



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MARCO AURÉLIO BIZARRI

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE SONDA DE RESISTIVIDADE
ELÉTRICA PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO**

BAURU
2019

MARCO AURÉLIO BIZARRI

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE SONDA DE RESISTIVIDADE
ELÉTRICA PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO**

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.

Orientadora: Profa. Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto

Coorientador: Prof. Dr. Caio Gorla Nogueira

Bauru

2019



Bizarri, Marco Aurélio.

Construção e avaliação de sonda de resistividade elétrica para investigação do subsolo / Marco Aurélio Bizarri, 2019

98 f.

Orientadora: Anna Silvia Palcheco Peixoto

Coorientador: Caio Gorla Nogueira

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Sonda. 2. Resistividade elétrica. 3. Solo. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCO AURÉLIO BIZARRI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 02 dias do mês de dezembro do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Sala de Videoconferência (prédio antigo DEE), reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof^a. Dr^a. CRISTINA DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA do(a) Departamento de Geotecnia / Universidade de São Paulo - USP / São Carlos, Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCO AURÉLIO BIZARRI, intitulada **CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE SONDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO

Prof^a. Dr^a. CRISTINA DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA

Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

DEDICATÓRIA

Em memória dos meus queridos avós, Norma Albino e Antoni Bizarri.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela sua imensa bondade e inúmeras bênçãos concedidas.

Aos meus pais, pelo amor que sempre tiveram comigo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus Bauru, por ser minha casa durante esses oito anos.

Aos meus orientadores, Anna Silvia Palcheco Peixoto e Caio Gorla Nogueira, pela dedicação que tiveram comigo e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos.

Aos professores Heraldo Luiz Giacheti e José Alfredo Covolan Ulson, pela especial ajuda no desenvolvimento desse projeto.

A todos os demais professores Todos foram fundamentais para o meu desenvolvimento.

Aos técnicos dos Laboratórios da Engenharia Civil e da Engenharia Elétrica, da UNESP Campus Bauru, por serem sempre solícitos, atenciosos e além de tudo amigos.

Aos meus amigos do programa de pós-graduação da UNESP Campus Bauru, do CVU – Bauru, e em especial aos da ENACTUS – UNESP Bauru, por estarem muito presentes durante esse período.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos concedida.

Resumo

O sensor de resistividade elétrica acoplado ao Piezocone (CPTu) permite a obtenção do perfil de resistividade elétrica do solo, possibilitando a estimativa de alguns parâmetros tais como porosidade, grau de saturação e índice de comportamento do solo. Além disso, também é possível localizar preliminarmente a profundidade, tanto da intrusão de água salgada em aquíferos de água doce, e de plumas de contaminação, o que difundiu o uso do equipamento em investigações geoambientais. A técnica pode ser utilizada como um complemento ao caminhamento elétrico evidenciando anomalias no maciço que necessitem de uma análise mais criteriosa, direcionando ensaios de amostragem de água e solo. Contudo, um fato importante a ser mencionado, é que as sondas comerciais fornecem diretamente os valores da resistividade, não informando as variáveis de entrada, tais como forma, frequência e amplitude da onda do sinal gerado. Portanto, o objetivo dessa dissertação é apresentar a construção de uma sonda que realiza a leitura vertical da resistividade elétrica do solo, com dimensões externas similares ao do Piezocone de Resistividade Elétrica (RCPTu). A pesquisa considera o design das peças, análises mecânicas teóricas, a construção do equipamento, ensaios laboratoriais de calibração e campo elétrico em meio aquoso, e ensaios de campo. Além disso, foram realizados cálculos da probabilidade da ocorrência de cenários de falha estrutural, utilizando a teoria da confiabilidade. Por fim, os resultados dos ensaios de campo e do RCPTu foram comparados e as análises mostraram que os valores obtidos foram próximos.

Palavras chave: sonda, resistividade elétrica, solo.

Abstract

The electrical resistivity sensor connected in the Piezocone (CPTu) allows the logging of the soil electrical resistivity, permitting the evaluation of parameters such as porosity, degree of saturation and soil behavior type. In addition, it is also possible to preliminarily locate the depth of both saltwater intrusion in freshwater aquifers and contamination plumes, which has widespread the use of the equipment in geo-environmental investigations. The technique can be used as a complement to the vertical electrical sounding, showing anomalies in the massif that require a more careful analysis, conducting soil and water sampling tests. However, an important fact to be mentioned is that the commercial probes provide the electrical resistivity values directly, not informing the input variables, such as waveform, frequency and amplitude of the generated signal. Therefore, the purpose of this dissertation is to present the construction of a probe that logs the electrical resistivity of the soil, with external dimensions similar to the Resistivity Piezocone (RCPTu). The research considered the design of the pieces, theoretical mechanical analysis, the construction of the equipment, laboratory calibration and electric field in aqueous environment, and field tests. In addition, it was done calculations of the probability of occurrence of structural failure scenarios, using the reliability theory. Further, the results of field tests and RCPTu were compared and the analysis lead to close values.

Keywords: probe, electrical resistivity, soil.

Índice de Figuras

FIGURA 1. (A) CONFIGURAÇÃO DAS LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO DE UM DIPOLO, (B) LINHAS DE CAMPO EM UMA SUSPENSÃO DE FRAGMENTOS DE FIBRA EM ÓLEO (TIPPLER, 1999).....	17
FIGURA 2. ESBOÇO DE CAMPO ELÉTRICO NO SOLO GERADO POR UM ELETRODO, ADAPTADO DE PACHECO, 2004.	18
FIGURA 3. LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO PROVENIENTES DE UM ENSAIO COM RCPTu EM SOLUÇÃO SALINA (MODIFICADO DE DANIEL, 1999).	18
FIGURA 4. ESBOÇO DA ERCP, ADAPTADO DE KIM <i>ET AL.</i> (2011).....	19
FIGURA 5. CURVAS DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM RELAÇÃO AO TEOR DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO ARENOSO.	21
FIGURA 6. CURVAS DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM RELAÇÃO AO TEOR DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO ARGILOSO.	21
FIGURA 7. ESQUEMA DE CAIXA DE SOLO, ADAPTADO DE ZHOU <i>ET AL.</i> (2015).	25
FIGURA 8. MINIATURE RESISTIVITY PROBE, ADAPTADO DE AHN <i>ET AL.</i> (2007).....	26
FIGURA 9. DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS POR PEIXOTO <i>ET AL.</i> (2010).....	27
FIGURA 10. TRP, ADAPTADO DE JUNG <i>ET AL.</i> (2015).....	27
FIGURA 11. DISPOSITIVO DESENVOLVIDO POR MANFRIN <i>ET AL.</i> (2018), APADTADO DE MANFRIN <i>ET AL.</i> (2018).	28
FIGURA 12. ESBOÇO DO ENSAIO COM O MÓDULO DESENVOLVIDO, RETIRADO DE PEIXOTO (2013).	29
FIGURA 13. SONDA HTP, ADAPTADO DE HTTPS://GEOPROBE.COM/HPT-HYDRAULIC-PROFILING-TOOL 30	30
FIGURA 14. ESBOÇO DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL COM DUAS CAMADAS.	32
FIGURA 15. PERFIL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE UM ATERRO COM SISTEMA CONTRA VAZAMENTOS, ADAPTADO DE KODA <i>ET AL.</i> (2017).	34
FIGURA 16. RESULTADO TÍPICO DE UM ENSAIO RCPTu, ADAPTADO DE CAMPANELLA (2008).	36
FIGURA 17. ESBOÇO DE ENSAIO COM DOIS ELETRODOS, ADAPTADO DE SON <i>ET AL.</i> (2008).....	37
FIGURA 18. ESBOÇO DO ENSAIO COM HASTE E MÚLTIPLOS ELETRODOS, ADAPTADO DE OH <i>ET AL.</i> (2008).....	37
FIGURA 19. VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO DURANTE UMA CHUVA, ADAPTADO DE FEI FU <i>ET AL.</i> (2015).	39
FIGURA 20. PERFIL 2D DO SOLO GERADO POR SEV, ADAPTADO DE AEDOWYING <i>ET AL.</i> (2017).....	40
FIGURA 21. VISTA 3D DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO GERADA A PARTIR DO IE, ADAPTADO DE DAHLIN <i>ET AL.</i> (2013).....	40
FIGURA 22. PROJETO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO.	42
FIGURA 22. DETALHAMENTO DA PEÇA PRINCIPAL.....	43
FIGURA 23. DETALHAMENTO DAS PEÇAS ISOLANTES.	44
FIGURA 24. DETALHAMENTO DE UM ELETRODO.....	44
FIGURA 25. DETALHAMENTO DA PRIMEIRA LUVA.	45

FIGURA 26. DETALHAMENTO DA SEGUNDA LUVA.	45
FIGURA 27. DETALHAMENTO DA TERCEIRA LUVA.	46
FIGURA 29. ESQUEMA DAS VARIÁVEIS PRESENTES DURANTE A CRAVAÇÃO (A), E RETIRADA (B) DO EQUIPAMENTO DO SOLO.	47
FIGURA 30. DADOS DOS PERFIS E FORÇAS RESULTANTES.	52
FIGURA 31. EXEMPLO DE ESPAÇO NORMAL PADRÃO NÃO CORRELACIONADO.	54
FIGURA 32. ARRANJO DE WENNER UTILIZADO NA SONDA.	57
FIGURA 33. (A) DETALHE DA SOLDA DOS ELETRODOS; (B) DETALHE DOS ELETRODOS COM CABOS ELÉTRICOS.	58
FIGURA 34. PREPARAÇÃO DO SENSOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.	58
FIGURA 35. SENSOR LM35. (A) DETALHE DO SENSOR COM LIGAÇÕES NOS SEUS TERMINAIS. (B) SENSOR FIXADO NA PRIMEIRA LUVA.	59
FIGURA 36. DETALHE DAS LIGAÇÕES DOS CABOS ELÉTRICOS NO CONECTOR.	60
FIGURA 37. SONDA DESENVOLVIDA PARA LEITURA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA.	60
FIGURA 38. ESQUEMA DAS LIGAÇÕES ENTRE CANAIS E CONECTORES.	61
FIGURA 39. SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.	62
FIGURA 41. VERIFICAÇÃO DA ESTANQUEIDADE. (A) CÂMARA DE PRESSÃO. (B) SISTEMA DE AQUISIÇÃO E INTERFACE AR/ÁGUA.	64
FIGURA 42. RESULTADOS DO ENSAIO DE ESTANQUEIDADE.	64
FIGURA 43. EQUIPAMENTO POSICIONADO NO RECIPIENTE PARA ENSAIO AQUOSO.	66
FIGURA 44. ENSAIO AQUOSO EM ANDAMENTO.	68
FIGURA 45. CALIBRAÇÃO EM SOLUÇÃO COM ÁGUA POTÁVEL.	69
FIGURA 46. CALIBRAÇÃO EM SOLUÇÃO COM ÁGUA DEIONIZADA.	69
FIGURA 47. CURVA DE CALIBRAÇÃO.	70
FIGURA 48. ENSAIO DE CAMPO ELÉTRICO; (A) RÉGUA GRADUADA DE 2 EM 2 CM; (B) MULTÍMETRO DIGITAL; (C) SONDA GRADUADA DE 2 EM 2 CM.	71
FIGURA 49. CAMPO ELÉTRICO – 75 Ω M.	72
FIGURA 50. CAMPO ELÉTRICO – 20 Ω M.	72
FIGURA 51. CAMPO ELÉTRICO – 10 Ω M.	73
FIGURA 54. LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NO PARQUE VITÓRIA RÉGIA - BAURU.	74
FIGURA 55. INSTRUÇÕES PARA INICIAR O ARMAZENAMENTO DE DADOS DO ENSAIO.	75
FIGURA 56. (A) EQUIPAMENTO DE PENETRAÇÃO; (B) DETALHE DA SONDA NO EQUIPAMENTO.	75
FIGURA 58. CORREÇÕES PARA UMA TEMPERATURA DE 25 °C.	76
FIGURA 59. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA, E GRANULOMETRIA DE SANTOS <i>ET AL.</i> (2018).	78
FIGURA 60. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS ENSAIOS REALIZADOS NO PARQUE VITÓRIA RÉGIA - BAURU.	79
FIGURA 61. DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.	89

Índice de Tabelas

TABELA 1. RESULTADOS DE YAMASAKI (2012)	20
TABELA 2. VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO VARIANDO-SE O TEOR DE SALINIDADE DO FLUIDO, YAMASAKI (2012).	22
TABELA 3. RESISTIVIDADES ELÉTRICA E COEFICIENTES DE TEMPERATURA (GREF, 2005).....	23
TABELA 4. VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM O GRAU DE SATURAÇÃO E A TEMPERATURA.....	26
TABELA 5. CORRELAÇÕES ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS, LIN <i>ET AL.</i> (2016).	31
TABELA 6. RESUMO DE VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLOS E FLUIDOS, ADAPTADO DE DAVIES E CAMPANELLA (1995).....	33
TABELA 7. RELAÇÃO ENTRE IC E FC	35
TABELA 8. FORÇA MÁXIMA NA CRAVAÇÃO E RETIRADA.	47
TABELA 9. PARCELAS DE FORÇA NO AÇO E NA POLIAMIDA.....	49
TABELA 10. COMPRIMENTO MÍNIMO DA ROSCA.	50
TABELA 11. ÍNDICES DE CONFIABILIDADE-ALVO E PROBABILIDADES DE FALHA PARA ELS IRREVERSÍVEL (JCSS, 2001).	55
TABELA 12. ÍNDICES DE CONFIABILIDADE, PROBABILIDADES DE FALHA E SENSIBILIDADES PARA AS FORÇAS APLICADAS PELO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO.	56
TABELA 13. COEFICIENTES DE COMPENSAÇÃO PARA OS TIPOS DE SOLUÇÃO (<i>THERMO SCIENTIFIC ORION STAR™ AND STAR PLUS SERIES METER USER GUIDE</i> , 2008).	67

Lista de Siglas e Abreviaturas

CPT	–	Cone de Penetração
CPT _u	–	Piezocone
DMT	–	Dilatômetro de Marchetti
ERCP	–	<i>Electrical Resistivity Cone Probe</i>
FDP	–	Função Distribuição de Probabilidades
F.E.	–	Faculdade de Engenharia
GPR	–	Georadar
HPT	–	<i>Hydraulic Profiling Tool</i>
IE	–	Imageamento Elétrico
MRP	–	<i>Miniature Resistivity Probe</i>
NaCl	–	Cloreto de Sódio
RCPT _u	–	Piezocone de Resistividade Elétrica
RNA	–	Rede Neural Artificial
SEV	–	Sondagem Elétrica Vertical
TER	–	Tomografia de Resistividade Elétrica
TRP	–	<i>Temperature-Compensated Resistivity Rrobe</i>
UNESP	–	Universidade Estadual Paulista

Lista de Símbolos

α	—	Sensibilidade
$\alpha_{\theta_{ref}}$	—	Coeficiente de compensação da resistividade elétrica para uma temperatura Θ de referência
β	—	Índice de confiabilidade
ΔL	—	Variação do comprimento da peça
ΔL_A	—	Variação do comprimento da peça de aço
ΔL_P	—	Variação do comprimento da peça de poliamida
Δt	—	Variação de tempo
Δq	—	Variação de carga
ε_{rms}	—	Tensão rms
γ	—	Peso específico
γ_n	—	Peso específico natural do solo
ρ	—	Resistividade elétrica
ρ_{25}	—	Resistividade elétrica corrigida a uma temperatura de 25°C
ρ_{θ}	—	Resistividade elétrica à uma temperatura Θ
$\rho_{\theta_{ref}}$	—	Resistividade elétrica para uma temperatura Θ de referência
ρ_a	—	Resistividade do solo
ρ_{el}	—	Resistividade elétrica da solução eletrolítica
ρ_{sat}	—	Resistividade elétrica do solo saturado
ρ_w	—	Resistividade do fluído intersticial
σ_e	—	Tensão normal de escoamento do material
σ_{el}	—	Condutividade elétrica
$\sigma_{el\theta}$	—	Condutividade elétrica a uma temperatura qualquer
σ_{el25}	—	Condutividade elétrica corrigida para a temperatura de 25 °C
σ_{pd}	—	Desvio padrão
σ_p	—	Tensão atuante na poliamida
τ	—	Tensão atuante de cisalhamento
τ_e	—	Tensão limite de cisalhamento
θ	—	Temperatura
θ_{ref}	—	Temperatura de referência
v	—	Fator referente a área do sensor que sofre influência da poro-pressão
χ	—	Variáveis aleatórias
ψ	—	Variáveis determinísticas

A	—	Área da seção transversal
A_{Δ}	—	Variação de área
A_A	—	Área da seção transversal de aço
A_L	—	Área da superfície lateral
A_P	—	Área da seção transversal de poliamida
A_q	—	Área de ponta
A_s	—	Área lateral
a_t	—	Tortuosidade
B_q	—	Parâmetro de poro-pressão
D_{10}	—	Diâmetro efetivo
d	—	Raio do eletrodo
E	—	Módulo de Young
$\vec{E}$	—	Campo elétrico
E_A	—	Módulo de Young do aço
E_P	—	Módulo de Young da poliamida
e	—	Índice de vazios
e_e	—	Espaçamento entre os eletrodos
F	—	Força aplicada
$\vec{F}$	—	Força eletrostática
F_A	—	Força atuante no aço
F_P	—	Força atuante na poliamida
F_c	—	Força de cravação
$F_{m\acute{a}x}$	—	Força máxima aplicada
F_r	—	Força de retirada
f	—	Força aplicada pelo equipamento de cravação
f_s	—	Atrito lateral
f_t	—	Atrito lateral normalizado
FC	—	Teor de finos
FF	—	Fator de formação
$G(\chi,\psi)$	—	Curva da função estado limite
$G1$	—	Falha por compressão no aço
$G2$	—	Falha por tração no aço
$G3$	—	Falha por compressão da poliamida
$G4$	—	Falha por cisalhamento das luvas
I_c	—	Índice de comportamento do solo
i	—	Corrente elétrica

$i_{\text{máx}}$	—	Corrente elétrica máxima
i_{med}	—	Corrente elétrica média
i_{rms}	—	Corrente elétrica rms
IP	—	Índice de plasticidade
k	—	Fator de calibração
L	—	Comprimento inicial da peça
L_A	—	Comprimento da peça de aço
L_P	—	Comprimento da peça de poliamida
L_r	—	Comprimento da rosca
l	—	Comprimento do material
LL	—	Limite de liquidez
m	—	Constante relacionada ao fator de cimentação das partículas
n	—	Porosidade
P*	—	Ponto de projeto
P_f	—	Probabilidade de falha
q_0	—	Carga geradora do campo elétrico
q_c	—	Resistência de ponta
q_t	—	Resistência de ponta normalizada
R	—	Resistência elétrica
R^2	—	Coefficiente de determinação
r	—	Raio
r_s	—	Coefficiente de Spearman
$R(\chi, \psi)$	—	Função de resistência
S	—	Grau de saturação
$S(\chi, \psi)$	—	Função de solicitação
TS	—	Teor de sais
u	—	Porosidade
u_2	—	Porosidade medida logo acima da ponta do cone
V	—	Diferença de potencial
w	—	Teor de umidade
z	—	Profundidade

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas.....	v
Lista de Siglas e Abreviaturas	vi
Lista de Símbolos	vii
Sumário	x
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Fenômeno da Condução Elétrica	15
3.2 Fatores Intervenientes na Medida da Resistividade Elétrica.....	19
3.3 A Influência da Temperatura na Resistividade Elétrica	22
3.4 Sondas Desenvolvidas	26
3.5 Correlações com a Resistividade Elétrica	29
3.6 A Resistividade Elétrica e Problemas Ambientais.....	32
4 PROJETO DA Sonda DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	42
4.1 Projeto do Equipamento	42
4.2 Análise Mecânica	46
4.2.1 Verificação à Compressão e Tração no Aço	46
4.2.2 Verificação à Compressão da Poliamida	48
4.2.3 Verificação ao Cisalhamento na Ligação das Luvas	49
4.2.4 Testes Teóricos para Três Perfis Analisados	50
4.3 Análise Utilizando a Teoria da Confiabilidade.....	53
4.3.1 Formulação do Problema	54
4.3.2 Resultados e Análises	55
5 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO	57
5.1 Sensor de Resistividade Elétrica	57

5.2	<i>Sensor de Temperatura</i>	59
5.3	<i>Construção da Sonda de Resistividade Elétrica</i>	59
5.4	<i>Aquisição de Dados</i>	60
6	ENSAIOS, RESULTADOS E ANÁLISES	63
6.1	<i>Verificação da Estanqueidade</i>	63
6.1.1	Material	63
6.1.2	Procedimento	63
6.1.3	Resultado e Análises	64
6.2	<i>Calibração em Meio Aquoso em Laboratório</i>	65
6.2.1	Material	65
6.2.2	Procedimento	65
6.2.3	Resultado e Análises	68
6.3	<i>Avaliação do Campo Elétrico em Meio Aquoso em Laboratório</i>	70
6.3.1	Material	70
6.3.2	Procedimento	71
6.3.3	Resultado e Análises	72
6.4	<i>Ensaio de Campo</i>	73
6.4.1	Material	74
6.4.2	Procedimento	74
6.4.3	Resultados e Análises	75
7	Conclusões	80
7.1	<i>Sugestões para Continuidade da Pesquisa</i>	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	Anexo	88

1 INTRODUÇÃO

Dada a dificuldade da investigação de grandes áreas para localização de plumas de contaminantes, métodos geofísicos como Georadar (GPR), Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical (SEV), começaram a ser utilizados por permitirem o cobrimento de uma vasta área em um curto espaço de tempo, possibilitando por meio do contraste da resistividade elétrica a localização de pontos com maiores probabilidades de contaminação.

Assim nesses pontos são utilizadas técnicas de alta resolução para direcionar uma avaliação complementar, como a técnica do Piezocone de Resistividade Elétrica (RCPTu), que realiza medidas contínuas e com alta nitidez da resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), poro pressão (u) e da resistividade elétrica (ρ).

Dessa maneira, as leituras de resistividade elétrica obtidas no campo são comparadas a valores brancos e/ou a valores característicos de ambientes geológicos similares, possibilitando direcionar os estudos mais detalhados em profundidades discretas por meio da coleta de amostras de solo ou água, para as áreas onde há uma maior possibilidade de contaminação, minimizando assim os custos e o tempo de análise de uma grande área.

Entretanto, a experiência adquirida até o momento demonstrou que os solos desenvolvidos em climas tropicais apresentam comportamentos diferentes dos solos de países temperados, onde a maioria das pesquisas foram desenvolvidas. Dessa maneira, existe a necessidade de estudos específicos que visem avaliar os fatores intervenientes na resistividade elétrica do solo, tais como: mineralogia, índice de vazios, teor de umidade, grau de saturação, sucção matricial e temperatura (PEIXOTO *et al.*, 2014; PREGNOLATO *et al.*, 2016).

E embora o RCPTu esteja disponível comercialmente, o estudo dos fatores intervenientes é restringido, pois não há como alterar os parâmetros de entrada. Portanto, o desenvolvimento de uma sonda de resistividade elétrica que possibilite variar a forma,

frequência e amplitude do sinal gerado, permitirá desenvolver um estudo sobre o comportamento dessas variáveis em solos desenvolvidos em climas tropicais.

Nesse sentido, essa dissertação foi estruturada de modo em que no capítulo 3, “Revisão Bibliográfica”, apresenta os conceitos básicos para o entendimento do fenômeno da condução elétrica; os estudos de vários pesquisadores sobre os fatores intervenientes na medida da resistividade elétrica; as sondas desenvolvidas; as correlações existentes com a resistividade elétrica; e a sua utilização em problemas ambientais.

No capítulo 4, “Projeto da Sonda de Resistividade Elétrica”, se discorre sobre o projeto do equipamento, desde a sua concepção, análise mecânica teórica para esforços de tração e compressão e uma análise utilizando a teoria da confiabilidade, onde são apresentadas as probabilidades de falha do equipamento nos três cenários analisados.

O capítulo 5, “Construção do Equipamento”, se refere ao passo-a-passo da construção dos sensores e da sonda de resistividade elétrica, bem como a construção do sistema de aquisição de dados utilizado e o reparo do profundímetro.

No capítulo 6, “Ensaio, Resultados e Análises”, são descritos todos os ensaios e resultados que corroboraram com a verificação da funcionalidade da sonda, além das análises realizadas para cada ensaio.

E por fim, no capítulo 7, “Conclusões”, são apresentadas as considerações finais da pesquisa, além de sugestões para continuidade da própria.

2 OBJETIVOS

O objetivo dessa pesquisa é desenvolver uma sonda para leitura vertical da resistividade elétrica do solo, com dimensões similares do RCPTu, e de modo que seja possível o controle dos parâmetros de entrada, ou seja, da forma, frequência e amplitude da onda do sinal gerado.

Além de contribuir para o desenvolvimento da linha de pesquisa “Investigação e Monitoramento Geoambiental”, e do grupo de pesquisa “Geotecnia e Saneamento Ambiental”, tal projeto tem os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um projeto da sonda com dimensões externas similares às do RCPTu, e internas de modo a permitir a acomodação de cabos elétricos, sensor de temperatura e conector;
- Realizar análises teóricas mecânicas e de confiabilidade para verificar e alterar quando necessário as dimensões do projeto;
- Construir a sonda com sensor de resistividade elétrica e de temperatura;
- Verificar a vedação da sonda;
- Desenvolver um *software* para aquisição de dados que permita a leitura da resistividade elétrica em ensaios laboratoriais e de campo;
- Obter a curva de calibração e o campo elétrico gerado pela sonda por meio de ensaios laboratoriais em meio aquoso;
- Realizar ensaios de campo com a sonda e com o RCPTu, afim de comparar os dados dos ensaios e avaliar a funcionalidade da sonda desenvolvida.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fenômeno da Condução Elétrica

Define-se corrente elétrica como um fluxo ordenado de cargas elétricas, em um determinado período de tempo, que passam pela área de um condutor, e que pode ser mensurada pela equação (1).

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que: i , corrente elétrica; Δq , variação de carga; Δt , variação de tempo.

A corrente elétrica pode ser contínua ou alternada. Na corrente contínua um fluxo unidirecional e com sentido constante ao longo do tempo ocorre devido a uma fonte composta por um polo positivo e outro negativo, como os encontrados em pilhas e baterias.

Na corrente alternada o sentido da corrente é alterado com o tempo, devido a polarização da fonte que varia ao longo do tempo, gerando uma troca entre os polos positivo e negativo, como ocorre em rede elétrica residencial (TIPPLER, 1999).

O valor absoluto da corrente alternada pode ser representado por uma função, geralmente senoidal, por ser o tipo de transmissão mais eficiente, e o seu valor é notado pela abreviação rms, que significa *root mean square*, ou raiz quadrada do valor médio ao quadrado, podendo ser calculada pela equação (2) (TIPPLER, 1999).

$$i_{rms} = \sqrt{i_{med}^2} \quad (2)$$

Em que: i_{rms} , corrente elétrica em rms; i_{med} , corrente elétrica média.

No caso do experimento realizado nessa pesquisa, onde o tipo de onda gerada é senoidal, o valor da corrente rms é obtido pela equação (3), e devido ao fato de que os eletrodos são de materiais ôhmicos, também é possível relacionar a corrente rms com a resistência elétrica através da equação (4) (TIPPLER, 1999)

$$i_{rms} = \frac{i_{máx}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$i_{rms} = \frac{\varepsilon_{rms}}{R} \quad (4)$$

Em que: $i_{máx}$, corrente elétrica máxima; ε_{rms} , tensão em rms; R, resistência elétrica.

A resistência elétrica é a capacidade de limitar passagem de uma corrente elétrica por um corpo qualquer, sob influência de um campo elétrico, podendo ser expressa pela primeira lei de Ohm equação (5) (TIPPLER, 1999).

$$R = \frac{V}{i} \quad (5)$$

Em que: V, diferença de potencial.

Mas diferente da resistência, a resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca do material, sendo a capacidade deste em se opor à passagem de corrente elétrica, dada pela segunda lei de Ohm equação (6) (TIPPLER, 1999).

$$\rho = \frac{AR}{l} \quad (6)$$

Em que: ρ , resistividade elétrica; A, área da seção transversal; l, comprimento do material.

A condutividade elétrica é o inverso da resistividade, indicando a capacidade do material em transmitir uma corrente elétrica, sendo expressa pela equação (7).

$$\sigma_{el} = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

Onde: σ_{el} , condutividade elétrica.

Outro fator importante para a pesquisa é o campo elétrico, expresso pela equação (8), que nada mais é do que um espaço sobre a influência de uma carga geradora. Dentro do campo elétrico uma carga elétrica qualquer sofrerá uma ação de uma força eletrostática de atração, quando as cargas tiverem sinais opostos, ou repulsão, quando tiverem o mesmo sinal.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (8)$$

Em que: $\vec{E}$, campo elétrico; $\vec{F}$, força eletrostática; q_0 , carga geradora do campo elétrico.

Decompondo o campo elétrico gerado por uma carga positiva pontual em vetores, aparecerão linhas de campo que indicam em cada ponto o módulo e a direção da força exercida sobre uma carga de prova. A partir das linhas de campo que possuem módulos iguais, é possível traçar superfícies equipotenciais (TIPPLER 1990).

Em um campo elétrico produzido por um dipolo, a partícula de carga positiva irá gerar linhas de campo elétrico que se orientam para o seu exterior, enquanto partícula com carga negativa direciona as linhas de campo para o seu interior, tendo uma configuração similar a observada na Figura 1 (TIPPLER 1990).

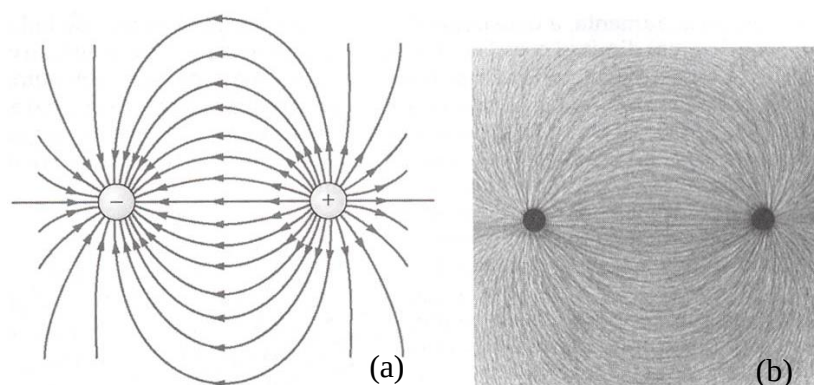


Figura 1. (a) Configuração das linhas de campo elétrico de um dipolo, (b) linhas de campo em uma suspensão de fragmentos de fibra em óleo (Tipler, 1999).

Além da configuração das cargas geradoras, o campo elétrico também depende do meio em que está inserido. Em um meio ideal a propagação ocorre uniformemente devido à ausência de barreiras físicas que alteram a trajetória dos elétrons, assim as linhas equipotenciais formadas são perfeitamente esféricas. Um exemplo de um meio ideal é uma solução aquosa.

Porém, como o solo é um meio particulado e trifásico, a trajetória dos elétrons acaba sendo alterada, e as linhas equipotenciais ficam destorcidas, como visto no exemplo da Figura 2 (PACHECO, 2014).

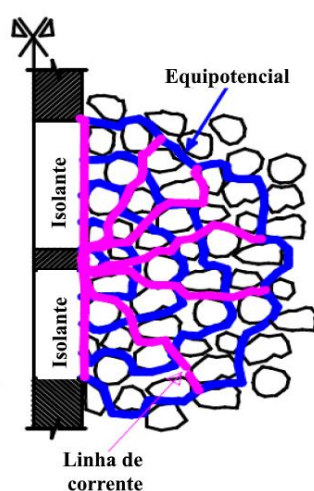


Figura 2. Esboço de campo elétrico no solo gerado por um eletrodo, adaptado de Pacheco, 2004.

Daniel *et al.* (1999) com um RCPTu fizeram a leitura do campo elétrico em um ensaio aquoso com solução salina e verificaram que as linhas equipotenciais foram semelhantes com as da teoria, Figura 3.

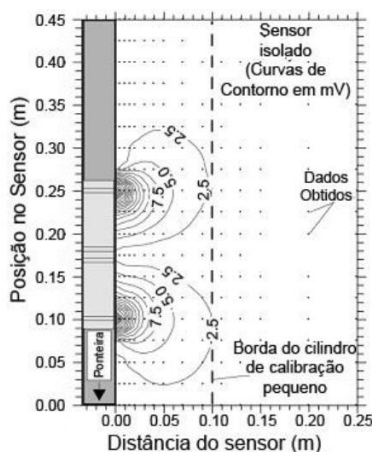


Figura 3. Linhas de campo elétrico provenientes de um ensaio com RCPTu em solução salina (modificado de DANIEL, 1999).

3.2 Fatores Intervenientes na Medida da Resistividade Elétrica

No solo, por ser em meio trifásico, a resistividade elétrica depende de vários fatores, dentre os quais se destacam: a resistividade das partículas de solo e dos fluidos intersticiais; o formato dos grãos; a porosidade; a disposição dos poros; teor de umidade; grau de saturação; mineralogia; etc.

Em solos arenosos, a corrente elétrica caminha através dos fluidos intersticiais, tendo em vista que partículas de areia, ar e contaminantes de fase não aquosa (NAPLs) podem ser considerados isolantes, facilitando correlações entre os índices físicos e a resistividade (CAMPANELLA e WEEMEES, 1990; AHN *et al.*, 2007; CAMPANELLA 2008; KIM *et al.*, 2009). Em contrapartida, nos solos argilosos e orgânicos, a condução elétrica ocorre também através da troca catiônica, que ocorre entre as superfícies das partículas do solo, dificultando as correlações (CAMPANELLA e WEEMEES 1990; LONG *et al.*, 2012; CHOO *et al.*, 2016).

Além dos fatores intervenientes mencionados, a cravação do equipamento gera perturbações no solo, modificando seus parâmetros e consequentemente o valor da sua resistividade elétrica. Assim, para diminuir a influência desse fator em solos litorâneos, Kim *et al.* (2011) utilizou uma ferramenta chamada *Electrical Resistivity Cone Probe* (ERCP) (Figura 4), semelhante ao RCPTu, porém com um diâmetro menor.

Além da ERCP gerar uma perturbação menor no solo, Kim *et al.* (2011) também estimaram a velocidade de cravação levando em consideração o coeficiente de dissipação da poro-pressão para os solos estudados, variando entre 1,0 e 3,3 mm/s, que é uma velocidade baixa quando comparada aos 20 mm/s do RCPTu.

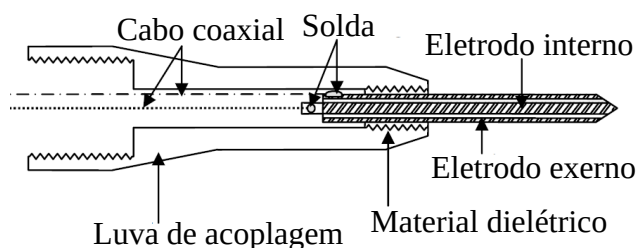


Figura 4. Esboço da ERCP, adaptado de Kim *et al.* (2011).

Através da leitura da resistividade elétrica em um ensaio laboratorial e em ensaios de campo, utilizando a lei de Archie para estimar o índice de vazios, obtiveram bons resultados comparando com os valores obtidos através de ensaios convencionais, como o ensaio edométrico (KIM *et al.*, 2011).

Yamasaki (2012) estudou a influência da salinidade do fluido intersticial na avaliação da resistividade elétrica e na compactação. Nesse estudo a autora variou o teor de massa de cloreto de sódio (NaCl) no fluido de percolação em amostras com dois tipos de solos tropicais: uma argila pouco arenosa, residual de diabásio, proveniente do município de Piracicaba e uma areia argilosa, resultante de um colúvio na bacia sedimentar do Paraná, região de Bauru.

O fator de formação (FF), expresso pela equação (9) (ARCHIE, 1942), que é a razão entre a resistividade efetiva do solo saturado e a resistividade do fluido, também foi utilizado para interpretação da resistividade elétrica do solo. Os resultados podem ser observados na Tabela 1 (YAMASAKI, 2012).

$$FF = n^{-m} \quad (9)$$

Em que: FF, fator de formação; n, porosidade do solo; m, constante que depende do grau de cimentação das partículas, variando de 1,5 para areias e entre 1,8 a 3,0 para argilas (JACKSON *et al.*, 1978)

Tabela 1. Resultados de Yamasaki (2012)

Solo	Fluido	$\rho_{\text{sat}} (\Omega\text{m})$	$\rho_w (\Omega\text{m})$	FF _{médio}
Arenoso	Água destilada	680,37	10000	0,07
	Água potável	577,26	74,87	7,71
	250 PPM	146,39	19,11	7,67
	500 PPM	71,05	9,75	7,28
Argiloso	Água destilada	52,50	10204,08	0,01
	Água potável	39,55	74,91	0,53
	250 PPM	36,76	19,16	1,92
	500 PPM	25,22	9,72	2,6

Pela Tabela 1 observa-se que desprezando os resultados com água destilada, para o solo argiloso houve um aumento no FF conforme o aumento de NaCl no fluido intersticial, pois os íons da solução reagem com os da superfície específica dos argilominerais, aumentando assim a resistividade elétrica do solo. Porém no solo arenoso não houve mudança no FF.

Yamasaki (2012) também realizou ensaios de compactação mini-MCV variando o teor de umidade, e obteve a resistividade elétrica de cada amostra através do ensaio com placas de cobre logo após cada compactação no cilindro. As curvas de variação da resistividade em relação ao teor de umidade podem ser observadas nas Figura 5 e Figura 6, e os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 2.

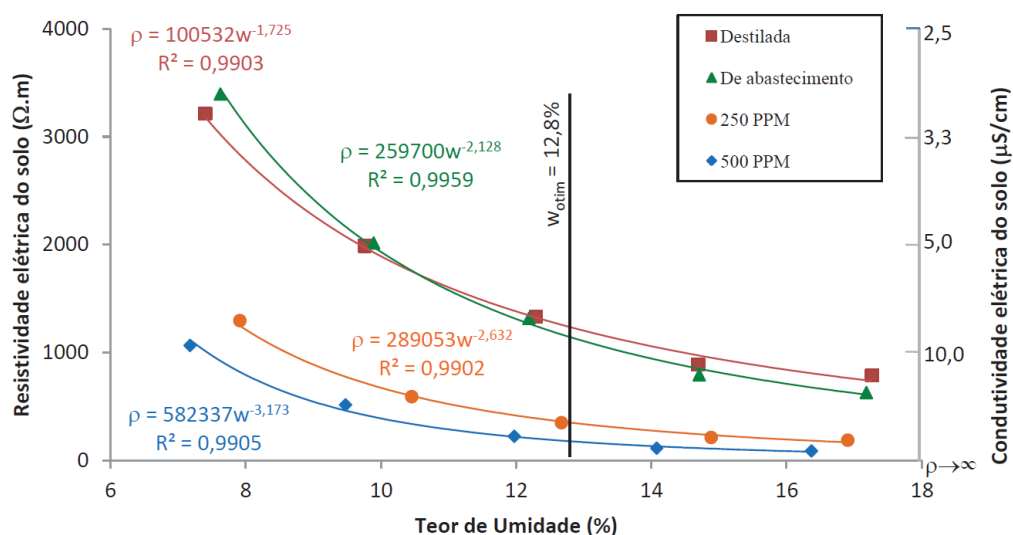


Figura 5. Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o solo arenoso.

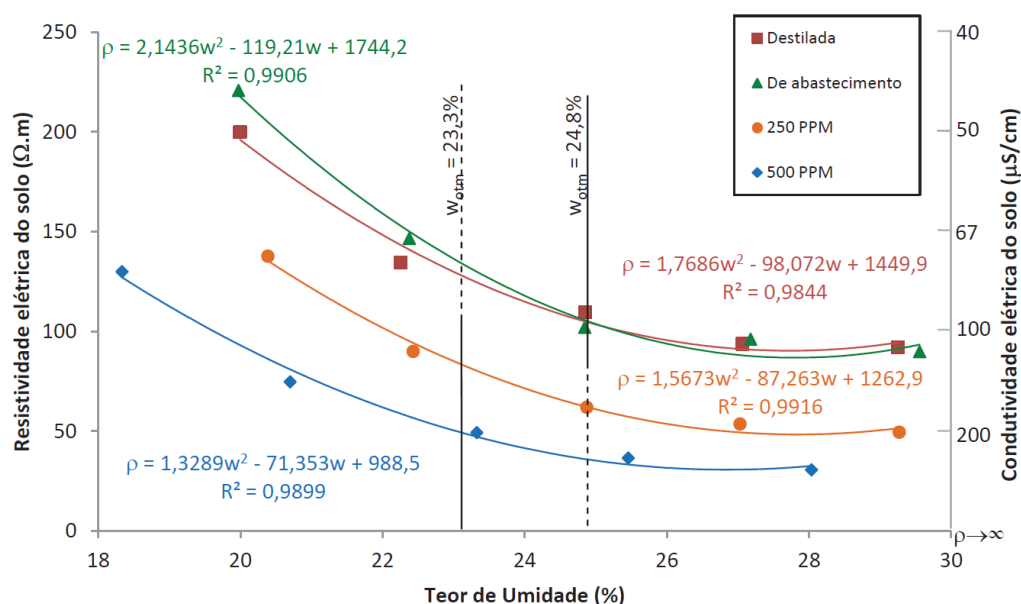


Figura 6. Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o solo argiloso.

Analisando as Figura 5 e Figura 6, e a Tabela 2, se pode observar que com o aumento do teor de umidade a resistividade elétrica diminui, tendendo à permanecer constante a partir de um certo ponto.

Tabela 2. Valores médios obtidos nos ensaios de compactação variando-se o teor de salinidade do fluido, Yamasaki (2012).

Amostra	Fluido	w (%)	ρ_b (Ω m)	e	S (%)
Solo arenoso	Água destilada $\sim \rho = \infty$	7,4	3213	0,55	35,6
		9,8	1987	0,46	56,9
		12,3	1333	0,42	78,6
		14,7	890	0,42	90,8
		17,3	789	0,52	87,7
	Água de abastecimento $\sim \rho = 77 \Omega$ m	7,6	3394	0,57	36,24
		9,9	2015	0,46	56,67
		12,2	1317	0,42	77,48
		14,7	793	0,43	91
		17,2	629	0,51	88,35
	250 ppm $\sim \rho = 20 \Omega$ m	7,9	1296	0,53	39,91
		10,5	592	0,45	61,97
		12,7	350	0,41	82,1
		14,9	214	0,44	90,25
		16,9	189	0,51	88,54
	500 ppm $\sim \rho = 10 \Omega$ m	7,2	1066	0,57	33,63
		9,5	515	0,47	53,22
		12	224	0,42	75,71
		14,1	114	0,41	91,11
		16,4	88	0,48	90,23
Solo argiloso	Água destilada $\sim \rho = \infty$	20	200	0,97	59,54
		22,3	134	0,84	75,62
		24,8	110	0,82	87,17
		27,1	94	0,88	88,12
		29,2	92	0,91	91,82
	Água de abastecimento $\sim \rho = 77 \Omega$ m	20	221	0,96	59,94
		22,4	146	0,85	75,77
		24,8	102	0,82	87,05
		27,2	96	0,87	89,78
		29,6	90	0,93	91,86
	250 ppm $\sim \rho = 20 \Omega$ m	20,4	138	0,91	64,36
		22,4	90	0,83	77,74
		24,9	62	0,84	85,32
		27	54	0,87	89,37
		29,3	49	0,92	90,99
	500 ppm $\sim \rho = 10 \Omega$ m	18,3	130	1,03	51,03
		20,7	75	0,96	61,56
		23,3	49	0,88	76,04
		25,5	37	0,84	86,57
		28	31	0,89	90,71

3.3 A Influência da Temperatura na Resistividade Elétrica

A variação da temperatura de um material acarreta na alteração da energia cinética dos seus componentes iônicos, e conseqüentemente no número de elétrons livres, e também

modifica a sua viscosidade, fatores esses que influenciam na resistividade elétrica desse material (MIRANDA, *et al.* 1997).

A variação da resistividade elétrica com a temperatura tem um comportamento próximo ao linear, podendo ser expresso pela equação (10).

$$\rho_{\theta} = \rho_{\theta_{ref}} [1 + \alpha_{\theta_{ref}} (\theta - \theta_{ref})] \quad (10)$$

Em que: ρ_{θ} , resistividade elétrica à uma temperatura θ qualquer; $\rho_{\theta_{ref}}$, resistividade elétrica para uma temperatura θ de referência; $\alpha_{\theta_{ref}}$, coeficiente de compensação da resistividade elétrica para uma temperatura θ de referência; θ , temperatura; θ_{ref} , temperatura de referência.

Exceção se faz para temperaturas próximas de zero absoluto, quando a resistividade elétrica de alguns metais e materiais cerâmicos tende a zero, fenômeno esse conhecido como supercondutividade

Na Tabela 3 observa-se que para a maioria dos metais puros o aumento da temperatura acarreta no aumento da resistividade elétrica. Esse fato pode ser explicado porque com a elevação da temperatura o efeito da agitação das moléculas é superior ao efeito do aumento dos elétrons livres, o que dificulta a passagem dos elétrons, aumentando o valor da resistividade elétrica. Porém, em alguns materiais como carbono, germânio e silício, a resistividade elétrica diminui conforme o aumento da temperatura.

Tabela 3. Resistividades elétrica e coeficientes de temperatura (GREF, 2005).

Material	Resistividade específica (θ = 20 °C) (Ωm)	Coeficiente de compensação (α_{20}) (°C ⁻¹)
Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Chumbo	$2,2 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Estanho	$1,2 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Ferro	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Níquel	$7,8 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-3}$
Platina	$1,1 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Prata	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Carbono	$3,5 \times 10^{-5}$	$-5,0 \times 10^{-4}$
Germânio	$4,5 \times 10^{-1}$	$-4,8 \times 10^{-2}$
Silício	$6,4 \times 10^{-2}$	$-7,5 \times 10^{-2}$
Constantan	$5,0 \times 10^{-1}$	$-4,0 \times 10^{-5}$ a $1,0 \times 10^{-5}$

Por outro lado, em soluções eletrolíticas, de acordo com Abu-Hassanein *et al* (1996), o aumento da temperatura acarreta na diminuição da viscosidade da solução, reduzindo o valor da resistividade elétrica. Além disso, de acordo com Miranda *et al* (1997), o aumento da temperatura também eleva a energia cinética média dos componentes iônicos, aumentando a capacidade de condução iônica e consequentemente diminuindo a resistividade elétrica.

Assim, a equação (11) descreve o efeito da temperatura para soluções eletrolíticas (JUNG *et al.*, 2015).

$$\rho_{el} = \frac{\rho_{\theta ref}}{1 + \alpha_{\theta ref}(\theta - \theta_{ref})} \quad (11)$$

Em que: ρ_{el} , resistividade elétrica da solução eletrolítica.

A resistividade elétrica do solo é geralmente expressa para uma temperatura de referência de 25 °C, assim, quando a resistividade é medida em uma temperatura qualquer, são realizados ajustes por meio de modelos de correção, facilitando a comparação dos resultados (MA *et al.*, 2011; ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996).

Dentre os modelos de correção mais utilizados, se pode citar o modelo linear (BARRY *et al.*, 2008; HAYASHI, 2004), equação (12), o modelo polinomial (BESSON *et al.*, 2008; RHOADES *et al.*, 1999), equação (13), os modelos exponenciais, como o de Sheets e Hendrickx corrigido (CORWIN & LESCH, 2005), equação (14), e o por Benson *et al.* (2008), equação (15), dentre outros.

$$\sigma_{el25} = \frac{\sigma_{el\theta}}{1 + \alpha_{\theta ref}(\theta - 25)} \quad (12)$$

$$\sigma_{el25} = [1 - 0,020346(\theta - 25) + 0,0003822(\theta - 25)^2 + 0,00000555(\theta - 25)^3] \sigma_{el\theta} \quad (13)$$

$$\sigma_{el25} = \sigma_{el\theta} \left[0,4470 + 1,4034e^{(-\theta/26,815)} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_{el25} = \sigma_{el\theta} \left(\frac{25}{\theta} \right)^{0,3} \quad (15)$$

Em que: σ_{el25} , condutividade elétrica corrigida para a temperatura de 25 °C; $\sigma_{el\theta}$, condutividade elétrica a uma temperatura qualquer.

Ma *et al.* (2011) compararam vários modelos de correção entre si, e observando as variações residuais de acordo com a tabela de correção da *U.S. Salinity Laboratory*, notaram que o modelo que tem a menor variação residual é o de Sheets e Hendrickx corrigido (CORWIN & LESCH, 2005), com erro de aproximadamente 0,14%, assim, recomendam que para correções seja usado esse modelo, ou o modelo linear, para temperaturas variando entre 3 e 50 °C.

E para verificar a influência da temperatura na resistividade elétrica do solo, também foram realizados ensaios de laboratório.

Zhou *et al* (2015) por meio de ensaios laboratoriais utilizando uma caixa de solo com quatro eletrodos, como visto na Figura 7, efetuaram a leitura da resistividade elétrica para cinco tipos de solo em uma câmara de testes, aonde a temperatura variou de 45 a -20 °C, e observaram que a influência desse fator pode ser dividida em três estágios.

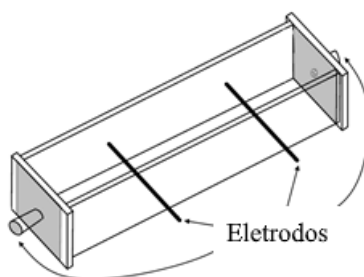


Figura 7. Esquema de caixa de solo, adaptado de Zhou *et al* (2015).

No primeiro estágio, para temperaturas acima de zero, a resistividade elétrica tende a diminuir levemente conforme o aumento da temperatura, o que pode ser explicado pelo fato de que com o aumento da temperatura acontece um aumento na mobilidade dos íons, devido a diminuição da viscosidade do fluido intersticial.

No segundo estágio, durante a transição próxima a 0 °C, a resistividade elétrica tem uma queda repentina, que é ligada ao processo de formação de gelo nessa temperatura. E no terceiro estágio, para temperaturas abaixo de zero, a resistividade elétrica diminui drasticamente conforme o aumento da temperatura, o que não era esperado, pois como todo fluido intersticial está congelado, se imaginava que toda condutividade elétrica do solo dependa somente das partículas de argilominerais.

Outra pesquisa que também utilizou a caixa de solo para verificar a influência da temperatura na resistividade elétrica do solo foi a desenvolvida por Kouchaki *et al.* (2019). Nessa pesquisa foram preparados 3 solos arenosos mal graduados, com teor de umidade de 10, 50 e 100%, e por meio do ensaio com caixa de solo as resistividades elétricas foram medidas para temperaturas de 10 e 30 °C. Os resultados mostraram que, para um mesmo grau de saturação, a porcentagem média da variação da resistividade elétrica foi de 27% a cada 10 °C (Tabela 4).

Tabela 4. Variação da resistividade elétrica com o grau de saturação e a temperatura.

Saturação (%)	Temperatura (°C)	Resistividade elétrica (Ωm)	Diferença ($\%10^{\circ}\text{C}^{-1}$)
10	10	1265	26
10	30	799	
50	10	265	28
50	30	162	
100	10	111	27
100	30	69	

3.4 Sondas Desenvolvidas

Algumas das sondas para leitura da resistividade elétrica desenvolvidas foram feitas em tamanho reduzido, como a *Miniature Resistivity Probe* (MRP) que foi concebida por Ahn *et al.* (2007), e pode ser observada na Figura 8. Seu corpo é feito de policarbonato e eletrodos de aço inox, seguindo o arranjo de Wenner. A MRP é alimentada por fonte externa, em que uma corrente é transmitida entre os eletrodos externos o que gera um campo elétrico, e os eletrodos internos realizam a leitura de V.

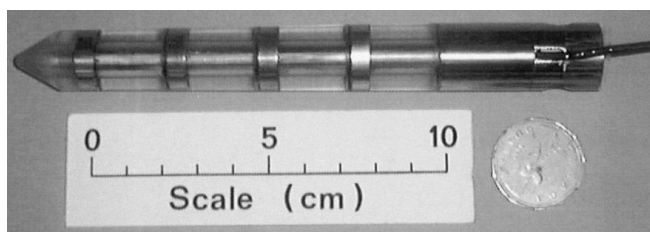


Figura 8. Miniature resistivity probe, adaptado de Ahn *et al.* (2007).

Em solos arenosos preparados em laboratório, utilizando a MPR, foi observado que o acréscimo da concentração de chumbo, níquel, cobre ou zinco nas amostras gerou uma

diminuição da sua resistividade elétrica em torno de 200 Ω m, sendo suficiente para que fosse caracterizada a contaminação, podendo até mesmo ser utilizada para delimitar a pluma de contaminantes (AHN *et al.*, 2007).

Porém nas amostras com fenol e gasolina, os valores da resistividade elétrica aumentaram ligeiramente conforme o aumento da concentração desses contaminantes, mas esse aumento não foi suficiente para caracterizar uma possível contaminação através dos ensaios com o equipamento (AHN *et al.*, 2007).

Peixoto *et al.* (2010) desenvolveram dois dispositivos para leitura da resistividade elétrica do solo, ambos com corpo de poliamida e eletrodos feitos com uma liga de cobre e zinco (Figura 9). Assim, foram realizados ensaios laboratoriais em meio aquoso com os dois dispositivos e também com o RCPTu, e verificaram que o diâmetro dos equipamentos teve pouca influência na leitura da resistividade elétrica.

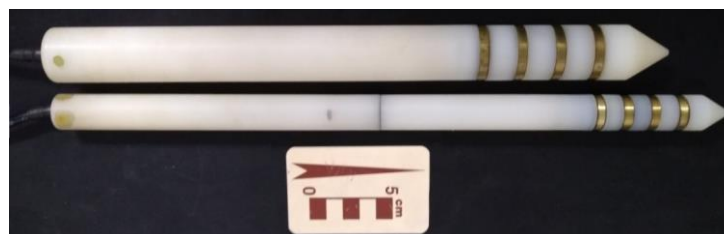


Figura 9. Dispositivos desenvolvidos por Peixoto *et al.* (2010).

Para verificar o aumento de temperatura durante a cravação, Jung *et al.* (2015) desenvolveram uma ferramenta chamada *Temperature-Compensated Resistivity Probe* (TRP) (Figura 10), que consiste em uma sonda com as mesmas dimensões do RCPTu, mas composta apenas por um módulo de resistividade elétrica de dois eletrodos, e três sensores de temperatura.



Figura 10. TRP, adaptado de Jung *et al.* (2015).

Jung *et al.* (2015) conduziram um ensaio de campo onde a TRP foi introduzida no solo a partir de um pré-furo com encapsulamento de aço, até a profundidade de seis metros, a partir da qual a sonda começou a ser cravada. Nesse ensaio observou-se que ao longo de 6,5 m de cravação em um solo argiloso, a temperatura foi elevada em 4°C.

Outro dispositivo similar aos desenvolvidos por Peixoto *et al.* (2010), é o de Manfrin *et al.* (2018), que foi fabricado com os mesmos materiais, mas tem um modelo construtivo diferente. Ao invés de utilizar um corpo maciço de poliamida, ele é composto por anéis que se encaixam, possibilitando variar o tamanho dos eletrodos e a distância entre eles (Figura 11).

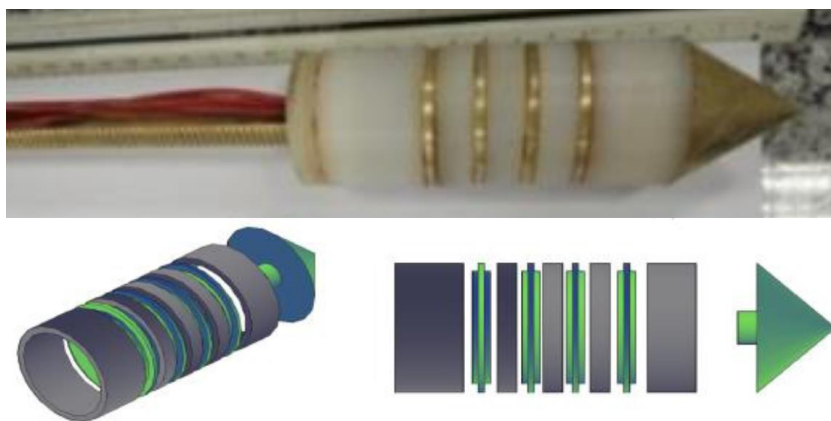


Figura 11. Dispositivo desenvolvido por Manfrin *et al.* (2018), adaptado de Manfrin *et al.* (2018).

Contudo, também existem sondas desenvolvidas com dimensões similares ao comercial, como o módulo de resistividade elétrica e sísmico que pode ser acoplado ao Dilatômetro de Marchetti (DMT) criado por Bang *et al.* (2008), Figura 12. Esse módulo segue o arranjo de Wenner, e para determinação do fator de calibração foi utilizada a equação (16), proposta por Fukue *et al.* (2001), resultando em um fator de calibração com valor de 1,478.

$$k = \frac{\pi^2}{\left(\frac{2}{d + e_e} - \frac{2}{d + 2e_e}\right)} \quad (16)$$

Em que: k, fator de calibração; d, raio do eletrodo; e_e , espaçamento entre os eletrodos.

Porém, como a equação (16) não contempla um fator que considera a espessura do eletrodo, e devido à dificuldade de se obter uma equação exata para um módulo com uma forma complexa, Bang *et al.* (2008) optaram pela adoção do coeficiente obtido empiricamente através da calibração em meio aquoso em laboratório.

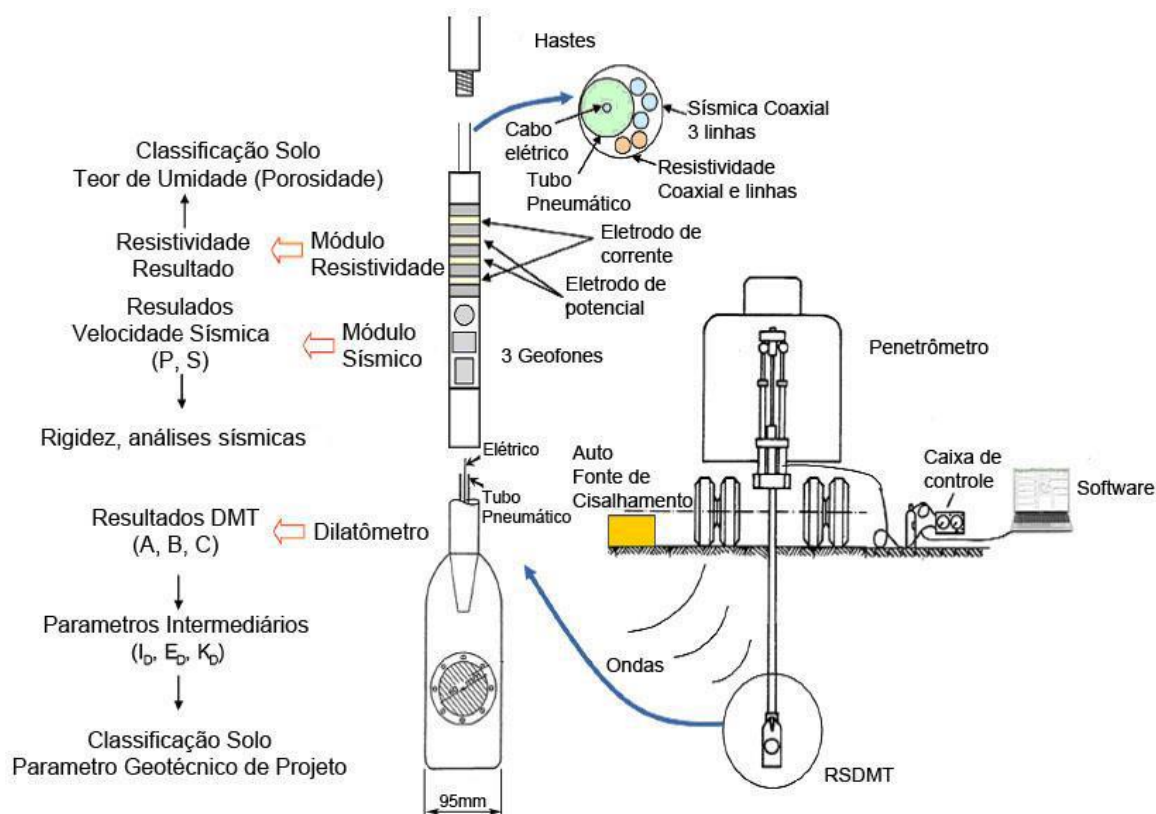


Figura 12. Esboço do ensaio com o módulo desenvolvido, retirado de Peixoto (2013).

3.5 Correlações com a Resistividade Elétrica

Em solos não coesivos, se considera que as partículas do solo são isolantes, assim é assumido que o fluxo de corrente elétrica ocorre apenas entre os vazios que contenham água mineralizada (KOWALCZYK *et al.*, 2014). Anteriormente, Archie (1942) havia proposto a equação (17), vindo a ser conhecida como Lei de Archie, que relaciona a resistividade elétrica do solo com alguns parâmetros, como porosidade e grau de saturação.

$$\rho_a = a_t \rho_w n^{-m} S^{-1} \quad (17)$$

Em que: ρ_a , resistividade do solo; a_t , tortuosidade; ρ_w , resistividade do fluido intersticial; n , porosidade; m , constante relacionada ao fator de cimentação das partículas, da ordem de 1,6 para areias, 1,3 para esferas de vidro e 2,0 para argilas (JACKSON *et al.*, 1978); S , grau de saturação.

Para avaliar a conformidade da Lei de Archie em argilas, Kelly *et al.* (2016) realizaram de ensaios laboratoriais e de campo. Nos ensaios de laboratório mediram a

porosidade e as resistividades elétricas do solo e do fluido intersticial, verificando a conformidade da lei de Archie para um solo argiloso onde a resistividade do fluido era baixa.

Nos ensaios de campo utilizaram uma ferramenta chamada *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) (Figura 13), que é uma sonda que conforme vai sendo cravada no solo além de medir sua condutividade elétrica, também mede a pressão necessária para injetar um fluxo de água nele, possibilitando a estimativa do coeficiente hidráulico na zona saturada.



Figura 13. Sonda HPT, adaptado de <https://geoprobe.com/hpt-hydraulic-profiling-tool>

A partir da condutividade elétrica obtida pela HPT, a lei de Archie foi utilizada para calcular a porosidade do solo, e comparando com valores medidos, observaram que a porosidade calculada resultou em valores razoáveis para uma primeira aproximação. (KELLY *et al.*, 2016).

Choo *et al.* (2016) também examinaram a influência da argila na resistividade elétrica no solo, para isso foi realizado um estudo onde solos preparados com diferentes proporções de areia e argila tiveram a sua resistividade elétrica medida, variando a resistividade elétrica do fluido intersticial.

As amostras com areia pura apresentaram resultados que mostraram uma boa relação com a lei de Archie. Porém as amostras com argila evidenciam que quando a resistividade do fluido é baixa, a resistividade elétrica da amostra decresce consideravelmente com o aumento do teor de argila, e quando a resistividade elétrica do fluido intersticial é alta, a resistividade elétrica pouco varia com o teor de argila (CHOO *et al.*, 2016).

Para verificar a relação entre a resistividade elétrica com outros parâmetros, Ifan e Azhar Syed (2012) utilizaram o método de regressão linear, onde a partir de 79 amostras, sendo 46 classificadas como areias siltosas, e 36 como areias e areias com pedregulhos, coletadas em 10 poços, geraram equações de correlações lineares através do método de regressão simples, relacionando a resistividade elétrica com o teor de umidade, peso específico, coesão, ângulo de atrito, índice de plasticidade e diâmetro efetivo (D_{10}).

Para as equações propostas, o coeficiente de determinação (R^2) variou entre 0,0386 e 0,652, o que não garantiu uma boa correlação entre os índices. O fato de todas as amostras terem sido retiradas até três metros de profundidade pode ter influenciado nos resultados, tendo em vista que os parâmetros são mais susceptíveis à variabilidade conforme sua proximidade com a superfície (IFAN e AZHAR SYED, 2012).

Nessa mesma linha de pesquisa, também existe um estudo onde a correlação de Spearman foi utilizada para estudar as correlações da resistividade elétrica e parâmetros geotécnicos de argilas marinhas (LIN *et al*, 2016).

O coeficiente de Spearman (r_s) avalia a intensidade com a qual duas variáveis podem ser descritas por uma função monótona, ou seja, verifica se as variáveis tendem a mudar juntas, mantendo ou opondo a relação de ordem, mas não necessariamente a uma taxa constante.

De acordo com a Tabela 5, se observa que apesar de o teor de finos (FC) e o limite de liquidez (LL) não apresentaram boas correlações com a resistividade elétrica, há uma forte correlação positiva entre a resistividade elétrica e o peso específico (γ), ou seja, quando a resistividade elétrica aumenta, γ também tende a aumentar (LIN *et al*, 2016).

Tabela 5. Correlações entre resistividade elétrica e parâmetros geotécnicos, Lin *et al*. (2016).

Parâmetro Geotécnico	Modelo de correlação com ρ	R^2	r_s
γ	Polinômio de segundo grau	0,72	0,776
FC	Função logarítmica	0,53	-0,706
e	Função logarítmica	0,88	-0,924
w	Função potência	0,93	-0,958
TS	Função potência	0,88	-0,908
IP	Função exponencial	0,85	-0,901
LL	Função potência	0,53	-0,535

Nota: γ , peso específico; FC, teor de finos; e, índice de vazios; w, teor de umidade; TS, teor de sais; IP, índice de plasticidade; LL, limite de liquidez.

Também foram observadas fortes correlações negativas com o teor de umidade (w), o índice de vazios (e), o teor de sais (TS) e o índice de plasticidade (IP), assim quando a resistividade elétrica aumenta, esses fatores tendem a diminuir (LIN *et al*, 2016).

Contudo, poucos são os métodos desenvolvidos para determinação da resistividade a partir de outros parâmetros do solo, assim Bian *et al.* (2015) desenvolveram uma rede neural artificial (RNA) onde a resistividade elétrica é obtida através dos valores de entrada de teor de umidade, índice de vazios e grau de saturação.

Uma RNA é composta por neurônios artificiais (nós), que correlacionam valores de entrada e de saída através da ponderação de seus valores em diferentes etapas (camadas), como exemplificada na Figura 14 (BIAN *et al.*, 2015). A arquitetura de uma RNA difere no número de camadas presentes, na quantidade de nós presente em cada camada, no tipo de relações entre os nós (*feedback* ou *feedforward*), e na sua topologia (FERNEDA, 2006).

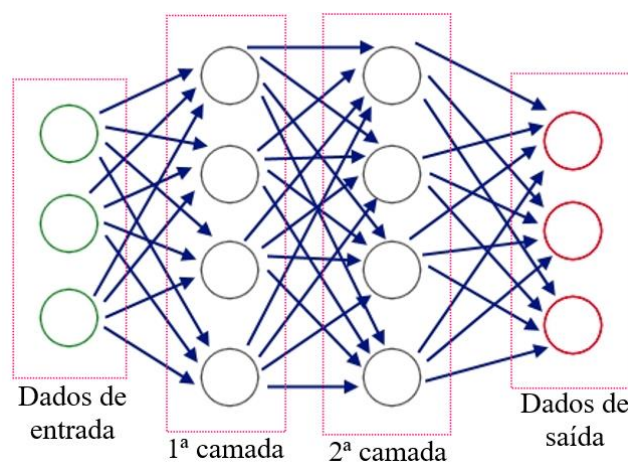


Figura 14. Esboço de uma rede neural artificial com duas camadas.

Um fato interessante a ser mencionado é que as RNAs melhoram gradativamente suas performances, pois possuem algoritmos de auto aprendizado que ajustam o valor dos pesos utilizados nas relações entre os nós (FERNEDA, 2006)

A RNA desenvolvida por Bian *et al.* (2015) a partir dos dados de entrada do teor de umidade, porosidade e grau de saturação conseguiu prever a resistividade elétrica, com um valor de R^2 superior a 0,95, porém seu uso pode ser limitado, tendo em vista que para sua criação e validação foram utilizados dados de 98 amostras locais.

3.6 A Resistividade Elétrica e Problemas Ambientais

Davies e Campanella (1995) por meio de resultados de ensaios de RCPTu geraram a Tabela 6, onde os valores de resistividade elétrica de vários tipos de solos e fluidos, inclusive contaminados, são apresentados. Os dados dessa tabela podem ser utilizados como base inicial para comparações entre valores de resistividade elétrica.

Tabela 6. Resumo de valores típicos de resistividade e condutividade elétrica de solos e fluidos, adaptado de Davies e Campanella (1995).

Tipo de material	Resistividade do solo ρ_b , Ωm	Resistividade do fluido ρ_f , Ωm	Condutividade do solo $\mu S/cm$	Condutividade do fluido $\mu S/cm$
Água do mar	-	0,2	-	50.000
Água potável	-	> 15	-	< 665
C. E. Fazenda McDonald – Argila (Richmond)	1,5	0,3	6.700	33.300
C. E. Laing Bridge – Argila (Richmond)	20	7	500	1.430
C. E. Colebrook – Argila (Langley)	25	18,2	400	550
C. E. TC @ 232 – Argila (Langley)	8	-	1.250	-
C. E. Strong Pit – Argila (Abbotsford)	35	-	285	-
C. E. Kidd 2 – Argila (Richmond)	14	12,5	715	800
C. E. Fazenda Mc Donald – Areia (Richmond)	5 - 20	1,5 - 6	2.000 - 500	6.700 - 1.670
C. E. Laing Bridge – Areia (Richmond)	5 - 40	1,5 - 10	2.000 - 250	6.700 - 1.000
C. E. Colebrook – Areia (Langley)	70	-	143	-
C. E. Strong Pit site – Areia	115	-	89	-
C. E. Kidd 2 (Richmond) – Areia	1,5 - 40	0,5 - 21	6.700 - 225	20.000 - 475
Chorume típico de aterro sanitário	1 - 30	0,5 - 10	10.000 - 330	20.000 - 1.000
Área de barragem de rejeito (metais) com chorume de sulfeto oxidado	0,01 - 20	0,005 - 15	1.000.000 - 500	2.000.000 - 670
Área de barragem de rejeito (metais) sem chorume de sulfeto oxidado	20 - 100	15 - 50	145 - 100	665 - 200
Areia e pedregulho contaminados com arsênico	1 - 10	0,5 - 4	10.000 - 1.000	20.000 - 2.500
Área industrial – Contaminantes inorgânicos em areias	0,5 - 1,5	0,3 - 0,5	20.000 - 6.500	33.000 - 20.000
Área industrial – Areias e siltes contaminados por creosoto	200 - 1.000	75 - 450	50 - 10	135 - 22
Área industrial – Contaminantes orgânicos em areia	125	-	80	-
Área do BC Place - Parte 2 –Vancouver (gasômetro)	200 - 300	-	50 - 33	-
Área do BC Place- Parte 2(resíduos de madeira)	300 - 600	-	33 - 66	-

O estudo hidrogeológico em áreas contaminadas faz-se necessário para entender como ocorre a interação entre solo e contaminante, para que sejam escolhidos os melhores métodos de remediação. A localização do agente contaminante se faz possível dado o contraste entre a sua resistividade elétrica e a resistividade elétrica do meio não contaminado (NYARI *et al.*, 2010).

Uma das principais fontes contaminantes do solo são os aterros sanitários. No passado muitos foram construídos sem que houvesse uma regulamentação que visando a

utilização de métodos de contenção para evitar que o chorume infiltrasse no solo, vindo a contaminá-lo.

Dado as vastas áreas que a contaminação pode atingir e a possibilidade de contaminação cruzada gerada por métodos intrusivos, várias pesquisas utilizaram a resistividade elétrica para estudo e monitoramento de aterros sanitários (MONDELLI *et al.*, 2010; GENELLE *et al.*, 2012; KODA *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2018; ZAWADZKI *et al.*, 2018).

No trabalho realizado por Koda *et al.* (2017), se destaca o mapeamento utilizando ensaios de SEV e de tomografia de resistividade elétrica (TRE), de um aterro municipal que possuía um sistema contra vazamentos composto por uma camada de geomembrana sobre uma camada de argila compactada.

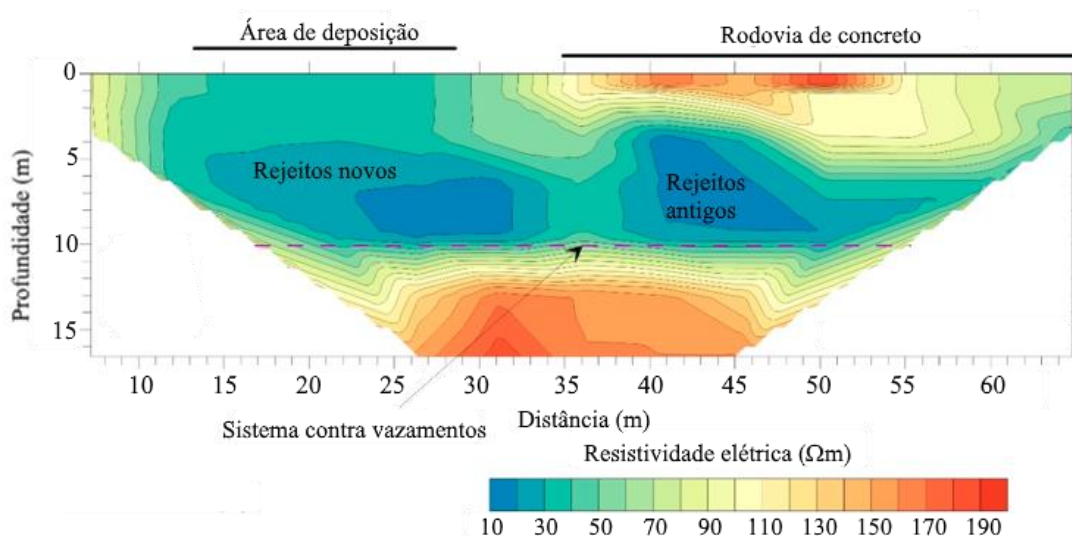


Figura 15. Perfil de resistividade elétrica de um aterro com sistema contra vazamentos, adaptado de Koda *et al.* (2017).

Devido à ausência de áreas com baixa resistividade elétrica sob o sistema contra vazamentos (Figura 15), foi avaliada a possibilidade de não infiltração de chorume no solo. Fato esse que foi reforçado por testes químicos em amostras de água provenientes de poços de monitoramento, que também apontaram ausência de contaminação (KODA *et al.*, 2017).

Liu *et al.* (2013) trabalharam no sudeste da China, em uma área contaminada por uma indústria de pesticidas. Nessa área foram realizados três ensaios de RCPTu, e um foi realizado em uma área livre de contaminação. Os dados dos ensaios foram utilizados para calcular o índice de comportamento do solo (I_c), pela equação (18), e posteriormente FC, pela Tabela 7.

$$I_c = \sqrt{\{3 - \log[q_t(1 - B_q) + 1]\}^2 + [1,5 + 1,3 \log(f_t)]^2} \quad (18)$$

Em que: q_t , resistência de ponta normalizada; B_q , parâmetro de poro-pressão; f_t , atrito lateral normalizado.

Tabela 7. Relação entre I_c e FC

I_c	FC (%)
$x \leq 1,3$	0
$1,3 < x < 3,65$	$42,4x - 54,9$
$x \geq 3,65$	100

Os autores observaram que no ensaio realizado na área não contaminada, os valores da resistividade elétrica tenderam a aumentar conforme a diminuição de FC e I_c , demonstrando a influência dos argilominerais nesses valores. Contudo, esse comportamento não foi notado nos três ensaios em locais contaminados, indicando que os íons do fluído intersticial tiveram uma maior influência na resistividade elétrica do que as partículas de finos, confirmando a contaminação dessas áreas (LIU *et al.*, 2013).

Campanella (2008) exemplificou um ensaio em uma área onde havia uma mina de metais abandonada, que devido ao longo tempo sem a descontaminação do local, o lixiviado tornou-se extremamente ácido, tendo valores de pH inferiores a 1. Em um pH tão baixo os metais que participam da reação são solúveis em água e infiltram no solo.

Devido à grande área a ser mapeada para estimar a localização das plumas de contaminação, foi utilizada preliminarmente uma ferramenta chamada *Ground Conductivity Meter*, que permite cobrir uma vasta área em um curto espaço de tempo, evidenciando possíveis pontos de contaminação. Em seguida, a pluma de contaminação foi delimitada por meio de ensaios RCPTu (Figura 16), auxiliando na decisão de onde seriam instalados poços de monitoramento.

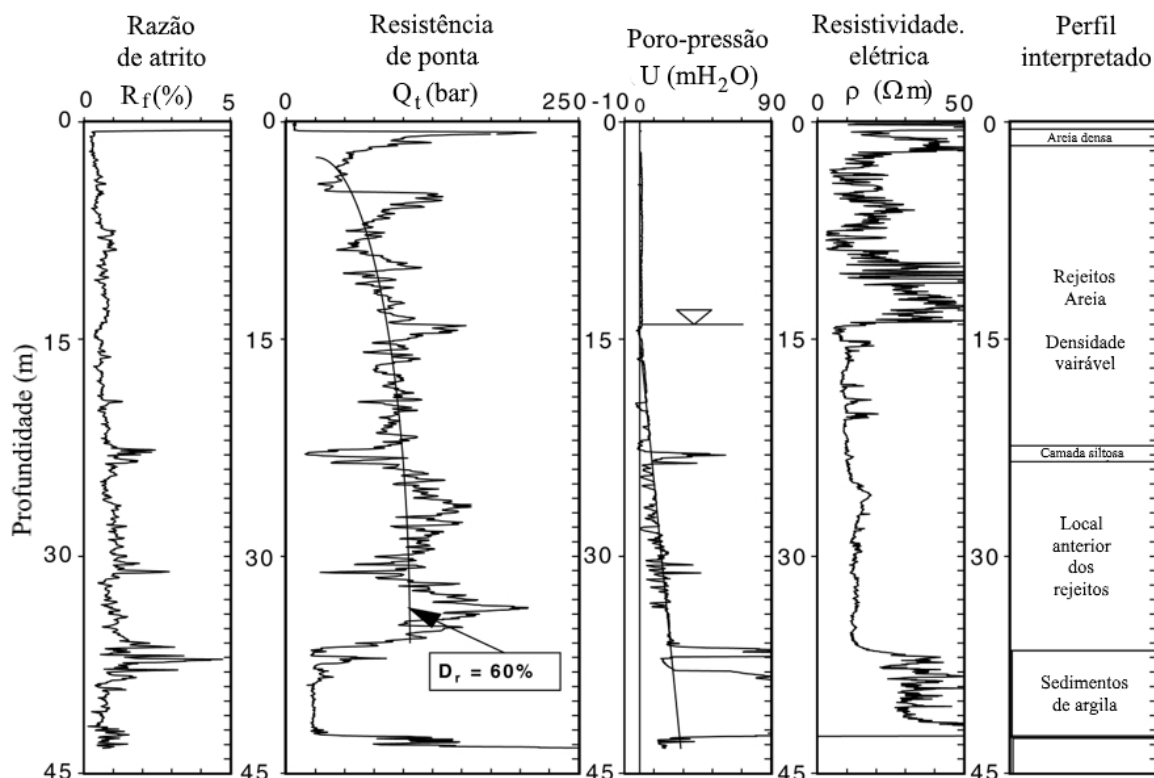


Figura 16. Resultado típico de um ensaio RCPTu, adaptado de Campanella (2008).

Apesar da resistividade elétrica ser eficiente na localização de contaminantes que são condutores elétricos, ainda existem incertezas sobre a capacidade em localizar hidrocarbonetos e outros tipos de contaminantes que sejam isolantes elétricos, principalmente na zona vadosa. Como a zona vadosa apresenta uma resistividade elétrica mais elevada, a localização por contraste acaba sendo prejudicada, pois esses tipos de contaminantes também apresentam altas resistividades elétricas (KIM *et al.*, 2007).

Para entender melhor o efeito da contaminação de solos não saturados por hidrocarbonetos, Son *et al.* (2008) preparou amostras de com teor de umidade de 5 e de 15%, e as contaminou com quantidades de diesel variando entre 20 e 100% em relação à massa de água. A leitura da resistividade elétrica foi feita por meio de dois eletrodos, como visto na Figura 17.

Pelos resultados dos ensaios observou-se que nas amostras com teor de umidade de 5%, a resistividade elétrica das amostras aumentou de acordo com o aumento do teor de diesel, já nas amostras com teor de umidade de 15% a resistividade elétrica não teve alterações significantes com o aumento do teor de diesel. O que pode ser explicado pelo fato de que com esse teor de umidade a corrente elétrica flui pela água e não é inibida pelo hidrocarboneto (SON *et al.*, 2008).

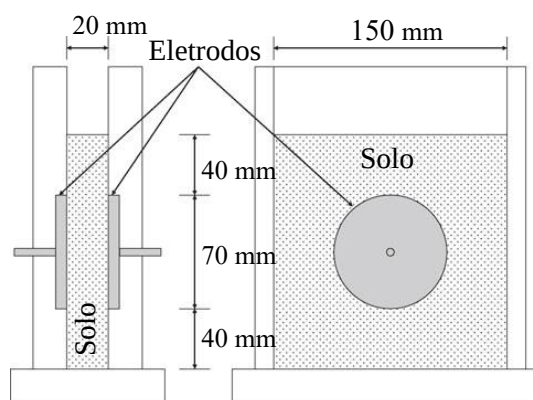


Figura 17. Esboço de ensaio com dois eletrodos, adaptado de Son *et al.* (2008).

Ainda nessa linha de pesquisa, Oh *et al.* (2008) realizaram ensaios de laboratório em uma caixa cilíndrica com diâmetro suficiente para evitar o efeito de borda, onde camadas de solo arenoso com diferentes teores de umidade foram preparadas utilizando diesel.

No interior dessa caixa, para evitar os efeitos da perturbação do solo devido à cravação, foi instalado uma haste cilíndrica, com dimensões semelhantes às do RCPTu, contendo múltiplos eletrodos espaçados de 2 em 2 cm, como visto na Figura 18 (OH *et al.*, 2008).

Dos resultados pode-se observar que a localização de hidrocarbonetos pela leitura da resistividade elétrica implica dificuldades. Nos solos secos a resistividade elétrica não foi apta a localizar a presença do diesel, porém uma queda abrupta na resistividade elétrica próxima ao nível d'água pode indicar a presença desses contaminantes flutuando sobre o lençol freático (OH *et al.*, 2008).

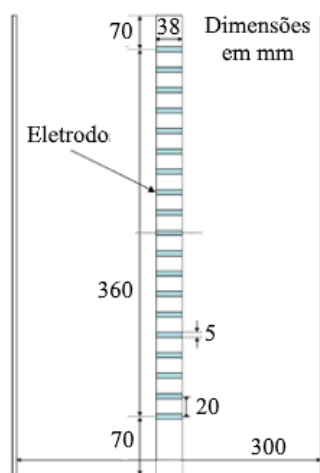


Figura 18. Esboço do ensaio com haste e múltiplos eletrodos, adaptado de Oh *et al.* (2008).

Kim *et al.* (2009) realizando um ensaio similar ao de Oh *et al.* (2008), indicou que contaminantes que sejam isolantes podem ser localizados a partir da resistividade elétrica desde que a camada superior e inferior à contaminada tenham uma resistividade elétrica inferior a essa.

Esse fato foi observado *in situ* por Campanella (2008), nas beiras de um rio onde madeira era tratada com creosoto, um líquido que não conduz corrente elétrica, imiscível em água, ligeiramente mais denso e aproximadamente 50 vezes mais viscoso que essa.

Ensaio com RCPTu não indicaram a presença do creosoto ao longo dos perfis estudados, obtendo uma resistividade elétrica em torno de 100 Ω m, exceto por uma faixa em que a resistividade elétrica atingiu picos de 250 Ω m, evidenciando que o creosoto afundou pelos sedimentos até ficar retido em lentes siltosas (CAMPANELLA, 2008).

Entre outras aplicações da resistividade elétrica pode-se citar o monitoramento da salinidade dos solos (CAMPANELLA, 2008; FEI FU *et al.*, 2015) e a verificação de colunas de solo-cimento (ARAI *et al.*, 2013).

A agricultura em solos salinos, principalmente os costais, necessita de constante irrigação com água doce para lixiviar o sal das camadas mais superficiais, e em locais onde esse recurso não é abundante, o monitoramento da salinidade do solo faz-se necessário para otimizar a quantidade de água doce utilizada (FEI FU *et al.*, 2015).

Sabendo disso, Fei Fu *et al.* (2015) realizou ensaios de campo com uma sonda similar ao RCPTu, mas com 44 eletrodos espaçados em 1 cm, onde a leitura da resistividade elétrica na camada mais superficial do solo foi medida por períodos irregulares durante 38 meses. A partir dos resultados verificou-se a dinâmica da migração vertical de sais no solo, sendo a resistividade aumentada conforme a irrigação ou chuva (Figura 19), e diminuída conforme a evaporação da água superficial do solo.

Nessa mesma linha de pesquisa, Campanella (2008) utilizou medidas da resistividade elétrica provenientes de ensaios de RCPTu para examinar a intrusão de água salina em um aquífero. Pode-se notar que ao longo do ano há uma variação na intrusão dependendo do fluxo de saída de água fresca e de sua elevação.

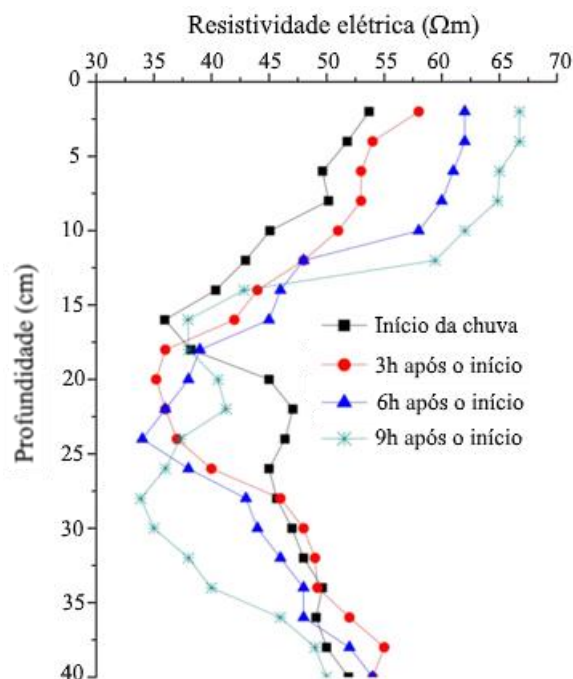


Figura 19. Variação da resistividade elétrica do solo durante uma chuva, adaptado de Fei Fu *et al.* (2015).

Além da localização de contaminantes, a localização de solos colapsíveis, ou seja, solos que sofrem redução de volume quando inundados sem que haja acréscimo de carga, também é de grande interesse, principalmente para o planejamento urbanístico, pois permite a escolha correta tanto do local, bem como do tipo de fundação que será utilizado nas edificações.

Assim, para identificar camadas de solos colapsíveis, De Lollo *et al.* (2011) investigaram perfis de solo na cidade de Ilha Solteira utilizando a resistividade elétrica. Para tanto, utilizaram ensaios laboratoriais e sondagens elétricas verticais (SEVs) e os compararam aos de CPT e SPT.

Os autores observaram que a SEV apesar de ser eficiente na delimitação do topo da camada colapsível, não identificou a base da camada com a mesma clareza. Assim, a SEV pode ser utilizada na identificação primária desse tipo de solo, para que outros ensaios possam confirmar ou não a presença dele (De Lollo *et al.*, 2011).

A SEV também foi utilizada na interpretação das camadas de solo Lagos, na Nigéria, onde várias construções sofriam colapsos estruturais por terem suas fundações nas profundidades mais superficiais do solo (Aedowyin *et al.*, 2017).

Por meio de ensaios de SEV, Aedowyin *et al.* (2017) formaram imagens 2D do perfil do solo (Figura 20), o que permitiu a discretização entre camadas de solos granulares e finos, bem como a localização de um canal vertical arenoso por onde ocorria um fluxo ascendente

de água, o que acarretava na diminuição da tensão efetiva do solo causando falhas estruturais nas construções.

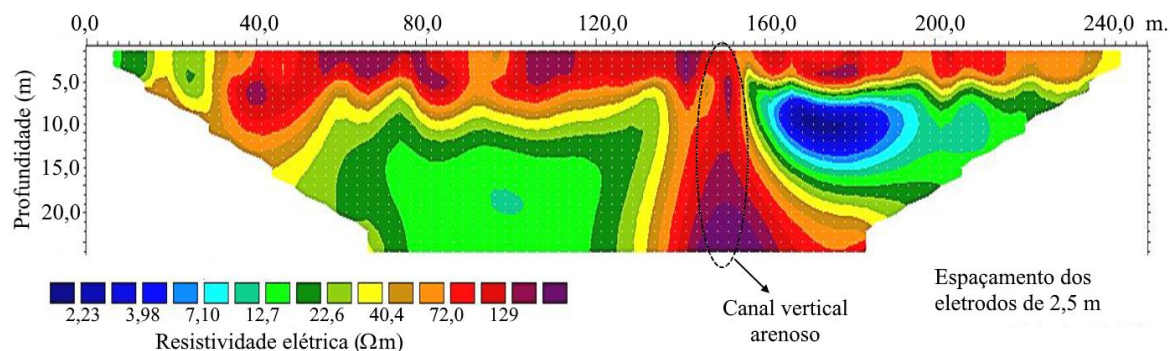


Figura 20. Perfil 2D do solo gerado por SEV, adaptado de Aedowying *et al.* (2017).

O colapso do solo também pode ocorrer em argilas muito sensíveis. Em contato com a água marinha a argila tem sua estabilidade mantida pelo sal, mas quando esse é lixiviado, a argila pode tornar-se muito sensível, entrando em colapso devido ao rearranjo das suas partículas, tendo sua resistência ao cisalhamento reduzida a aproximadamente zero (DAHLIN *et al.*, 2013; KALSCHEUER *et al.* 2013).

Dahlin *et al.* (2013) utilizaram o RCPTu e imageamento elétrico (IE) para obterem modelos tridimensionais (Figura 21) de áreas marítimas na Suécia, visando o mapeamento de argilas sensíveis por serem agravantes em locais com riscos de deslizamentos.

Dahlin *et al.* (2013) concluíram que a metodologia pode ser aplicada para distinguir entre argilas com quantidades de sais suficientes para permanecerem estáveis, mesmo após lixiviadas, das que se tornaram instáveis caso ocorra a lixiviação, dada a diferença da resistividade elétrica entre elas.

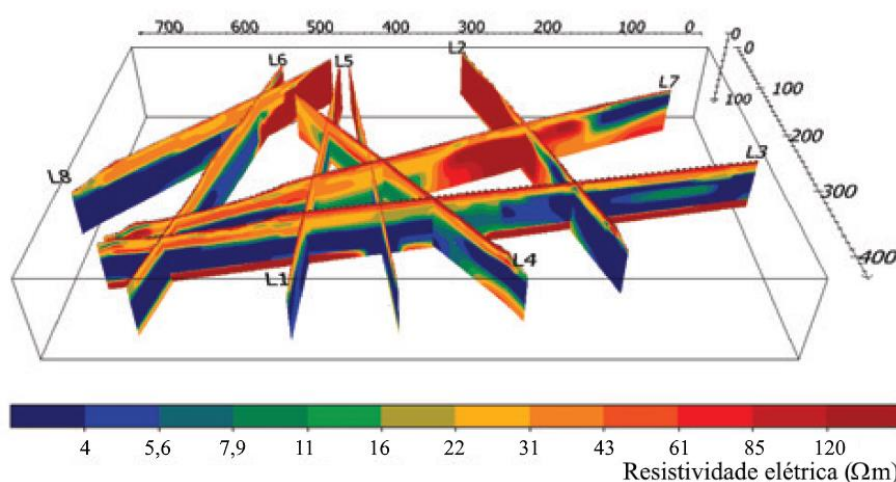


Figura 21. Vista 3D da resistividade elétrica do solo gerada a partir do IE, adaptado de Dahlin *et al.* (2013).

Um estudo similar ao feito por Dahlin *et al.* (2013) foi realizado por Kalscheuer *et al.* (2013) na Noruega. Nesse estudo foram utilizados vários ensaios geoeletricos para mapear o solo e para delimitar a zona de argila muito sensível. As análises mostraram a possibilidade de identificação de argilas muito sensíveis em uma faixa de resistividade elétrica entre 10 e 80 Ωm .

A resistividade elétrica também pode ser utilizada na localização de formações cársticas. Essas formações são solúveis em água, podendo gerar cavernas, dolinas, rios subterrâneos e até sumidouros, esses últimos que por sua vez são buracos de grandes dimensões abertos no solo devido a dissolução da rocha nas águas presentes no solo, que podem gerar problemas desde danos na infraestrutura até a perda de vidas (KAUFMANN *et al.*, 2012).

Devido ao fato de quase sempre essas formações são cobertas por solo residual, sua localização torna-se difícil, e quase sempre são identificadas apenas após um acidente. Kaufmann *et al.* (2012) propuseram utilizar a resistividade elétrica como meio mapear tridimensionalmente essas formações para auxiliar no planejamento urbano. Dessa maneira, inicialmente foi utilizado o IE para mapear a área, e depois com os ensaios de RCPTu puderam confirmar a presença de formações cársticas.

Além da resistividade elétrica ser utilizada para localizar formações naturais, ela também pode ser empregada na localização para anomalias geradas pelo homem, como na localização de áreas contaminadas por pesticidas, combustíveis, e outros tipos de contaminantes.

4 PROJETO DA SONDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Nesse capítulo é abordado o desenvolvimento do projeto mecânico da sonda de resistividade elétrica. São apresentadas as medidas iniciais da sonda, bem como discutida a análise mecânica, onde foram realizadas análises determinísticas da resistência do equipamento, e por fim a análise utilizando a teoria da confiabilidade, onde foram calculadas as probabilidades de falha do equipamento e a influência das variáveis aleatórias para o modo de falha de compressão e tração no aço, de acordo com as cargas aplicadas pelo equipamento de cravação.

4.1 Projeto do Equipamento

No projeto do equipamento foram adotadas dimensões externas similares às do RCPTu, para que a perturbação gerada no solo durante a cravação de ambos os equipamentos seja semelhante, minimizando a influência desse fator durante a comparação dos resultados.

Desse modo, a configuração final do projeto do equipamento pode ser observado na Figura 22.

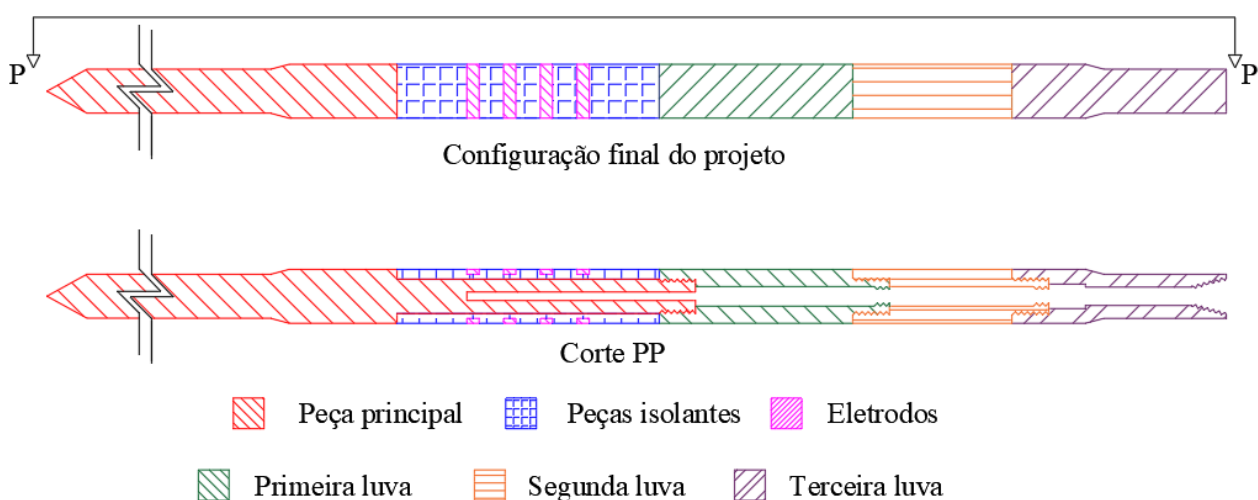


Figura 22. Projeto do equipamento desenvolvido.

O esqueleto do equipamento, chamado de peça principal, foi construído em aço inoxidável 304, por ser um material com elevada resistência mecânica e por possuir uma alta resistência contra corrosão e abrasão. Essa peça contém uma haste de cravação, de seção maciça, e uma extremidade de seção circular vazada com fenda, onde são acomodados os condutores (Figura 23).

Os eletrodos, detalhados na Figura 25, possuem seção transversal circular vazada, com um pequeno furo para acomodar os cabos elétricos, e também foram produzidos com aço inoxidável 304. A poliamida (Nylon 6.6) foi utilizada como material isolante para fazer as peças da Figura 24, impedindo que os eletrodos entrem em contato com o corpo de inox, causando curto-circuito.

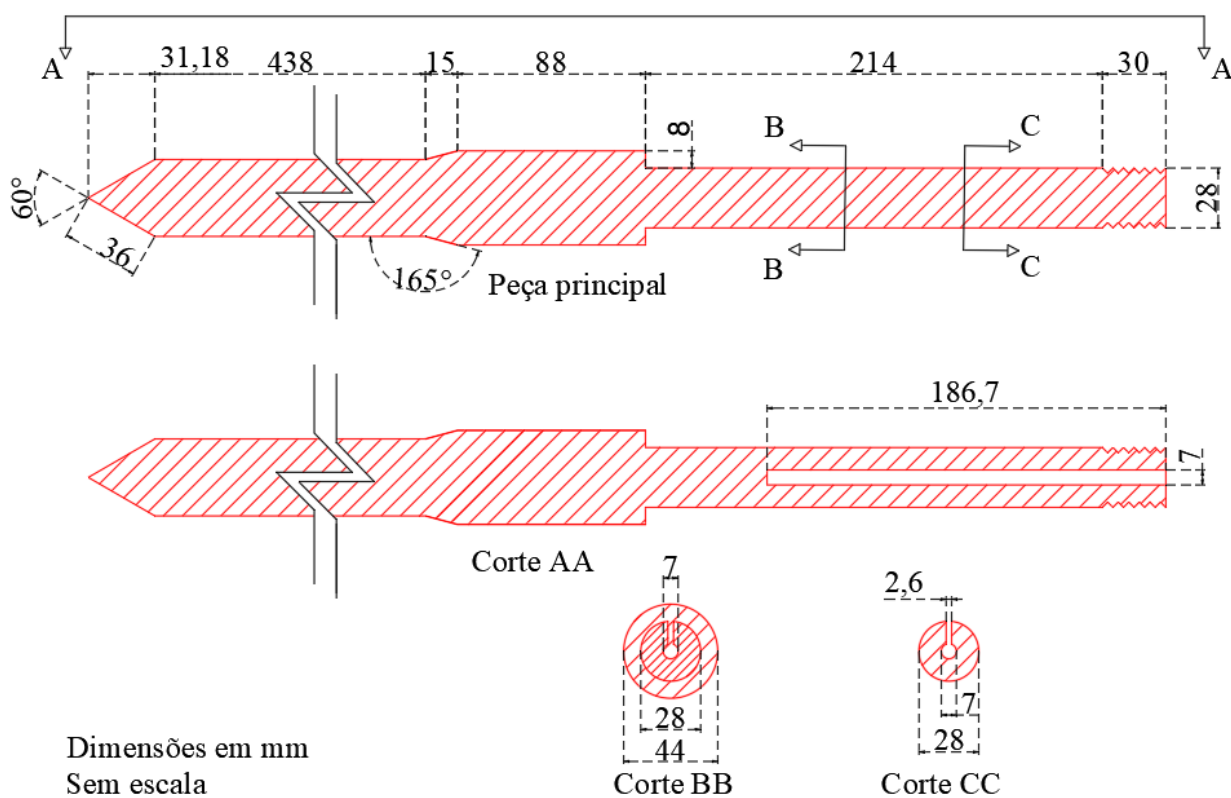


Figura 23. Detalhamento da peça principal.

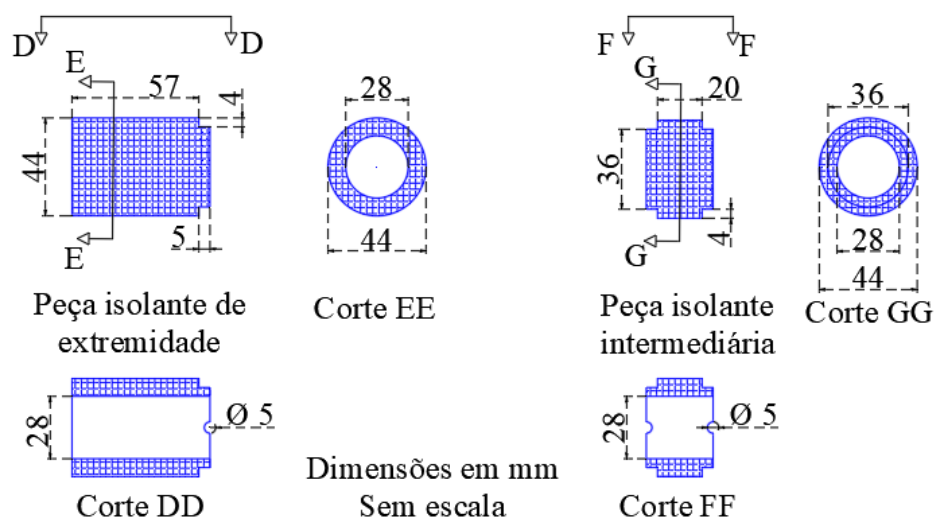


Figura 24. Detalhamento das peças isolantes.

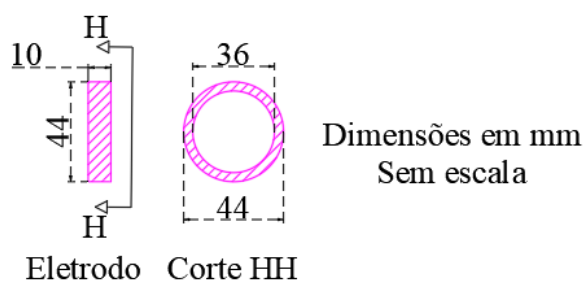


Figura 25. Detalhamento de um eletrodo.

Foi escolhido o esquema de quatro eletrodos, conforme o arranjo de Wenner para evitar o efeito da polarização, frequentemente presente nos arranjos com dois eletrodos, assim os dois eletrodos extremos transmitem o sinal gerado e realizam a leitura da corrente, enquanto os dois eletrodos centrais fazem a leitura de V .

A primeira luva, Figura 26, além de garantir a fixação do sensor de resistividade elétrica na peça principal, também permite a acomodação dos cabos elétricos dos eletrodos e do sensor de temperatura LM35.

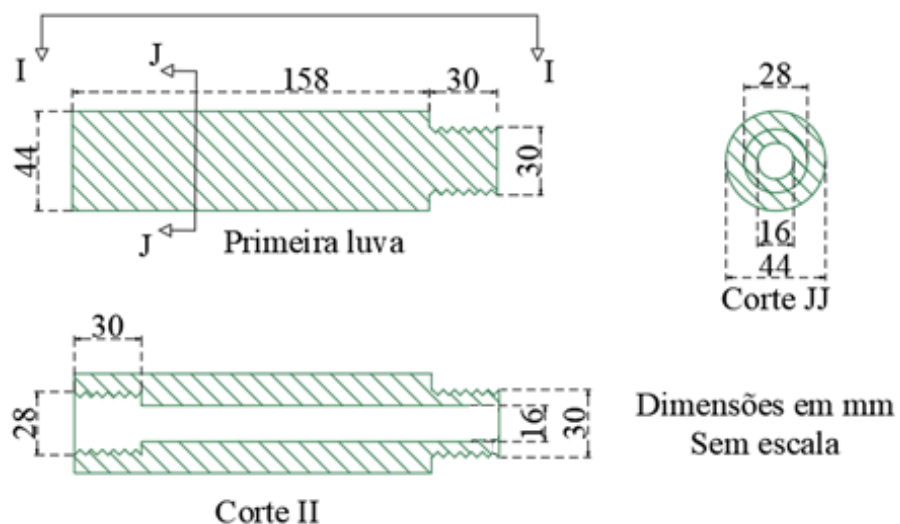


Figura 26. Detalhamento da primeira luva.

A segunda luva, Figura 27, possui uma rosca interna em cada extremidade, permitindo sua ligação com a primeira rosca e também a acomodação de um conector circular.

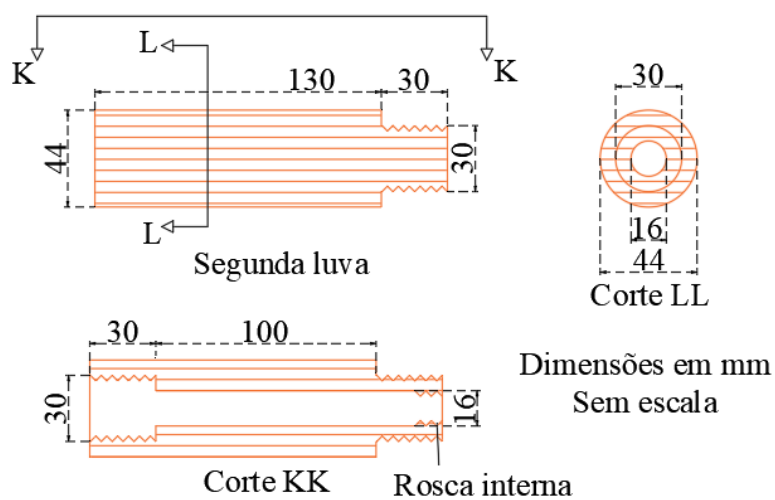


Figura 27. Detalhamento da segunda luva.

A terceira luva, detalhada na Figura 28, é responsável pela conexão do equipamento com sistema de hastes que são utilizadas no equipamento de cravação, tendo em vista que as hastes do sistema de cravação possuem rosca cônica.

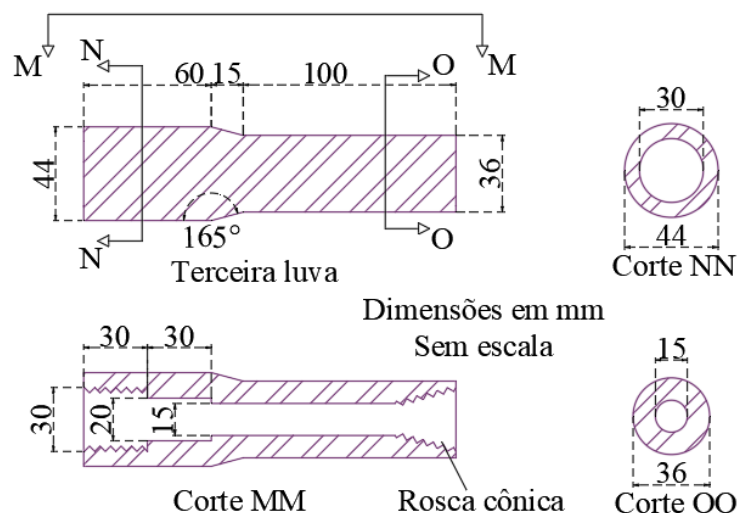


Figura 28. Detalhamento da terceira luva.

4.2 Análise Mecânica

Durante a cravação da sonda de resistividade elétrica do solo são gerados esforços solicitantes de compressão, tanto nas peças de aço inox, bem como nas de poliamida, que podem levar ao esmagamento das mesmas. Além disso, no processo de retirada do equipamento do solo pode ocorrer, tanto a ruptura à tração da seção menos resistente de aço, quanto a ruptura por cisalhamento nas ligações das luvas metálicas.

Assim, foram realizadas verificações mecânicas teóricas, de modo a garantir que o estado limite de serviço não seja ultrapassado, garantindo a integridade da sonda desenvolvida tanto no processo de cravação, bem como retirada do solo.

4.2.1 Verificação à Compressão e Tração no Aço

Durante o ensaio em campo o equipamento de cravação aplica uma força na sonda que ao penetrar no solo, sofre uma força de reação do solo de mesmo módulo, mas com sentido contrário ao da máquina, comprimindo o equipamento.

E durante a retirada do mesmo, a máquina de cravação exerce uma força de tração sobre o equipamento, que equivale a força de atrito entre o solo e o equipamento e também sobre o solo que está sobre o equipamento. Um esquema das variáveis atuantes nesses casos pode ser visto na Figura 29.

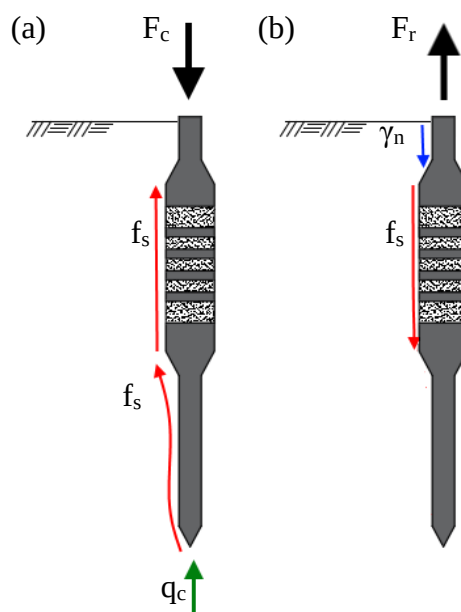


Figura 29. Esquema das variáveis presentes durante a cravação (a), e retirada (b) do equipamento do solo.

A seção menos resistente de aço, ou seja, de menor área, encontra-se na peça principal, onde a seção é vazada e com fenda, e o modo de falha considerado foi o de compressão simples. Assim, a força máxima que pode ser aplicada na seção é dada pela equação (19):

$$F_{m\acute{a}x} = \sigma_e A \quad (19)$$

Em que: $F_{m\acute{a}x}$, força máxima aplicada; σ_e , tensão normal de escoamento do material.

Os valores utilizados e obtidos na equação (19) podem ser observados na Tabela 8, onde o valor da tensão média de escoamento do aço inoxidável 304 foi retirada de Afshan *et al.* (2015).

Tabela 8. Força máxima na cravação e retirada.

σ_e (MPa)	A (m ²)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)
312	$549,8 \times 10^{-6}$	171,5

A força máxima a ser considerada no instante da retirada do equipamento do solo pode ser considerada como igual à força máxima de cravação (em módulo), uma vez que essa força representa a última condição de equilíbrio do equipamento.

Porém, como não foram utilizados coeficientes de segurança para obtenção de $F_{m\acute{a}x}$, no item 4.3 é apresentada uma breve análise utilizando a teoria da confiabilidade para estimar a probabilidade de falha do equipamento.

4.2.2 Verificação à Compressão da Poliamida

No processo de cravação, na seção transversal composta por aço e poliamida, parte da força é resistida pelo aço e parte pela poliamida. Para a obtenção dessas parcelas de força em cada material foi adotada a hipótese de aderência perfeita entre as interfaces desses materiais, ou seja, foi considerado que não há escorregamento entre os materiais.

Dessa forma, a equação (21) foi escrita em termos de compatibilidade de deslocamentos de ambos os conjuntos, em que a variação de comprimento envolvida nesse cálculo é dada pela equação (20) para cada peça.

Assim, com o par de equações (22) e (23), calcula-se o valor das parcelas que são transmitidas para cada elemento, e por meio da equação (24), se encontra o valor da tensão atuante na poliamida.

$$\Delta L = \frac{LF}{EA} \quad (20)$$

$$\Delta L_A = \Delta L_P \quad (21)$$

$$\frac{F_A L_A}{E_A A_A} = \frac{F_P L_P}{E_P A_P} \quad (22)$$

Em que: ΔL , variação do comprimento da peça; L , comprimento inicial da peça; F , força aplicada; E , módulo de Young; ΔL_A , variação do comprimento da peça de aço; ΔL_P , variação do comprimento da peça de poliamida; F_A , parcela de força atuante no aço; L_A , comprimento da peça de aço; E_A , módulo de Young do aço; A_A , área da seção transversal de aço analisada; F_P , parcela de força atuante na poliamida; L_P , comprimento da peça de poliamida; E_P , módulo de Young da poliamida; A_P , área da seção transversal de poliamida analisada.

$$F = F_A + F_P \quad (23)$$

$$\sigma_P = \frac{F_P}{A_P} \quad (24)$$

Em que: σ_P , tensão atuante na poliamida.

Os valores utilizados na verificação e a tensão atuante na poliamida são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Parcelas de força no aço e na poliamida.

E_A (GPa)	E_P (GPa)	A_A (m ²)	A_P (m ²)
200	3,1	549×10^{-6}	904×10^{-6}
F (kN)	F_A (kN)	F_P (kN)	σ_P (MPa)
171,5	167,2	4,3	4,8

Como esperado, dada a discrepância entre os módulos de elasticidade do aço e da poliamida, uma parcela pequena da força é resistida pela poliamida, resultando em uma tensão atuante menor que a sua tensão de escoamento, 29 MPa, não ocorrendo seu esmagamento durante a cravação.

4.2.3 **Verificação ao Cisalhamento na Ligação das Luvas**

A ligação das luvas foi dimensionada para que durante a retirada do equipamento do solo não ocorra o rompimento e consequente perda do mesmo.

Para a verificação do cisalhamento, equação (25), admitiu-se distribuição uniforme das tensões cisalhantes em função da pequena área de superfície lateral. O limite de tensão considerado para o rompimento por cisalhamento foi dado pela equação (26).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (25)$$

$$\tau_e = \frac{\sigma_e}{2} \quad (26)$$

Em que: τ , tensão atuante de cisalhamento; τ_e , tensão limite de cisalhamento.

A partir dessas considerações, as equações (27) e (28) foram utilizadas para a determinação do comprimento da rosca de conexão entre as peças.

$$\frac{\sigma_e}{2} = \frac{F}{A_L} \quad (27)$$

$$L_r = \frac{F}{\sigma_e \pi r} \quad (28)$$

Em que: A_L , área da superfície lateral; L_r , comprimento da rosca; r , raio da seção transversal do elemento.

Na Tabela 10 estão os valores utilizados nos cálculos e o comprimento mínimo obtido.

Tabela 10. Comprimento mínimo da rosca.

σ_e (MPa)	F (kN)	r (mm)	L_r (mm)
312	150	14	10,8

Como o valor calculado foi menor que o tamanho da rosca das hastes, se optou por adotar o tamanho da rosca das hastes para as demais roscas, sendo ele de 30 mm.

4.2.4 Testes Teóricos para Três Perfis Analisados

Para verificação da viabilidade de utilização do equipamento foram realizados testes teóricos para estimar as forças necessárias para a cravação (F_c) e retirada (F_r) do equipamento desenvolvido, a partir de dados de ensaios de CPT de Bauru, Campinas e São Carlos.

A resistência de ponta (q_c) é igual à tensão correspondente à reação de cravação do equipamento e o atrito lateral (f_s) é igual à tensão atuante devido à interação da área lateral do equipamento com o solo. Assim, para cravação do equipamento, foi levada em consideração a parcela de área de solo deslocada pelo equipamento, multiplicada pela resistência de ponta, somado com a parcela da área lateral, multiplicada pela resistência lateral, como visto na equação (29).

$$F_c = q_c A_q + f_s A_s \quad (29)$$

Em que: F_c , força necessária para cravação; q_c , resistência de ponta; A_q , área de ponta; f_s , atrito lateral; A_s , área lateral.

E na estimativa para retirada do solo, foi considerado que, pelo fato de sua estrutura já ter sido amolgada, pode ocorrer o desmoronamento da parede lateral do furo, assim, foi adicionada uma parcela devido ao peso do solo sobre o equipamento, como visto na equação (30).

$$F_r = \gamma_n z A_\Delta + f_s A_s \quad (30)$$

Em que: F_r , força necessária para retirada; z , profundidade; γ_n , peso específico natural do solo; A_Δ , variação de área devido aos diferentes diâmetros da luva e do sensor de resistividade.

Os perfis selecionados para análise foram o CE.1 – Bauru, o CE.1 – Campinas e o CE.5 – São Carlos (PEIXOTO, 2001), nos quais os pesos específicos dos solos foram adotados como sendo a média dos valores por metro de profundidade, resultando em 16,16 kN/m³ para Bauru, 14,77 kN/m³ para Campinas e 17,29 kN/m³ para São Carlos.

Para os cálculos, foram adotados os maiores valores de q_c e f_s dentro de cada metro de profundidade. Como os dados utilizados foram de ensaios CPT, ou seja, a poro-pressão não alivia a leitura de q_c , não é necessário que se realize a correção desse valor, que poderia ser realizada pela equação (31).

$$q_t = q_c + u_2(1 - v) \quad (31)$$

Em que: q_t , resistência de ponta normalizada; u_2 , poro-pressão medida logo acima da ponta do cone; v , fator referente a área do sensor que sofre influência da poro-pressão.

4.2.4.1 Resultados

Na Figura 30 são apresentados os resultados dos testes teóricos para os três perfis analisados.

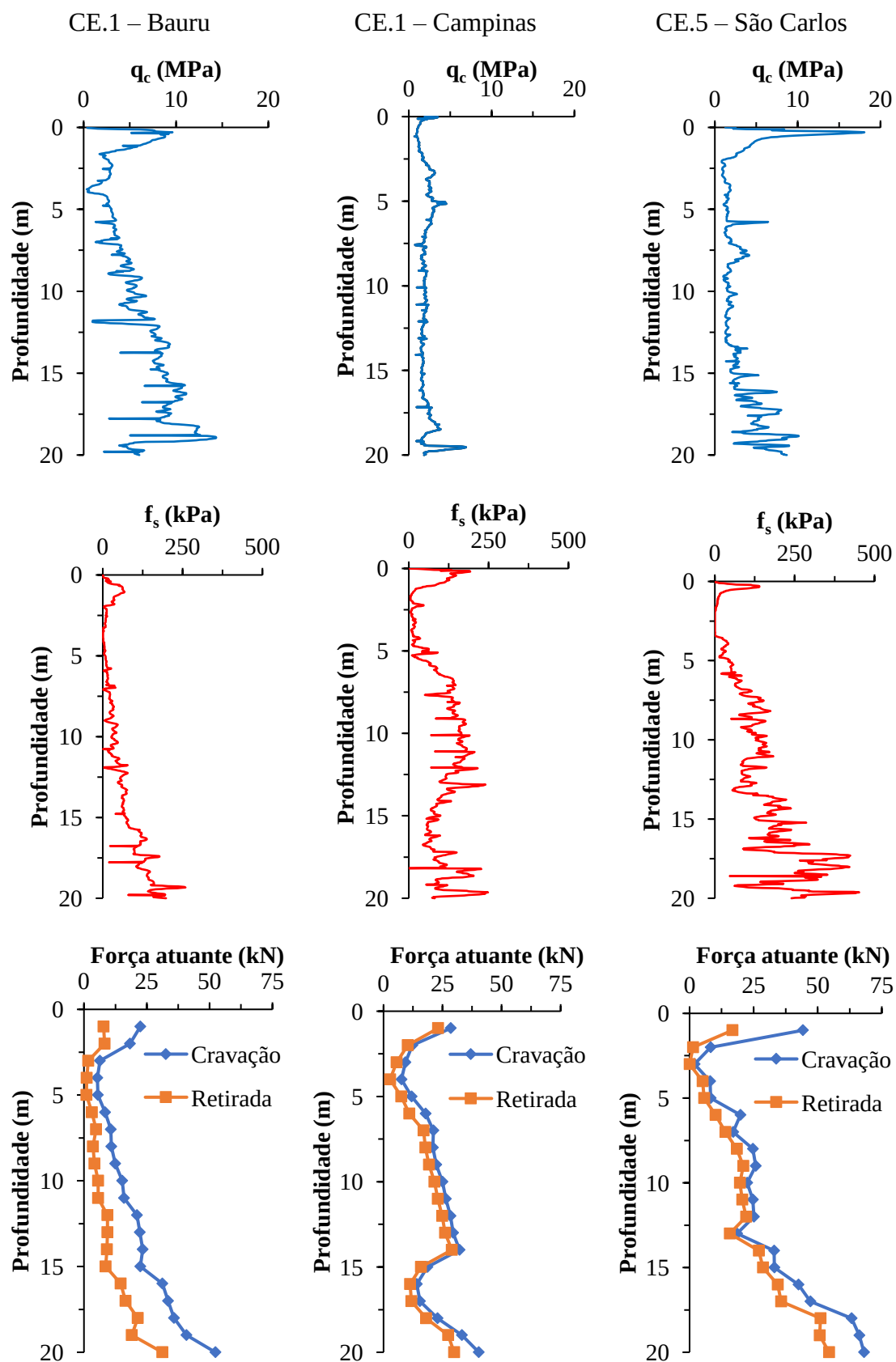


Figura 30. Dados dos perfis e forças resultantes.

Analisando as forças atuantes na Figura 30, se nota que para os três perfis analisados a força de cravação resultou sempre maior que a força de retirada, além de possuírem um comportamento semelhante. Também é observado que em nenhum dos casos as forças superaram o valor da força máxima que pode atuar no equipamento, sem que haja falha estrutural (171,5 kN).

Assim, teoricamente o equipamento está apto a realizar ensaios em solos com características similares às apresentadas. No entanto, para ampliar a análise do projeto mecânico do equipamento, foi realizada uma análise de confiabilidade para verificar a probabilidade de falha estrutural da sonda de acordo com as cargas que forem aplicadas nela.

4.3 Análise Utilizando a Teoria da Confiabilidade

A análise utilizando a Teoria da Confiabilidade tem como objetivo verificar o projeto estrutural da sonda durante o processo de cravação e retirada do solo, em um cenário de incertezas.

O aço possui incertezas intrínsecas, pois mesmo com um maior controle sobre o processo de fabricação, não é possível garantir que o material apresente características idênticas ao longo de toda peça, nem que a área da seção transversal seja contínua.

Na análise utilizando a teoria da confiabilidade as variáveis são separadas em dois grupos, as aleatórias e as determinísticas. As variáveis aleatórias são as que possuem incertezas que não podem ser eliminadas, como a tensão de escoamento do aço e a área da seção transversal, e as variáveis determinísticas são as que as incertezas são desprezadas, como a força aplicada pelo equipamento de cravação (f), que pode ser mensurada.

Por meio das variáveis aleatórias é composto um sistema de coordenadas no espaço normal padrão não correlacionado, onde o centro desse sistema corresponde ao valor médio dessas variáveis. O ponto da curva da função de estado limite ($G(\chi, \psi)$) que gera a menor distância em relação ao centro desse sistema, é o ponto de projeto (P^*), e a distância desse vetor em módulo, é o índice de confiabilidade (β), como exemplificado na Figura 31.

Através do ponto de projeto são conhecidos os valores das variáveis aleatórias que geraram o menor índice de confiabilidade. E mediante o índice de confiabilidade, é conhecida a probabilidade de falha do equipamento no cenário analisado, em que nessa pesquisa a probabilidade de falha significa a propensão a ocorrer um evento de falha, onde nesse caso o estado limite de serviço seria atingido.

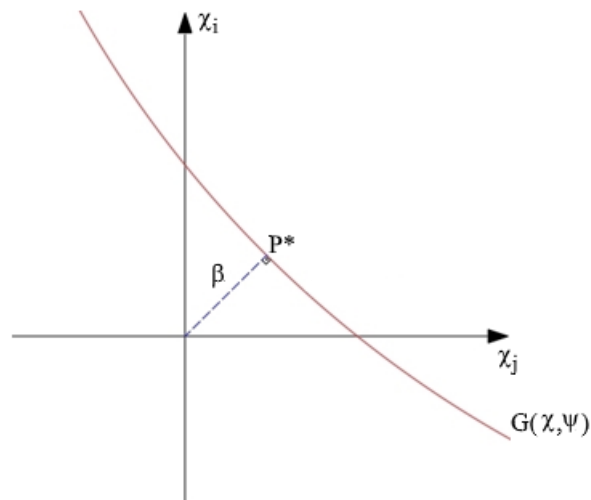


Figura 31. Exemplo de espaço normal padrão não correlacionado.

Assim, por meio da teoria da confiabilidade são conhecidas as probabilidades de falha do equipamento nos cenários analisados, servindo de base para aceitar ou não o projeto previamente verificado na análise mecânica.

Essa análise também fornece os valores da sensibilidade (α), ou seja, a influência de cada variável aleatória nos cenários analisados. O que permite uma readequação mais eficiente do projeto para os casos onde a probabilidade de falha extrapola o limite adotado.

4.3.1 **Formulação do Problema**

A forma geral de representação do problema de confiabilidade nesse trabalho segue o formato da equação (32), que é o formato margem de segurança.

$$G(\chi, \psi) = R(\chi, \psi) - S(\chi, \psi) \quad (32)$$

Em que: $G(\chi, \psi)$, função estado limite; $R(\chi, \psi)$, função de resistência; $S(\chi, \psi)$, função de solicitação; χ , variáveis aleatórias; ψ , variáveis determinísticas.

Assim, nesse estudo o modo de falha considerado foi o de tração e compressão no aço, onde a função de resistência é igual à tensão de escoamento do aço, e a função solicitante igual à força aplicada pelo equipamento de cravação, dividida pela menor área de aço, que se encontra na peça principal, corte CC, do item 4.1. Resultando na equação (33), onde as variáveis aleatórias são σ_a e A_a , e f é determinística.

$$G(\chi, \psi) = \sigma_a - \frac{f}{A_a} \quad (33)$$

Em que: f , é a força aplicada pelo equipamento de cravação.

Os dados da média e desvio padrão de σ_a foram retirados de Afshan *et al.* (2015), sendo respectivamente 312,0 MPa e 15,2 MPa, e a média da área foi considerada a própria área nominal, 549,8 mm², e o desvio padrão foi adotado como sendo 1%, 54,98 mm², de acordo com a expertise do profissional que usinou as peças.

O software desenvolvido por Nogueira (2010) foi utilizado para o estudo utilizando a teoria da confiabilidade. Desse modo, se variou a força aplicada pelo equipamento de cravação de 100 a 150 kN, que são valores comuns de força para as máquinas de cravação convencionais, e foram obtidos os valores dos índices de confiabilidade, as probabilidades de falha e as sensibilidades.

Assim, os índices de confiabilidade resultantes foram comparados com os índices de confiabilidade-alvo, Tabela 11, de acordo com as indicações feitas pelo *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS, 2001), para estado limite de serviço irreversível, correspondendo à impossibilidade de reutilização do equipamento.

Tabela 11. Índices de confiabilidade-alvo e probabilidades de falha para ELS irreversível (JCSS, 2001).

Custo relativo da medida de segurança	Índice de confiabilidade-alvo	Probabilidade de falha
Alta	1,3	10^{-1}
Normal	1,7	5×10^{-2}
Pequena	2,3	10^{-2}

4.3.2 Resultados e Análises

A partir da Tabela 12, se observa que para uma força de 150 kN, que é comum para os equipamentos de cravação, o índice de confiabilidade (2,51) é ligeiramente mais alto do que o recomendado pela JCSS (2001) (2,3), para um custo relativo de medida de segurança pequena por falha para ELS irreversível.

Portanto, apesar do projeto do equipamento apresentar medidas internas estimadas de acordo com as necessidades de acomodação de cabos e conectores, e a análise mecânica não levar em consideração fatores de segurança, a análise utilizando a teoria da confiabilidade mostrou que o projeto da sonda apresenta uma probabilidade de falha aceitável de acordo com a JCSS (2001).

Na Tabela 12 também é possível notar que a sensibilidade de σ_a é superior sobre a sensibilidade de A_a , mostrando assim que a tensão de escoamento do aço tem uma influência dominante na probabilidade de falha no cenário analisado. Isso indica que, garantida a área de seção transversal especificada no projeto mecânico do equipamento, a qualidade do material utilizado é preponderante sobre o comportamento da sonda. Em função da baixa parcela de força que solicita a peça de poliamida, não foi realizada a análise de confiabilidade para o modo de falha por compressão na poliamida.

Tabela 12. Índices de confiabilidade, probabilidades de falha e sensibilidades para as forças aplicadas pelo equipamento de cravação.

f (kN)	β	P_f	α_{σ_a} (%)	α_{A_a} (%)
100	8,47	$1,18 \times 10^{-17}$	98,81	1,19
110	7,27	$1,76 \times 10^{-13}$	98,49	1,51
120	6,07	$6,23 \times 10^{-10}$	98,03	1,97
130	4,87	$5,32 \times 10^{-7}$	97,44	2,56
140	3,69	$1,12 \times 10^{-5}$	96,62	3,38
150	2,51	$6,08 \times 10^{-3}$	95,45	4,55

5 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

Nesse capítulo são apresentadas as diferentes etapas da montagem da parte elétrica do sensor. Na sequência, também é mostrada a configuração utilizada no sistema de aquisição de dados que permitiu a leitura e gravação de V , corrente e temperatura fornecidas pela sonda, bem como da profundidade.

5.1 Sensor de Resistividade Elétrica

O arranjo de eletrodos escolhido para o sensor de resistividade elétrica foi o arranjo de Wenner, como observado na Figura 32, pois com 4 eletrodos evita-se o efeito da polarização induzida, o que afeta a leitura da resistividade elétrica. Desse modo, nessa configuração o sinal gerado é propagado pelos eletrodos externos, os quais também são utilizados para leitura da corrente, e a leitura de V é realizada pelos eletrodos internos.

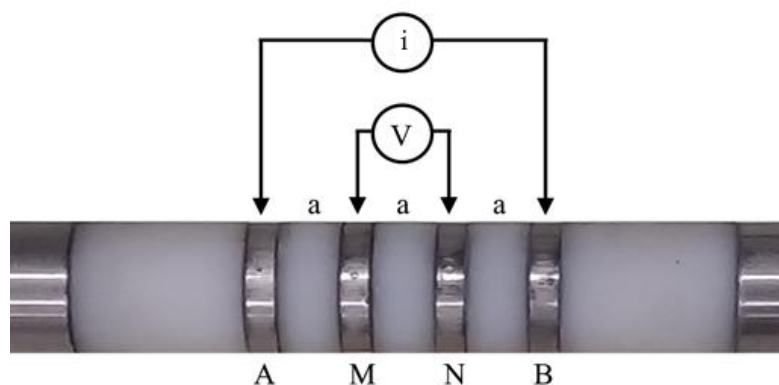


Figura 32. Arranjo de Wenner utilizado na sonda.

Assim, para o preparo do sensor de resistividade elétrica, primeiramente em cada eletrodo foi realizado um furo de 2 mm para acomodação do cabo elétrico, que posteriormente foi soldado com estanho, Figura 33 (a). Os eletrodos têm cabos elétricos com cores diferentes, Figura 33 (b), para a diferenciação das conexões.



Figura 33. (a) Detalhe da solda dos eletrodos; (b) detalhe dos eletrodos com cabos elétricos.

Em seguida, a vedação da sonda foi feita por meio de *o-rings* inseridos nas peças isolantes, e em cada interface foi aplicado adesivo de silicone para auxiliar na vedação do sensor.

Após o preparo dos eletrodos e da vedação, na peça principal foi inserido uma peça isolante de extremidade, como observado na Figura 34 (a), e nela um eletrodo foi acoplado, Figura 34 (b), onde o cabo elétrico ficou acomodado dentro do vão da peça principal.

Posteriormente foram inseridas as peças isolantes intermediárias, cada um com o seu eletrodo Figura 34 (c), e posteriormente a última peça isolante de extremidade foi acoplada Figura 34 (d), permitindo que a primeira luva com o sensor LM35 pudesse ser rosqueada, finalizando o sensor de resistividade elétrica.

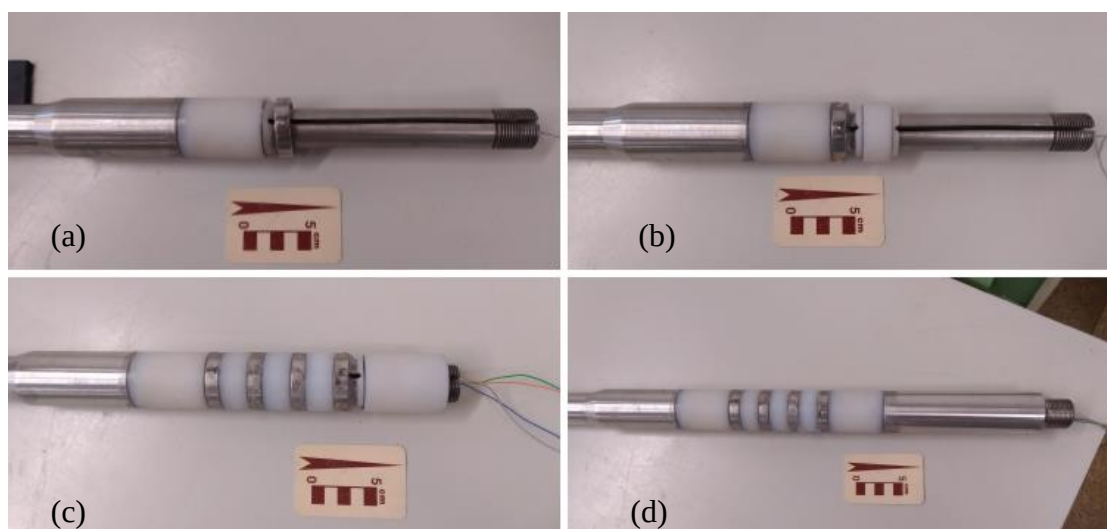


Figura 34. Preparação do sensor de resistividade elétrica.

5.2 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura é um sensor de precisão do tipo LM35, Figura 35 (a). Esse tipo de sensor realiza a leitura de V, que é transformada em temperatura a partir do fator de calibração de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Assim, para cada grau centígrado do meio em que ele está inserido, é acrescida uma tensão de saída de 10 mV .

A ligação dos terminais do LM35 foi feita com os mesmos cabos elétricos dos eletrodos, e o sensor foi fixado a $3,5 \text{ cm}$ do início da primeira luva com cianoacrilato, como visto na Figura 35 (b). Após a fixação do LM35, foi realizada uma pequena punção na face externa da luva, permitindo marcar a localização do sensor.

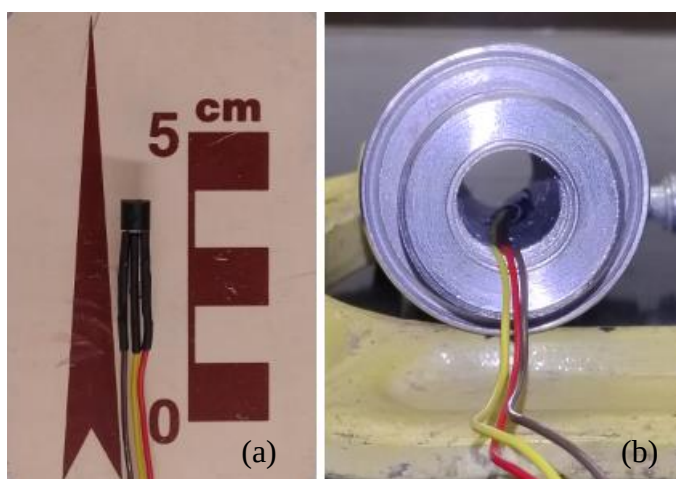


Figura 35. Sensor LM35. (a) Detalhe do sensor com ligações nos seus terminais. (b) Sensor fixado na primeira luva.

5.3 Construção da Sonda de Resistividade Elétrica

Na sequência, a primeira etapa da construção foi inserir na primeira luva os cabos elétricos dos eletrodos, de maneira a permitir que ela fosse rosqueada na peça principal, preparada previamente com *o-ring* e adesivo de silicone.

Os cabos elétricos foram fixados no final da primeira luva com adesivo para motor, a segunda luva foi rosqueada na primeira, e os cabos elétricos foram cortados em um tamanho conveniente, e soldados à sua via correspondente em um conector circular impermeável de sete vias, como observado na Figura 36 (a).

Após a soldagem dos cabos elétricos, o conector foi rotacionado no sentido anti-horário, Figura 36 (b), conforme o número de passos de sua rosca. Esse procedimento evitou que os cabos ficassem torcidos dentro do equipamento após a instalação do conector. No

conector também foi utilizado *o-ring* e adesivo de silicone para evitar a entrada de água no equipamento. Assim, a sonda desenvolvida pode ser observada na Figura 37.

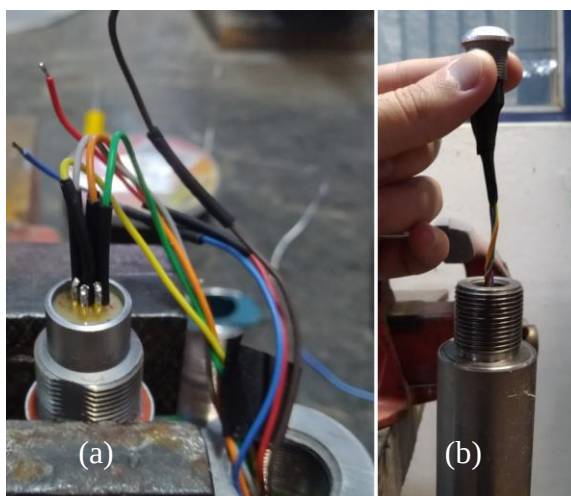


Figura 36. Detalhe das ligações dos cabos elétricos no conector.



Figura 37. Sonda desenvolvida para leitura da resistividade elétrica.

5.4 Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizou uma placa de aquisição da National Instruments, modelo NI USB-6353, na qual foram empregados quatro canais analógicos com leitura diferencial, sendo um para leitura de V, um para corrente, um para temperatura e um para profundidade. Nos terminais positivos e negativos dos canais foram ligados resistores de $100\text{ k}\Omega$, que foram conectados no aterramento do sistema para diminuir os ruídos.

Para leitura de V, os cabos elétricos foram soldados diretamente no conector do cabo que é ligado na ponteira, Figura 38 (a). Porém para a leitura da corrente, foi necessário a utilização de um resistor em paralelo com os terminais, Figura 38 (b), assim o sistema de aquisição mede V entre os terminais e transforma em corrente dado o valor da resistência elétrica.

Um circuito RC foi instalado entre os terminais de leitura da temperatura para diminuir os ruídos do sinal de resposta. O circuito RC montado utilizou um resistor de $68\text{ }\Omega$

e um capacitor eletrolítico 50V e 0,22 μ F. Também foi empregado um capacitor cerâmico de 50 V e 474 nF entre o terminal negativo e o de alimentação do sensor, com o mesmo intuito de diminuir os ruídos. A configuração das ligações para leitura da temperatura é observada na Figura 38 (c).

Os terminais de leitura do sensor de profundidade foram ligados diretamente no conector do sensor, Figura 38 (d).

A alimentação dos sensores de temperatura e profundidade foi feita pela própria placa de aquisição, que fornece uma tensão contínua de 5 V, e a sonda foi aterrada no terminal de terra da placa de aquisição.

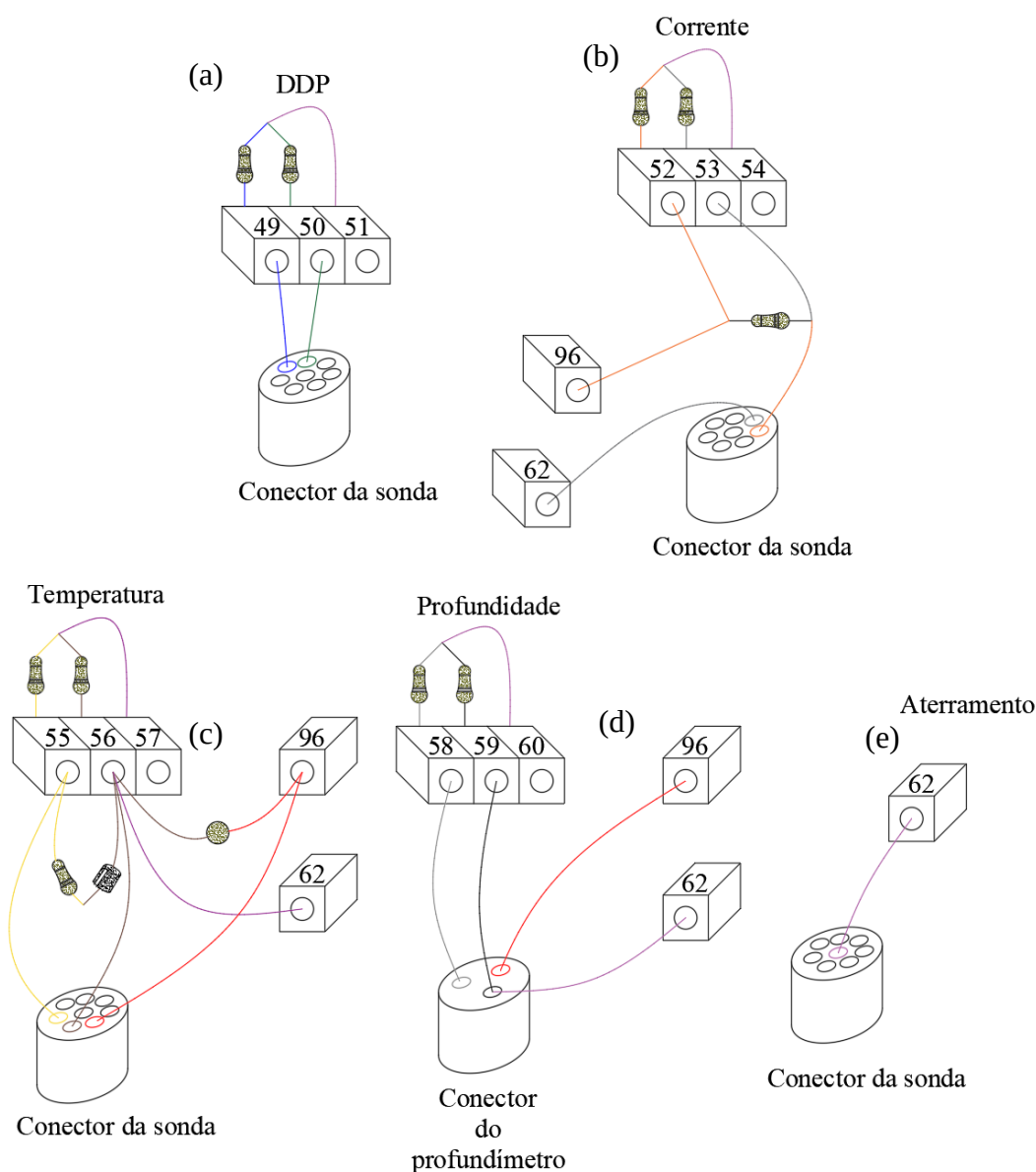


Figura 38. Esquema das ligações entre canais e conectores.

O software para aquisição de dados, Figura 39, foi desenvolvido na plataforma LabView. Ele permite gerar o sinal elétrico enviado para a sonda, a gravação dos dados de ensaios de campo, bem como calibração em meio aquoso. Sua programação gráfica se encontra no item Anexo.

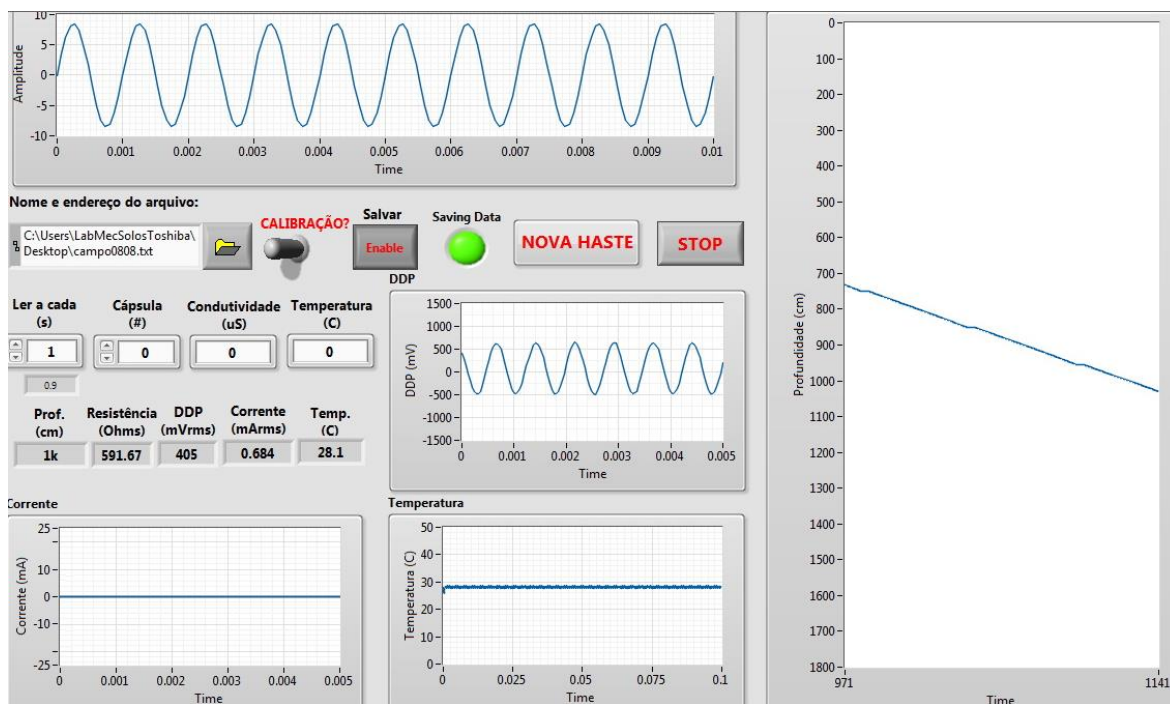


Figura 39. Software para aquisição de dados.

6 ENSAIOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo são apresentados o material, procedimentos, resultados e comentários dos ensaios realizados, que avaliaram o funcionamento da sonda desenvolvida.

Inicialmente foram realizados ensaios de estanqueidade do equipamento, para averiguar se ocorreria a intrusão de água na sonda. Em seguida ensaios laboratoriais em meio aquoso foram feitos para obtenção da curva de calibração e do campo elétrico gerado pela sonda, para que depois fossem efetuados ensaios de campo, sendo um ensaio de teste no campo experimental da F.E. – Bauru, e um ensaio definitivo no Parque Vitória Régia.

6.1 Verificação da Estanqueidade

Em grandes profundidades, aquíferos confinados ou em solos argilosos, a pressão neutra pode ser muito elevada. Essa pressão pode fazer com que haja a intrusão de água no equipamento caso este não seja bem vedado, o que provocaria distorções nas leituras da resistividade elétrica inviabilizando o uso do mesmo.

Assim, se faz necessário a verificação da vedação da sonda desenvolvida.

6.1.1 *Material*

Para realização do ensaio de estanqueidade foi utilizado o seguinte material:

- Câmara de pressão;
- Compressor de ar;
- Interface ar/água;
- Sistema de aquisição de dados.

6.1.2 *Procedimento*

O procedimento adotado para esse ensaio foi o mesmo utilizada por Vitali (2011), em que a sonda foi inserida em uma câmara de pressão preenchida com água, e em seguida

por meio do compressor de ar e interface ar/água foi aplicada uma pressão inicial de 300 kPa na câmara. A Figura 40 mostra o ensaio de estanqueidade em andamento.

Após a estabilização do sistema, o compressor foi isolado do mesmo e a pressão da câmara foi anotada em intervalos de 5 minutos, ao longo de uma hora. Assim, qualquer diminuição de pressão indicaria a intrusão de água no equipamento.

O procedimento foi também realizado para uma pressão de 650 kPa.

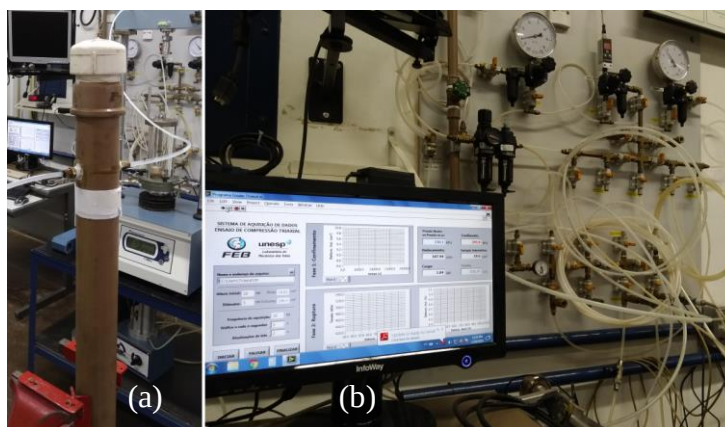


Figura 40. Verificação da estanqueidade. (a) Câmara de pressão. (b) Sistema de aquisição e interface ar/água.

6.1.3 Resultado e Análises

Na Figura 41 são observados os valores da pressão dentro da câmara ao longo do ensaio.

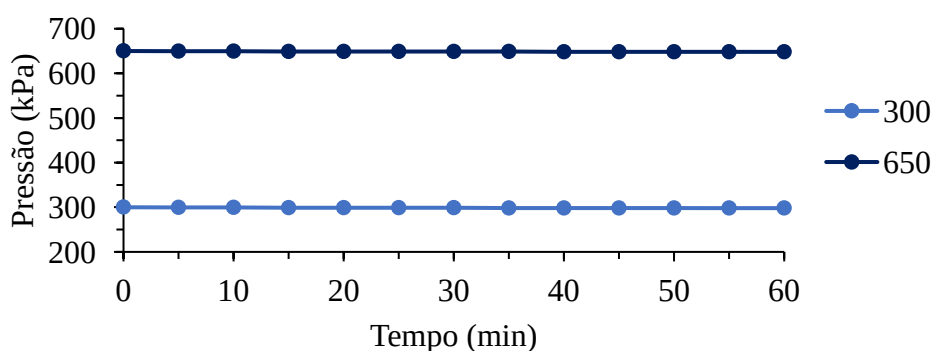


Figura 41. Resultados do ensaio de estanqueidade.

Como não houve decréscimo do valor da pressão na câmara durante a verificação da estanqueidade, se presume que não ocorreu intrusão de água na sonda desenvolvida e o sistema de vedação foi efetivo para suportar pressões de até 650 kPa durante uma hora.

6.2 Calibração em Meio Aquoso em Laboratório

O equipamento desenvolvido faz a leitura de V e da corrente elétrica do meio em que está inserido, além de V fornecida pelo sensor LM35, que é transformada em temperatura.

O valor da resistência elétrica (V/i) é obtido a partir da razão de V pela corrente elétrica, podendo esse valor ser corrigido para o de uma temperatura padrão. Porém, para a obtenção da resistividade elétrica é necessária a calibração, que relaciona V/i com a resistividade elétrica.

A calibração em meio em meio aquoso consiste em variar a resistividade elétrica da solução aquosa por meio adição de NaCl, enquanto são realizadas as leituras da corrente elétrica, de V , da temperatura e da condutividade elétrica da mesma, onde o experimento é repetido até que os resultados sejam semelhantes.

6.2.1 *Material*

Para realização da calibração em meio aquoso foi utilizado o seguinte material:

- Sonda desenvolvida;
- Reservatório com capacidade de 310 l;
- Placa de aquisição de dados National Instruments USB-6353;
- Software desenvolvido para aquisição de dados;
- Condutímetro Thermo Scientific Orion 3 Star;
- Balança de precisão Quimis BG 4000;
- 7 kg de NaCl (por calibração);
- Água potável e deionizada.

6.2.2 *Procedimento*

O ensaio em meio aquoso foi realizado em um recipiente com capacidade de 310 litros, previamente higienizado com sabão neutro e enxaguado com água deionizada, para evitar que impurezas pudessem alterar os valores da condutividade elétrica.

Em função do comprimento do equipamento, foi necessária a instalação de um flange no fundo do recipiente, permitindo que a haste de cravação transpassasse o recipiente e a seção com os eletrodos ficasse submersa, como observado na Figura 42.



Figura 42. Equipamento posicionado no recipiente para ensaio aquoso.

Com auxílio de uma balança de precisão foram preparadas 56 cápsulas contendo massas de NaCl variando entre 0,02 e 1.000 gramas, e em seguida, foram adicionados 300 litros de água potável no reservatório já com a sonda introduzida nele.

O procedimento do ensaio foi a mesma utilizada por Pregnoiato (2014), porém o gerador de funções foi substituído pela placa de aquisição de dados, que alimenta a sonda com uma onda senoidal de amplitude de 7 V e frequência de 1 kHz.

A leitura da condutividade elétrica e da temperatura do meio aquoso foram realizadas pela ponta de prova de um condutivímetro que ficava mergulhada na solução aquosa.

O sistema de aquisição de dados foi colocado no modo “Calibração”, com frequência de gravação a cada 6 segundos, e o número da cápsula, o valor da condutividade elétrica e da temperatura medidos pelo condutivímetro foram inseridos no programa. O botão “Enable” foi pressionado e após 20 segundos foi pressionado novamente, gerando a leitura de 3 valores de V, corrente elétrica e temperatura obtidos através da sonda.

Em seguida foi adicionada a massa de NaCl da primeira cápsula no recipiente. A solução aquosa foi agitada com uma colher industrial até entrar em equilíbrio, os novos valores medidos pelo condutivímetro foram inseridos no programa, e foram salvos novamente três valores das variáveis obtidas pela sonda. Assim o procedimento foi repetido até a 56ª cápsula.

O arquivo gerado pelo programa tem extensão txt, e os dados armazenados nele foram inseridos em uma planilha eletrônica que calculou a resistividade elétrica corrigida para uma temperatura padrão, adotada sendo 25 °C, a mesma adotada por Pregolato (2014), por meio da equação (34), adaptada de Barry *et al* (2008), na qual de acordo com o manual do equipamento que foi utilizado para leitura da condutividade elétrica, o coeficiente de compensação para soluções salinas tem valor de 2,12, como visto na Tabela 13.

$$\rho_{25} = \rho_{el}[1 + 2,12(\theta - 25)] \quad (34)$$

Em que: ρ_{25} , resistividade elétrica corrigida a uma temperatura de 25°C.

Tabela 13. Coeficientes de compensação para os tipos de solução (*Thermo Scientific Orion Startm and Star Plus Series Meter User Guide*, 2008).

Solução (25°C a 50°C)	Coeficiente de compensação (%)
Água ultra pura	4,55
Solução salina	2,12
5% de NaOH	1,72
Amônia diluída	1,88
10% HCl	1,32
5% de ácido sulfúrico	0,96
98% de ácido sulfúrico	2,84
Solução de açúcar	5,64

O ensaio com água potável foi realizado oito vezes, onde a partir do sexto ensaio as curvas de calibração começaram a ficar sobrepostas. Após realizados os ensaios com água potável, foram feitos mais três ensaios, mas desta vez com água deionizada, como visto na Figura 43, que devido a sua menor condutividade permitiu ampliar a gama de pontos com uma resistividade elétrica mais elevada.

Entre as calibrações, foi realizada a limpeza do reservatório de maneira a evitar resíduos que interfeririam na próxima calibração.



Figura 43. Ensaio aquoso em andamento.

6.2.3 Resultado e Análises

A partir dos dados obtidos foi possível obter a curva de V/i versus resistividade elétrica para os ensaios com água potável e deionizada.

Pode-se observar na Figura 44 que na calibração com água potável praticamente as quatro linhas de tendência ficaram sobrepostas, o que indica uma excelente correlação entre V/i e a resistividade elétrica.

Porém vale ressaltar que, enquanto na calibração com água deionizada os valores da resistividade elétrica chegaram a quase $6.000 \Omega m$, podendo ser observados na Figura 45, no ensaio com água potável eles não passaram de $100 \Omega m$.

Apesar da calibração com água deionizada apresentar um alcance maior na escala de resistividade elétrica, é observado que a curva de calibração perde a linearidade para resistividades elétricas superiores à $200 \Omega m$, e que a partir de $1.750 \Omega m$ os pontos ficam dispersos.

A dispersão ocorrida pode ter sido causada pela variação que ocorre no sistema de aquisição de dados ao registrar correntes elétricas inferiores a 1 mA .

Desse modo, para determinar a curva de calibração do equipamento, equação 35, foram utilizados todos os pontos com resistividade elétrica inferior a $1.750 \Omega m$, dos três ensaios em água deionizada, Figura 46.

$$\rho_{el} = 0,0023 \left(\frac{V}{i} \right)^2 + 0,3733 \left(\frac{V}{i} \right) \quad (35)$$

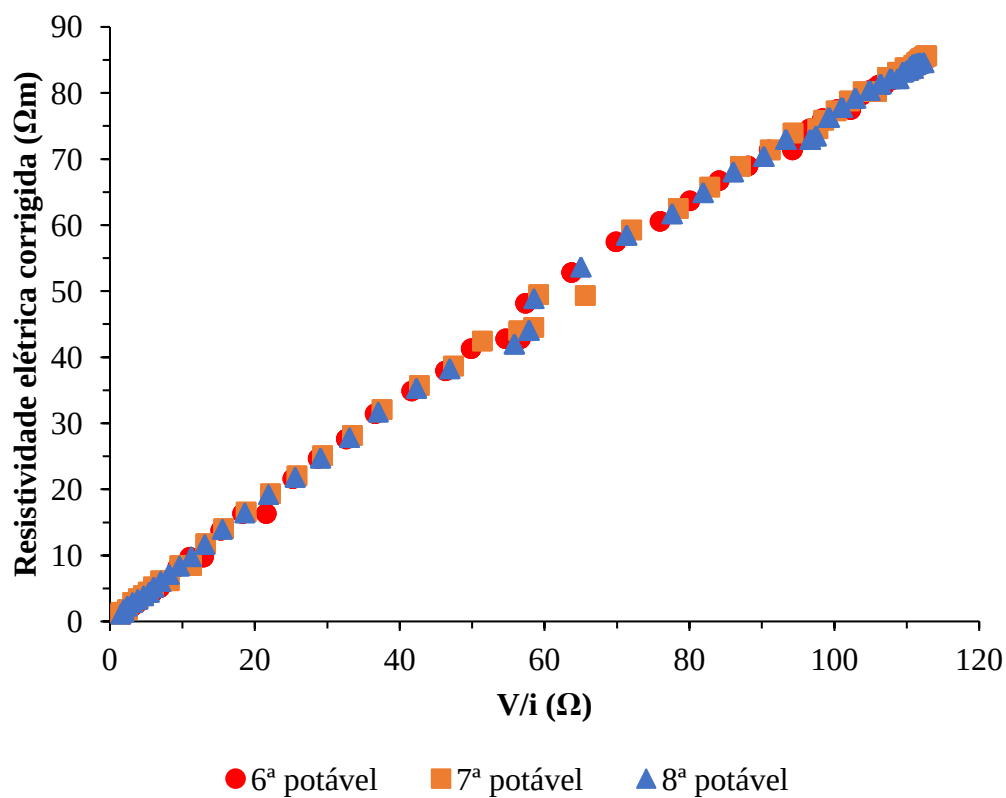


Figura 44. Calibração em solução com água potável.

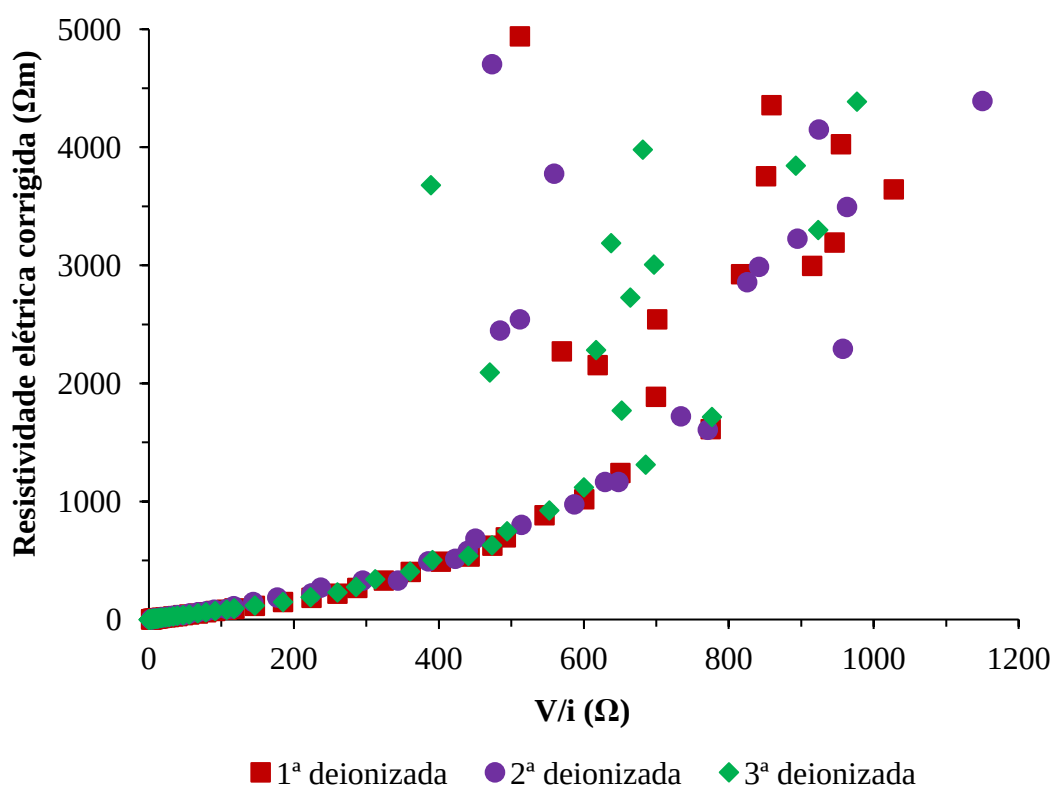


Figura 45. Calibração em solução com água deionizada.

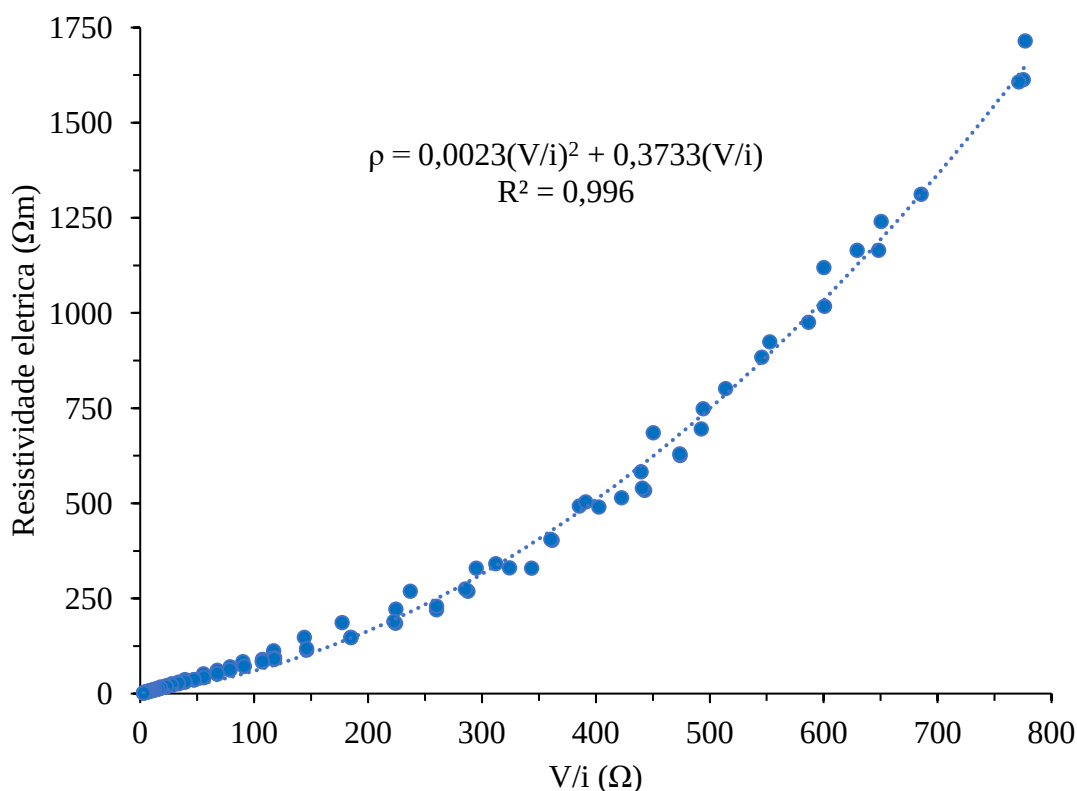


Figura 46. Curva de calibração.

6.3 Avaliação do Campo Elétrico em Meio Aquoso em Laboratório

Por meio da avaliação do campo elétrico em meio aquoso é possível verificar a região de entorno influenciada pelo funcionamento da sonda desenvolvida, em diferentes valores de resistividade elétrica do meio. Para tanto, nesse ensaio foram realizadas leituras de V ao longo da profundidade e na extensão horizontal.

Esse ensaio também permite verificar a funcionalidade do equipamento desenvolvido, pois nele são obtidos os valores da resistividade elétrica fornecidos pelo equipamento desenvolvido, pelo condutivímetro e pelo valor do campo elétrico.

6.3.1 *Material*

Além do material utilizado na calibração em meio aquoso, também foi empregado o seguinte material:

- Régua graduada de 2 em 2 cm, Figura 47 (a);
- Multímetro digital, Figura 47 (b);
- Sonda graduada de 2 em 2 cm, Figura 47 (c).

6.3.2 Procedimento

No preparo do aparato uma régua graduada foi disposta de maneira que seu cento coincidiu com o centro do equipamento desenvolvido, gerando um plano imaginário, onde a régua é o eixo X, e a profundidade, que é medida a partir do centro do arranjo de eletrodos, é o eixo Y, como observado na Figura 47.

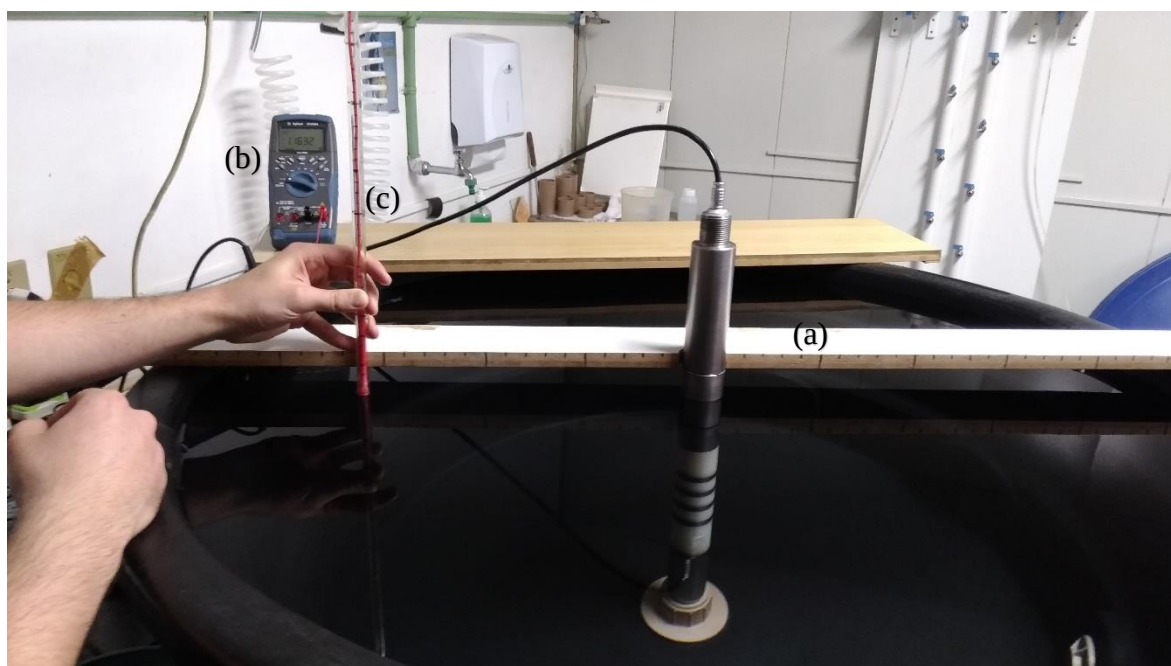


Figura 47. Ensaio de campo elétrico; (a) régua graduada de 2 em 2 cm; (b) multímetro digital; (c) sonda graduada de 2 em 2 cm.

Assim, os valores de V ao longo do plano X Y foram obtidos pela sonda graduada, que foi ligada a um multímetro, este que por sua vez teve um terminal ligada ao aterramento do laboratório. Também foram coletados os valores de temperatura e condutividade elétrica da solução, e de V e corrente elétrica do equipamento desenvolvido.

O ensaio foi realizado em faixas de resistividade elétrica pré-estabelecidas de 75 Ωm (água potável, condutividade elétrica de 133 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 20 Ωm (concentração de 250 ppm de NaCl, condutividade elétrica de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e 10 Ωm (concentração de 500 ppm de NaCl, condutividade elétrica de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

6.3.3 Resultado e Análises

Nas Figura 48, Figura 49 e Figura 50 são apresentados os resultados dos ensaios de campo elétrico nas soluções com resistividade elétrica igual a 75, 20 e 10 Ωm , respectivamente. É possível notar que a influência do campo elétrico gerado pela sonda para as três resistividades elétricas ficou em torno de 10 cm.

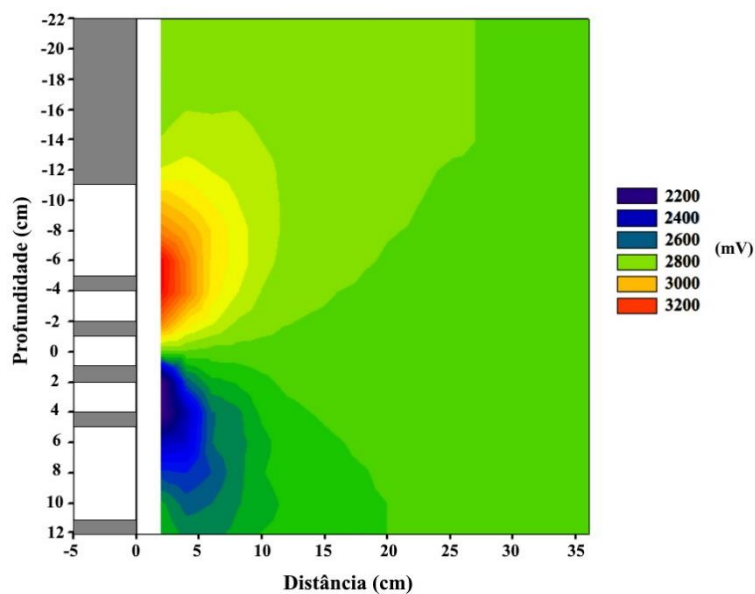


Figura 48. Campo elétrico – 75 Ωm .

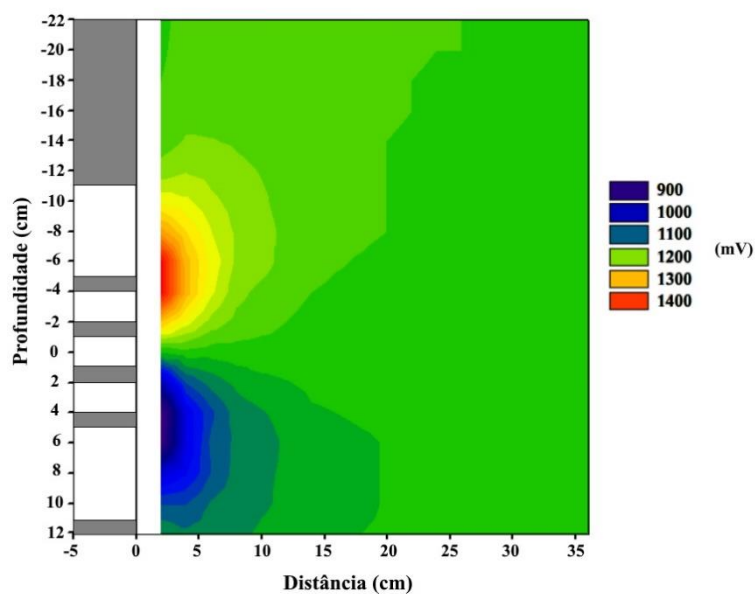


Figura 49. Campo elétrico – 20 Ωm .

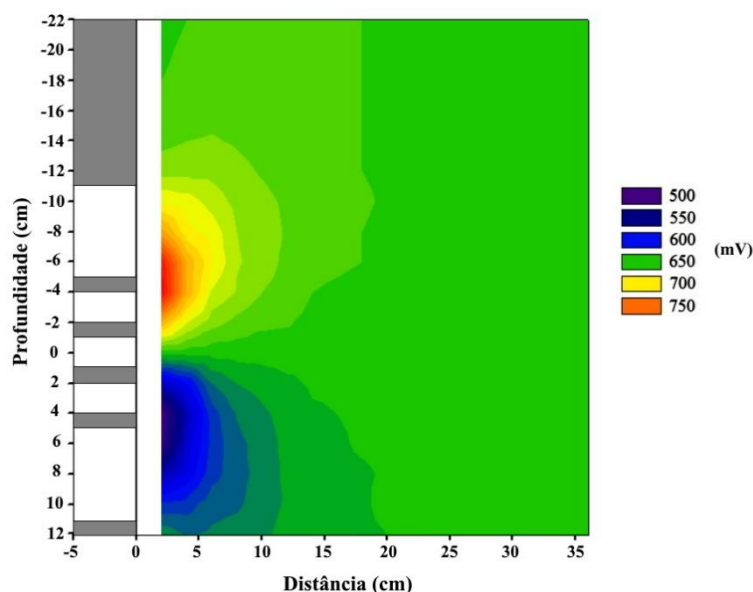


Figura 50. Campo elétrico – 10 Ω m.

Observa-se também que o comportamento do campo elétrico foi similar ao obtido por Daniel *et al.* (1999), e é próximo ao esperado de acordo com a teoria.

6.4 Ensaio de Campo

Primeiramente, foi realizado um teste inicial do protocolo de ensaio, no campo experimental da F.E. – Bauru, em função da facilidade de realização próxima ao laboratório, com intuito de verificar preliminarmente o funcionamento dos sensores de resistividade elétrica, de temperatura e do sistema de aquisição de dados.

O segundo ensaio foi realizado no Parque Vitória Régia, município de Bauru – SP, Figura 51, onde a área é coberta por sedimentos do Grupo Bauru (CAVAGUTI, 1981), em que por sua vez existe a predominância da Formação Marília nos interflúvios, e da Formação Adamantina nas regiões mais baixas do terreno (IPT, 1989). Foram realizados uma sondagem com o RCPTu e três sondagens com a sonda desenvolvida.

O objetivo dessa campanha foi realizar ensaios em local com o nível d'água próximo à superfície, por apresentar valores de resistividade elétrica mais condizentes com a prática e possibilitar a comparação dos resultados com os de RCPTu.

Ensaio anteriores realizados por Santos *et al.* (2018) mostraram que o nível d'água no local se encontra em torno de 2 m de profundidade, e ensaios granulométricos apontaram um solo arenoso, com perfil médio constituído por 5% de argila, 10% de silte e 85% de areia.

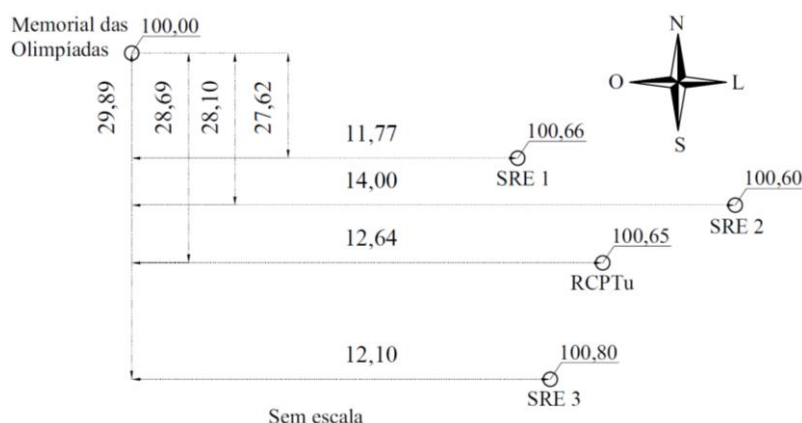


Figura 51. Localização dos ensaios no Parque Vitória Régia - Bauru.

Assim, se espera que nesse local o fluxo de corrente elétrica aconteça em sua grande maioria entre os vazios do solo que estarão preenchidos por água, permitindo uma melhor comparação entre os resultados da sonda desenvolvida com o RCPTu.

A locação dos furos possibilitou também a obtenção do nível do lago que se encontra a 22 metros da campanha de ensaios e com superfície na cota 98,11 m.

6.4.1 **Material**

Para realização do ensaio de campo foi utilizado o seguinte material:

- Equipamento de cravação;
- Sonda desenvolvida;
- Sensor de profundidade;
- Placa de aquisição de dados National Instruments USB-6353;
- RCPTu;
- Software desenvolvido para aquisição de dados.

6.4.2 **Procedimento**

Primeiramente, o equipamento de penetração, Figura 53 (a), foi nivelado e ancorado, para na sequência ser feito um pré furo de 25 cm. Em seguida a sonda foi acoplada no equipamento, Figura 53 (b), quando a mesma foi rosqueada na primeira haste e o equipamento foi posicionado de modo a encostar na haste.

Assim, no *software* foi apertado o botão “play”, Figura 52 (a), que iniciou a gravação dos dados do ensaio, e a primeira haste foi cravada. Ao final da cravação de cada haste, foi apertado o botão “pause”, Figura 52 (b), para evitar que *software* realize várias leituras na mesma profundidade. E após a inserção de uma nova haste, foram pressionados os botões

“pause” e “NOVA HASTE”, Figura 52 (c), em sequência, para reiniciar a gravação de dados e possibilitar a leitura da profundidade conforme a nova haste é cravada.

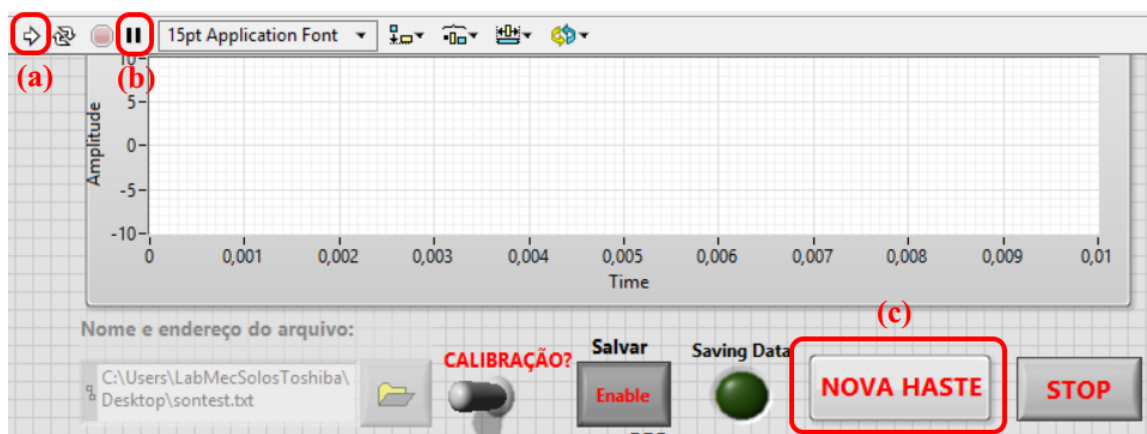


Figura 52. Instruções para iniciar o armazenamento de dados do ensaio.



Figura 53. (a) Equipamento de penetração; (b) detalhe da sonda no equipamento.

6.4.3 Resultados e Análises

O ensaio realizado no campo experimental da F.E. – Bauru mostraram que a sonda e o sistema de aquisição de dados desenvolvidos tiveram bons resultados, podendo ser possível a leitura da profundidade, diferença de potencial, corrente elétrica e temperatura.

Nos ensaios realizados no Parque Vitória Régia, a resistividade elétrica foi corrigida para uma temperatura padrão de 25 °C, por meio do modelo linear proposto por Barry *et al.* (2008), equação 12, do modelo polinomial proposto por Benson *et al.* (2008), equação 13, do modelo exponencial 1 proposto por Corwin e Lesch (2005), equação 14, e do modelo exponencial 2, proposto por Benson *et al.* (2008), equação 15, resultando na Figura 54.

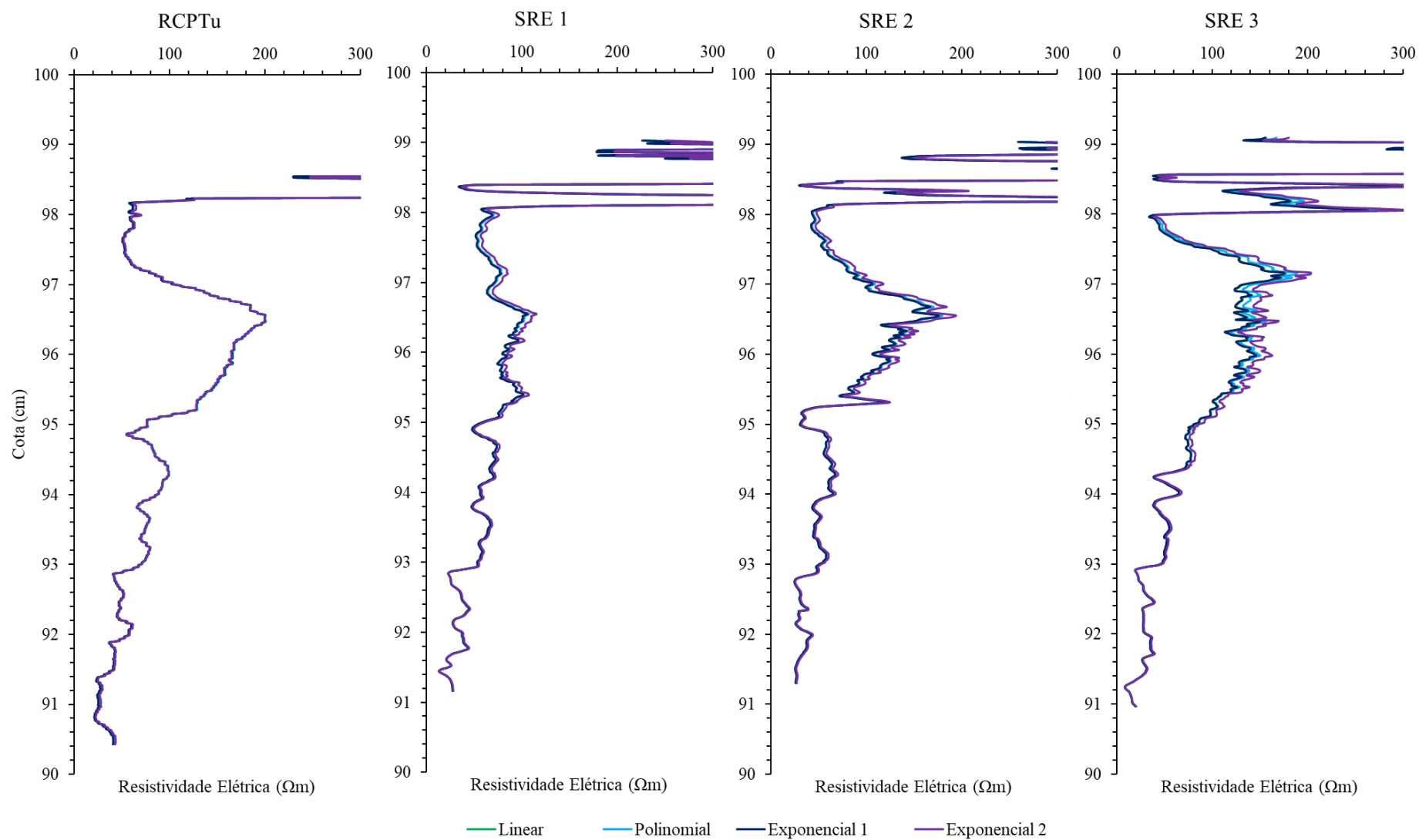


Figura 54. Correções para uma temperatura de 25 °C.

Os quatro métodos apresentaram resultados semelhantes nos quatro ensaios. Dessa maneira, se optou por realizar todas as correções de temperatura pelo modelo linear, pois esse também foi o modelo utilizado na calibração em meio aquoso.

Assim, na Figura 55 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no Parque Vitória Régia, com a resistividade elétrica corrigida para uma temperatura padrão de 25 °C, e também é apresentada a granulometria do local, retirada de Santos *et al.* (2018).

Analisando a Figura 56, se observa que os resultados dos primeiros metros dos ensaios apresentaram grande variabilidade, provavelmente por se tratar de um solo não saturado e assim a resistividade elétrica extrapola o valor máximo da precisão da sonda.

Porém, a partir do segundo metro, onde espera-se que o solo esteja saturado devido ao nível d'água do local, as respostas da sonda apesar de não serem idênticas à do RCPTu, apresentaram resultados similares e dentro da faixa de resistividade elétrica esperada para solos arenosos, de acordo com a Tabela 6, de Davies e Campanella (1995).

O fato de o RCPTu apresentar uma resistividade elétrica ligeiramente maior ao longo do perfil, pode ser explicado pela diferença da tensão aplicada pelo equipamento no solo. Enquanto o RCPTu aplica diferença de potencial de 9V, a sonda desenvolvida aplica apenas 4,95 V.

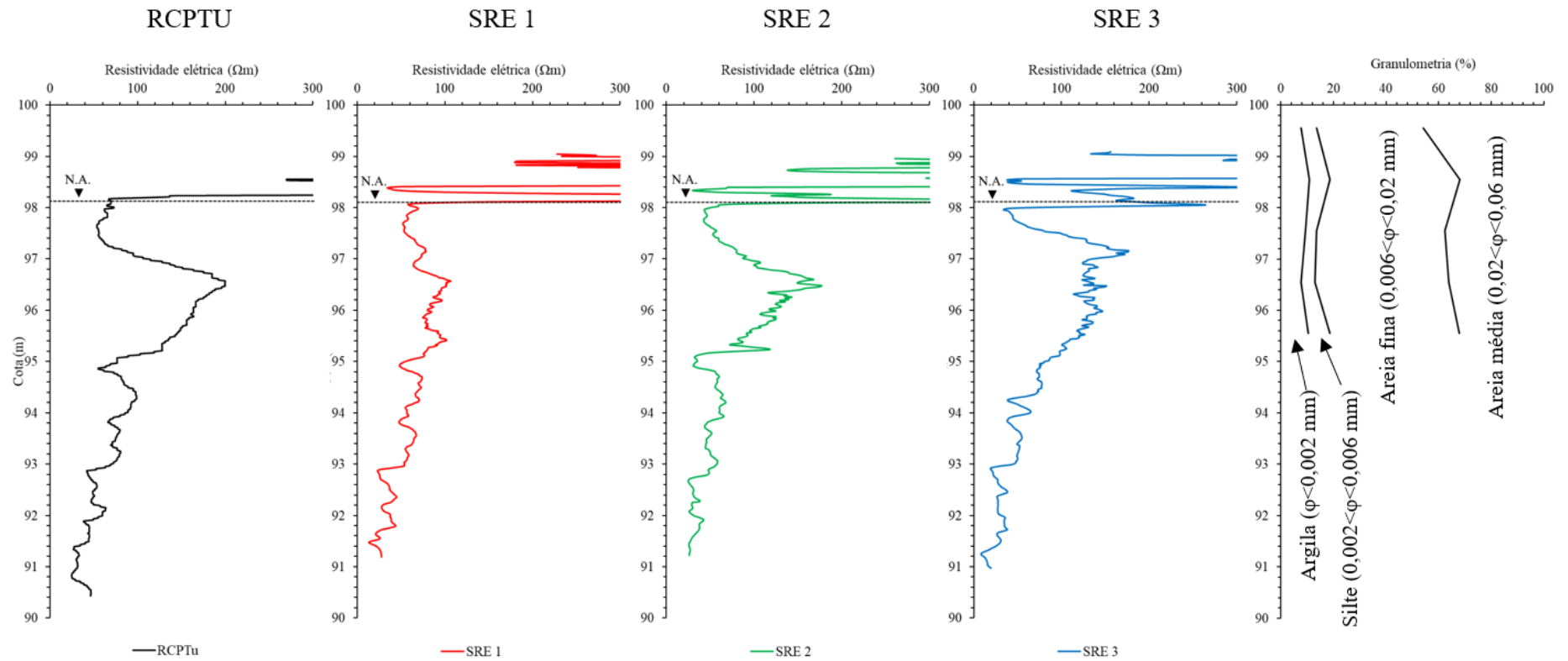


Figura 55. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica, e granulometria de Santos *et al.* (2018).

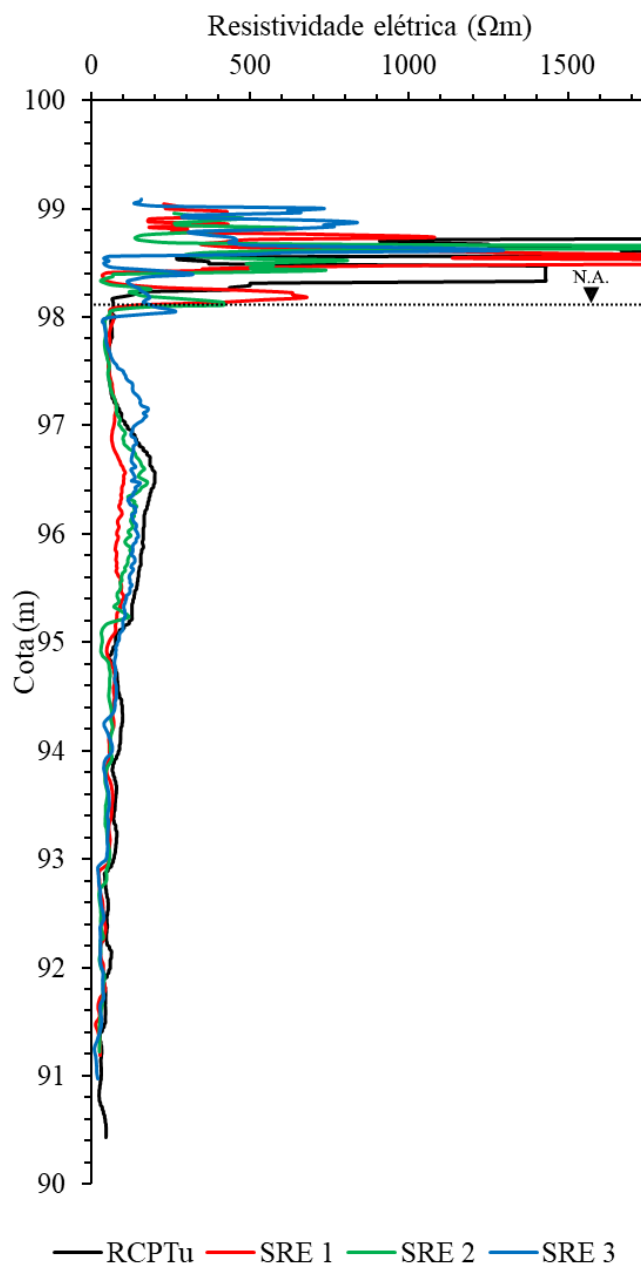


Figura 56. Resistividade elétrica dos ensaios realizados no Parque Vitória Régia - Bauru.

7 Conclusões

As análises teóricas mostraram que o projeto da sonda apresentou uma probabilidade de falha baixa para esforços de até 100 kN, e uma probabilidade de falha aceitável de acordo com a JCSS (2001) para esforços de 150 kN. Dessa maneira, se pode concluir que a mesma pode ser utilizada em equipamentos de cravação convencionais.

A vedação da sonda foi verificada em função do ensaio de estanqueidade que mostrou que a sonda pode suportar pressões de até 65 metros de coluna d'água, por até uma hora, sem que haja intrusão de água no equipamento, o que poderia gerar alterações na leitura da resistividade elétrica, e até mesmo a sua inutilização.

O armazenamento de dados foi possível pelo desenvolvimento do software que foi capaz de registrar os valores da profundidade, da temperatura, da corrente elétrica e da diferença de potencial, de acordo com o período de tempo selecionado. Essa etapa permitiu a execução de maneira mais ágil dos ensaios, tanto no laboratório, como no campo.

A calibração permitiu conhecer a relação entre V/i e a resistividade elétrica, além de indicar que a sonda responde bem em ambientes com resistividade elétrica inferiores a 1.500 Ωm . E o ensaio de campo elétrico em laboratório mostrou que a sonda em um meio aquoso possui um alcance de aproximadamente 10 cm.

Os ensaios de campo mostraram que a sonda apesar de não apresentar respostas idênticas aos do RCPTu, teve uma boa leitura da resistividade elétrica e pode ser utilizada para dar continuidade no desenvolvimento da mesma.

Por fim, o desenvolvimento da sonda irá possibilitar a continuidade dos estudos considerando a interferência dos parâmetros de entrada no valor de saída da resistividade elétrica.

7.1 Sugestões para Continuidade da Pesquisa

A utilização de um gerador de funções para gerar o sinal que, atualmente é gerado pelo sistema de aquisição de dados, poderá aumentar a capacidade e a precisão da sonda desenvolvida para leituras de resistividade elétrica superiores a 1.500 Ωm .

Calibrações variando a frequência e tamanhos da onda permitirão avaliar a resposta do equipamento em solos desenvolvidos em climas tropicais, possibilitando achar uma faixa de valores em que a resistividade elétrica lida pelo equipamento seja a mais próxima do real.

A utilização de um sistema que transforme os dados analógicos em digitais e emita o sinal para o sistema de aquisição de dados também permitirá um avanço no desenvolvimento da sonda. Porém faz-se necessário uma análise estrutural mais criteriosa para avaliar a área mínima de aço que permite acoplar o sistema na sonda, sem que a probabilidade de falha do equipamento seja elevada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., Blotz, L. R. (1996). *Electrical Resistivity of Compacted Clays*. Journal of Geotechnical Engineering, 122(5): 397- 406.
- Adewoyin, O. O., Joshua, E. O., Akinyemi, M. L., Omeje, M., & Joel, E. S. (2017). *Application of 2D electrical resistivity imaging and cone penetration test (CPT) to assess the hazardous effect of near surface water on foundations in Lagos Nigeria*. Journal of Physics: Conference Series, 852, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/852/1/012033>
- Afshan, S., Francis, P., Baddoo, N. R., & Gardner, L. (2015). *Reliability analysis of structural stainless steel design provisions*. Journal of Constructional Steel Research, 114, 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.012>
- Ahn, T., Allouche, E. N., & Yanful, E. K. (2007). *Detection of heavy metal and hydrocarbon contamination using a miniature resistivity probe*. Environmental Technology, 28(6), 701–711. <https://doi.org/10.1080/09593332808618819>
- Archie, G. E. (1942). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*. Transactions of the AIME, 146(01), 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Bang, E. S., Sung, N. H., Park, S. G., Kim, J. H., Kim, D. S., & Lee, S. H. (2008). *Development and verification of a resistivity seismic flat dilatometer testing system for efficient soft soil site characterization*, (Marchetti 1998), 1247–1254.
- Barry, J. A., Douglas Groom, M., Reza, E., & Jeffrey, J. D. (2008). *Resistivity methods*. In J. A. Barry, J. D. Jeffrey, & M. R. Ehsani (Eds.), Handbook of agricultural geophysics (pp. 86–91). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., & King, D. (2008). *The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: Analysis of the existing conversion models and proposal of a new model*. Soil Science, 173, 707–720.
- Campanella, R. (2008). *The Third James K. Mitchell Lecture: Geo-environmental site characterization* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1080/17486020802352356>

- Cavaguti, N. (1981) *Geologia, Estruturas e Características hidrológicas Mesozoicas da Região de Bauru-SP*, Tese de Doutorado, USC, 169p.
- Choo, H., Song, J., Lee, W., & Lee, C. (2016). *Effects of clay fraction and pore water conductivity on electrical conductivity of sand-kaolinite mixed soils*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 147(October), 735–745. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.009>
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). *Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 46, 11–43.
- Dahlin, T., Löfroth, H., Schälin, D., & Suer, P. (2013). *Mapping of quick clay using geoelectrical imaging and CPTU-resistivity*. Near Surface Geophysics, 11(6), 659–670. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013044>
- Davies, M., & G. Campanella, R. (1995). *Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenviromental Characterization of Soil*. <https://doi.org/10.4133/1.2922135>
- Daniel, Chris R, Heraldo L Giacheti, John A Howie, and Richard G Campanella. *Resistivity Piezocone (RCPTU) Data Interpretation and Potential Applications*. XI Pan-American Conference on Geotechnical Engineering, 1999, 1–8.
- de Lollo, J. A., Rodrigues, R. A., Elis, V. R., & Prado, R. (2011). *Use of electrical resistivity to identify collapsible soils in Brazil*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(2), 299–307. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0357-8>
- fei Fu, T., jun Yu, H., gang Jia, Y., yong Xu, X., & Guo, L. (2015). *Application of an In Situ Electrical Resistivity Device to Monitor Water and Salt Transport in Shandong Coastal Saline Soil*. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(7), 1907–1915. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1497-5>
- Ferneda, E. (2006). *Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação*, 25–30.
- Fukue, M., Minato, T., Matsumoto, M., Horibe H. & Taya N., (2001). *Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers*, Engineering Geology, 60, 361–369.
- Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., & Naudet, V. (2012). *Monitoring land fill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site*. Engineering Geology, 145–146, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.002>
- GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física Instituto de Física da USP (2005). *FISICA 3: ELETROMAGNETISMO*. EdUSP. 5ª ed. 440 p.
- Hayashi, M. (2004). *Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion*. Environmental Monitoring and Assessment, 96, 119–128.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1989). *Compartimentação estrutural e evolução tectônica do Estado de São Paulo*.

- Irfan, F., & Azhar Syed, B. (2012). *Simple and Multiple Regression models for relationship between electrical resistivity and various soil properties* (Vol. 70). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2122-0>
- Jackson, P.D., Taylor Smith, D., and Stanford, P., (1978). *Resistivity-porosity-particle shaperelationships for marine sands*. *Geophysics*, 43, 6, 1250-1268.
- Joint Committee on Structural Safety, JCSS, (2001). *Probabilistic Model Code*.
- Jung, S. H., Yoon, H. K., & Lee, J. S. (2015). *Effects of temperature compensation on electrical resistivity during subsurface characterization*. *Acta Geotechnica*, 10(2), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0301-8>
- Kalscheuer, T., Bastani, M., Donohue, S., Persson, L., Aspmo Pfaffhuber, A., Reiser, F., & Ren, Z. (2013). *Delineation of a quick clay zone at Smørgrav, Norway, with electromagnetic methods under geotechnical constraints*. *Journal of Applied Geophysics*, 92, 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.006>
- Kaufmann, O., Deceuster, J., & Quinif, Y. (2012). *An electrical resistivity imaging-based strategy to enable site-scale planning over covered palaeokarst features in the Tournaisis area (Belgium)*. *Engineering Geology*, 133–134, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.01.017>
- Kelly, R., Pineda, J. A., & Suwal, L. (2016). *A comparison of in-situ and laboratory resistivity measurements in soft clay*. *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*, 5.
- Kim, J. H., Yoon, H., & Lee, J. (2011). *Resistivity Cone Probe*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (January), 86–93.
- Kim, Y. S., Oh, M. H., & Park, J. (2009). *Analysis of resistivity data obtained from cone penetrometer in contaminated soil layers*. *Environmental Geology*, 58(6), 1309–1317. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1634-0>
- Kim, Y. S., Oh, M. H., & Park, J. (2007). *Laboratory study on the dielectric properties of contaminated soil using CPT deployed probe*. *Geosciences Journal*, 11(2), 121–130. <https://doi.org/10.1007/BF02913925>
- Koda, E., Tkaczyk, A., Lech, M., & Osiński, P. (2017). *Application of Electrical Resistivity Data Sets for the Evaluation of the Pollution Concentration Level within Landfill Subsoil*. *Applied Sciences*, 7(3), 262. <https://doi.org/10.3390/app7030262>
- Kouchaki, B. M., Bernhardt-Barry, M. L., Wood, C. M., & Moody, T. (2019). *A Laboratory Investigation of Factors Influencing the Electrical Resistivity of Different Soil Types*. *Geotechnical Testing Journal*, 42(4), 20170364. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170364>
- Kowalczyk, S., Maślakowski, M., & Tucholka, P. (2014). *Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction*. *Journal of Applied Geophysics*, 110, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.016>

- Lin, J., Cai, G., Liu, S., Puppala, A. J., & Zou, H. (2016). *Correlations Between Electrical Resistivity and Geotechnical Parameters for Jiangsu Marine Clay Using Spearman's Coefficient Test*. International Journal of Civil Engineering, 9–13. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0055-9>
- Liu, S., Cai, G., Du, Y., Zou, H., & Fan, R. (2013). *Site investigation of a pesticide contaminated factory based on in-situ resistivity piezocone tests in Southeastern China*, 1757–1764.
- Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J.-S., Solberg, I.-L., Rønning, J. S., Limacher, R., ... Lecomte, I. (2012). *Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays*. Canadian Geotechnical Journal, 49(10), 1158–1168. <https://doi.org/10.1139/t2012-080>
- Ma, R., McBratney, A., Whelan, B., Minasny, B., & Short, M. (2011). *Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement*. Precision Agriculture, 12(1), 55–66. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9156-7>
- Manfrin, S. K., Perotoni, M. B., & Paiva, C. F. E. de. (2018). *Emprego de um sistema autônomo de medição da resistividade (condutividade) do solo - Sonda Geofísica . COBRAMSEG 2018*. Salvador, BH - Brasil.
- Miranda, J.M; Luis, J. F.; Costa, P. T.; Santos, F. M.(1997).Fundamentos de Geofísica. Cap. 5 - Geoeletricidade, pág.120 a 134.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., & Howie, J. A. (2010). *Interpretation of resistivity piezocone tests in a contaminated municipal solid waste disposal site*. Geotechnical Testing Journal, 33(2). <https://doi.org/10.1520/GTJ102561>
- Moreira, C. A., Helene, L. P. I., Nogara, P., & Ilha, L. M. (2018). *Analysis of leaks from geomembrane in a sanitary landfill through models of electrical resistivity tomography in South Brazil*. Environmental Earth Sciences, 77(1), 7–7. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7180-x>
- Nogueira, C. G. (2010). *Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estruturas de concreto armado*. (Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP - Brasil.
- Nyári, Z., Ismet, A., Stickel, J., & Tillmann, A. (2010). *The use of non-conventional CPTe data in determination of 3-D electrical resistivity distribution*, 70, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.01.008>
- Oh, M. H., Kim, Y. S., & Park, J. B. (2008). *Laboratory study on the applicability of resistivity cone for investigation of subsurface contamination*, 737–744.
- Pacheco, A. de O. (2004). *Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados*. (Dissertação de Mestrado em Ciências). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Peixoto, A. S. P., Pregnotato, M. C., Silva, A. C. C. L., & Paulo, S. (2010). *Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization*. Cpt'10, 8.

- Peixoto, A. S. P. (2001). *Estudo do Ensaio SPT-T e sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações*. (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola.). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP - Brasil.
- Peixoto, A. S. P. (2013). *Fatores Intervenientes na Medida do Torque e na Medida da Resistividade em Ensaio de Campo*. (Texto apresentado como requisito parcial à obtenção do título de LIVRE-DOCENTE EM GEOTECNIA AMBIENTAL). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, SP - Brasil.
- Peixoto, A., Yamasaki, M. T., & Lodi, R. C. (2014). *Evaluation of electrical resistivity in a tropical sandy soil compacted* (Vol. 19).
- Pregnotato, M. C., Giacheti, H. L., & Peixoto, A. S. P. (2016). *Influence of the Test Specimen Diameter on the Measurement of Electrical Resistivity in Sands by Using Laboratory Devices*, 39(2), 157–165.
- Pregnotato, M. C. (2014). *Avaliação de Desempenho do Dispositivo de Medida de Resistividade Elétrica em Laboratório* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, SP, Brazil.
- Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. (1999). *Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements* (pp. 1–150). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Santos, R., Rocha, B., Marques da Silva, N., & Giacheti, H. (2018). *CPTu e SDMT na Investigação de um Perfil de Solo Arenoso*.
- Son, Y., Oh, M., & Lee, S. (2009). *Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz–10 MHz* (Vol. 58). <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1637-x>
- Thermo Scientific Orion Startm and Star Plus Series Meter User Guide (2008). Environmental Instruments. Water Analysis Instruments.
- Tippler, P. A. (1999). *Física: eletricidade, eletromagnetismo e ótica*. (Vol. 2). Rio de Janeiro, Brasil: Livros técnicos e Científicos S.A.
- Vitali, O. M. P. (2011) *Desenvolvimento de um sistema para realização de ensaios sísmicos down-hole em conjunto com o CPT*. 114p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011
- Yamasaki, M. T. (2012). *Influência da Salinidade do Fluido na Avaliação da Compactação e da Resistividade Elétrica de Dois Solos*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, SP - Brasil.
- Zawadzki, L. Ukasz, Wychowaniak, D., & Lech, M. (2018). *Electrical resistivity methods for landfill monitoring*, 50(50), 183–193.
- Zhou, M., Wang, J., Cai, L., Fan, Y., & Zheng, Z. (2015). *Laboratory Investigations on Factors Affecting Soil Electrical Resistivity and the Measurement*. IEEE

Transactions on Industry Applications, 51(6), 5358–5365.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2465931>

Anexo

Na Figura 57, é possível ver a programação em diagrama de blocos utilizada no desenvolvimento do software para aquisição de dados.

