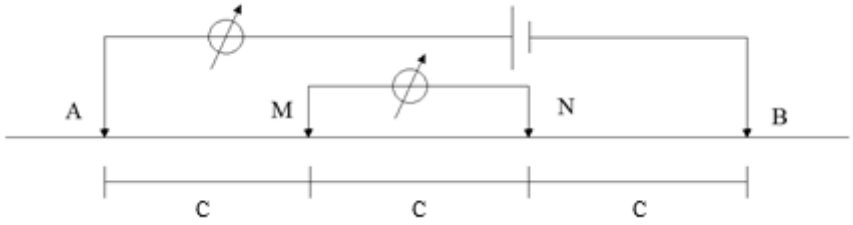


Figura 9: Arranjo de Wenner.

No arranjo de Wenner o eletrodo A emite uma corrente *i* que é recebida pelo eletrodo *B*, sendo estes os eletrodos de corrente. Essa corrente ao percorrer o solo induz um potencial que é captado pelos eletrodos centrais, denominados de *M* e *N*, de acordo com a Figura 9. A medida da resistividade para esse arranjo, é calculada através da eq. 14.

$$\rho_{ap} = 2c \times \frac{V}{i} \qquad (14)$$

Em que: ρ_{ap} é a resistividade aparente (Ω.m); *c* a distância entre os eletrodos (m); *V* a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* (mV) e *i* a intensidade de corrente (mA).

No arranjo Wenner, o ponto de investigação é estabelecido entre os eletrodos e fixo no centro do arranjo, como mostra a Figura 10. Dessa forma, quanto maior a distância entre os eletrodos de corrente (AB) maiores serão os raios de investigação.

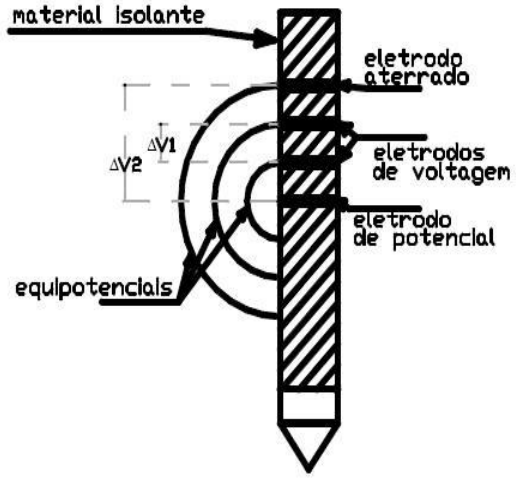


Figura 10: Representação esquemática das equipotenciais desenvolvidas pelo cone resistivo (Pacheco, 2004).

O termo verificação é muitas vezes confundido com o termo calibração, o qual consiste, de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (2009), na operação que estabelece, sob condições específicas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas, sendo expressa por meio de um diagrama, uma curva ou uma tabela de calibração.

Assim, a medida de resistividade do dispositivo de 20 mm de diâmetro, desenvolvido na Unesp, é obtida a partir de uma curva de verificação, que relaciona a razão entre a variação de tensão por corrente (V/i) com a resistividade elétrica. Recentemente, a ponteira passou por um novo processo de verificação e os valores obtidos estão apresentados na Figura 11.

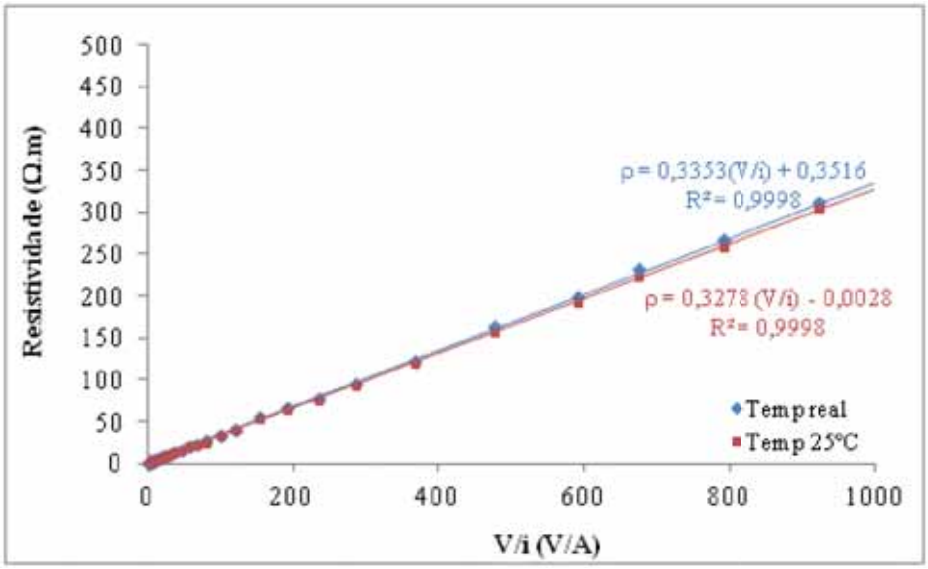


Figura 11: Curva de verificação do dispositivo de resistividade (Bollini e Peixoto, 2011).

2.4. Aparatos desenvolvidos para o estudo da medida de resistividade elétrica

Na Engenharia Geotécnica a medida de resistividade elétrica foi motivo de estudo, por muitos anos, com o intuito de estimar a porosidade de solos não coesivos. Recentemente, esse estudo tem sido utilizado para realizar investigações de campo e avaliação do percentual de contaminação de solos. De acordo com Aquino (2010), a medida de resistividade elétrica do solo é uma forma de investigação indireta que pode ser correlacionada com diferentes propriedades físicas do solo, tais como a porosidade, condutividade hidráulica e as propriedades físico-químicas.

Nesse contexto se inserem as técnicas utilizadas em laboratório, que são relativamente recentes. Geralmente, essas técnicas visam à obtenção de parâmetros elétricos de referência para sua utilização no campo, visando em sua maioria, o reconhecimento geotécnico ou avaliação do grau de contaminação dos terrenos (AQUINO, 2010). Durante a evolução da aplicação do conceito de resistividade elétrica, esses aparatos foram aperfeiçoados com o intuito de facilitar a obtenção de medidas elétricas. A seguir, estão relacionados alguns desses aparatos.

Utiliza-se, basicamente, dois equipamentos de obtenção da medida de resistividade em laboratório: através de sensores metálicos instalados em um cone de material isolante, equipamento também denominado de ponteira, e por placas metálicas instaladas nas

extremidades do corpo de prova. Tanto os sensores com as placas são responsáveis por aplicar uma corrente no solo, a qual atravessa as camadas da amostra e é medida na região central do corpo de prova, por multímetros ou aparelhos de aquisição de dados; os resultados são comparados com solos de mesma mineralogia.

A principal diferença entre os instrumentos é o campo elétrico gerado por eles, que no caso das placas tem por finalidade distribuir uniformemente a diferença de potencial na amostra; diferentemente da ponteira que pode impactar na leitura da resistividade em decorrência da propagação do campo elétrico gerado pelos eletrodos, quer seja por aspectos instrumentais relacionados a estrutura da ponteira, quer por fatores laboratoriais como o tamanho do corpo de prova ou ainda por particularidades relacionados ao aspectos do material que se deseja estudar.

Abu-Hassanein & Benson (1994) desenvolveram um corpo de prova com dimensões semelhantes ao cilindro de compactação tipo Proctor Normal. Nessa estrutura o campo elétrico era introduzido através de dois discos de cobre posicionados na extremidade do corpo de prova e a tensão era medida através de duas barras condutoras, também de cobre, cravadas na região central do corpo de prova, Figura 12. Os resultados desses ensaios mostraram que a resistividade de argilas compactadas é influenciada pelo teor de umidade, energia de compactação e saturação inicial do corpo de prova.

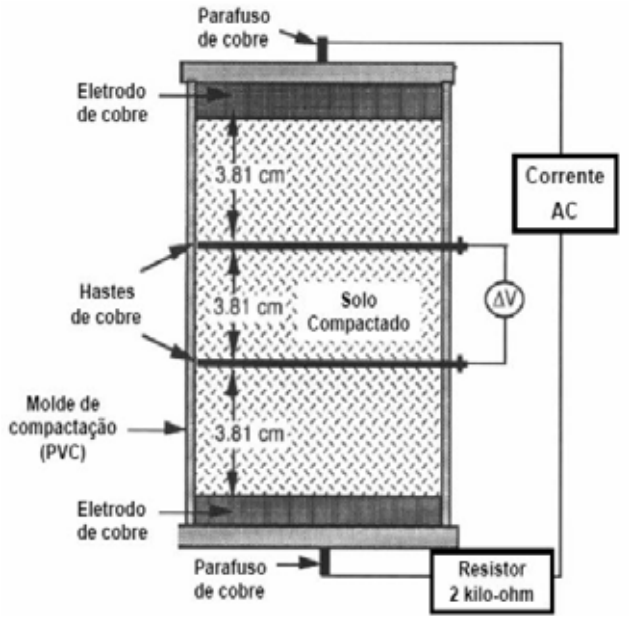


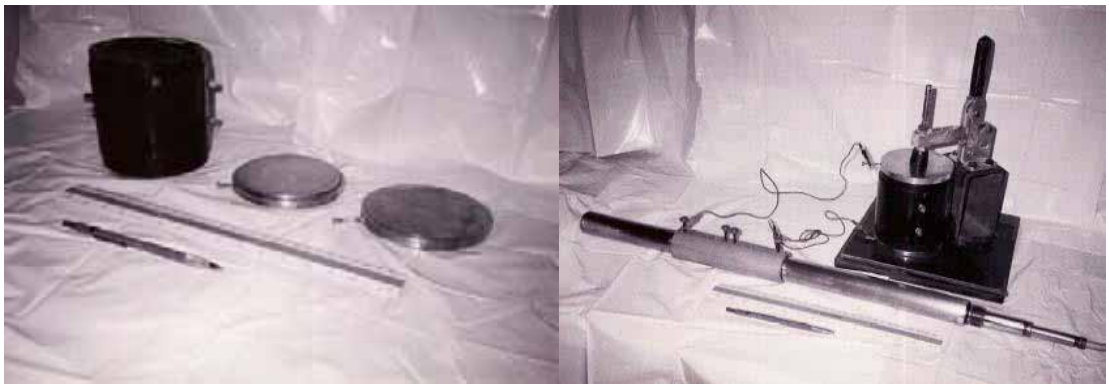
Figura 12: Corpo de prova de medida de resistividade elétrica em laboratório utilizados (Abu-Hassanein & Benson,1994).

Posteriormente, Abu-Hassanein & Benson (1996) apresentaram várias relações entre a resistividade e algumas características de diferentes tipos de solos argilosos, utilizando o aparato da Figura 12. Os autores apresentaram resultados de medida de resistividade elétrica de um solo ensaiado nas direções vertical e horizontal, a fim de verificar a anisotropia. Eles realizaram os ensaios em um solo compactado, em diferentes teores de umidade, na energia Proctor Normal Reduzido (utilizando a metade do número de golpes desta energia). Os resultados apresentados pelos autores mostraram que, para umidades abaixo da ótima (ramo seco da curva de compactação), os valores de resistividade medidos na direção horizontal variaram entre 75 e 80 % daqueles medidos na direção vertical. Já no ramo úmido da curva de compactação, o efeito da anisotropia sobre os valores de resistividade horizontais foi menor, com estes variando entre 90 e 95% dos valores de resistividade medidos na direção vertical. Os autores afirmaram que os solos compactados com teores de umidade elevados tornam-se mais homogêneos, uma vez que no ramo seco existe a presença da macroestrutura entre os grãos de argila (*apud* AQUINO, 2010).

Corroborando para os resultados obtidos por Abu-Hassanein & Benson (1996), Yamasaki *et al*. (2012), utilizando de um aparato com o mesmo princípio, analisaram o efeito da resistividade elétrica variando-se o teor de salinidade do fluído de percolação para um solo sedimentar e outro arenoso controlando o teor de umidade, o grau de saturação, a energia de compactação e o índice de vazios. Assim, foi possível verificar uma importante relação entre resistividade elétrica do solo saturado com a resistividade elétrica do fluído de percolação, denominada fator de formação, importante no estudo de valores de referência em solos tropicais com foco na investigação geoambiental.

Utilizando um equipamento semelhante ao de Abu-Hassanein, Daniel (1997), em estudos realizados na *University of British Columbia*, acoplou o dispositivo para medida da resistividade de um piezocone (RCPTU) a um molde de ensaio de compactação feito com material isolante, Figura 13, através de dois eletrodos de latão localizados na extremidade da amostra. Esses eletrodos foram conectados aos dois eletrodos externos do piezocone (envio e recebimento de corrente elétrica) e a diferença de potencial era medida diretamente através dos dois eletrodos internos do piezocone.

A proposta de Daniel (1997) era obter valores de resistividade de referência em amostras de solos residuais em laboratório, onde muitas vezes a penetração do piezocone é prejudicada, além de auxiliar no entendimento da influência de fatores como o grau de saturação, porosidade e tipo de fluido existente entre os grãos de solo.



(a) (b)

Figura 13: Equipamento para medida da resistividade elétrica em laboratório em amostras compactadas: a) molde de compactação, b) aparato de medida montado *apud* Daniel (1997).

Mais recentemente, Daniel *et al.* (2003) mostraram a necessidade de isolar o sensor de resistividade das partes eletrônicas do CPTU para a obtenção da resistividade do solo. Os equipamentos utilizados por esses autores foram desenvolvidos na *University of British Columbia (UBC)*. Na Figura 14 está apresentado o módulo de resistividade ligado atrás do piezocone padrão. No experimento com isolamento, a excitação e a resposta estão isoladas eletricamente do cone padrão, o que provoca uma pequena corrente de fuga e calibrações lineares de resistividade de 0,01 Ω.m a 500 Ω.m para uma dada corrente de excitação.

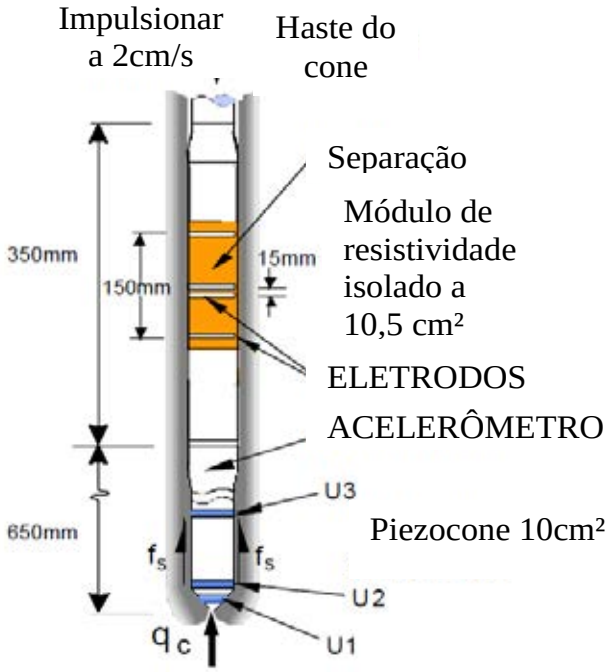
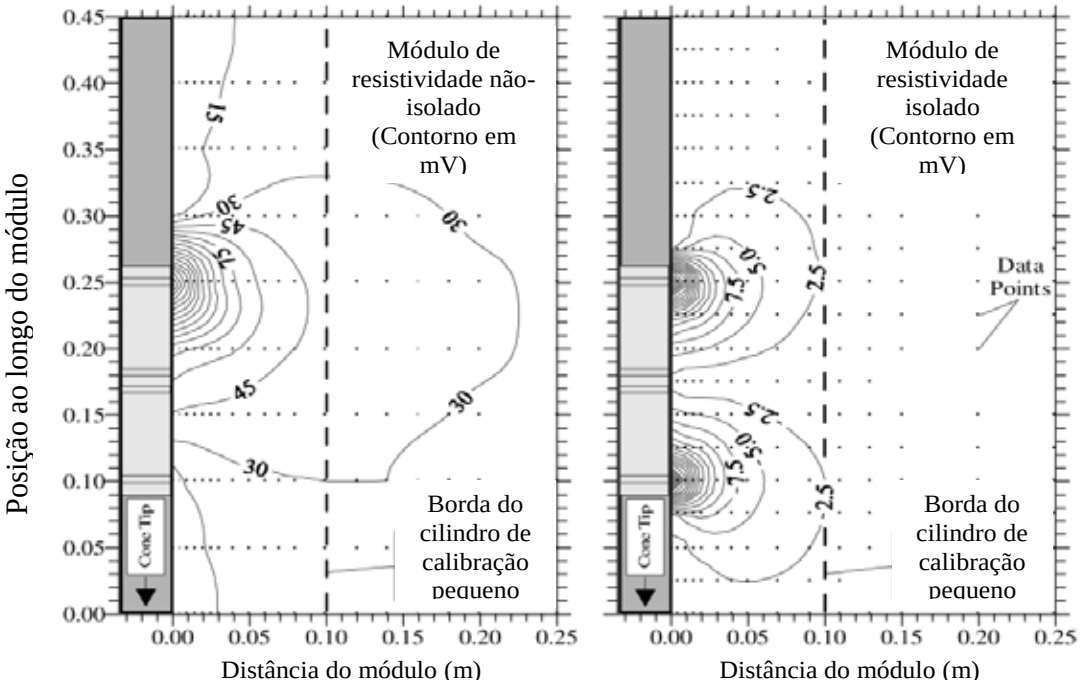


Figura 14: Piezocone de Resistividade desenvolvido na University of British Columbia, *apud* Campanella (2008).

Esse equipamento possui um eletrodo de espaçamento de 15 mm útil para a detecção de finas camadas de solo e outro eletrodo de maior espaçamento, isto é, 150 mm para medir a corrente alternada de excitação e a resistividade média ao longo da profundidade.

Daniel *et al.* (2003) apresentou como resultado de suas pesquisas as medidas equipotenciais que estão apresentadas na Figura 15. Nela observa-se que à grande diferença nos valores ocorridos devido à excitação de 25 mV para o sensor não-isolado e 1,5 mV, para o sensor isolado. Nota-se também a grande dispersão no das curvas equipotenciais no eletrodo próximo à ponteira do CPTU.



(A) módulo não-isolado (B) módulo isolado

Figura 15: Medidas equipotenciais realizadas em torno do piezocone de resistividade da University of British Columbia (Daniel *et al.*, 2003).

Pacheco (2004) realizou ensaios de resistividade com o piezocone resistivo em laboratório, Figura 16, utilizando areias de praia lavadas, de diferentes granulometrias e formas de grãos, e caulinita, homogeneizada em uma batedeira industrial com diferentes concentrações salinas. Os corpos de prova eram obtidos por pluviação: o material era lançado em um balde utilizando-se um funil, com abertura e altura de lançamento conhecidas, a fim de obter diferentes índices de vazios.



Figura 16: Aparato de medidas de resistividade em laboratório *apud* Pacheco (2004).

Na mesma tendência apresentada por Campanella (2008) em se acoplar os sensores, sísmico e de resistividade, à ponteira do CPTU, Bang *et al.* (2008) apresentou o desenvolvimento de um dilatômetro sísmico e de resistividade, o RSDMT, Figura 17. Nesse arranjo, o valor da resistividade pode ser calculado pela eq.15.

$$\rho = \frac{\pi^2}{\frac{2}{d+c} - \frac{2}{d+2c}} \left(\frac{V}{i}\right) = k\left(\frac{V}{i}\right) \tag{15}$$

Em que: ρ é a resistividade; d é o raio do eletrodo; c é a distância entre eletrodos; V é a medida potencial; i é a corrente de excitação e k é o fator geométrico.

Bang *et al.* (2008) determinaram o fator geométrico através da eq. 14, com $d \approx 50mm$ e $c=25mm$, e o obtiveram o valor de 1,478, esse valor foi calculado desconsiderando a espessura do eletrodo. A determinação empírica do fator geométrico foi avaliada a partir da variação da concentração da água com a adição de concentrações de cloreto de sódio (NaCl).

Nesse sistema, foram realizadas medidas de tensão e corrente através do RSDMT e relacionando os valores de resistência com as medidas de condutividade elétrica através de um condutivímetro. Na Figura 18 tem os resultados desse ensaio. Assim, a equação que relaciona a resistividade em função da razão entre a variação da tensão pela corrente fornece o fator geométrico empírico isto é, $k = 0,5274$, bem diferente do fator geométrico teórico de

1,478. De acordo com Bang *et al.* (2008), essa diferença pode estar relacionada com o complexo isolamento dos eletrodos que podem se comportar de maneira diferente do campo teórico e, também, que o eletrodo é espesso quando comparado ao espaçamento entre os eletrodos, características que não podem ser ignoradas.

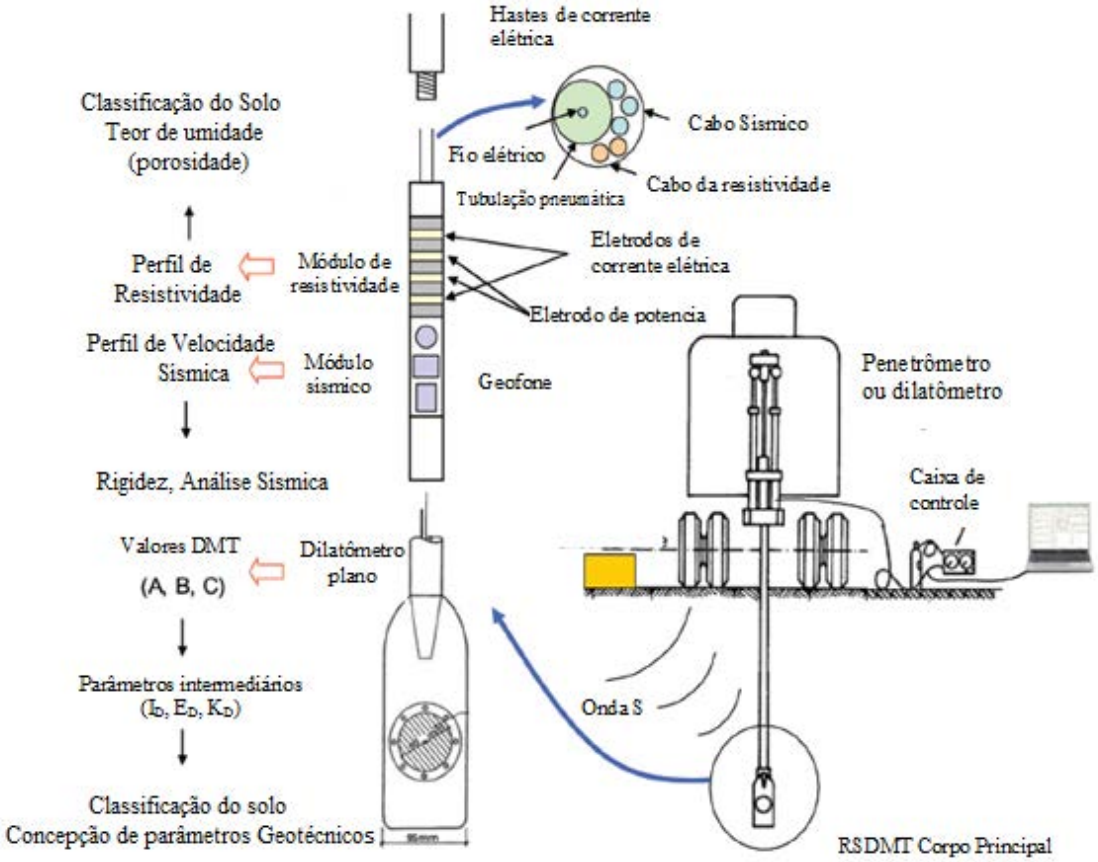


Figura 17: Diagrama Esquemático do sistema RSDMT *apud* Bang *et al.*(2008).

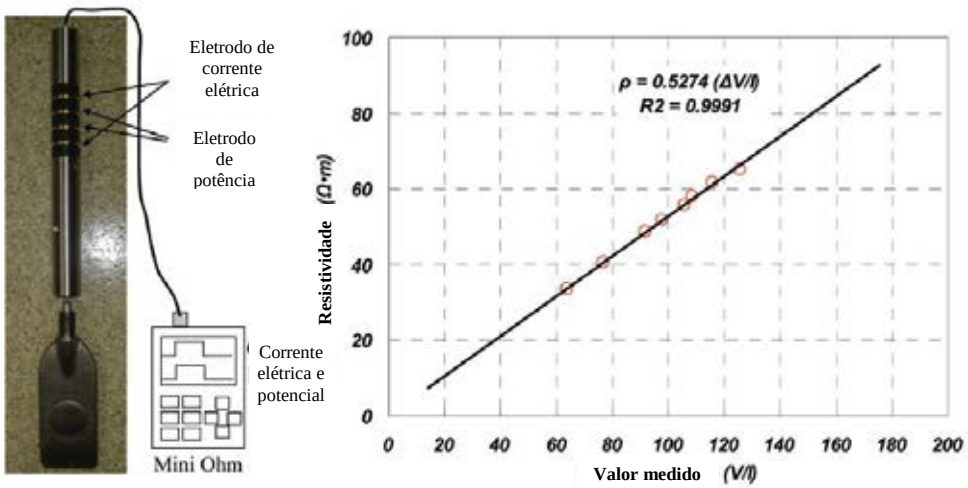


Figura 18: Módulo de resistividade e calibração empírica para a obtenção do fator geométrico (Bang *et al.*, 2008).

Aquino (2010) desenvolveu um sistema de laboratório utilizando a técnica de duas pontas ou dois terminais, Figura 19, que consiste em medir a corrente elétrica que flui por uma amostra, com todas as dimensões conhecidas, impondo uma diferença de potencial pré-estabelecida.

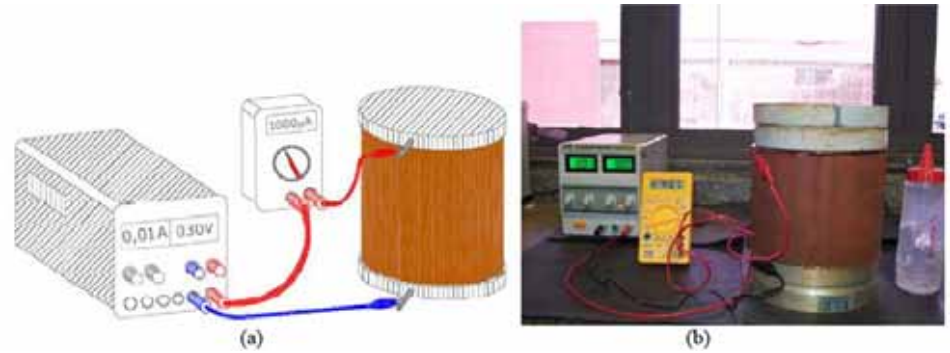


Figura 19: Sistema para medidas de resistividade elétrica: a) desenho esquemático da montagem, b) imagem da realização das medidas (Aquino, 2010).

Utilizando esse aparato, Aquino (2010) fez correlações entre a resistividade e alguns índices físicos dos solos (teor de umidade volumétrica e gravimétrica, grau de saturação e índice de vazios), Figura 20. Os resultados apresentaram um bom ajuste da curva de potência, com valores do coeficiente de determinação próximos de 1 para o grau de saturação, teor de umidade volumétrica e gravimétrica, indicando que a taxa com que se dá o aumento da resistividade elétrica com a diminuição dos índices físicos (w, θw e Sr) é maior quanto menor forem os valores destes. Aquino (2010) correlacionou também a resistividade elétrica com o peso específico aparente seco e o índice de vazios, Figura 21.

Essa correlação não se apresentou um único comportamento, tendo em vista a dispersão dos pontos no espaço resistividade elétrica por índice de vazios ou peso específico aparente seco. No entanto, dividindo os pontos por famílias de grau de compactação, verificou-se que o comportamento do peso específico aparente seco e o índice de vazios por resistividade elétrica apresentou comportamento semelhante ao da curva de compactação.

Adli *et al.* (2010) estudou a diferença entre as leituras de resistividade elétrica realizadas em campo e em laboratório para amostras de rochas. As amostras de rocha foram extraídas na profundidade de 3,34 m, conforme indicado na Figura 22, local no qual a profundidade real da rocha é conhecida e pôde ser comparada com os valores obtidos no levantamento de resistividade.

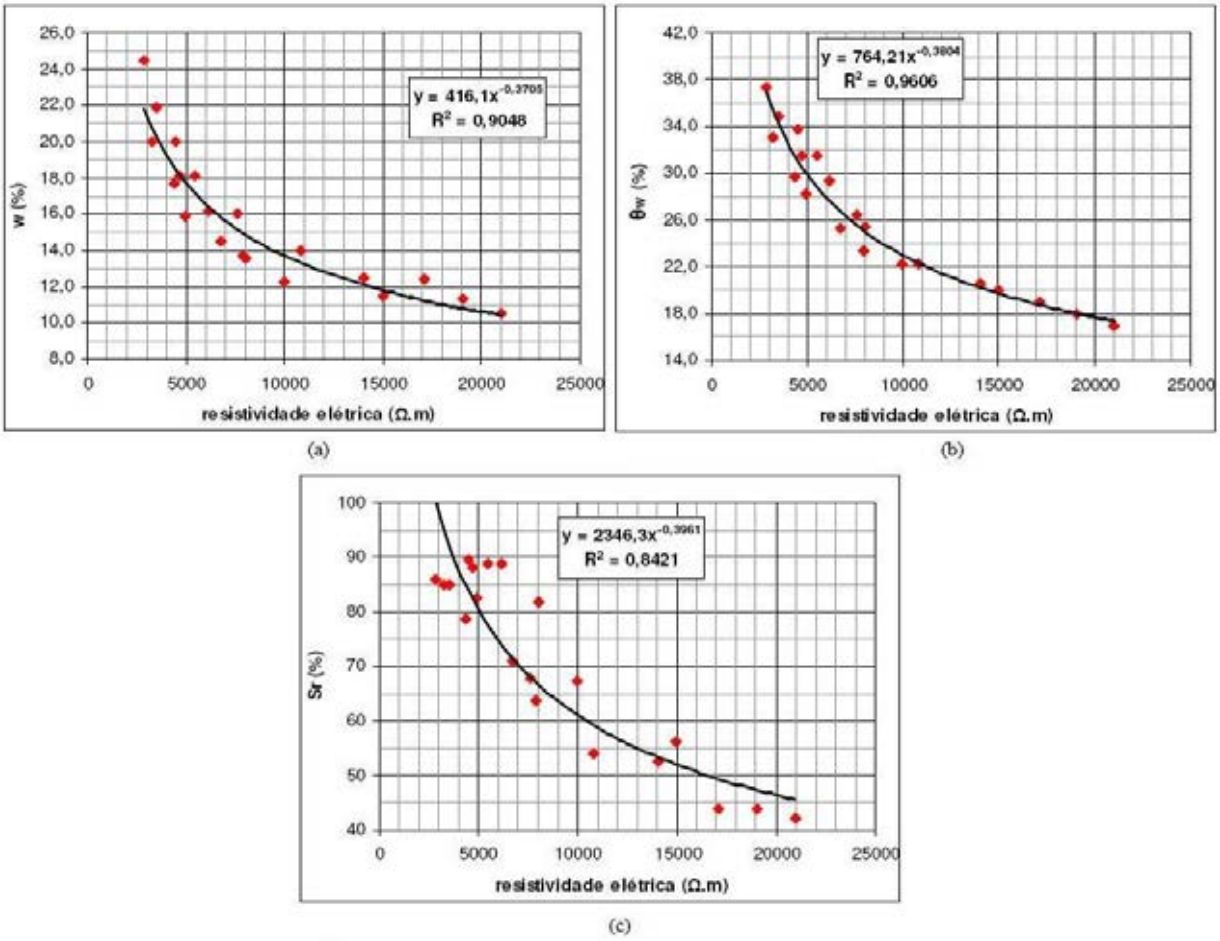


Figura 20: Correlações entre a resistividade elétrica e índices físicos: a) teor de umidade gravimétrica, b) teor de umidade volumétrica, c) grau de saturação (Aquino, 2010).

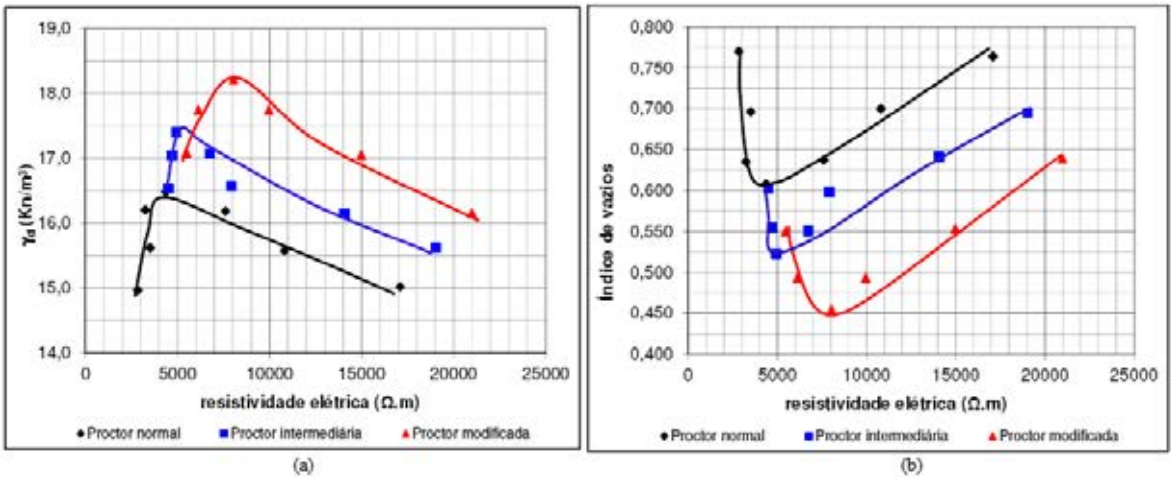


Figura 21: (a) Peso aparente específico seco (γd) *versus* resistividade elétrica, (b) índices de vazios (e) *versus* resistividade elétrica (Aquino, 2010).

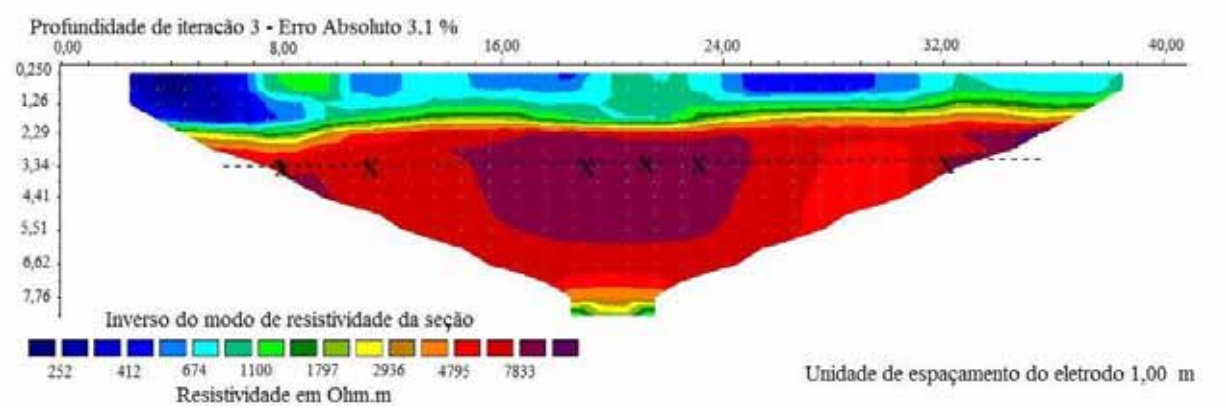


Figura 22: Pseudo resistividade para área de pesquisa. 'X' indica os locais onde as amostras foram extraídas para a análise laboratorial (adaptado de Adli *et al.*, 2010).

Adli *et al.* (2010) utilizaram espaçamento de 1,00 m entre cada um dos eletrodos, pois proporciona moderadamente boa cobertura de resistividade horizontal e vertical. Quanto ao ensaio realizado em laboratório, as amostras possuem diâmetro de 4,3 cm e o comprimento variando de 4,00 a 8,00 cm nas quais a leitura da resistividade foi realizada por dois discos de cobre. Durante os ensaios de laboratório foi mantida a superfície da rocha seca, para que não ocorresse alteração nos valores da resistividade, e medido o valor da porosidade por pesagem da rocha em estado seco e saturada em água.

Os resultados obtidos por Adli *et al.* (2010) mostram que a resistividade obtida em campo para o granito estudado apresentou valores de resistividade entre 1500 Ω.m e 9000 Ω.m, enquanto as resistividades de laboratório apresentaram menos de 50% da resistividade campo, diferença considerada relativamente pequena pelos autores para a aplicação de um levantamento de resistividade, Figura 23 e Tabela 6. Essa diferença foi atribuída à presença de água nos poros da rocha e a presença de sais na condição apresentada *in situ*

Tabela 6: Diferença em porcentagem entre ensaio de campo e laboratório (ADLI *et al., 2010).*

Localização das amostras	Resultados (Ohm.m)		Diferença em Porcentagem (%)	Porosidade (%)
	Campo	Laboratório		
8 m	6.558,40	7.900,84	16,99	0,23
11 m	7.573,00	13.616,19	44,38	0,27
19 m	9.167,40	10.783,65	14,99	0,11
21 m	9.170,10	7.132,63	22,22	0,16
23 m	9.117,00	11.675,11	21,91	0,11
32 m	6.893,00	12.318,31	44,04	0,26

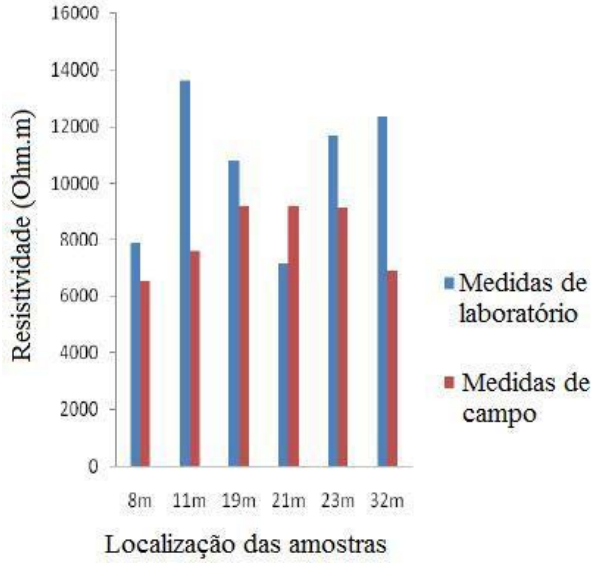


Figura 23: Comparação entre a resistividade de campo e a de laboratório na distância específica do levantamento (Adli *et al.*, 2010).

Mais recentemente, Long *et al.* (2012) estudaram a relação entre a resistividade elétrica e os parâmetros geotécnicos básicos para argilas marinhas. Nessa pesquisa foram realizados ensaios no sul da Noruega, Figura 24, utilizando o método de ERT (*Electrical Resistivity Tomography).*

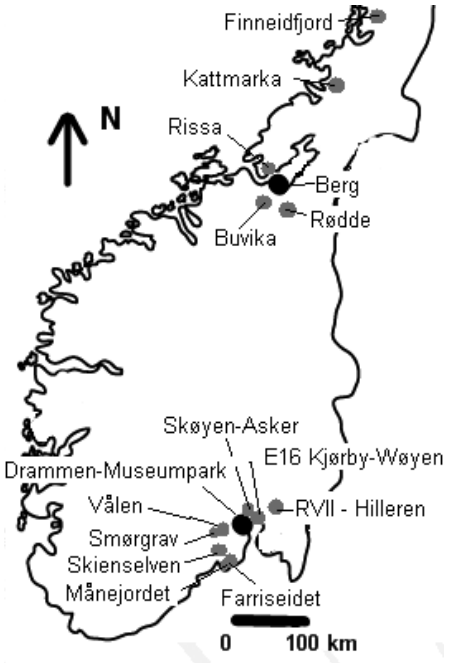


Figura 24: Local de retirada das amostras (Long *et al.*, 2012).

Os resultados foram obtidos na escala bidimensional, os quais foram tratados e convertidos para valores unidirecionais de resistividade elétrica em função da profundidade e analisados em função da posição de perfuração. Nos locais de sondagem foram realizados também amostras de pistão para a obtenção dos parâmetros geotécnicos para a mesma profundidade estudada pelo ERT, o que permitiu a comparação entre os resultados.

Long *et al.* (2012) mostraram a relação entre a resistividade elétrica e quantidade de sal do fluído, Figura 25. Como esperado, há uma forte ligação entre esses parâmetros, isto é, a resistividade elétrica decresce rapidamente com o aumento do teor de sal e se torna mais ou menos constante quando a quantidade de sal excede aproximadamente 8 g/L. A linha de tendência exponencial, que descreve esse comportamento, apresenta um coeficiente de correlação relativamente bom de valor igual a 0,8.

Nessa mesma pesquisa foi estudada a relação entre o teor de argila e a resistividade. Foi verificada uma relação forte entre estas duas propriedades, isto é, a resistividade elétrica diminui com o aumento do teor de argila, Figura 26. Esse comportamento é esperado porque as partículas de argila facilitam a condutância de corrente elétrica em sua superfície. Em locais onde a quantidade de argila é baixa, como por exemplo, Finneidfjord, Kattmarka, and Rødde, que são materiais comparativamente mais siltosos, os resultados apresentaram valores elevados de resistividade (LONG *et al* 2012).

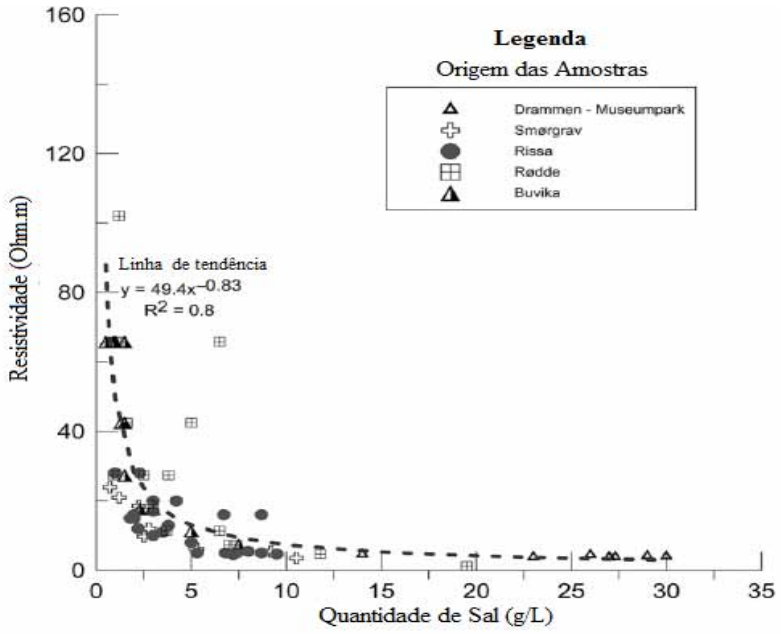


Figura 25: Relação entre a resistividade e quantidade de sal contido no fluído nos poros do solo (Long *et al.*, 2012).

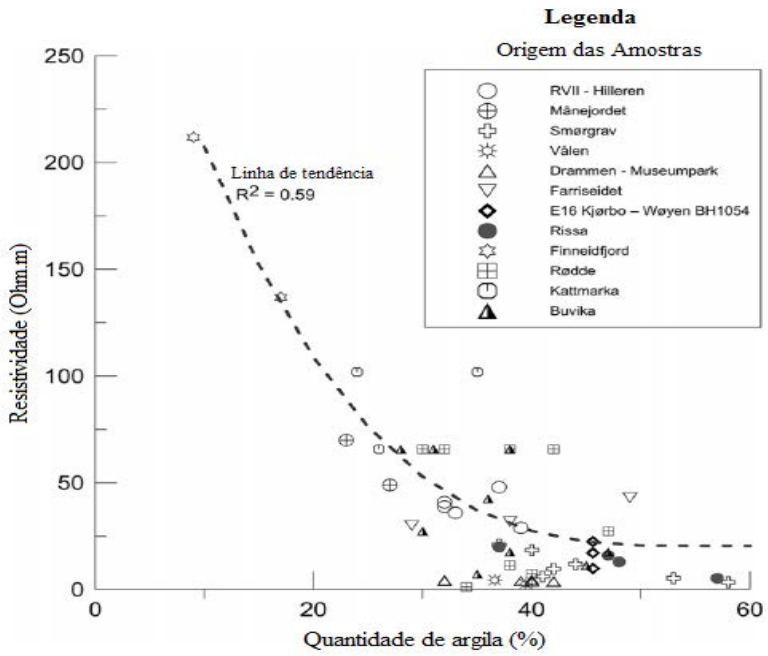


Figura 26: Resistividade elétrica em função da quantidade de argila (Long *et al.*, 2012).

3. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE RESISTIVIDADE

Nessa seção estão apresentadas as características construtivas e de funcionamento do dispositivo de resistividade de 20 mm de diâmetro. Com a construção desse protótipo foram observados alguns aspectos interessantes de serem apontados para a construção de uma ponteira de campo e, por isso, também serão relacionados a seguir.

3.1. Aspectos construtivos

O dispositivo de resistividade elétrica é composto basicamente de dois materiais, sendo que o corpo é formado de material isolante e os anéis de leitura (sensores) de material condutor. Assim, para a confecção do protótipo de laboratório, foi usinado o corpo do dispositivo de acordo com as dimensões de projeto, Figura 27, e depois acoplados os sensores com os fios passando pelo entalhe construtivo central, que foram ligados a um cabo que reuni as ligações independentes a um conector de cinco pinos.

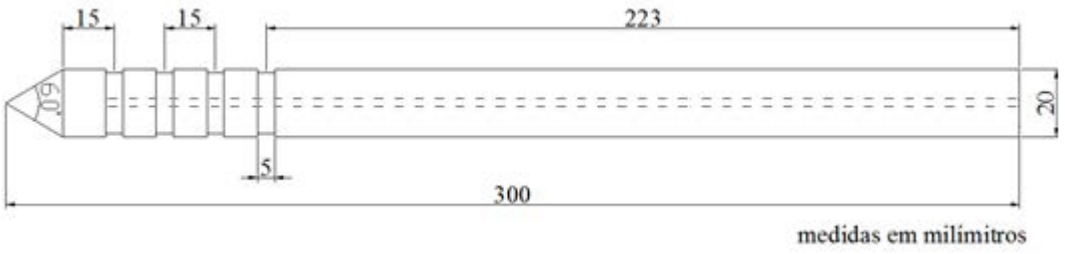


Figura 27: Dimensões de projeto do protótipo do dispositivo de 20 mm de diâmetro.

Para a confecção do corpo do dispositivo de resistividade elétrica optou-se pelo *technyl* como material isolante, também denominado de nylon ou poliamida. Esse material é bastante versátil e de fácil usinagem, o que permite variadas aplicações. No anexo 1 estão apresentadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, elétricas e químicas desse material de acordo com o fabricante.

A usinagem do corpo do dispositivo de resistividade elétrica em *technyl* foi realizada por um torneiro mecânico de acordo com dimensões de projeto, Figura 27.

O material adotado para a confecção dos sensores foi uma liga de cobre e zinco devido a facilidade construtiva e por atender as necessidades de laboratório; embora essa liga exija alguns cuidados de limpeza após o uso para evitar a corrosão precoce do material.

Os anéis foram cortados nas dimensões do entalhe dos sensores, Figura 27, inseridos no corpo do dispositivo de resistividade e afixados com solda na junção de cada um dos anéis metálicos e seus respectivos fios de cobre, de modo que cada sensor possui uma única ligação independente.

Os fios utilizados para a montagem do equipamento são do tipo blindados, ou seja, possuem uma malha metálica envolvendo o cabo condutor, Figura 28. Os fios blindados são interessantes de serem utilizados para fins de instrumentação pois minimizam a interferência eletromagnética recebida pelo cabo, isto é, os ruídos existentes no ambiente provenientes de ondas de transmissão como, por exemplo, sinal de celular e rádio.

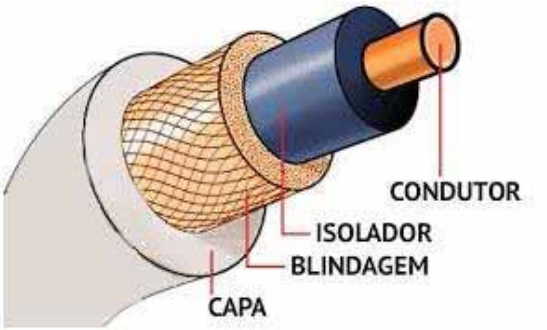


Figura 28: Representação da blindagem dos fios de cobre utilizados.

Os quatro fios de cobre que se ligam a cada um dos quatro sensores pelo entalhe central do corpo do dispositivo de resistividade foram ligados a um cabo de fios blindados. É importante observar que por se tratar de um protótipo de laboratório, a junção entre o corpo do dispositivo de resistividade e o cabo de fios foi realizada sem nenhuma articulação, Figura 29, pois a cravação em laboratório é realizada manualmente com o auxílio de um trado de diâmetro inferior ao do dispositivo de resistividade.

O cabo de fios blindados foi ligado a um conector metálico de cinco pinos, quatro pinos para os quatros sensores e um neutro, tipo macho para facilitar a conexão com o circuito elétrico do dispositivo de resistividade, no qual há um conector de espera (tipo fêmea), Figura 30. Nesse circuito elétrico estão instaladas as entradas e saídas para instrumentação do dispositivo de resistividade.



Figura 29: Dispositivo de resistividade elétrico com a terminação sem articulação.



Figura 30: Conectores de cinco pinos utilizados para instrumentação do dispositivo.

3.2. Funcionamento do dispositivo de resistividade de 20 mm de diâmetro

O protótipo de laboratório foi elaborado para ser utilizado em corpos de prova de pequenas profundidades, por isso, utiliza-se um trado (de diâmetro em torno de 18 mm) para abrir um pré-furo nos corpos de prova e depois realiza-se a cravação do dispositivo de resistividade, Figura 31.



(a) (b)

Figura 31: Instalação do dispositivo de resistividade nos corpos de prova. (a) Furo a trado na região central do corpo de prova. (b) Cravação do dispositivo de resistividade no corpo de prova, adaptado de Yamasaki (2009).

A cravação é realizada lentamente para minimizar a perturbação da amostra na região próxima a instalação do dispositivo de resistividade, sendo que a posição ideal de funcionamento do equipamento é na região central ao corpo de prova, tanto em planta quanto em profundidade, e com o alinhamento paralelo a face do corpo de prova, Figura 31.

O dispositivo de resistividade funciona alimentado por um gerador de sinais que está configurado para emitir uma onda senoidal na frequência de 1kHz. Esse sinal é transmitido aos sensores externos do arranjo do dispositivo de resistividade e deve ser controlado através da leitura da tensão RMS, a qual é indicada de ser mantida em 6,0 V. Se o valor da tensão RMS for diferente, por exemplo 3,0 V, os valores de tensão e corrente obtidos nos resultados podem ser multiplicados pelo fator da razão entre a tensão RMS de interesse (no caso 6,0 V) e a efetivamente enviada (por exemplo 3,0 V), isto é, basta multiplicar os valores obtidos de tensão e corrente por dois para que esses valores possam ser comparados com os demais resultados obtidos na tensão RMS de 6,0 V.

O circuito elétrico montado para a instrumentação do dispositivo de resistividade foi acoplado em uma caixa para a instalação dos terminais de leitura, o que permite a fácil instalação do gerador de sinais e dos multímetros, Figura 32. Assim, a caixa de instrumentação é composta de uma entrada tipo fêmea para o conector de cinco pinos, um circuito elétrico para simples passagem dos sinais (sem nenhum amplificador de sinal), quatro terminais sendo dois para os sensores centrais (eletrodos de tensão) e dois para os sensores externos (eletrodos de corrente).

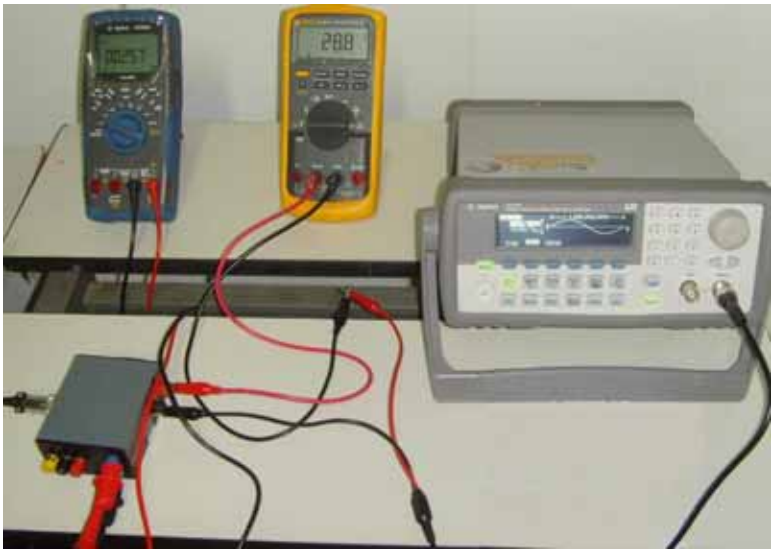


Figura 32: Caixa de instrumentação conectada ao dispositivo de resistividade, multímetros e gerador de sinais.

Para melhor entendimento da disposição dos multímetros e do gerador de sinal, as ligações entre esses equipamentos e a caixa de instrumentação do dispositivo de resistividade foi esquematizada na Figura 33. Assim, o dispositivo de resistividade é ligado na caixa de instrumentação pelo conector de cindo pinos, o amperímetro é disposto em série com o gerador de sinais e o voltímetro é disposto em paralelo com os sensores centrais do dispositivo de resistividade.

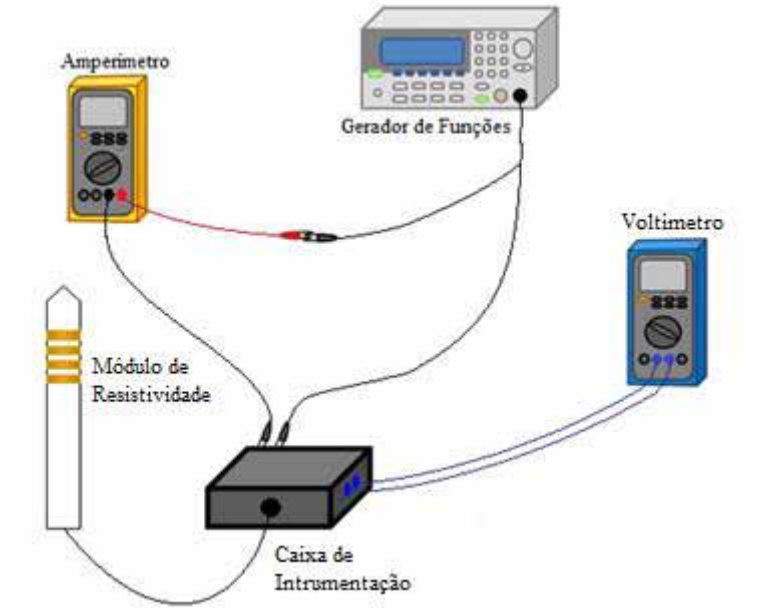


Figura 33: Montagem do circuito elétrico para obtenção da resistividade elétrica pelo dispositivo de resistividade.

A leitura da corrente e da tensão obtidas através dos multímetros são relacionadas em uma planilha eletrônica e juntamente com a curva de verificação do dispositivo de resistividade, a qual relaciona a razão entre tensão e corrente com a resistência, é possível obter a resistividade elétrica do meio ensaiado.

3.3. Considerações para a construção de uma ponteira de campo

O dispositivo de resistividade para aplicação em campo possui algumas particularidades que o diferencia do protótipo de laboratório. Em aspectos gerais, tem-se diferentes escalas dos equipamentos, solicitações de cravação e forma de instrumentação das medidas.

As dimensões do dispositivo de resistividade desenvolvido para o laboratório visou atender a confecção de pequenos corpos de prova, os quais podem ser ensaiados em condições controladas para avaliar alguns fatores que interferem na obtenção da medida de resistividade elétrica. Já o dispositivo de resistividade de campo visa avaliar a resistividade elétrica com todas as suas variáveis numa região de interesse ao redor do dispositivo, a qual possui uma ordem de grande bastante distinta da avaliada pelo protótipo de laboratório.

Assim, as dimensões para a elaboração desse dispositivo de resistividade de campo podem ser baseadas nas dimensões do próprio módulo de resistividade que é acoplado ao piezocone padrão, isto é, as dimensões de projeto dessa ferramenta podem possuir o mesmo diâmetro e espaçamento dos sensores do módulo comercial empregado nesse tipo de ensaio.

A adoção das mesmas medidas do módulo comercial é interessante pois possibilita a comparação das leituras entre eles, uma vez que pode ser desprezado o efeito escala entre as ponteiras. Outra vantagem é a utilização do mesmo sistema de cravação dos ensaios de RCPTU e CPTU para a execução dos ensaios com o dispositivo a ser construído; para isso deverá ser mantido o mesmo sistema de encaixe entre o módulo de resistividade comercial e o sistema de cravação.

Quanto a solicitação de cravação tem-se o aspecto da resistência mecânica de ponta requerida pelo material constituinte do corpo do dispositivo de resistividade. O protótipo de laboratório é constituído, em sua quase totalidade por *technyl* que possui característica de material isolante e por uma liga metálica condutora nos sensores. O módulo de resistividade comercial também possui maior quantidade de material isolante que material condutor; contudo, o módulo comercial é instalado atrás do piezocone padrão cujo material predominante é aço inox.

Assim, o projeto do dispositivo de resistividade de campo pode ser viabilizado de duas maneiras distintas: como um dispositivo de resistividade de elevada resistência mecânica para suportar as tensões de cravação ou como um módulo de resistividade que é inserido no solo acoplado a uma ponteira de cravação.

A primeira opção é fazer uma ponteira com um material isolante que suporte as tensões de cravação pelo equipamento padrão do ensaio de RCPTU. Assim, será necessário determinar uma profundidade de interesse das análises e estimar a dureza dos materiais que se pretende estudar para dimensionar os esforços solicitantes que serão transmitidos ao equipamento e, dessa forma, escolher materiais que resistam aos esforços de projeto.

Portanto, um importante passo para a construção desse dispositivo é a pesquisa de materiais que atendam as solicitações de projeto; o próprio *technyl* possui diferentes composições que podem atender aos esforços solicitantes. Nessa concepção, é indicado ensaiar o corpo do dispositivo de resistividade a cravação, ou seja, o esqueleto da ponteira de resistividade usinada com as dimensões de projeto mas sem os eletrodos instalados às tensões de cravação com o equipamento padrão para esse ensaio e, assim, verificar se o material atende as solicitações de campo.

A segunda opção é acoplar uma ponteira de cravação de mesma dimensão do piezocone padrão na frente do módulo de resistividade a ser confeccionado, mas sem os equipamentos de instrumentação da ponteira comercial. Dessa maneira, a ponteira de cravação serviria como uma haste de sacrifício para as tensões de perfuração e como uma proteção do módulo de resistividade elétrica.

Como ponto de atenção nessa segunda proposição do módulo de resistividade tem-se a ligação entre a haste de cravação e módulo de resistividade, na qual deve haver uma distribuição uniforme dos esforços e perfeito encaixe entre as partes para que não ocorra a quebra dessa ligação durante os ensaios.

A haste de cravação também deve ser dimensionada aos esforços de cravação de acordo com as solicitações de projeto para as condições de campo que se pretende estudar e, além disso, será necessário pesquisar os materiais resistentes aos esforços de projeto. Quanto as características do material constituinte do corpo do módulo de resistividade este deverá atender, principalmente, aos esforços de atrito lateral.

Dentro dessa segunda alternativa construtiva, pode-se pensar em fazer uma compatibilidade entre o módulo de resistividade a ser construído com o próprio piezocone padrão comercial, o que facilita alguns aspectos de projeto mas apresenta como principal dificuldade o ponto de ligação entre eles. Dentro dessa concepção, é necessário que a forma de alimentação e instrumentação do módulo de resistividade seja realizada independentemente do piezocone padrão, cujas as grandezas elétricas são padronizadas pelo fabricante e não podem ser alteradas pelo usuário, e assim propicie os testes para a verificação do funcionamento desse novo equipamento.

Em ambas as concepções do dispositivo de resistividade o material para a confecção dos anéis de leitura pode ser o mesmo. Em virtude da agressividade de campo ser maior que a de laboratório não é aconselhável a utilização da liga de cobre e zinco para a confecção dos sensores. Assim, indica-se a utilização de uma liga mais nobre como, por exemplo, a de

aço inoxidável a qual possui elevada resistência a corrosão, boa resistência mecânica e a variação de temperatura. No entanto, há diferentes elementos que podem ser incorporados a essa liga de aço que variam suas características e o preço final, assim, também indica-se a pesquisa a respeito de ligas metálicas condutoras que atendam às necessidades de campo e também as particularidades de confecção do dispositivo de resistividade, como por exemplo, a facilidade de ligação com os fios de cobre e soldagem para o fechamento do anel metálico.

Para a passagem dos fios blindados que se ligam aos anéis de leitura indica-se a colocação dos mesmos internamente ao dispositivo de resistividade pois previne-se a ruptura dos fios durante a cravação dessa ferramenta e torna a ligação com os anéis de leitura menos vulnerável. Esse posicionamento dos fios é o mesmo adotado no módulo de resistividade comercial e também no protótipo de laboratório, conforme Figura 27 apresentada no Item 3.1.

O cabo blindado utilizado no módulo de resistividade comercial é do tipo espiral com material condutor em cobre, conforme Figura 34 meramente ilustrativa, o que é interessante para instrumentação, pois é menos vulnerável a ruptura e produz menores tensões no ponto de conexão das ligações. Para a escolha do cabo é necessário verificar a indicação de capacidade de corrente que atenda aos critérios de projeto com o menor diâmetro comercial para que o entalhe construtivo central seja o menor possível.



(a) (b)

Figura 34: (a) Cabo blindado tipo espiral flexível, (b) detalhe mostrando a malha interna de blindagem do cabo.

Outro aspecto importante é a terminação do dispositivo de resistividade por onde passa o cabo de fios blindados, sendo portanto um ponto de fragilidade. Nesse local, recomenda-se a utilização de um conector metálico de elevada resistência do tipo articulado ou composto de um sistema de rosca sem-fim para fazer esta conexão. É preciso fazer uma busca no mercado para verificar se os modelos disponíveis atendem as particularidades desse

sistema e dimensões do dispositivo de resistividade ou, ainda, elaborar um projeto desse conector e enviar para um torneiro mecânico usiná-lo.

A coleta de dados do protótipo de laboratório é realizada manualmente com o auxílio de multímetros de precisão. No entanto, para o dispositivo de resistividade de campo, devido ao elevado número de leituras que o equipamento deverá realizar ao longo da profundidade do ensaio, indica-se que essa coleta seja realizada por meio de um sistema de aquisição de dados configurado para capturar as mesmas leituras que o protótipo de laboratório, sendo elas: corrente de alimentação do sistema, diferença de potencial entre os eletrodos centrais em decorrência do sinal emitido aos eletrodos externos, tensão RMS dos eletrodos externos e temperatura do meio.

Alguns outros sensores podem ser interessantes de serem acoplados ao dispositivo de resistividade, caso esse não seja cravado conjuntamente com o piezocone padrão, pois podem contribuir para a execução do ensaio ou para as análises dos dados. Como por exemplo, o inclinômetro que permite ao sondador controlar a posição de cravação do equipamento e evitar possíveis danos ao aparelho, através da monitoração da inclinação durante a execução do ensaio.

Quanto as características do solo, um aspecto relevante para as análises que envolvem a medida de resistividade elétrica é o nível d´água, pois a ausência de água entre as partículas de solo dificulta a passagem de corrente elétrica e, consequentemente, a obtenção da medida de resistividade elétrica. Já em solos saturados, a resistividade elétrica é facilmente obtida e varia entre um menor intervalo de valores, sendo portanto, uma medida mais confiável. Dessa forma, o conhecimento da posição do nível d´água é importante para a análise dos valores de resistividade elétrica obtidos.

Assim, o dispositivo de resistividade de campo a ser construído pode ou não contar com os dispositivos sugeridos anteriormente, bem como pode-se adotar outros sensores que se julgue interessantes de serem acoplados, dependo da finalidade para qual se destinará o equipamento a ser construído. Nesse aspecto, é importante definir claramente o escopo de utilização do dispositivo de resistividade antes da concepção do projeto para que as premissas estejam bem definidas e atendam às necessidades de campo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse item apresenta os diferentes moldes dos corpos de prova utilizados nessa pesquisa bem como os equipamentos utilizados para obtenção das medidas elétricas de laboratório e as metodologias utilizadas para a realização dos ensaios e das análises.

4.1. Materiais

Os equipamentos apresentados a seguir estão relacionados com as leituras de propriedades elétricas relevantes para a verificação do dispositivo de resistividade, para a obtenção do potencial elétrico em meio líquido e na avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica em meio particulado através de duas técnicas de leitura de resistividade: dispositivo de resistividade e as placas circulares. Nesses ensaios foram realizadas leituras de corrente, diferença de potencial, frequência, condutividade, temperatura e medidas RMS de diferença de potencial e corrente elétrica.

4.1.1. Instrumentos para obtenção das medidas elétricas e acessórios

Os equipamentos utilizados foram: amperímetro e voltímetro com quatro casas de precisão, gerador de sinais, condutivímetro com ampla faixa de leitura, ponta de temperatura para solos e líquidos, reservatório de água, filtro para água destilada, balança de quatro e duas casas de precisão, porções de cloreto de sódio, régua de madeira de furo central com marcação a cada dois centímetros, sonda graduada para leitura de voltagem a cada dois centímetros de profundidade, conectores, fios de cobre de diversos tipos (com e sem blindagem) e aterramento isolado para os ensaios.

a. Placas de cobre

As placas circulares de cobre com diâmetro de 110,0 mm, Figura 35, foram utilizadas nos ensaios de avaliação do efeito de borda do molde de compactação para a verificação do campo elétrico em meio particulado como referência para análise dos resultados obtidos pelo dispositivo de resistividade neste mesmo ensaio.

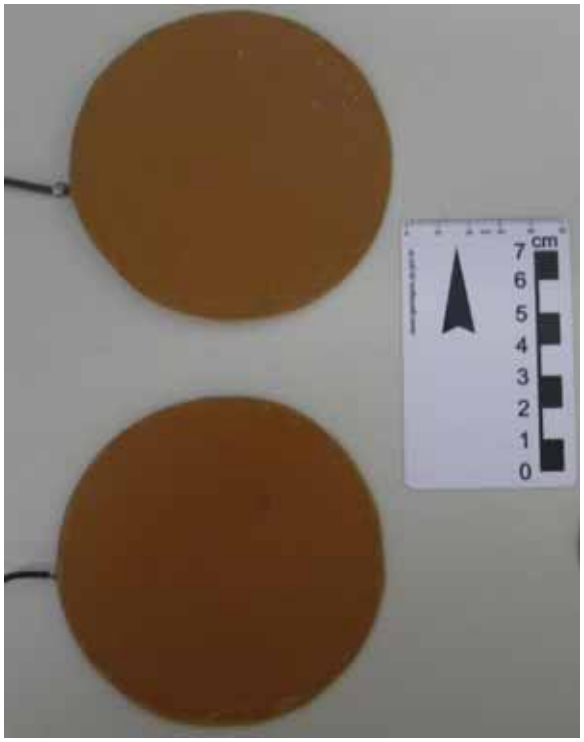


Figura 35: Placas de cobre diâmetro de 111,0 mm.

b. Recipientes utilizados nos ensaios em meio aquoso

Devido aos diferentes ensaios realizados nessa pesquisa, foram necessários variados recipientes em função da particularidade de cada um dos experimentos.

Nos ensaios de verificação do dispositivo de resistividade foi utilizado um recipiente com dimensões otimizadas para minimizar impactos ambientais e para os ensaios de campo elétrico em meio aquoso foi utilizado um recipiente com diâmetro interno de 1050 mm. A seguir, cada um deles será detalhado.

Recipiente para a aferição do dispositivo de resistividade

Para os ensaios de verificação do dispositivo de resistividade foi escolhido um recipiente com dimensões reduzidas para minimizar o uso de água destilada, mas sem causar impacto nas leituras de resistividade, isto é, sem gerar efeito de borda. Assim, a solução otimizada foi a utilização de um recipiente plástico de 370 mm de diâmetro interno médio e 445 mm de profundidade, resultando no volume de 48 litros, Figura 36.



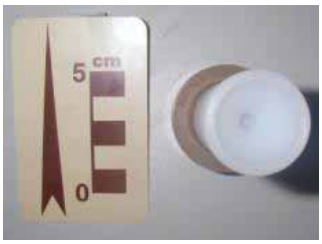
(a) (b)

Figura 36: Recipiente utilizado para a verificação do dispositivo de resistividade. (a) Vista frontal do corpo de prova. (b) Vista em planta, mostrando a região central com as peças para fixação do dispositivo de resistividade.

Para a execução do ensaio foi necessário fixar o dispositivo de resistividade no fundo do recipiente por peças construídas exclusivamente para esse fim e com as dimensões em função da geometria do dispositivo. Assim, estas peças proporcionaram a fixação e sustentação do dispositivo de resistividade, mantendo-o no centro do corpo de prova e na posição vertical, durante os ensaios, Figura 37.



(a) Perfil



(b) Planta



(c) Encaixe do dispositivo de Resistividade durante o ensaio

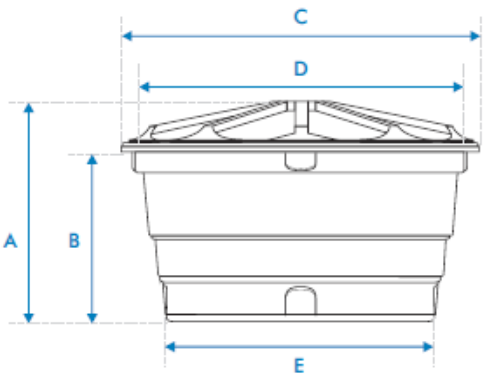
Figura 37: Peça para fixação do dispositivo de resistividade nos ensaios em meio aquoso.

Recipiente para ensaio de potencial elétrico em meio aquoso

O recipiente utilizado no ensaio de potencial elétrico em meio líquido possui diâmetro de 1050 mm e altura de 540 mm. Na Figura 38, à esquerda, tem-se a foto do corpo de prova com o dispositivo de resistividade e a régua graduada utilizada para a tomada das medidas, de acordo com as coordenadas de interesse, e, à direita, o desenho esquemático do molde do corpo de prova, de acordo com as especificações do fabricante, e dimensões apresentadas na Tabela 7.



(a)



(b)

Figura 38: Recipiente para realização dos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso. (a) montagem do corpo de prova para a realização do ensaio. (b) desenho esquemático das dimensões do molde do corpo de prova de 310 litros.

Tabela 7: Descrição e tamanho das dimensões do recipiente utilizado nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso, de acordo com as especificações do fabricante.

Cota	Descrição	Dimensões (mm)
A	Altura com tampa	690
B	Altura sem tampa	540
C	Diâmetro com tampa	1050
D	Diâmetro sem tampa	1040
E	Diâmetro da base	750

Nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso também foi necessária a utilização das peças adaptadoras para fixação do dispositivo de resistividade elétrica no centro do corpo de prova, apresentadas anteriormente na Figura 37. As peças adaptadoras foram conectadas diretamente no flange da caixa d´água.

c. Recipiente utilizados em ensaios com areia

Para a avaliação da geometria do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica foi necessário utilizar dois recipientes com diâmetros diferentes, sendo um de 450 mm e outro de 154,8 mm, e alturas de mesma ordem de grandeza, 200 mm, Figura 39.

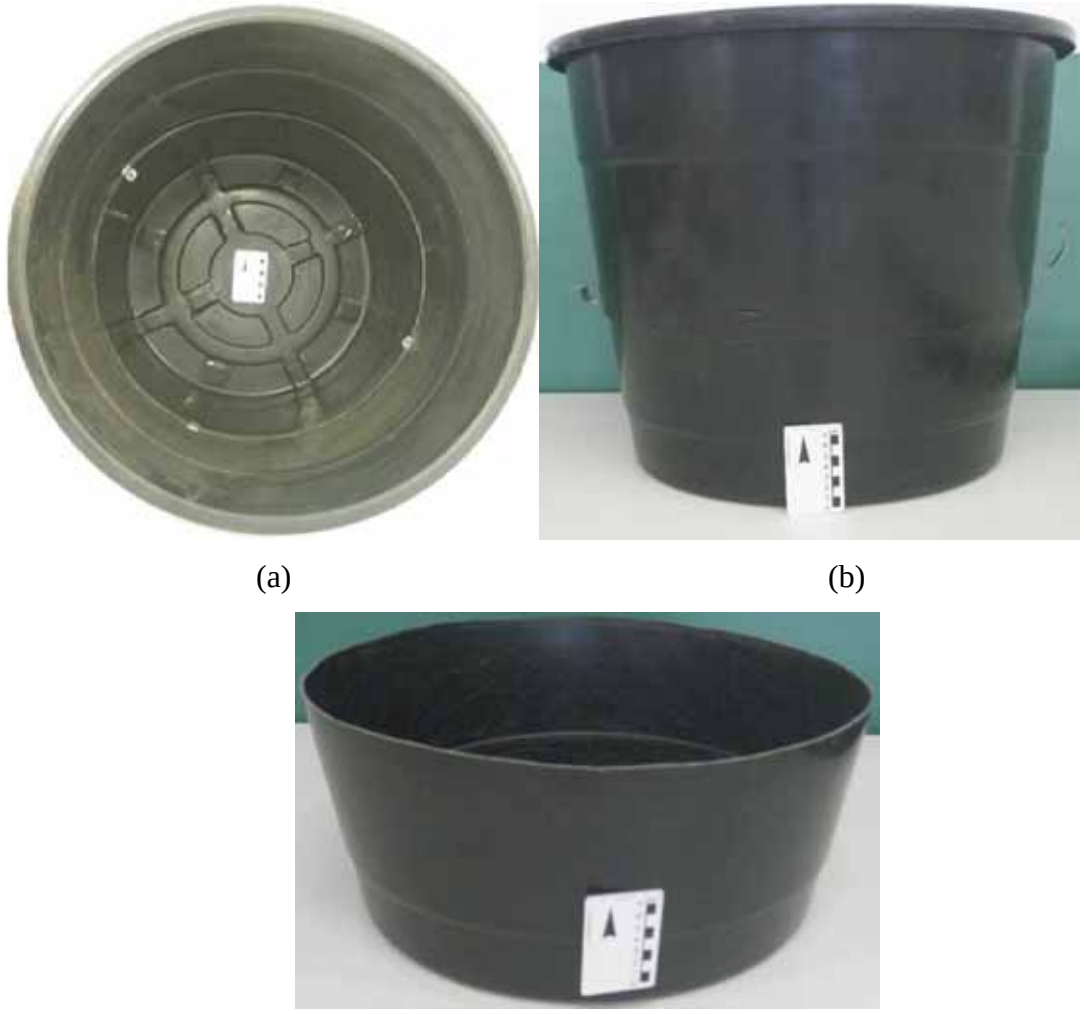


(a) (b)

Figura 39: Recipientes utilizados nos ensaios de avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica.

O recipiente maior, de 450 mm de diâmetro, por facilidade construtiva, foi uma adaptação de um vasilhame plástico comercializável, o qual foi cortado na altura de

197,8 mm e a outra parte foi utilizada como um colarinho para possibilitar o preenchimento com material particulado durante o ensaio pelo método de pluviação modificado, Figura 40.

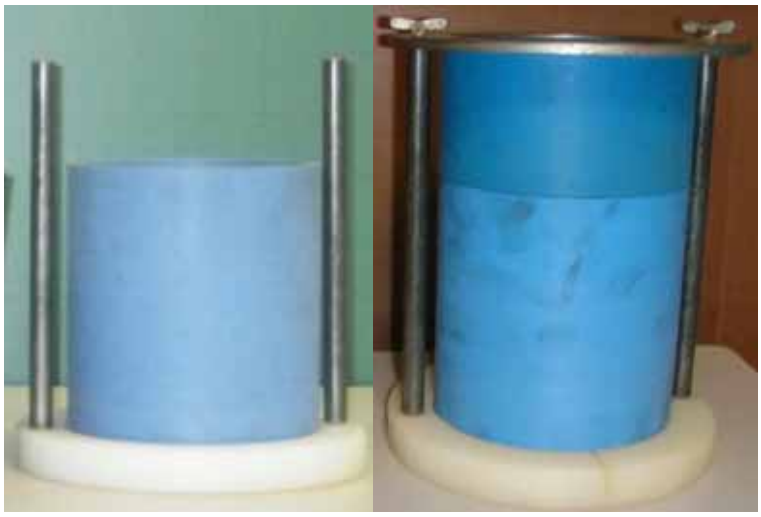


(a) (b)

(c)

Figura 40: Recipiente maior de 450 mm de diâmetro. (a) Vista em planta com o colarinho (b) Vista frontal com colarinho (c) Detalhe do corpo de prova sem colarinho.

O recipiente menor, de 154,8 mm de diâmetro, possui altura de 196,0 mm sem o colarinho, altura total utilizada nesse ensaio, e com o colarinho possui uma altura total de 270,6 mm, utilizado apenas para a moldagem e removido para nivelamento e obtenção das medidas, Figura 41.



(a) (b)

Figura 41: Recipiente menor de 154,6 mm de diâmetro. (a) Detalhe do corpo de prova sem colarinho, altura de 196 mm. (b) Corpo de prova com colarinho, altura total de 270 mm.

Sintetizando as dimensões dos recipientes utilizados nos ensaios de avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da medida de resistividade elétrica tem-se a Tabela 8.

Tabela 8: Dimensões dos recipientes utilizados nos ensaios de avaliação do efeito de borda do molde de compactação para a verificação do campo elétrico em meio particulado.

Descrição	Dimensões Corpos de Prova	
	Menor sem colarinho	Maior sem colarinho
Diâmetro corpo de prova – d_{cp} (mm)	154,8	450
Altura corpo de prova -h_{cp} (mm)	196	197,8
Volume do corpo de prova (mm^3)	3.688.823	31.458.731
Diâmetro placas utilizadas (mm)	111,0	111,0
Área placa Aplacas (mm^2)	9676,9	9676,9
Razão d_{cp}/h_{cp}	0,790	2,275

4.1.2. Caracterização da areia de cava

Para a avaliação do efeito de borda do molde de compactação para a verificação do campo elétrico em meio particulado foi utilizado uma areia de cava. Esse solo possui atributos interessantes para esse tipo de análise, uma vez que este é constituído de partículas

de quartzo, que tem característica isolante, mas em condições saturadas possibilita fácil condução de elétrons entre suas partículas. Dessa forma, o estudo da propagação da resistividade elétrica ocorre em uma ampla faixa de valores de resistividade, sem a interferência da condução de corrente elétrica por meio das partículas, como ocorre em solos com presença de argilo-minerais.

Dessa forma, estão apresentados na Tabela 9 os procedimentos e normas utilizados para a realização dos ensaios de caracterização, em consonância com os objetivos para o qual a areia foi utilizada, e na Tabela 10 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização obtidos.

Tabela 9: Ensaios de caracterização geotécnica realizados para a areia de cava.

Ensaio	Normas e Procedimentos
Massa Específica dos Sólidos	NBR 6508/84
Granulometria Conjunta	NBR 7181/84
Pluviação ao ar	Vide item 4.2.3

Tabela 10: Resultado dos ensaios de caracterização da areia de cava.

Ensaio	Descrição	Areia Cava
Massa esp. dos sólidos	γ_s (kN/m³)	26,87
Granulometria conjunta	argila, Ø<0,002 (%)	-
	silte, 0,002<Ø<0,060 (%)	-
	areia fina, 0,060<Ø<0,20 (%)	20
	areia média, 0,20<Ø<0,60 (%)	64
	areia grossa, 0,60<Ø<2,00 (%)	14
	Pedregulho fino,2,00<Ø<6,00(%)	2
Limite de Liquidez	LL (%)	NP
Limite de Plasticidade	LP (%)	NP

4.2. Métodos

Nessa seção serão apresentadas as descrições dos métodos utilizados para a realização dos ensaios de verificação do dispositivo de resistividade, campo elétrico em meio aquoso e avaliação do efeito de borda do molde de compactação bem como o método adotado para obtenção dos parâmetros da Lei de Archie para análise dos resultados realizados com a areia de cava.

4.2.1. Verificação do dispositivo de resistividade

A correta obtenção das medidas pelo dispositivo de resistividade depende da verificação constante do equipamento. Em síntese, este processo consiste em variar a condutividade/resistividade elétrica do meio aquoso por meio da adição de massas conhecidas de cloreto de sódio e realizar medidas de corrente, diferença de potencial, temperatura e resistividade elétrica. Esse procedimento é repetido por diversas vezes até que a relação entre a diferença de potencial e a corrente elétrica esteja estável, ou seja, apresente repetição dos valores.

Antes de cada um dos ensaios, o reservatório utilizado foi higienizado para eliminar qualquer impureza que poderia vir alterar a condutividade do meio aquoso. Essa higienização foi realizada com sabão neutro e o último enxague com água destilada.

O reservatório, já montado na Figura 36, foi instrumentado com os equipamentos apresentados na Figura 42. Em detalhe, o dispositivo de resistividade foi ligado diretamente ao gerador de sinais que foi conectado a um circuito elétrico, o qual possibilitou a realização das medidas de tensão (RMS) aplicadas ao equipamento e a corrente medida pelo dispositivo de resistividade.



Figura 42: Sistema de verificação do dispositivo de resistividade (modificado de Peixoto *et at.*, 2010).

Os valores padrões adotados para o ensaio de verificação foram: medida RMS de 6 V (em corrente contínua) emitidos para o dispositivo de resistividade através de uma onda

senoidal na frequência de 1000 Hz. Esses valores foram mantidos constantes durante todo o experimento.

O primeiro ponto da verificação foi referente às características da água destilada. Para cada um dos pontos foram relacionados os valores de temperatura, condutividade (obtida através do condutivímetro), medida de tensão RMS (aplicada pelo gerador de sinais ao dispositivo de resistividade e obtida pelo multímetro), corrente aplicada ao dispositivo de resistividade (também lida pelo multímetro), a tensão do meio aquoso lida pelo dispositivo de resistividade e a massa de cloreto de sódio acumulada. Com esses valores foi possível obter o valor da concentração do meio em partes por milhão (ppm) e a razão diferença de potencial e corrente (V/i), a qual foi relacionada com a resistividade lida pelo condutivímetro para obtenção da curva de verificação do dispositivo de resistividade.

Após a coleta de todos os dados relacionados anteriormente, adicionou-se a primeira porção de cloreto de sódio, homogeneizou-se a solução e, posteriormente, as leituras foram realizadas e anotadas em uma planilha eletrônica. Esse processo foi repetido até que a resistividade do meio atingisse o limite de interesse para a pesquisa, finalizando uma curva de verificação.

É importante ressaltar que no momento em que esses ensaios foram realizados o laboratório não possuía estrutura de controle de temperatura, por isso os valores de temperatura foram anotados para posterior correção do efeito da temperatura.

Para a avaliação dos resultados foram construídos gráficos da razão entre diferença de potencial e corrente (V/i) versus resistividade, no qual se determinou uma curva de ajuste dos pontos encontrados no experimento.

Depois de repetidos processos de verificação, obtiveram-se diversas curvas, que foram comparadas entre si. Assim, o processo de verificação foi concluído quando a sobreposição das curvas aproximou-se de uma mesma curva, isto é, quando o dispositivo começou a repetir os valores das leituras realizadas.

Nessa pesquisa, o objetivo da verificação do dispositivo de resistividade foi atualizar a resposta do equipamento de modo a obter as curvas de verificação em função da temperatura. Assim, as temperaturas de interesse ficaram entre 19°C a 25°C, visto que em ensaios de campo, as maiores variações de temperatura ocorrem no primeiro horizonte de solo, que fica entorno de até 0,5 m de profundidade. Isso ocorre porque essa camada recebe maior influência das variações climáticas devido a sua exposição direta ou indireta ao sol, o que está atrelado ao tipo de cobertura que o solo recebe (quer ela seja vegetal ou artificial).

A obtenção das curvas de verificação para as temperaturas de 19°C a 25°C, com variação unitária foi possível através da utilização dos ensaios realizados por Kishimoto (2011). Dessa forma, o equipamento de referência para relacionar as medidas de corrente e tensão do dispositivo de resistividade com a resistividade elétrica do meio foi um condutivímetro de precisão.

O condutivímetro utilizado nesta pesquisa fornece os valores das medidas de condutividade para uma temperatura de 25°C, independentemente da temperatura do meio em estudo, isto é, todas as medidas obtidas no visor do aparelho não correspondem a temperatura do ensaio mas sim a temperatura de 25°C.

Portanto, para conseguir a condutividade elétrica do meio na temperatura real do ensaio é necessário aplicar a equação do condutivímetro utilizado, disponível no manual do aparelho, para converter as leituras de condutividade de 25°C para as temperaturas de interesse, eq. 16.

$$Condutividade_{T(°C)ensaio} = \frac{Condutividade_{\ 25°C}}{1+(2{,}1*\frac{T_{25°C}-T_{ensaio}}{100})} \tag{16}$$

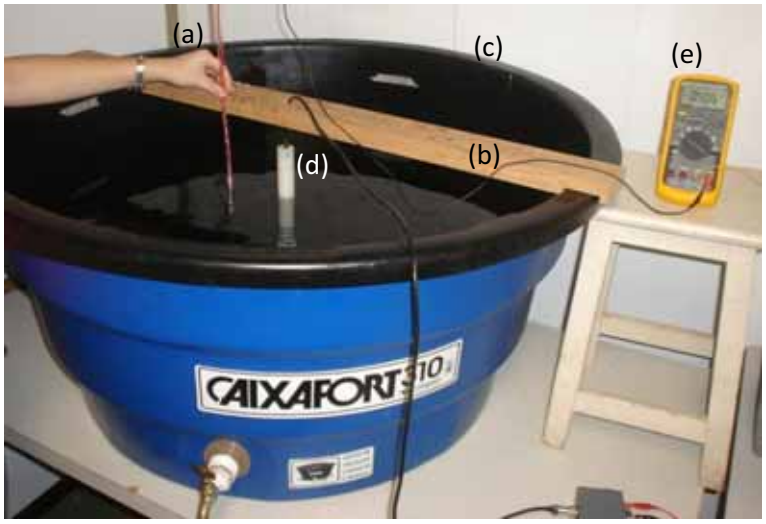
Assim, para a realização das análises foram compilados os resultados coletados nas concentrações de 1, 20, 50, 100, 500 e 1000 partes por milhão e realizado a correção dos valores de condutividade elétrica pela eq. 16. Os resultados corrigidos foram plotados em um gráfico de resistividade elétrica em função da razão de tensão e corrente do ensaio para cada as temperaturas de 19°C a 25°C, com variação unitária.

4.2.2. Ensaios de potencial elétrico em meio aquoso

Neste estudo, o ensaio de potencial elétrico em meio aquoso tem como objetivo avaliar a região que o dispositivo de resistividade consegue propagar a diferença de potencial para realizar suas leituras. Para tanto, foram utilizadas diferentes concentrações do meio visando possibilitar uma interpretação mais ampla do comportamento do dispositivo de resistividade.

Experimentalmente, o ensaio de potencial elétrico consiste na obtenção de leituras de tensão ao longo do eixo XY. Antes da realização dos ensaios, definiu-se uma malha de 34 cm no eixo horizontal (X) e 30 cm no eixo vertical (Y), com intervalo de medidas a cada

dois centímetros, em ambos os eixos, Figura 43. O eixo X tem o seu marco zero coincidindo com o centro do dispositivo de resistividade e o eixo Y com o centro dos eletrodos.



(a) Sonda graduada;
(b) Régua graduada;
(c) Corpo de prova;
(d) Módulo de resistividade;
(e) Voltímetro, ligado ao aterramento.

Figura 43: Montagem do ensaio de potencial elétrico para o dispositivo de resistividade.

Inicialmente, o reservatório plástico foi abastecido com água destilada até altura predeterminada de ensaio, gerando um volume conhecido. A seguir foi adicionada uma determinada porção de cloreto de sódio para a obtenção de uma concentração de interesse, a exceção dos ensaios realizados na água destilada pura e na água de abastecimento.

As análises foram realizadas em quatro faixas de condutividade elétrica: 1μS/cm (água destilada), 130 μS/cm (água potável), 500 μS/cm (concentração de 250 ppm de cloreto de sódio) e 1000 μS/cm (concentração de 500 ppm de cloreto de sódio). Foram realizados três ensaios para cada uma das condutividades elétricas.

Com a solução preparada, a régua graduada foi montada, dispositivo de resistividade foi posicionado na parte central do corpo de prova, o voltímetro teve uma ponta ligada ao aterramento do laboratório e a outra foi conectada a sonda graduada para a realização das leituras.

Em cada ensaio foram coletados os valores da condutividade do meio, temperatura e valores da tensão no sistema de coordenadas XY (distância e profundidade), como mostrado na Figura 43. Foram realizadas também as leituras referente ao dispositivo de resistividade: corrente de alimentação, tensão RMS do sistema e tensão captada pelos eletrodos centrais,

além da frequência de 1 kHz aplicado pelo gerador de funções através de uma onda senoidal. Todas as medidas foram anotadas numa planilha eletrônica.

Assim sendo, para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso foi preciso relacioná-los com a curva de verificação do dispositivo de resistividade em sua respectiva temperatura de ensaio.

4.2.3. Avaliação do diâmetro na obtenção da medida de resistividade elétrica em meio particulado

Para essa avaliação, optou-se por comparar as medidas de resistividade elétrica em dois corpos de provas de diâmetros diferentes mas de mesma altura, 197 mm, para verificar se ocorrem distorções na trajetória de propagação da corrente entre os corpos de prova avaliados. Assim, o diâmetro maior utilizado nos ensaios foi dimensionado de forma a minimizar essas distorções e os possíveis efeitos de borda para a leitura da resistividade, ou seja, o maior corpo de prova foi definido como sendo, aproximadamente, três vezes maior que o diâmetro do potencial elétrico obtido em meio aquoso para o dispositivo de resistividade, ou seja 450 mm.

Dessa forma, os corpos de prova utilizados foram: o corpo de prova menor o qual foi dimensionado a partir dos resultados de campo elétrico em meio aquoso, de diâmetro interno de 155 mm, e o maior para obtenção de medidas de referência para a análise do corpo de prova menor, de diâmetro interno de 450 mm, dimensionado a partir do menor corpo de prova. Esses corpos de prova estão descritos na Tabela 8 do item 4.1.

Nos ensaios de avaliação do diâmetro do corpo de prova na obtenção da resistividade elétrica em meio particulado variou-se os teores de umidade da areia de cava, desde a condição de, aproximadamente, 5,0 % de saturação até a condição totalmente saturada para observar a variação dos valores de resistividade elétrica em função dos índices físicos do solo, mantendo-se constante a altura dos corpos de prova, e utilizando duas técnicas para a obtenção da medida de resistividade elétrica: as placas de cobre e o dispositivo de resistividade.

A areia de cava utilizada nesse estudo foi mantida armazenada em local fechado para evitar contaminações. O preparo da areia para esse ensaio foi secá-la por ventilação em abrigo do sol e posterior peneiramento para separação de impurezas de grandes diâmetros.

Nesse peneiramento foram utilizadas: uma peneira de abertura nominal 9,52 mm e três peneiras de abertura nominal 4,76 mm, respectivamente, Figura 44.



Figura 44: Aparato de pluviação utilizado no peneiramento da areia e na realização do ensaio.

A variação dos índices físicos do solo foi obtida através da modificação do teor de umidade das amostras através da adição de água de abastecimento de forma controlada. Assim, cada conjunto de ensaios, composto por quatro corpos de prova, foi moldado pelo método de pluviação com teores de umidade similares para avaliação da resistividade elétrica pelas placas de cobre e pelo dispositivo de resistividade em ambos os diâmetros dos corpos de prova (450 mm e 155 mm).

Com a areia no teor de umidade de interesse, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova pelo método de pluviação modificado, o qual consiste em adicionar a areia no aparato de pluviação e, em seguida, passá-la na peneira de abertura nominal de 19 mm, que foi mantida em todos os ensaios independentemente do teor de umidade da areia, Figura 45.

Para os ensaios com o corpo de prova grande, devido ao elevado peso total, o corpo de prova foi moldado em cima uma balança previamente zerada para mensurar apenas a massa da areia homogeneizada.

As medidas realizadas em cada corpo de prova foram: temperatura do ar, do solo, da água utilizada para umedecer o solo, massa de areia contida no corpo de prova, corrente, tensão, teor de umidade do solo ensaiado e condutividade da água e do solo. Também eram conhecidos os volumes dos corpos de prova e o volume da ponteira cravada no solo. Após a coleta de todas as medidas, montou-se uma planilha eletrônica de cálculo, na qual foram

relacionadas as medidas elétricas para cada amostra com os seus respectivos índices físicos do solo.

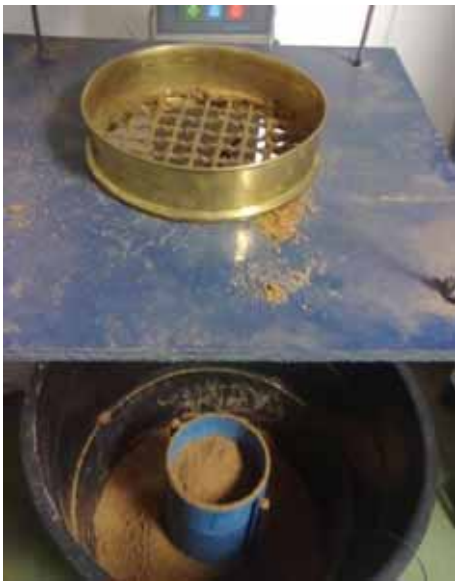


Figura 45: Preparo do corpo de prova menor (azul) pelo método de pluviação modificado.

As leituras de resistividade realizadas pelas placas de cobre e pelo dispositivo de resistividade possibilitaram a comparação dos resultados entre os diâmetros dos corpos de prova e entre as técnicas utilizadas, Figura 46.



(a) (b)

Figura 46: Avaliação do diâmetro na obtenção da medida de resistividade elétrica pelo dispositivo. (a) corpo de prova grande. (b) corpo de prova pequeno.

Nos ensaios com o dispositivo de resistividade, a ponteira foi posicionada no eixo central do corpo de prova e cravada na mesma profundidade para que região de obtenção das leituras fosse mantida. Outro aspecto relevante aos ensaios realizados com o dispositivo de resistividade foi o decréscimo do volume ocupado pela ponteira nos cálculos que envolveram o volume do corpo de prova.

Para os ensaios realizados com as placas de cobre, foi colocado uma massa padrão sobre a placa de topo para garantir o contato completo entre ela e o solo ensaiado.

Leitura de resistividade com as placas

Na realização da verificação do efeito de borda do molde de compactação realizou-se ensaios com as placas circulares de cobre. Nessa seção está detalhada a forma de obtenção das medidas por essa técnica.

A leitura da resistividade elétrica pelas placas ocorre de maneira bastante semelhante a do dispositivo de resistividade, distinguindo-se basicamente pela forma de posicionamento entre as técnicas e com relação ao campo elétrico gerado.

Para a realização das medidas, primeiramente, uma das placas foi disposta na região central do fundo do recipiente, Figura 47. A seguir, realizou-se a modelagem do corpo de prova da mesma forma com que foi preparado para o ensaio com o dispositivo de resistividade, para possibilitar a comparação entre esses ensaios. Ao término do preenchimento, realizou-se o nivelamento do corpo de prova.



Figura 47: Posicionamento das placas circulares no fundo dos recipientes dos corpos de prova.

A outra placa de cobre foi colocada no topo do corpo de prova após o nivelamento e, para garantir o contato entre a placa superior e o solo, adotou-se colocar uma massa padrão sobre essa placa durante a realização das leituras, Figura 48.

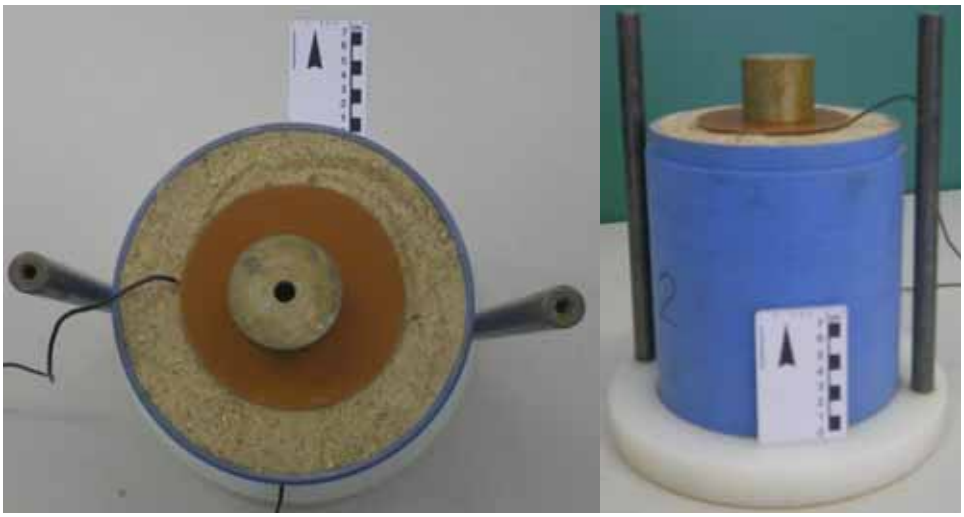


Figura 48: Posicionamento das placas de cobre no topo do corpo de prova com a massa padrão para garantir o contato da placa com o solo.

Após o preparo do corpo de prova, os equipamentos foram instalados para obtenção das medidas elétricas. Os ensaios utilizaram um gerador de sinal, um multímetro e um amperímetro de precisão, conforme Figura 49.

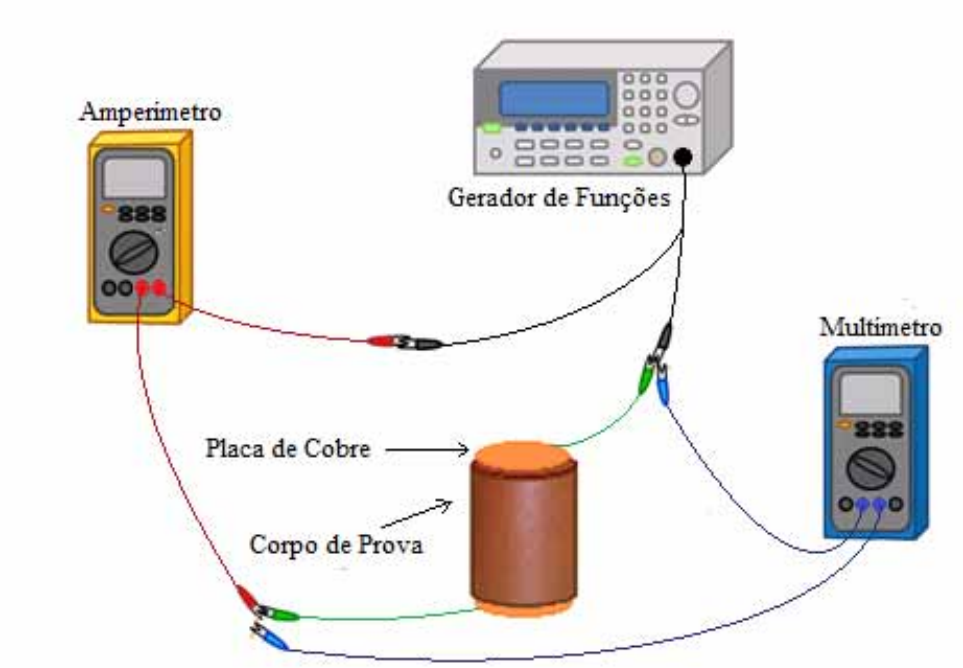


Figura 49: Montagem do circuito elétrico para obtenção da resistividade elétrica pelas placas.

Para a obtenção da medida de resistividade elétrica pelas placas de cobre foram realizadas as leituras de corrente, tensão e temperatura do solo em análise, as quais foram registradas numa planilha eletrônica. Durante todo o ensaio, foi mantida uma onda senoidal de frequência 1 kHz no gerador de sinais. A configuração do circuito elétrico utilizado para a leitura dessas medidas está apresentada na Figura 49.

O valor de resistividade elétrica foi obtido através da eq. 17, a qual é resultante da aplicação da Primeira e Segunda Leis de Ohm, eq. 07 e 05, isto é, a resistividade elétrica é a razão entre a diferença de potencial entre as placas e a corrente que passa por elas multiplicada pela altura do corpo de prova, h_{cp}, dividido pela área da placa de cobre, A_{placa}.

$$\rho = \frac{V}{i} . \frac{A_{placa}}{h_{cp}} \tag{17}$$

O valor da razão entre a altura do corpo de prova e a área da placa de cobre pode ser transformado em uma constante em função das configurações de ensaio. Assim sendo, foram utilizados nesse trabalho duas configurações diferentes, os quais estão presentados na Tabela 11.

Tabela 11: Dimensões relevantes dos corpos de prova e das placas de cobre para obtenção da razão d_{placas}/h_{cp}.

Descrição	Dimensões Corpos de Prova	
	Padrão sem colarinho	Grande sem colarinho
Diâmetro corpo de prova (mm)	154,8	450,0
Altura útil do corpo de prova h_{cp} (mm)	196,0	197,8
Volume do corpo de prova (mm^3)	3.688.823	31.458.731
Diâmetro placas utilizadas (mm)	111,0	111,0
Área placa Aplacas (mm^2)	9676,9	9676,9
Razão d_{placas}/h_{cp}	0,566	0,561

4.2.4. Formulação para determinação das constantes da Lei de Archie

Na análise dos resultados de avaliação do efeito de borda do molde de compactação na areia de cava foi aplicada a Lei de Archie apresentada na eq. 11, a qual contém a constante *a* e o fator associado ao grau de saturação. Conforme apresentado na revisão bibliográfica,

a razão entre a resistividade elétrica solo e a resistividade elétrica do fluído é denominada de fator de formação (F), assim, a eq. 11 pode ser reescrita pela eq. 18.

$$F = a * n^{-m} * Sr^{-s} \quad (18)$$

No entanto, para aplicar essa formulação foi preciso determinar as constantes empíricas *m*, *s* e *a*, as quais foram calculadas utilizando os dados provenientes dos ensaios realizados com as placas circulares e com o dispositivo de resistividade. O método utilizado para calcular essas constantes foi o mesmo utilizado por Daniel (1997) e está detalhado a seguir.

Cálculo do expoente da porosidade (constante *m*)

Em condições em que o grau de saturação é constante, é possível determinar a constante *m* isolando-se n^{-m} da eq. 18 e aplicando a operação de logaritmo em ambos os lados, tem-se, eq. 19.

$$\log\left(F * \frac{Sr^{s}}{a}\right) = (-m) * \log n \quad (19)$$

Na eq. 19 é possível atribuir o valor de uma única constante *C* para o fator Sr^{-s}/a e obter a eq. 20.

$$\log(F * C) = (-m) * \log n \quad (20)$$

Dessa forma, é possível plotar em escala di-log o fator de formação (F) em função da porosidade (*n*) e obter o expoente *m* através da inclusão de uma linha de tendência do tipo potência. Nessa análise é importante usar os dados de formar a garantir que C seja constante e que as amostras pertençam a um conjunto de ensaios com mesmo teor de umidade.

Cálculo do expoente do grau de saturação (constante *s*)

Sendo *m* um parâmetro conhecido, é possível isolar Sr^{s} na eq. 18, de forma semelhante à realizada no cálculo da constante *m*, e aplicar a operação logarítmica em ambos os lados da igualdade, eq. 21.

$$\log\left(F * \frac{n^{m}}{a}\right) = (-s) * \log Sr \quad (21)$$

O parâmetro *s* pode ser obtido plotando-se os resultados de $F.n^m$ versus grau de saturação e ajustando os pontos por uma tendência do tipo potência pois *a* é uma constante.

Cálculo do coeficiente *a*

Com os expoentes *m* e *s* conhecidos, é possível obter a constante *a* plotando-se o fator de formação (F) versus $n^{-m}.Sr^{-s}$ e calculando-se o coeficiente angular da reta de ajuste dos pontos, pois a relação entre os eixos é do tipo linear.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Primeiramente estão apresentados os resultados e análises dos ensaios de verificação do dispositivo de resistividade em função da temperatura uma vez que estas curvas foram utilizadas nas análises dos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso e na avaliação do diâmetro de dois corpos de prova no ensaio de resistividade elétrica em meio particulado.

Os resultados dos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso foram analisados, primeiramente, de forma isolada em função da concentração do meio e, posteriormente, foi realizada uma correção dos valores de resistividade elétrica desses ensaios para a temperatura 25°C para possibilitar a comparação dos resultados de potencial elétrico obtidos.

Nos ensaios para avaliação do diâmetro dos corpos de prova em meio particulado, os resultados foram compilados para a aplicação da Lei de Archie com o objetivo de equalizar os dados. Com os parâmetros empíricos ajustados, de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2.4, foi realizada a comparação dos resultados obtidos pelas placas de cobre e pelo dispositivo de resistividade para ambos os corpos de prova através do gráfico que relaciona índice de vazios da areia de cava com a resistividade elétrica do solo (ρ_b) corrigida pela Lei de Archie.

5.1. Verificação do dispositivo de resistividade

A triagem dos resultados foi realizada de forma a agrupar os valores de resistividade corrigidos para a temperatura de 25°C conforme eq. 16 nas diferentes concentrações do meio aquoso para cada uma das temperaturas de interesse de forma a obter a menor variação possível e, assim, calcular de forma empírica o fator (k) para cada uma das temperaturas.

Dessa forma, os resultados estão apresentados na Figura 50, na qual as curvas de verificação em função da temperatura estão apresentadas juntamente com a curva de verificação na temperatura de 25°C.

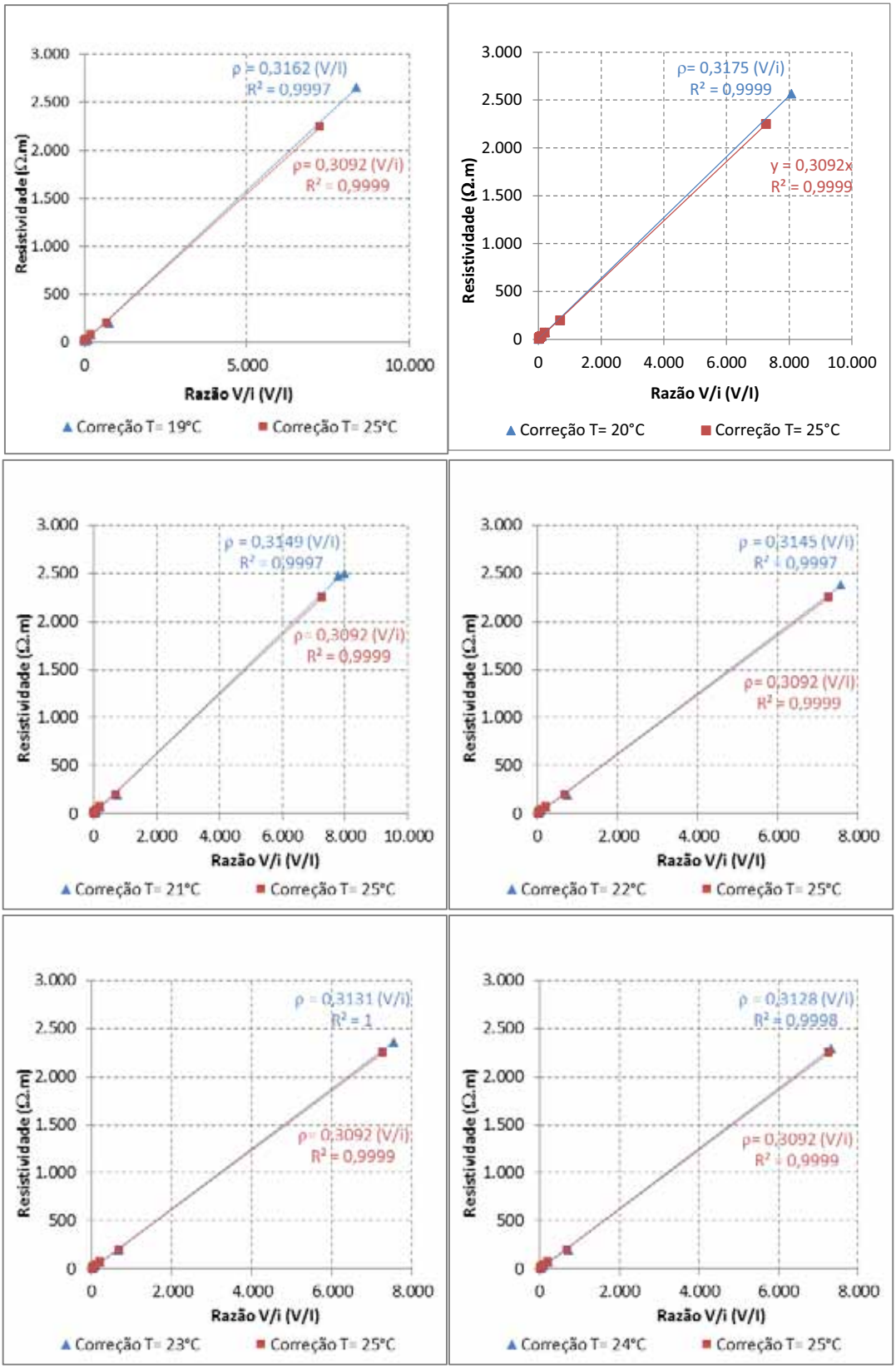


Figura 50: Curva de verificação do dispositivo de resistividade nas temperaturas de 19°C, 20°C, 21°C, 22°C, 23°C, 24°C comparado com a temperatura de referência 25°C.

Em virtude das concentrações utilizadas para obter os gráficos apresentados nas Figura 50 e Figura 51, para uma única temperatura (curva) tem-se um uma concentração de cinco pontos para o intervalo de resistividade de 0 a 500 Ω.m, os quais correspondem as concentrações de 20, 50, 100, 500 e 1000 ppm, e um único ponto para os valores de resistividade acima de 2000 Ω.m (1 ppm), provocando assim um intervalo sem pontos entre essas resistividades.

Como pode ser observado na Figura 51, há uma redução no coeficiente angular da reta de verificação com o aumento da temperatura, isto é, para uma mesma concentração de fluído ocorre uma redução da resistividade elétrica com o aumento da temperatura, como também pode ser observado na Tabela 12. Assim, o comportamento pelo dispositivo de resistividade é o mesmo descrito na literatura, indicando que o funcionamento do equipamento desenvolvido está dentro do padrão esperado para essa ferramenta.

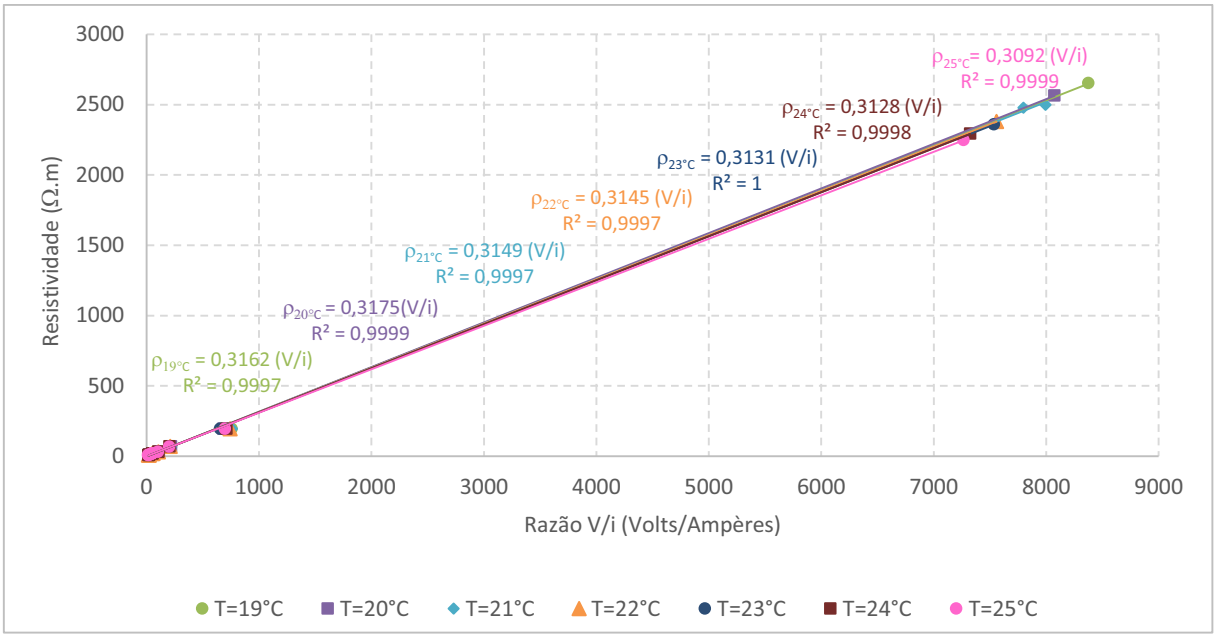


Figura 51: Verificação do dispositivo de resistividade em função da temperatura de 19° C a 25° C.

Tabela 12: Comparação entre o coeficiente angular das retas de verificação do dispositivo em função da temperatura

Temperatura (°C)	Equação	R²
19	ρ = 0,3162 (V/i)	R² = 0,9997
20	ρ = 0,3175 (V/i)	R² = 0,9999
21	ρ = 0,3149 (V/i)	R² = 0,9997
22	ρ = 0,3145 (V/i)	R² = 0,9997
23	ρ = 0,3131 (V/i)	R² = 1,0000
24	ρ = 0,3128 (V/i)	R² = 0,9998
25	ρ = 0,3092 (V/i)	R² = 0,9999

Além disso, os gráficos apresentados nas Figura 50 e Figura 51 descrevem com eficiência o comportamento do dispositivo de resistividade nas suas respectivas temperaturas de interesse, uma vez que estes apresentam elevados coeficientes de determinação (R^2), isto é, próximos da unidade.

Comparando o valor da curva de verificação para a temperatura de 25° C da Figura 11 com a Figura 51 se observa uma pequena variação entre os coeficientes angulares. Na Figura 11 os dados foram obtidos com a variação da concentração do meio aquoso sem a manutenção da temperatura e na Figura 51 manteve a concentração do meio para as concentrações de 1, 20, 50, 100, 500 e 1000 partes por milhão com variações de temperatura. Assim, a variação do coeficiente angular pode estar relacionada com a diferença de intervalo de resistividade elétrica entre os gráficos da Figura 11 e Figura 51 e também com o tratamento que as análises receberam em função do efeito da temperatura.

Nesse sentido, é importante ressaltar que a análise apresentada na Figura 51 foi realizada para descrever a variação da resistividade em função da variação de temperatura a cada grau Celsius e, por isso, descreve de forma mais detalhada o comportamento do dispositivo de resistividade.

É possível calcular também o fator geométrico teórico para a obtenção da resistividade elétrica pelo dispositivo através da eq. 15. Sendo o raio do eletrodo (d) igual a 10 mm e o espaçamento entre eletrodos (c) de 15 mm, o fator geométrico teórico resultou em 0,3290. Portanto, o fator teórico obtido pouco se difere dos fatores empírico calculados nas temperaturas de 19°C a 25°C. Dessa forma, verificou-se que para a temperatura de 19°C ocorreu a menor variação entre o fator empírico e fator teórico.

5.2. Potencial elétrico em meio aquoso

Os ensaios realizados com o dispositivo de resistividade de 20 mm de diâmetro foram realizados para quatro concentrações diferentes: água destilada, água de abastecimento público, 250 ppm e 500 ppm. A seguir serão apresentados os resultados em função da concentração do ensaio.

5.2.1. Água destilada

O ensaio de potencial elétrico em água destilada foi realizado na temperatura de 21°C e resultou em uma condutividade de 0,23 µS/cm pelo condutivímetro para a temperatura de referência de 25°C (temperatura padrão desse aparelho). A correção da condutividade elétrica para a temperatura de 21°C foi obtida através da eq. 16, a mesma utilizada para corrigir a curva de verificação do dispositivo de resistividade, e resultou em 0,21 µS/cm.

Os dados do ensaio de potencial elétrico foram: temperatura de 21°C, condutividade de 0,21 µS/cm (ou 47.619 Ω.m), tensão MN lida pelos sensores foi de 9 mV, corrente de 0,012 mA e tensão RMS de 3,00 V, Figura 52. Assim, o valor de resistência elétrica obtido pelo dispositivo de resistividade foi calculado a partir da razão entre a tensão de resposta e a corrente de alimentação, eq. 22.

$$\frac{V}{I} = \frac{9\ mV}{0{,}012\ mA} = 750\ mV/mA \qquad (22)$$

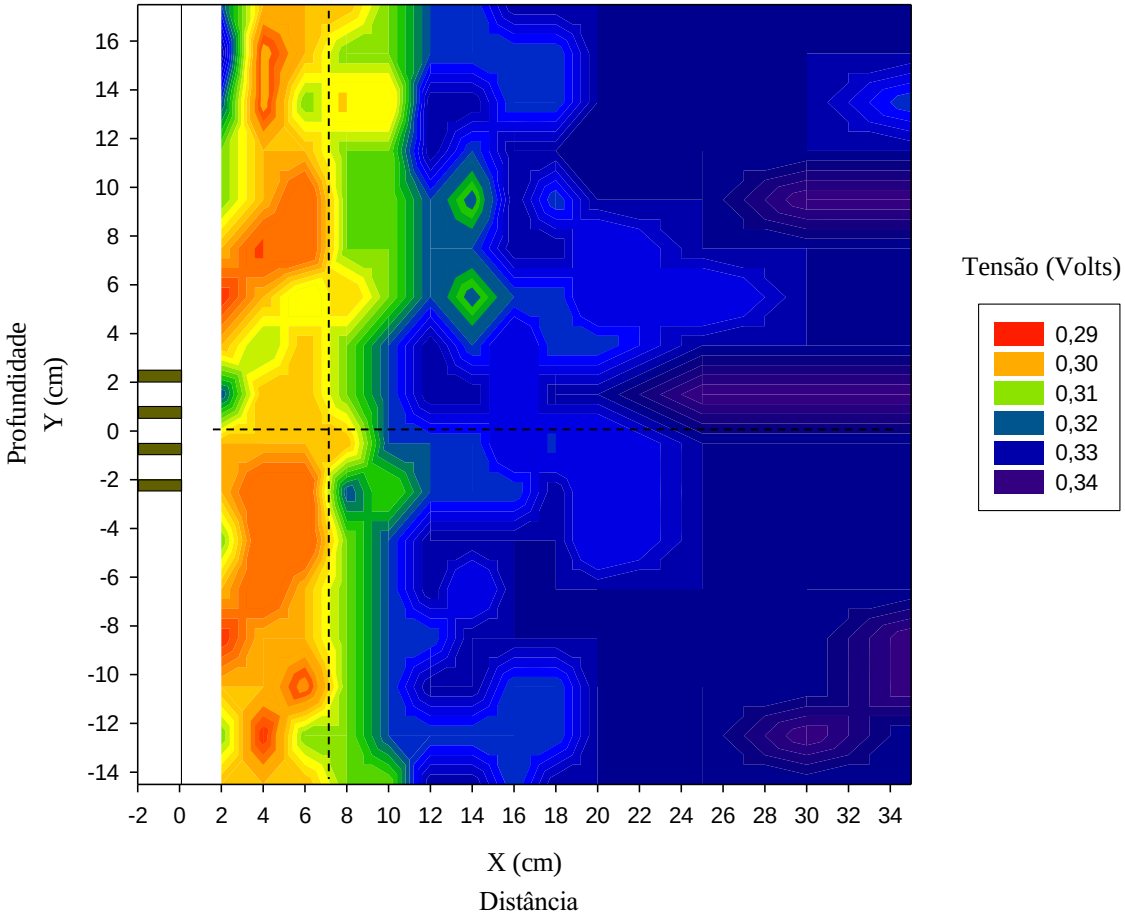


Figura 52: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a água destilada.

Aplicando o valor da razão de *V/i*, eq. 22, na equação de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 21°C, de acordo com a Tabela 12, tem-se equação 23.

$$\rho = 0{,}3149 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3149 * 750 = 236\ \Omega.m \quad (23)$$

O valor de tensão no centro do arranjo dos eletrodos foi 300 mV, como mostrado na Figura 52, e representa o valor do potencial elétrico médio para as condições experimentais relacionadas anteriormente. Com esse valor foi possível calcular a resistividade elétrica utilizando a equação de verificação do dispositivo de resistividade na temperatura do ensaio, Tabela 12, eq. 24.

$$\rho_{21°C} = 0{,}3149 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3149 * \frac{300mV}{0{,}012mA} = 7\,873\ \Omega.m \quad (24)$$

Assim os valores de resistividade elétrica obtidos para a água destilada foram: 236 Ω.m pelo dispositivo de resistividade, 47.619 Ω.m pelo condutivímetro e 7.873 Ω.m pelo ensaio de potencial elétrico. Primeiramente, é importante observar que o valor de resistividade obtido pelo condutivímetro extrapola a escala de resposta do dispositivo de resistividade, conforme apresentado na Figura 51. Portanto, o ensaio foi realizado em condições que o dispositivo de resistividade apresenta limitações, quer seja por não ter medidas estabilizadas para essa faixa de valores ou por limitações relacionadas as configurações do dispositivo de leitura.

Essa faixa de valores está relacionada com a condutividade da água destilada durante a realização dos ensaios, que por sua vez está vinculada com as condições do filtro de destilação. Em termos práticos, é possível comparar as condições iniciais dos ensaios de potencial elétrico com o de verificação do dispositivo de resistividade, ambos para a temperatura de 25°C, sendo estes, respectivamente: condutividade 0,23 μS/cm e 4,01 μS/cm, os quais em termos de resistividade são 43.478 Ω.m e 2.494 Ω.m; ou seja, a diferença de 3,78 μS/cm em termos de condutividade na condição inicial dos ensaios causa uma variação de 40.984 Ω.m em termos de resistividade elétrica.

A partir da curva de verificação do dispositivo de resistividade e do ensaio de potencial elétrico em água destilada delimitou-se a obtenção de leituras em 4,01 μS/cm ou 2.494 Ω.m, isto é, experimentalmente estes são os menores valores de condutividade e

resistividade elétrica, respectivamente, que o dispositivo de resistividade é capaz de realizar leituras confiáveis.

Outro aspecto relevante a ser considerado na leitura dos valores mínimos do dispositivo de resistividade é capacidade do multímetro. Uma vez que nessa condição têm-se os menores valores de corrente e tensão. Sendo assim, as medidas de corrente, principalmente, são obtidas próximas a faixa de incerteza do multímetro o que acaba gerando pequenos erros de leitura, os quais originam valores com grandes desvios quando aplicados na curva de verificação do dispositivo de resistividade.

Quanto ao potencial elétrico experimental apresentado na Figura 52 observa-se uma simetria na distribuição dos valores de tensão entre a parte superior e inferior da linha horizontal tracejada. Analisando a relação entre a diferença de potencial e a distância até o eixo do dispositivo de resistividade, tem-se um aumento da tensão com o aumento da distância.

Outro aspecto importante observado na Figura 52, é a extensão do potencial elétrico gerado pelo dispositivo de resistividade, isto é, a região no espaço que sofre interferência em decorrência do funcionamento dessa ferramenta. Nesse caso, o potencial elétrico ficou compreendido entre o eixo do dispositivo de resistividade e uma distância radial inferior a 80 mm.

5.2.2. Água potável

O ensaio de potencial elétrico em água potável foi realizado na temperatura de 20,3°C e resultou em uma condutividade de 135 μS/cm, medida efetuada pelo condutivímetro na temperatura de referência de 25°C.

De maneira análoga ao realizado na análise do ensaio de água destilada, foi utilizada a eq. 16 para ajustar a condutividade para a temperatura de 20°C, valor inteiro mais próximo da temperatura do ensaio, e obteve-se 122 μS/cm.

As grandezas coletadas durante o ensaio de potencial elétrico em água potável foram: condutividade 122 μS/cm (resistividade de 82 Ω.m) na temperatura de 20°C, tensão RMS 3,00 V, corrente de alimentação do sistema 1,53 mA, potencial entre os eletrodos centrais 262 mV, Figura 53. Assim, aplicando a tensão MN e corrente de alimentação, na equação

de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 20°C, Tabela 12, tem-se eq. 25.

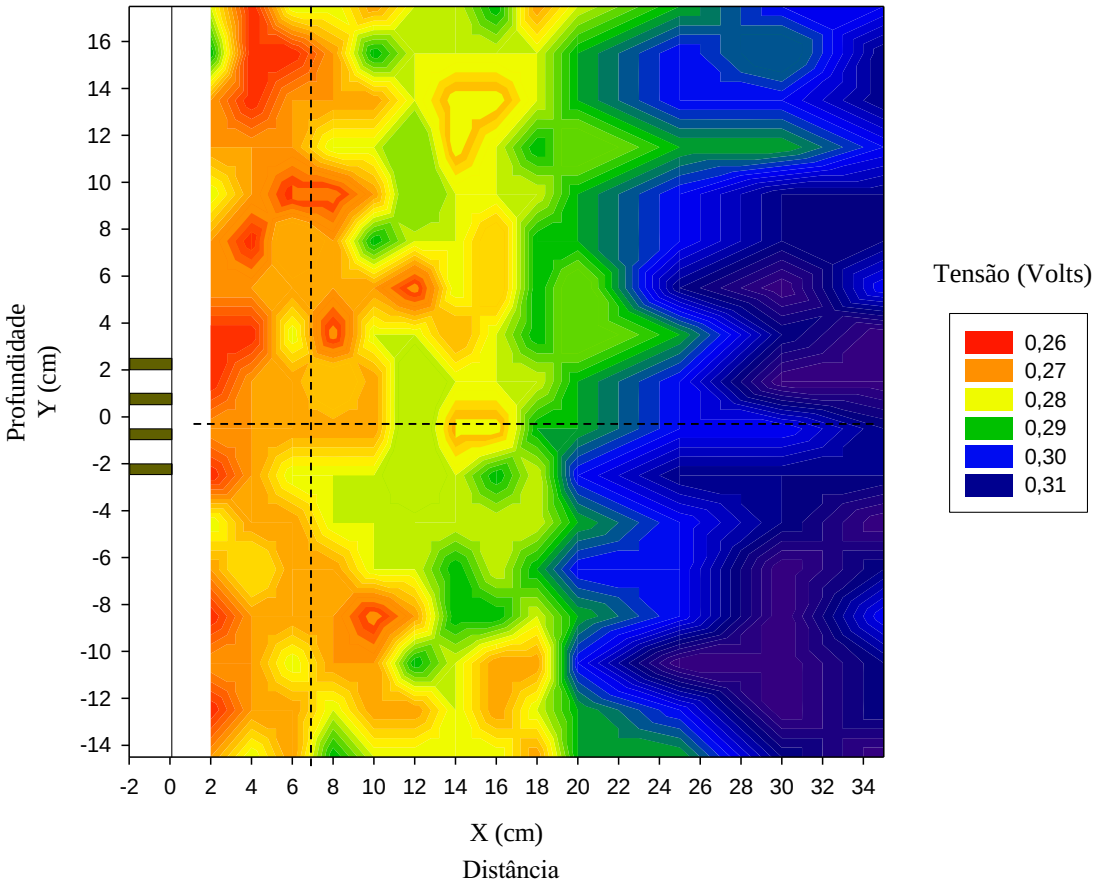


Figura 53: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a água potável.

$$\rho = 0{,}3175 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3175 * \left(\frac{262}{1{,}53}\right) = 54\ \Omega.m \qquad (25)$$

O resultado apresentado na eq. 25 foi o valor da resistividade elétrica calculada pelo dispositivo de resistividade e pode ser comparado com o valor de resistividade obtido no ensaio de potencial elétrico da Figura 53, isto é, através da faixa laranja de tensão, a qual representa a tensão média obtida no ensaio de potencial elétrico, de valor 0,270 V, e a corrente de 1,53 mA, que alimenta o dispositivo. Aplicando esses valores na equação de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 20°C, Tabela 12, tem-se o valor médio de resistividade para o ensaio de potencial elétrico, eq. 26.

$$\rho = 0{,}3175 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3175 * \frac{270\ mV}{1{,}53\ mA} = 56\ \Omega.m \qquad (26)$$

A diferença apresentada entre a leitura realizada pelo dispositivo de resistividade e pelo ensaio de potencial elétrico foi de 2 Ω.m, ou seja, praticamente, desprezível, mostrando que as medidas estão bastante satisfatórias. Sendo portanto, uma verificação experimental do bom funcionamento desse equipamento para os valores em que a curva de verificação está ajustada.

Analisando a região laranja do potencial elétrico apresentado na Figura 53, obteve-se a extensão média radial dessa faixa de 80 mm desde o eixo do dispositivo de resistividade, com alguns pontos de descontinuidade.

5.2.3. Concentração de 250 ppm de cloreto de sódio

Para o preparo da solução de 250 ppm foram utilizados 220 litros de água destilada com condutividade de 0,44 μS/cm para a temperatura de 25°C obtida pelo condutivímetro, temperatura da água destilada 23°C e 55g de cloreto de sódio. Após a homogeneização obteve-se uma solução de 250 ppm e condutividade de 543 μS/cm para a temperatura de referência de 25°C. Fazendo a correção da condutividade da solução para a temperatura de 23°C, através da eq. 16, o valor obtido foi de 521 μS/cm.

As condições do ensaio de potencial elétrico foram: condutividade 521 μS/cm (resistividade 19 Ω.m) na temperatura de 23°C, tensão entre os eletrodos centrais 314,7 mV, corrente de alimentação do sistema 5,82 mA, tensão RMS de 3,00 V, Figura 54. Com esses dados foi possível calcular a resistividade elétrica pelo dispositivo de resistividade, aplicando a tensão entre os eletrodos centrais e a corrente de alimentação na equação de verificação do dispositivo para a temperatura de 23°C, Tabela 12, eq. 27.

$$\rho = 0{,}3131 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3131 * \left(\frac{314{,}7}{5{,}82}\right) = 17\ \Omega.m \qquad (27)$$

De acordo com a Figura 54, a faixa laranja de tensão indica o valor médio obtido no ensaio de potencial elétrico, aplicando esse valor de 170 mV e a corrente de 5,82 mA, na equação de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 23°C, Tabela 12, tem-se o valor da resistividade média obtido no ensaio de potencial elétrico, eq. 28.

$$\rho = 0{,}3131 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3131 * \frac{170\ mV}{5{,}82\ mA} = 9\ \Omega.m \qquad (28)$$

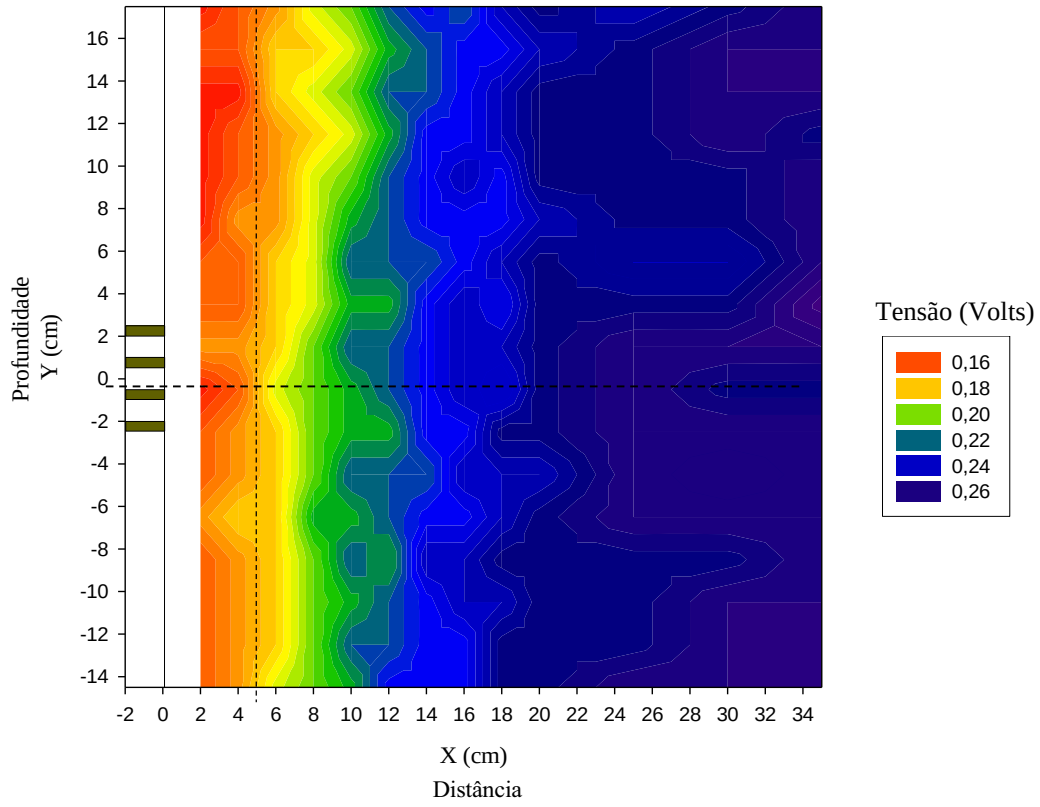


Figura 54: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a concentração de 250 ppm.

Comparando o valor de resistividade elétrica obtido pelo dispositivo de resistividade, eq. 27, com o valor médio de resistividade obtido pelo ensaio de potencial elétrico, eq. 28, tem-se uma diferença de 8 Ω.m, o que em termos experimentais é pouco significativa.

Quanto a diferença entre o dispositivo de resistividade e o condutivímetro foi observado uma diferença ainda menor de 2 Ω.m, que pode ser considerada desprezível. No entanto, diferentemente do comportamento observado em água potável, a menor diferença está entre o condutivímetro e o dispositivo de resistividade e não entre o dispositivo de resistividade e o potencial elétrico, indicando que com o aumento da concentração do meio há também uma modificação no comportamento das leituras pelo dispositivo de resistividade.

Na Figura 54, a faixa laranja de tensão se estendeu até um raio de 60 mm do eixo do dispositivo de resistividade, configurando assim o raio do potencial elétrico experimental desse equipamento para a concentração de 250 ppm.

5.2.4. Concentração de 500 ppm de cloreto de sódio

Para preparar essa solução foram utilizados 220 litros de água destilada na temperatura de 22°C e 110g de cloreto de sódio (NaCl) e, assim, obteve-se uma condutividade de 1.065 μS/cm para a temperatura padrão de 25°C, medida pelo condutivímetro. Fazendo a correção da condutividade da solução para a temperatura do ensaio, eq. 16, obteve-se 1.002 μS/cm.

As condições do ensaio foram: tensão RMS de 3,00 V, tensão MN de 320mV, corrente de alimentação 10,7 mA, condutividade de 1.002 μS/cm (ou resistividade de 10 Ω.m) na temperatura de 22,0°C. Na Figura 55 está apresentado o potencial elétrico obtido.

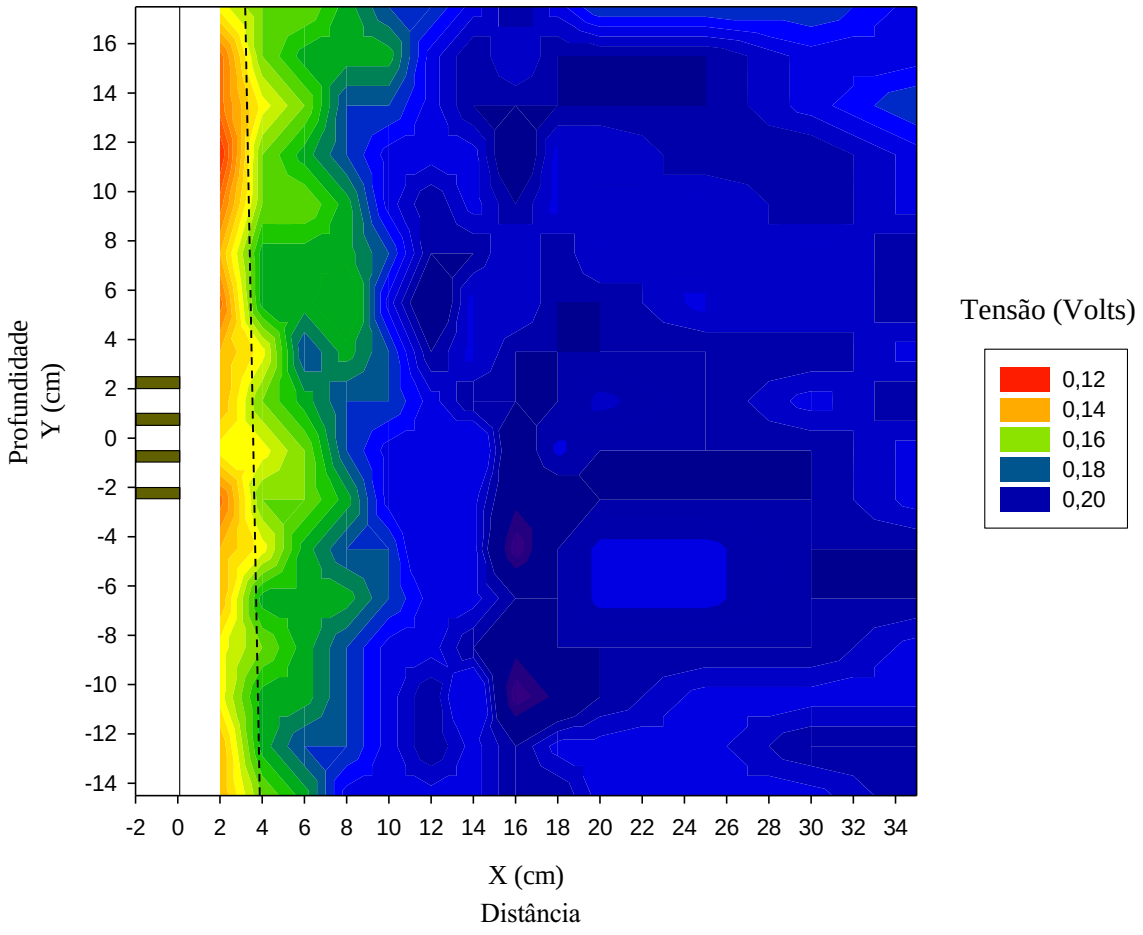


Figura 55: Potencial elétrico do dispositivo de resistividade para a concentração de 500 ppm.

Assim, aplicando a tensão MN e a corrente na equação de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 22°C, Tabela 12, tem-se a resistividade elétrica pelo dispositivo, eq. 29.

$$\rho = 0{,}3145 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3145 * \frac{320}{10{,}7} = 9\ \Omega.m \quad (29)$$

De acordo com a Figura 55, a faixa amarela de tensão indica o valor médio obtido no ensaio de potencial elétrico, isto é, 150 mV (valor médio entre a faixa laranja e verde). Assim, aplicando esse valor de tensão na equação de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura de 22°C, Tabela 12, com o valor da corrente desse ensaio, 10,7 mA, tem-se o valor da resistividade elétrica médio para o ensaio de potencial elétrico, eq. 30.

$$\rho = 0{,}3145 * \left(\frac{V}{i}\right) = 0{,}3145 * \frac{150\ mV}{10{,}7\ mA} = 4\ \Omega.m \quad (30)$$

Comparando o valor de resistividade elétrica obtido pelo dispositivo resistividade com o valor médio obtido no ensaio de potencial elétrico tem-se, respectivamente, 9 Ω.m e 4 Ω.m, ou seja, uma diferença de 5 Ω.m. No entanto, quando se compara os valores obtidos pelo condutivímetro (10 Ω.m) com os obtidos pelo dispositivo de resistividade essa diferença cai para 1 Ω.m.

Verificou-se, com esses resultados, um comportamento semelhante ao apresentado na concentração de 250 ppm, isto é, a diferença entre o dispositivo de resistividade e o condutivímetro foi novamente menor que a diferença entre o dispositivo de resistividade e o potencial elétrico.

Na Figura 55, a faixa amarela de tensão se estendeu até um raio inferior a 50 mm do eixo do dispositivo de resistividade, configurando assim o potencial elétrico experimental desse equipamento para a concentração de 500 ppm.

5.2.5. Interpretação dos resultados de potencial elétrico em meio aquoso

Nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso, a região que sofreu perturbação em decorrência do funcionamento do dispositivo de resistividade foi estudada em termos de valores obtidos pelas respostas dos equipamentos utilizados durante os ensaios, sendo eles: o condutivímetro, o próprio dispositivo de resistividade e o valor tensão no centro dos eletrodos no ensaio de potencial elétrico.

Esses equipamentos apresentam particularidades que devem ser consideradas na avaliação dos seus resultados, como por exemplo o universo de análise do condutivímetro, que devido a sua finalidade laboratorial é capaz de obter a condutividade de um fluído dentro de um Becker de 200 ml sem sofrer distorções em função de efeitos de borda. Por outro lado, o dispositivo de resistividade, também possui finalidade laboratorial, no entanto, para meios particulados de maior complexidade para a realização de leituras, conforme mostrado na Figura 4, e, consequentemente, seu campo elétrico possui uma maior dimensão de propagação quando comparado com o condutivímetro.

Os resultados de potencial elétrico obtidos formaram regiões diferentes em função da concentração do meio analisado, alguns deles com regiões descontinuas e outros com simetria entre a parte superior e inferior em relação ao centro dos eletrodos.

Foi considerado nas análises como sendo o raio do potencial elétrico do dispositivo de resistividade a região em que o valor da tensão no centro dos eletrodos se propagou, isto é, a distância em que a tensão gerada pela corrente que alimenta o sistema se propagou no eixo de coordenadas XY. A região de propagação do potencial elétrico do dispositivo de resistividade foi caracterizada por tensões inferiores as obtidas em posições mais distantes dos eletrodos de leitura.

Em função da variação da resistividade elétrica do meio observou-se, também, modificações no potencial elétrico gerado. Os valores de resistividade elétrica obtidos nos ensaios de potencial elétrico em função da concentração do meio foram sintetizados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados de resistividade elétrica obtidos nos ensaios de potencial elétrico.

Fluído	Temperatura (°C)	Resistividade Ω.m			Raio Potencial Elétrico
		Condutivímetro	Potencial Elétrico	Dispositivo de resistividade	
Água destilada	21	47.619	7.873	236	80 mm
Água potável	20	82	54	56	80 mm
250 ppm	23	19	9	17	60 mm
500 ppm	22	10	4	9	50 mm

O ensaio de potencial elétrico obtido para a água destilada foi realizado para verificar a resposta do equipamento para essa condição extrema, ou seja, de elevado valor de resistividade. Conforme apresentado na Tabela 13, os valores de resistividade elétrica

obtidos foram de três ordens de grandezas distintas, ou seja, o dispositivo de resistividade não realiza leituras confiáveis para essa concentração, quer seja em meio aquoso quer seja em meio particulado. Isso aconteceu porque a condição do ensaio extrapolou os limites da curva de verificação. Assim sendo, esse ensaio contribuiu para análise da região em que o potencial elétrico do dispositivo se propagou, a qual foi verificada experimentalmente e resultou num raio de 80 mm a partir do eixo do dispositivo de resistividade.

Para as demais concentrações, verificou-se que o valor de resistividade para o ensaio de potencial elétrico é menor que o valor obtido pelo dispositivo de resistividade em cada uma das condições ensaiadas. Conforme apresentado na Tabela 13, essa diferença foi menor para a condição da água potável (2 Ω.m), meio mais resistivo, e maior para as concentrações de 250 ppm (8 Ω.m) e 500 ppm (5 Ω.m).

O comprimento do raio do potencial elétrico é muito importante para o dimensionamento do corpo de prova, visto que as medidas de resistividade elétrica podem ser afetadas pelas dimensões do corpo de prova. Experimentalmente, os valores dos raios do potencial elétrico variaram entre 80 mm e 50 mm em função da resistividade do meio aquoso, sendo que os maiores raios ocorreram para as maiores resistividades e os menores valores de raio para os menores valores de resistividade elétrica.

Para a análise comparativa dos resultados de potencial elétrico obtidos em temperaturas diferentes realizou-se a correção dos valores de resistividade elétrica para a temperatura padrão de 25°C através da eq.15, Tabela 14.

Tabela 14: Resultados de resistividade elétrica corrigidos para a temperatura de 25°C obtidos nos ensaios de potencial elétrico do dispositivo de resistividade.

Fluído	Temperatura (°C)	Resistividade Ω.m		
		Condutivímetro	Potencial Elétrico	Dispositivo de resistividade
Água destilada	25	43.478	7.213	216
Água potável	25	73	49	50
250 ppm	25	18	9	16
500 ppm	25	9	4	9

Os valores de resistividade elétrica corrigidos decrescem com o aumento da condutividade do meio, ou seja, com a redução da resistividade elétrica. Isso ocorre porque os valores de razão entre a tensão lida pelo dispositivo e a corrente enviada ao dispositivo

de resistividade para cada uma das concentrações também decrescem com o aumento da concentração do meio.

Comparando os valores de resistividade elétrica para uma mesma concentração do fluído dentro da faixa de verificação do dispositivo de resistividade, foi possível montar a Tabela 15 com os desvios relativos entre as medidas corrigidas para a temperatura de 25°.

Tabela 15: Desvios relativos entre as resistividades obtidas nos ensaios de potencial elétrico dentro da faixa de verificação do dispositivo.

Fluído	Potencial elétrico/ Condutivímetro	Dispositivo de resistividade/ Condutivímetro	Dispositivo de resistividade/ Potencial elétrico
Água potável	33,70%	31,46%	3,26%
250 ppm	52,33%	11,84%	45,93%
500 ppm	55,82%	5,74%	53,13%

Analisando a Tabela 15 observa-se uma redução dos desvios relativos entre o dispositivo de resistividade e o condutivímetro com o aumento da condutividade do meio aquoso. No entanto, para os desvios relativos entre o potencial elétrico e o condutivímetro e entre o dispositivo de resistividade e o potencial elétrico observa-se um aumento do desvio relativo com o aumento da concentração do meio.

Com os resultados dos ensaios de potencial elétrico foram obtidas as distâncias radiais das tensões em função do funcionamento do dispositivo de resistividade em diferentes condições, a partir das quais foi possível definir a distância radial de 80 mm como sendo a ideal para o corpo de prova padrão deste equipamento, isto é, sem prejuízo a nenhuma condição experimental.

Quanto à altura do corpo de prova, os ensaios de potencial elétrico realizados em meio aquoso não contribuíram para a definição dessa grandeza, uma vez que os ensaios apresentaram continuidade das medidas de tesão ao longo de toda a profundidade medida no ensaio.

A partir desses resultados foi realizada a confecção do corpo de prova padrão, nesta pesquisa denominado de molde de compactação ou corpo de prova pequeno para os ensaios com areia de cava. No entanto, o diâmetro real obtido para a peça foi de 154,8 mm, o qual foi mantido sem prejuízo para as análises, conforme detalhado no item 4.1.

5.3. Avaliação do diâmetro na obtenção da resistividade elétrica em meio particulado

A avaliação da resistividade elétrica em dois corpos de prova com diâmetros diferentes e mesma altura se faz necessária para verificar o impacto das distorções das trajetórias de propagação de corrente elétrica e a distribuição das tensões dentro do solo durante os ensaios, bem como suas consequências na obtenção da medida de resistividade elétrica.

Os resultados obtidos estão apresentados em cinco grupos compostos de quatro amostras em função do teor de umidade que foram moldados, sendo dois corpos de prova para cada diâmetro de recipiente (maior e menor) e para cada diâmetro foram utilizados as placas de cobre e o dispositivo de resistividade para obtenção das medidas, Tabela 16.

Tabela 16: Relação dos conjuntos de ensaios obtidos em função do teor de umidade, índice de vazios e grau de saturação com suas respectivas temperaturas.

Conjunto	Ensaio	Técnica	Corpo de Prova	T_{solo} °C	w (%)	e	Sr (%)
A	1	placas de cobre	menor	24,8	2,0	0,85	6,3
A	2	dispositivo de resistividade	menor	24,8	2,0	0,83	6,5
A	3	placas de cobre	maior	23,5	2,0	1,02	5,2
A	4	dispositivo de resistividade	maior	24,2	2,0	0,92	5,8
B	5	placas de cobre	menor	23,3	5,5	0,91	16,0
B	6	dispositivo de resistividade	menor	23,6	5,7	0,90	16,9
B	7	placas de cobre	maior	23,3	7,2	0,99	19,3
B	8	dispositivo de resistividade	maior	23,1	6,7	0,98	18,3
C	9	placas de cobre	menor	24,6	17,1	0,64	71,5
C	10	dispositivo de resistividade	menor	24,4	15,2	0,74	55,0
C	11	placas de cobre	maior	24,9	20,2	0,86	63,1
C	12	dispositivo de resistividade	maior	24,6	18,6	0,85	58,5
D	13	placas de cobre	menor	25,3	19,5	0,54	96,1
D	14	dispositivo de resistividade	menor	25,6	18,4	0,55	88,8
D	15	placas de cobre	maior	25,3	21,4	0,61	93,7
D	16	dispositivo de resistividade	maior	24,9	22,3	0,61	97,0
E	17	placas de cobre	menor	25	18,6	0,48	100,0
E	18	dispositivo de resistividade	menor	24,8	19,4	0,50	100,0
E	19	placas de cobre	maior	24,5	22,3	0,63	95,1
E	20	dispositivo de resistividade	maior	25,5	20,4	0,54	100,0

Nesses ensaios a temperatura média foi de 24,9 °C com variação entre a máxima e a mínima temperatura de 2,5 °C. Como os corpos de prova foram agrupados em conjuntos de ensaios e a máxima variação de temperatura para um mesmo conjunto foi de 1,3 °C, Tabela 16, utilizou-se as curvas de verificação do dispositivo de resistividade para a temperatura do ensaio, sem necessidade de adotar uma temperatura padrão para correção dos valores de resistividade elétrica.

Na análise dos resultados de resistividade elétrica aplicou-se a Lei de Archie, conforme metodologia apresentada no item 4.2.4, e no cálculo das constantes dessa formulação foram utilizados os resultados provenientes dos ensaios com o dispositivo de resistividade e com as placas de cobre realizados em ambos os diâmetros dos corpos de prova.

Para o cálculo da constante *m* foram utilizados os ensaios do conjunto D e E da Tabela 16, cujos os resultados possuem grau de saturação elevados, acima de 94,0%, e podem ser considerados como pertencentes a uma mesma condição de ensaio. Graficamente foram relacionados os valores de porosidade com o fator de formação em escala gráfica di-log, Figura 56.

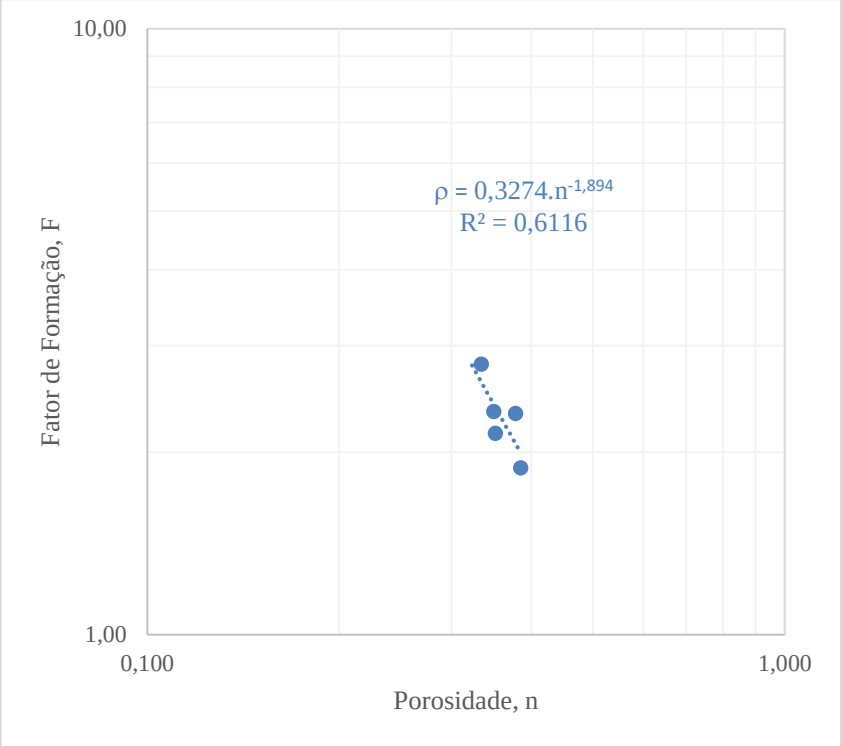


Figura 56: Resultado para o expoente m de porosidade com grau de saturação acima de 94%.

Sendo *m* uma constante empírica, admite-se R^2 de menores valores. Embora o valor obtido de R^2 seja igual a 0,6116, o resultado calculado para o expoente *m* de -1,894 está compreendido no intervalo apresentado na literatura e se assemelha ao valor de -1,96 apresentado por Daniel (1997) para uma para uma areia pura fina. Nesse cálculo o índice de vazios ficou entre 0,30 e 0,40 e nos resultados obtidos por Daniel (1997) entre 0,30 e 0,50, mostrando uma equivalência entre os resultados.

Para o cálculo do expoente *s* utilizou-se o valor calculado de *m*, apresentado na Figura 56 e, graficamente, relacionou-se $F*n^m$ com o grau de saturação. Nessa análise utilizou-se os resultados dos cinco conjuntos apresentados na Tabela 16, Figura 57.

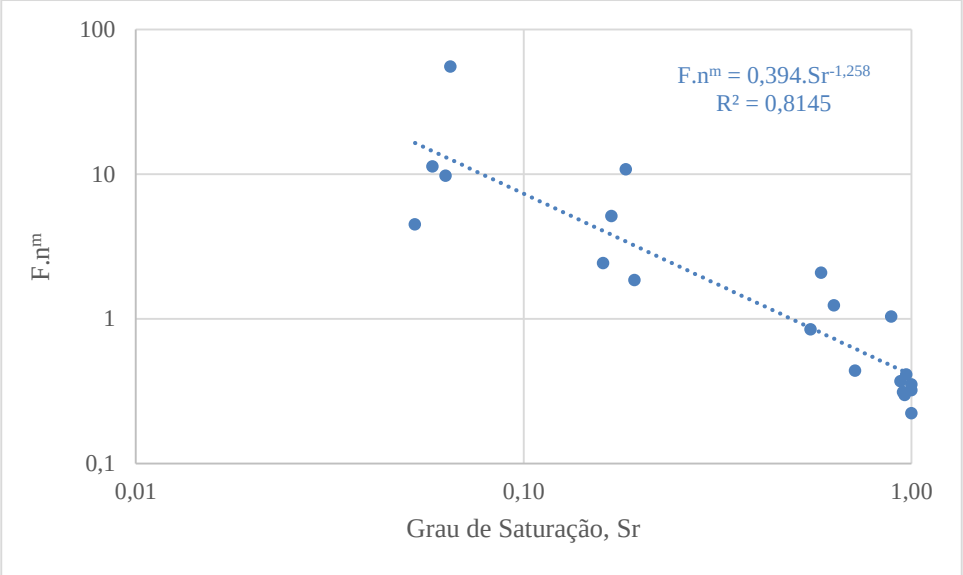


Figura 57: Resultado para o expoente *s* do grau de saturação com valor de m= - 1,894.

O resultado do expoente *s* apresentou valor de R^2 de 0,8145, superior ao calculado para o expoente *m* e adequado para essa grandeza. Portanto, o valor calculado para a constante *s* de -1,258 é um bom ajuste para esse parâmetro e se insere no intervalo apresentado na literatura, o qual varia entre 1,0 e 2,5 de acordo com Daniel (2003).

Quanto aos expoentes *m* e *s* é importante ressaltar que embora sejam de mesma ordem de grandeza a variação do fator Sr^{-s} é maior que o do fator n^{-m} pois a variação do grau de saturação é mais ampla do que a de porosidade do solo. Assim, o valor do expoente *m* que apresentou o menor R^2 ficou relacionado com o fator de menor variação para a Lei de Archie.

A constante *a* foi calculada a partir dos parâmetros *m* e *s* através do gráfico da Figura 58 que relaciona o fator de formação (F) com os fatores $n^{-m}.Sr^{-s}$ por uma relação linear.

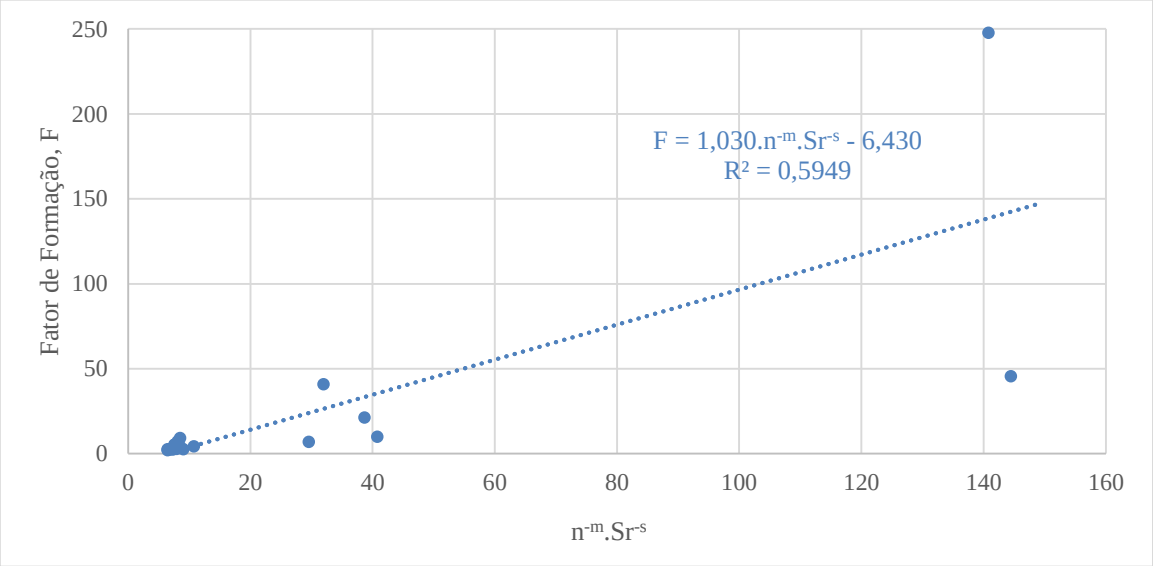


Figura 58: Resultado do coeficiente *a* para *m*= -1,894 e *s*= -1,258.

Para o cálculo da constante *a* foram utilizados os resultados dos cinco conjuntos apresentados na Tabela 16. Embora o valor de R^2 não seja elevado, o valor de *a* =1,030 está coerente com os valores da literatura.

Portanto, após o cálculo das constantes da Lei de Archie, foi possível montar o Anexo 2 com os resultados obtidos nos ensaios e os cálculos realizados para a obtenção das constantes da Lei de Archie.

Com a modelagem de Archie finalizada foi possível comparar o desempenho das técnicas utilizadas para a leitura da resistividade elétrica e o efeito do diâmetro do corpo de prova na obtenção das medidas. Nessa análise será relacionado o índice de vazios do solo, grandeza que não foi corrigida por esta modelagem, com a resistividade elétrica calculada pela Lei de Archie.

Reunindo os resultados obtidos pelas placas de cobre em ambos os corpos de prova obteve-se a Figura 59, a qual descartou apenas os dois pontos com grau de saturação em torno de 5,0%, isto é, o conjunto A da Tabela 16, pois nessa condição, a propagação de corrente elétrica é bastante reduzida.

Observou-se duas linhas de tendência para os resultados obtidos com as placas de cobre de elevados valores de R^2, Figura 59, mostrando que houve uma diferente distribuição

das tensões elétricas em função do corpo de prova utilizado. Comparando os valores de R^2 entre os corpos de prova, verificou-se que o maior valor ocorre para o corpo de prova menor.

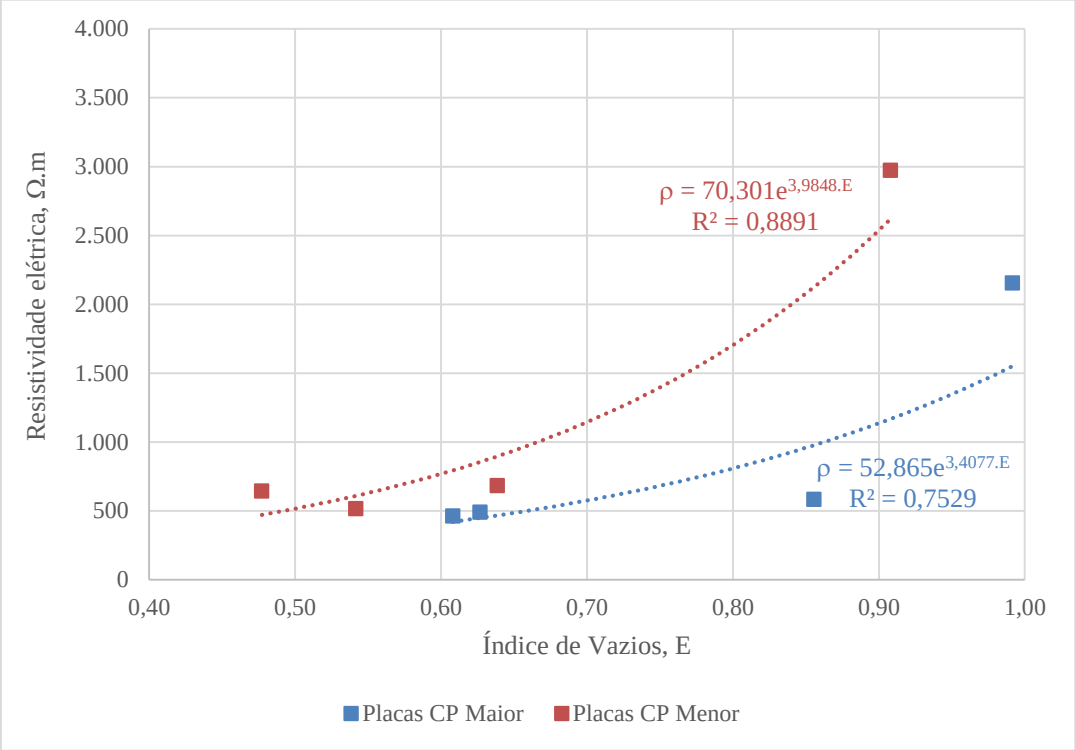


Figura 59: Avaliação da geometria do corpo de prova maior e menor nos ensaios de resistividade elétrica com as placas de cobre.

Na Figura 60 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com o dispositivo de resistividade descartando-se, também, os dois pontos com grau de saturação em torno de 5,0%, isto é, o conjunto A da Tabela 16 por estarem em condição de difícil propagação de corrente e, consequentemente, de leitura de resistividade elétrica.

As curvas de ajuste obtidas nos ensaios com o dispositivo de resistividade também apresentaram duas tendências diferentes em função do diâmetro do corpo de prova. Novamente, foram verificados bons valores de R^2 para ambas as curvas, sendo que o maior deles foi obtido para o ensaio realizado com o corpo de prova menor.

Portanto, devido a semelhança entre as curvas de ajuste obtidas pelas duas técnicas de medida de resistividade elétrica, foi possível comparar os resultados das placas de cobre com o dispositivo de resistividade para um mesmo diâmetro de corpo de prova. Assim, foram relacionados os resultados de resistividade elétrica por ambas as técnicas de medida de resistividade para o corpo de prova maior e menor, conforme apresentado na Figura 61.

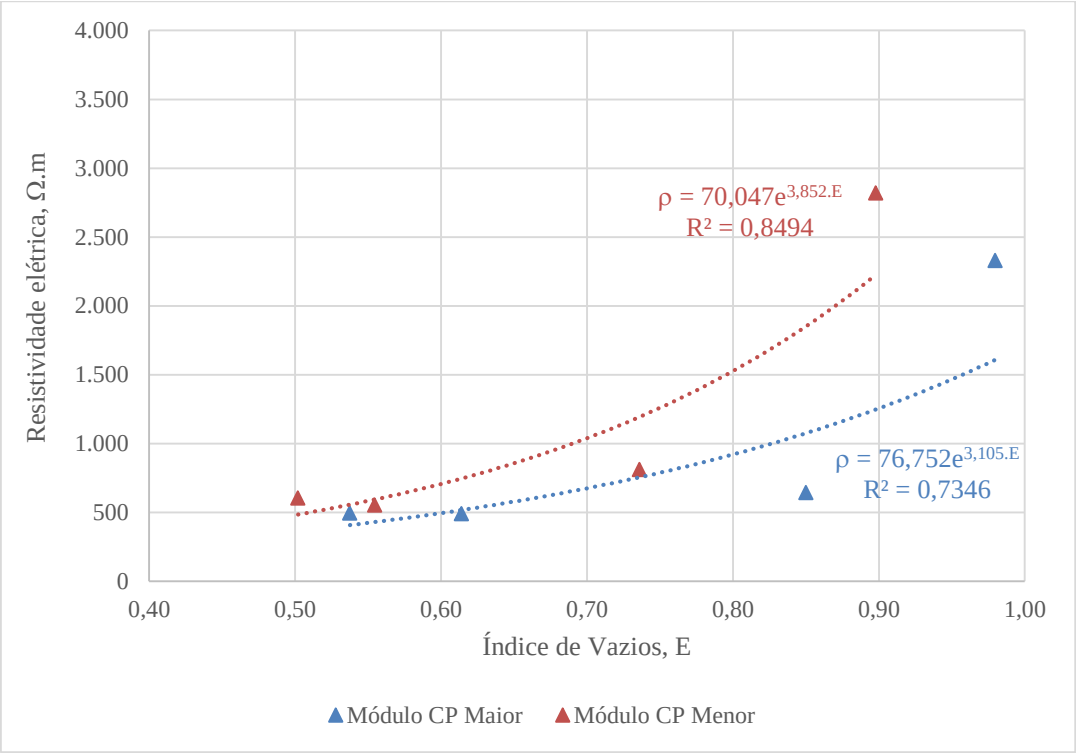


Figura 60: Avaliação da geometria do corpo de prova maior e menor nos ensaios de resistividade elétrica com o dispositivo de resistividade.

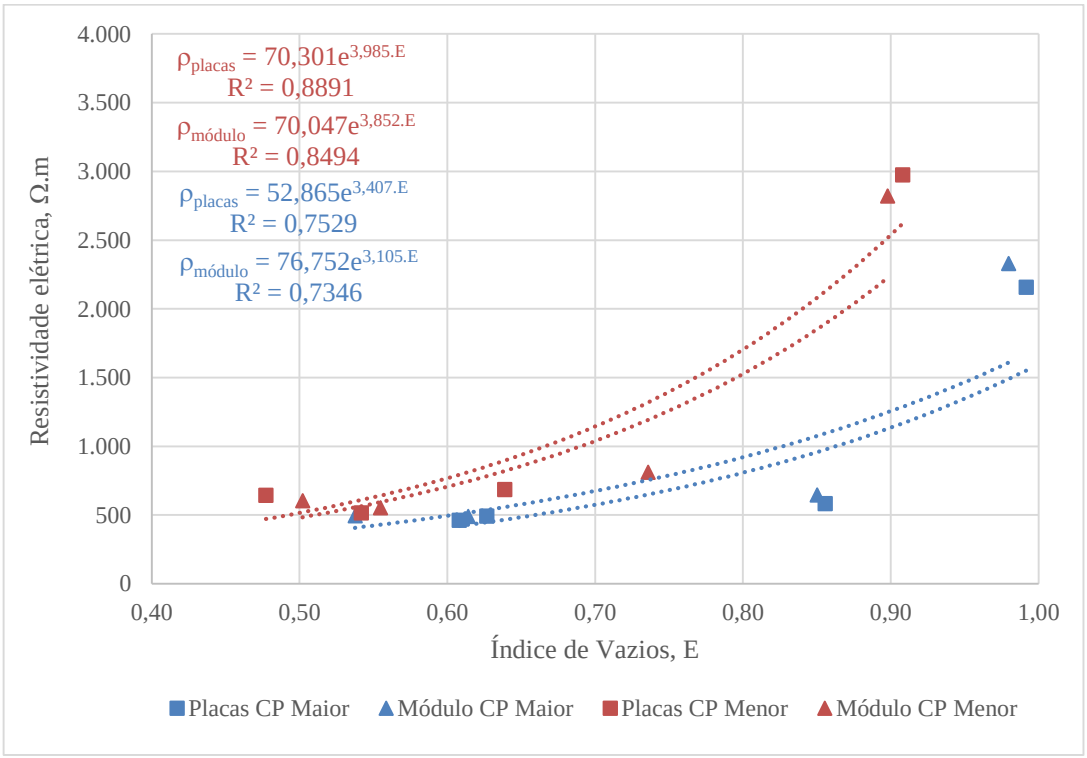


Figura 61: Valores de resistividade elétrica obtidos pelo dispositivo de resistividade e pelas placas de cobre para ambos os corpos de prova.

Verificou-se que para um mesmo corpo de prova os resultados de resistividade elétrica obtidos pelo dispositivo de resistividade e pelas placas de cobre apresentaram curvas de ajuste muito próximas, todas com elevados valores de R^2, principalmente os valores calculados no corpo de prova menor. Portanto, os valores de resistividade elétrica apresentaram maior variação em função do diâmetro do corpo de prova do que entre as técnicas utilizadas para realizar as medidas.

Dessa forma, foi possível considerar um único ajuste dos resultados de resistividade elétrica para cada corpo de prova considerando as duas técnicas utilizadas nessa pesquisa numa mesma curva, Figura 62.

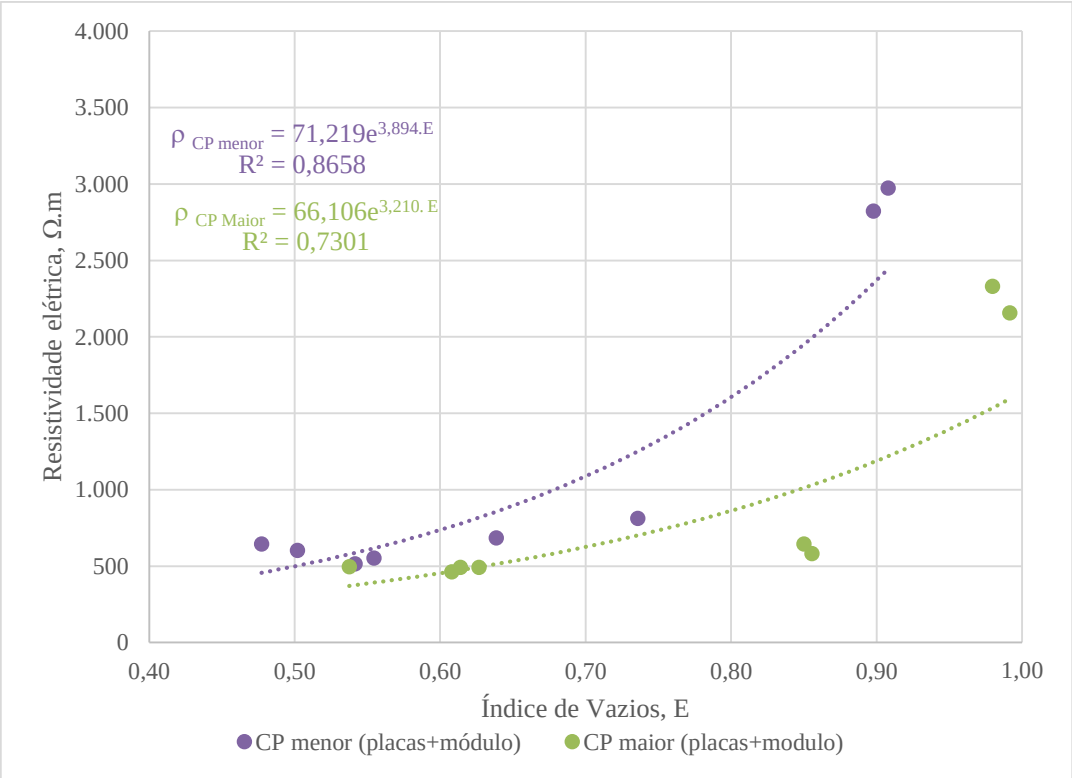


Figura 62: Resultado do ajuste de resistividade elétrica pelo diâmetro de corpo de prova utilizando as duas técnicas de medida de resistividade para obtenção da curva.

Analisando os valores de R^2 da Figura 62 conclui-se que, para cada diâmetro de corpo de prova, o ajuste das duas técnicas de medida de resistividade por uma única curva foi bastante adequado, pois os valores de R^2 obtidos são semelhantes aos apresentados na Figura 61, na qual as curvas foram calculadas separadamente. Verifica-se também que as duas linhas de tendência obtidas na Figura 62 pertencem à mesma família de curvas da Figura 61 e apresentaram valores de constante semelhantes.

Na Figura 62, os dois pontos extremos obtidos nos dois corpos de prova, com resistividade elétrica em torno de 3.000 Ω.m e grau de saturação em torno de 17%, foram os que apresentaram maior diferença absoluta de resistividade elétrica entre os diâmetros do corpo de prova. Nos ensaios de potencial elétrico em meio aquoso, os maiores raios de propagação de tensão em decorrência do funcionamento do dispositivo de resistividade elétrica também ocorreram para os maiores valores de resistividade elétrica. Assim, a maior diferença absoluta de resistividade entre os corpos de prova está relacionada com a dificuldade de propagação de corrente para elevados valores de resistividade elétrica, condição na qual ocorre maior distorção da propagação de corrente no meio particulado.

Dessa forma, os valores de resistividade elétrica obtidos no corpo de prova de 450 mm de diâmetro são menores do que os obtidos no corpo de prova de 155 mm de diâmetro, pois para o corpo de prova maior existem mais caminhos para a propagação de corrente quando comparado com o corpo de prova menor e, consequentemente, a corrente se propaga pelo caminho que oferece a menor resistência a passagem dos elétrons, resultando em menores valores de resistividade.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

O estudo em questão envolveu a construção do dispositivo de resistividade de laboratório, a realização de ensaios de instrumentação através da obtenção das curvas de verificação em função da temperatura e ensaios de potencial elétrico em meio aquoso, o desenvolvimento da metodologia de ensaio e, por fim, a aplicação do dispositivo em uma areia de média.

Quanto ao desenvolvimento e funcionamento do dispositivo de resistividade conclui-se que este equipamento pode ser aplicado em ensaios de laboratório com bastante eficácia desde que o mesmo seja aferido periodicamente. E, a partir dos conhecimentos adquiridos com a construção desse dispositivo, se obteve um boa base teórica e prática para o desenvolvimento de um dispositivo de resistividade de campo.

As curvas de verificação em função da temperatura resultaram em fatores empíricos bastante semelhantes ao fator geométrico teórico do arranjo de Wenner, demonstrando o bom desempenho do dispositivo de resistividade de laboratório e a correta aferição do mesmo.

A partir da obtenção das curvas de verificação do dispositivo de resistividade em função da temperatura foi possível avaliar o potencial elétrico em meio aquoso nas condições do ensaio e, posteriormente, converter as respostas em resistividade elétrica. Comparando as respostas dos ensaios de potencial de elétrico do dispositivo de resistividade observou-se uma redução do raio de propagação de tensões com o aumento da concentração de cloreto de sódio do meio aquoso. Isso ocorreu em virtude da maior facilidade de propagação dos elétrons para condições de menores resistividade elétricas.

Das análises do potencial elétrico em meio particulado obteve-se o diâmetro de 155 mm para o corpo de prova menor, também denominado de molde compactação, sendo este o valor indicado para a realização dos ensaios em laboratório em condições controladas. A altura não foi restringida pelas respostas dos ensaios de potencial elétrico nas concentrações estudadas, pois verificou-se uma simetria entre a parte superior e inferior do

eixo central dos sensores do dispositivo de resistividade elétrica. Dessa forma, adotou-se uma altura de, aproximadamente, 25% maior do que o diâmetro, ou seja, 196 mm para o corpo de prova menor sem colarinho.

Nos ensaios realizados com o corpo de prova da areia estudada utilizou-se as placas de cobre e o dispositivo desenvolvido na Unesp para a leitura da resistividade elétrica. As respostas obtidas por ambas as técnicas foram bastantes semelhantes e possibilitaram ser ajustadas por uma única curva em função do diâmetro do corpo de prova utilizado. Embora as características geométricas e elétricas das técnicas utilizadas sejam distintas e propiciem diferentes distribuições de tensões no solo, as duas técnicas se mostraram igualmente eficientes para a leitura da resistividade elétrica em laboratório nas areias não consolidadas.

Dessa forma, verificou-se que a geometria do corpo de prova utilizado impactou mais nas medidas de resistividade elétrica do que na técnica utilizada para a realização da medida. Esse resultado pode ser explicado devido a diferente distribuição das tensões que ocorre entre o corpo de prova maior e menor. No corpo de prova maior há mais trajetórias de corrente disponíveis para a propagação dos elétrons resultando em valores de resistividade elétrica menores do que os obtidos no corpo de prova menor para uma mesma condição de ensaio (grau de saturação, porosidade e índice de vazios).

É importante ressaltar que a utilização da resistividade elétrica em ensaios de investigação de subsolo é utilizada de forma qualitativa, ou seja, oscila dentro de uma faixa de valores. Assim, quando os valores de referência são excedidos tem-se um forte indicativo da presença de contaminantes e indica-se a realização de ensaios adicionais e amostras de solo, liquido e gás para investigação detalhada desse local.

6.1. Sugestões para atividade futuras

Visando dar continuidade aos estudos de resistividade elétrica, é importante o desenvolvimento do dispositivo de resistividade elétrica de campo, pois os estudos realizados até aqui fornecem bons subsídios para o desenvolvimento desse equipamento. Dessa forma, a utilização do dispositivo de resistividade de campo englobando o conhecimento das grandezas elétricas envolvidas, diferentemente do que ocorre com módulos comerciais, possibilitará uma melhor interpretação dos resultados de campo e contribuirá para o domínio dessa técnica.

Sendo as placas de cobre uma técnica relevante de medida de resistividade elétrica em laboratório, propõe-se o estudo da altura do corpo de prova em função do diâmetro das placas, em diferentes solos, com o objetivo de analisar a distribuição das propriedades em elétricas em cada um desses casos e, posteriormente, fazer uma otimização dos corpos de prova de laboratório.

BIBLIOGRAFIA

Abu-Hassanein, Z. S.; Benson, C. H. (1996). Electrical resistivity of compacted clays. In: J. Geotech. Eng., 122 (5), 397-406 (DOI 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:5(397)).

Abu-Hassanein, Z.S.; Benson, C.H. (1994). Using Electrical Resistivity for Compaction Control of Compacted Soil Liners. In: Proceedings of the First International Conference on Tailings & Mine Waste'94, pp. 177-188.

Adli, Z. H; Musa, M.H.; Ariflin, M.N.K (2010). Electrical Resistivity of Subsurface: Field and Laboratory Assessment. In World Academy of Science, Engineering and Technology (https://www.waset.org/journals/waset/v45/v45-148.pdf).

Aquino, F.R. (2010). Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-189/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.

Aquino, W.F. (1999). Métodos Geofísicos Aplicados à Investigação de Contaminação Subterrânea: Estudo de Casos. In: 4o. Congresso Brasileiro Geotecnia Ambiental, São José dos Campos (SP).

Archie, G. E. 1941. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Trans. Am. Inst. Min. Eng., Vol. 146, p 54-62.

Arulmoli, K., Arulanandan, K., Seed, H. B. (1985) "New Method for Evaluating Liquefaction Potential," J. Geotech. Engrg. Div., Vol. 111, No. 1, pp. 95–114.

Bang, E.S.; Sung, N.H.; Park, S.G.; Kim, J.H.; Kim, Y.S.; Seo; D.N.; Kim, D.S.; Lee, S.H. Development and verification of a resistivity seismic flat dilatometer testing system for efficient soft soil site characterization. In: The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3. 2008, Taipei, Taiwan. Geothecnical and Geophysical Site Characterization. Londres. Taylor & Francis Group Ed. p 1247-1253. 2008.

Bolinelli Junior, H. L.; Peixoto, A. S. P.; Giacheti, H. L. ; Elis, V. R. ; Hamada, J. ; Mio, G. de ; Cavaguchi, N. (2002). Piezocone de Resistividade: Primeiros resultados de sua Aplicação para Investigação Geoambiental de um Aterro Sanitário. In: 10o. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ouro Preto (MG).

Bollini, L.E.; Peixoto, A.S.P. (2011). Aferição dos dispositivos de leitura de resistividade considerando o efeito da temperatura. In: XXIII Congresso de Iniciação Científica da Unesp, Bauru (São Paulo).

Bortolin, J. R. M.; Malagutti Filho, W. (2010). Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos

sólidos urbanos. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 15, n. 4, Dec. 2010, (http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000400009).

Boszczowski, R. R.; Silva, J. M. (2008). Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade. In: COBRAMSEG 2008. Buzios (RJ).

Bryson, L. S.; Bathe, A. (2009). Determination of Selected Geotechnical Properties of Soil Using Electrical Conductivit. Geotechnical Testing Journal. Vol. 32. No 3, (DOI 10.1520/GTJ101632).

Campanella, R.G. Geo-environmental site characterization. In: The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3. 2008, Taipei, Taiwan. Geothecnical and Geophysical Site Characterization. Londres. Taylor & Francis Group Ed. p 3-15. 2008.

Campanella, R. G.; Weemees, I. (1990). Development and Use of na Eletrical Cone for Groundwater Contamination Studies. Soil Mechanics Series nº 140, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 42 p.

Compare, V; Cozzolino, M.; Mauriello, P; Patella, D. (2009). Resistivity probability tomography imaging at the Castle of Zena, Italy. In: EURASIP Journal on Image and Video Processing, Volume 2009, (DOI 10.1155/2009).

Corwin, D.L.; Lesch, S.M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. In: Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v.46, p.11-43, 2005, (DOI 10.1016/j.compag.2004.10.005)

Daichao, S.; Zhou, A.; Fredlund, D. G. (2011). Shear Strength Criteria for Unsaturated Soils. In: Geotech Geol Eng, Vol. 29, pp. 145-159,(DOI 10.1007/s10706-009-9276-x)

Daniel, C. (1997). An Investigation of the Factors Affecting Bulk Soil Electrical Resistivity. Bachelor Thesis, Department of Civil Engineering The University of British Columbia, Vancouver, BC, 1997.

Daniel, C.R.; Campanella, R.G.; Howie, J.A.; Giacheti, H.L. (2003). Specific depth cone resistivity measurements to determine soil engineering properties, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 8, No. 1.

Ekwue, E., and Bartholomew, J. (2010). Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. Biosystems Eng., 108 (2), 95-103.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., and Taya, N., 1999, The Micro-structures of Clay Given by Resistivity Measurements. Eng. Geol. (Amsterdam), Vol. 54, No. 1–2, pp. 43–53.

Giao, P., Chung, S., Kim, D., and Tanaka, H. (2003). Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. J.Appl.Geophys., 52(4), 157-175.

Gorman, T.; Kelly, W. E. (1990). Electrical-Hydraulic Properties of Unsaturated Ottawa Sand. J. Hydrol.,Vol. 118, No. 1–4, pp. 1–18, (DOI 10.1016/0022-1694(90)90247-U).

Grant, F.S.; West, G.F. (1965). Interpretation Theory in Applied Geophysics. Mcgraw-Hill Book Company, pp. 393.

Gupta, S. C.; Hanks, R. J., 1972, Influence of Water Content on Electrical Resistivity of the Soil. In: Soil Sci. Soc. Am. Proc., Vol. 36, No. 6, pp. 855–857.

Jackson, P. D., Smith, D. T., and Stanford, P. N. (1978). Resistivity- Porosity-Particle Shape Relationships for Marine Sands, Geophysics, Vol. 43, pp. 1250–1268.

Kalinski, R.; Kelly, W. (1993). Estimating water content of soils from electrical resistivity. GTJ. ASTM, 16(3), 323-329.

Kelly, W. E.; Reiter, P. F. (1984). Influence of Anisotropy on Relations Between Electrical and Hydraulic Properties of Aquifers. J. Hydrol., Vol. 74, No. 3–4, pp. 311–321, (DOI 10.1007/s10712-009-9072-4).

Kibria, G.; Hossain, M.S. (2012).Investigation of Geotechnical Parameters Affecting Electrical Resistivity of Compacted Clays.Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (DOI 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000722).

Kishimoto, M. M. (2011). Estudo da Influência da Temperatura no Dispositivo para Leitura da Resistividade em Laboratório. Bauru/ SP: Relatório de Iniciação Científica, FAPESP - Processo: 2009/17797 - 3.

Kong, Ling-Wei, Bai, Wei, and Guo, Ai-Guo. Effects of Cracks on the Electrical Conductivity of a Fissured Laterite: A Combined Experimental and Statistical Study," Geotechnical Testing Journal, Vol. 35, No. 6, 2012, pp. 1–9, (DOI 10.1520/GTJ20120070. ISSN 0149-6115).

Liu, S. Y.; Han, L. H.; Du, Y. J.; Gu, M. F. (2007). Experimental Study on Electrical Resistivity of Soil-cement. Environ. Geol., Vol. 54, No. 6, pp. 1227–1233.

Liu, S. Y.; Zha, F. S.;Yu, X. J. (2006). Laboratory Measurment Techniques of the Electrical Resistivity of Soils. J. Eng. Geol., Vol. 14, No. 2, pp. 216–222.

Long, M.; Donohue, S.; L'Heureux, J.S.; Solberg I. L.; Ronning J.S.; Limacher R.; O´Connor, P.; Sauvin, G.; Romoen M.; Lecomte, I. (2012). Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. Canadian Geotechnical Journal, Volume 49, Number 10. (DOI 10.1139/T2012-080).

Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell,J. (1997), Cone Penetration Test in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional, London, 311 pp.

Mazac, O.; Kelly, W. E.; Landa, I. (1985). Hydrogeophysical Model for Relations Between Electrical and Hydraulic Properties of Aquifers. J. Hydrol., Vol. 79, No. 1–2, pp. 1–19.

McCarter, W. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. Geotechnique, 34(2), 263.

Miguel, M. G.; Teixeira, R. S.; Padilha, A. C. (2006). Curvas características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. Revista de Ciências &Tecnologia , 12, 63-74.

Miranda, J.M; Luis, J. F.; Costa, P. T.; Santos, F. M.(1997). Fundamentos de Geofísica. Cap. 5 - Geoeletricidade, pág.120 a 134.

Molin, J.P.; Rabello, L.M.(2011). Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. In: Eng. Agríc., vol.31, n.1, pp. 90-101. ISSN 0100-6916, (http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000100009).

Mondelli, G.; Giacheti, H.L.; Boscov, M.E.G; Elis, V.R.; Hamada, J. (2007). Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. Environmental Geology (Berlin. Internet), Springer Berlin / Heidelberg, v. 52, p. 871-887, 2007. (DOI 10.1007/s00254-006-0529-1).

Oh, M.H.; Kim, Y.S.; Park, J.B.; Kwon, O.S. Laboratory study on applicability of resistivity cone for investigation of subsurface contamination. In: The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3. 2008, Taipei, Taiwan. Geothecnical and Geophysical Site Characterization. Londres. Taylor & Francis Group Ed. p 737-743. 2008.

Oliveira, F.S. (2004). Estudo Experimental de uma Área Contaminada por Lodo Biossólido no DF Via de Ensaios Cone Resistivo. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-122/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Peixoto, A. S. P.; Yamasaki, M. T.; Lodi, P. C. (2014). Evaluation of Electrical Resistivity in a Tropical Sandy Soil Compacted. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19C, p. 629-644, 2014.

Pacheco, A.O. (2004) – Ensaios com Cone Resistivo em Solos Saturados. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 151 p.

Peixoto, A. S. P. (2007) – Desenvolvimento de Dispositivo de Medida de Resistividade Elétrica para Investigação Geotécnica e Geoambiental do Subsolo. Relatório de Auxílio a Pesquisa Fapesp (Processo 2007/06085-7).

Peixoto, A. S. P.; Pregnolato, M. C.;Silva, A. C.; Yamasaki, M. T.; Conte Junior, F. (2010). Development of an Electrical Resistivity Measure for Geotechnical and Geoenvironmental Chacacterization. CPT'10 - The 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Huntington Beach, California/USA.

Perez, N.; Garnica, P.; Landaverde, N. Measurement of soil suction using soil's resistivity (2009). ICSMGE 2009 - 17th International Conference on Soil Mechanics and

Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt (DOI 10.3233/978-1-60750-031-5-245).

Pincelli, A. L. (2004). Desenvolvimento e Ensaios de um Sistema de Mensuração de Condutividade Elétrica do Solo. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba/SP.

Ridley, A. M.; Wray, W. K. Suction measurement: A review of current theory and practices. 1st Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris, 1995.

Schoor, M. (2002). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. Journal of Applied Geophysics 50 (2002),pp. 393–399.

Soto, M. A. (2004). Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos Não Saturados. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; e Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics (2nd Edition ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Tippler, P. A. (1999). Física: eletricidade, eletromagnetismo e ótica. Vol 2. Ed Livros técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, Brasil.

Vilar, O. M. (1997). Introdução à mecânica dos solos não saturados. Notas de aula.

Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009

Weemees, I. A. (1990). Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies. M.A.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of British Columbia. Vancouver, CA. 86p.

Yamasaki, M.T. (2012) – Influência da salinidade do fluído na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unesp/Bauru, São Paulo, 141 p.

Yamasaki, M. T. ; Peixoto, A. S. P. ; Pregnolato, M. C. (2012). Avaliação da Resistividade Elétrica Variando-se o Teor de Salinidade do Fluido de Percolação. In: COBRAMSEG 2012, Porto de Galinhas, Ipojuca, PE. COBRAMSEG 2012. v. 1. p. 1-7.

Yamasaki, M. T. (2009). Ensaio de Laboratório para Avaliação da Resistividade Elétrica em um Solo Tropical Arenoso. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista, UNESP., Engenharia Civil, Bauru/SP.

Anexo 1
Propriedades do *Technyl*

Propriedades Físicas	Unidades	Normas	Nylon 6.6
Peso específico	g/cm³	DIN 53479 ASTM D792 ISO 1183	1,14
Temperatura mínima e máxima em uso contínuo	°C	-	-30 / +100
Absorção de umidade até equilíbrio a 23 °C com UR 50%	%	DIN 53715	2,5
Absorção de água até saturação	%	DIN 53495 ASTM D570	8

Propriedades Mecânicas	Unidades	Normas	Nylon 6.6
Tensão de escoamento à tração	MPa	DIN 53455 ASTM D638 ISO R 527	90 (68)
Tensão de ruptura à tração	MPa	DIN 53455 ASTM D638	-
Tensão de ruptura à compressão	MPa	ASTM D695	100
Tensão de ruptura à flexão	MPa	ASTM D790	120
Módulo de elasticidade à tração	MPa	DIN 53457 ASTM D638 ISO R527	3300 (2000)
Módulo de elasticidade à compressão	MPa	ASTM D695	-
Módulo de elasticidade à flexão	MPa	DIN 53457 ASTM D790	3600 (1000)
Elongação até ruptura	%	DIN 53452 ASTM D638 ISO R 527	50 (160)
Resistência ao impacto	KJ/m²	DIN 53453 ASTM D256 ISO R 179	n.q. n.r. n.b.
Dureza Rockwell	-	ASTM D785 ISO 2039-2	R115
Resistência à penetração de esfera	MPa	DIN 53456 ISO 2039	170 (100)
Tensão de fluência com 1% defor. em 1000H	MPa	DIN 53444 ISO R 899	6

Propriedades Térmicas	Unidades	Normas	Nylon 6.6
Calor específico a 23°C	J/K.g	-	1,7
Condutividade térmica a 23°C	W/K.m	DIN 52612	0,23
Coeficiente linear de expansão térmica a 23°C	10^(-6)/K	-	90 (70)
Temperatura máxima de uso em curto período	°C	-	160
Ponto de fusão	°C	DIN 53736	245
Temperatura de transição vítrea	°C	DIN 53736	50 (5)
Temp. distorção sobre ISO-R75 método A	°C	DIN 53461 ASTM D648 ISO R 75	100
Inflamabilidade	-	UL94	HB

Propriedades Elétricas	Unidades	Normas	Nylon 6.6
Constante dielétrica a 1000 Hz	-	DIN 53483 ASTM D150	3,6
Fator de perda dielétrica a 10 Hz	-	DIN 53483	0,025 (0,2)
Resistividade volumétrica a 23 °C 50% RH	Ω.cm	DIN 53482 ASTM D257	10^(12) (10^(15))
Rigidez dielétrica	KV/mm	DIN 53481	36 (100)
Resistência superficial	Ω	DIN 53482	10^(13)

Propriedades Químicas	Unidades	Normas	Nylon 6.6
Resistência a ácidos fortes	-	ASTM D543	Não resiste
Resistência a ácidos fracos	-	ASTM D543	Resistência Limitada Nota (1)
Resistência à bases fortes	-	ASTM D543	Resistência Limitada
Resistência à bases fracas	-	ASTM D543	Resistência Limitada
Resistência a raios solares	-	ASTM D543	Não resiste Nota (2)

Notas:
(1) Resistente a solventes comuns, mas dissolvido por fenóis e ácido fórmico.
(2) Alguns materiais se tornaram quebradiços depois de prolongada exposição a luz solar. Usar, preferencialmente, materiais da cor preta.

As informações apresentadas neste anexo foram retiradas de catálogos de processadores e/ou fabricantes da matéria-prima, representando resultados obtidos em experiências, todavia são apenas balizadores das características do material.

Anexo 2
Planilha de cálculo da Lei de Archie

Conjunto	Amostra	Técnica	Corpo de Prova	ρ_b Ω.m	ρ_f Ω.m	F	n	Sr	e	w (%)	m	$F.n^m$	s	$n^{-m}.Sr^{-}_{s}$	$\rho_{b\ Archie}$ Ω.m
A	1	Placas	Menor	2990	71	42	0,46	0,06	0,85	2,0	-1,894	9,69	-1,258	141,76	10319
A	2	Módulo	Menor	17508	71	248	0,45	0,06	0,83	2,0	-1,894	55,09	-1,258	140,85	10253
A	3	Placas	Maior	1157	71	16	0,50	0,05	1,00	2,0	-1,894	4,48	-1,258	149,04	10849
A	4	Módulo	Maior	3221	71	46	0,48	0,06	0,92	2,0	-1,894	11,27	-1,258	144,51	10519
B	5	Placas	Menor	697	71	10	0,48	0,16	0,91	5,5	-1,894	2,42	-1,258	40,84	2973
B	6	Módulo	Menor	1493	71	21	0,47	0,17	0,90	5,7	-1,894	5,12	-1,258	38,75	2820
B	7	Placas	Maior	489	71	7	0,50	0,19	0,99	7,2	-1,894	1,85	-1,258	29,61	2155
B	8	Módulo	Maior	2884	71	41	0,49	0,18	0,98	6,7	-1,894	10,77	-1,258	32,01	2330
C	9	Placas	Menor	190	73	3	0,39	0,72	0,64	17,1	-1,894	0,44	-1,258	9,08	684
C	10	Módulo	Menor	312	73	4	0,42	0,55	0,74	15,2	-1,894	0,84	-1,258	10,78	811
C	11	Placas	Maior	391	73	5	0,46	0,63	0,86	20,2	-1,894	1,23	-1,258	7,73	582
C	12	Módulo	Maior	661	73	9	0,46	0,59	0,85	18,6	-1,894	2,07	-1,258	8,56	644
D	13	Placas	Menor	141	66	2	0,35	0,96	0,54	19,5	-1,894	0,30	-1,258	7,62	515
D	14	Módulo	Menor	477	66	7	0,36	0,89	0,55	18,4	-1,894	1,03	-1,258	8,18	553
D	15	Placas	Maior	152	66	2	0,38	0,94	0,61	21,4	-1,894	0,37	-1,258	6,84	462
D	16	Módulo	Maior	187	73	3	0,38	0,97	0,61	22,3	-1,894	0,41	-1,258	6,48	490
E	17	Placas	Menor	138	73	2	0,32	1,00	0,48	18,6	-1,894	0,22	-1,258	8,50	643
E	18	Módulo	Menor	205	73	3	0,33	1,00	0,50	19,4	-1,894	0,35	-1,258	7,97	603
E	19	Placas	Maior	138	73	2	0,39	0,95	0,63	22,3	-1,894	0,31	-1,258	6,48	490
E	20	Módulo	Maior	153	66	2	0,35	1,00	0,54	20,4	-1,894	0,32	-1,258	7,32	494